

FÉLIX CARDELLACH

Ingeniero y Arquitecto

Filosofía
de las
Estructuras



BARCELONA
Librería de A. Bosch

Ronda Universidad, 5

1910

1831

Alejo José
González
1939

FILOSOFÍA DE LAS ESTRUCTURAS

11799 59

DR 6882

DEL MISMO AUTOR

ARCOS FLEXIBLES Y SU RELACIÓN CON LAS VIGAS RECTAS.—*Revista Tecnológico-Industrial de la Asociación de Ingenieros de Barcelona*, 1899.

LÍNEAS DE SOMBRA Y PLANOS TANGENTES EN LOS HELIZOIDES ALABEADOS.—«Teoría de las sombras», de A. Rovira.—*Revista Tecnológico-Industrial de la Asociación de Ingenieros*, 1900-1901.

PRINCIPIOS RACIONALES DEL DIBUJO GEOMÉTRICO (primera parte).—«Forma geométrica».—Un volumen con ocho láminas. 1902.

CONNAISSANCES MATHÉMATIQUES ET LEURS APPLICATIONS QUI DOIVENT ENTRER DANS L'ENSEIGNEMENT GÉNÉRAL DE L'ARCHITECTE.—*Comptes rendus du VI Congrès International des Architectes*. Madrid, Abril, 1904.

PRINCIPIOS RACIONALES DEL DIBUJO GEOMÉTRICO (segunda parte).—«Sombras geométricas».—Un volumen con figuras intercaladas. 1904.

CUADRO SINÓPTICO, PROGRAMA DE LECCIONES É ÍNDICE GENERAL DE LA ASIGNATURA DE ESTEREOTOMÍA.—1905.

CONCLUSIONES DE LA MEMORIA SOBRE ARQUITECTURA INDUSTRIAL EN EL EXTRANJERO, elevada al Ministerio de Instrucción pública y Bellas Artes.—*Gaceta de Madrid*, 11 Marzo, 1909.

EXTRACTO DEL CURSO ESPECIAL DE CONFERENCIAS SOBRE ARQUITECTURA, DESARROLLADO CON PROYECCIONES ELÉCTRICAS EN EL SALÓN DOCTORAL DE LA UNIVERSIDAD DE BARCELONA.—*Anuario de la Universidad de Barcelona*, 1907 á 1908.

&, &.

EN PREPARACIÓN

LA ENSEÑANZA DE LA CONSTRUCCIÓN.

ESTÉTICA Y COMPOSICIÓN DE EDIFICIOS INDUSTRIALES.

PRINCIPIOS RACIONALES DEL DIBUJO GEOMÉTRICO (tercera parte).—«Perspectiva lumínar».

FÉLIX CARDELLACH

INGENIERO Y ARQUITECTO

FILOSOFÍA DE LAS ESTRUCTURAS

FILIACIÓN RACIONAL DE LAS FORMAS RESISTENTES
EMPLEADAS EN LA INGENIERÍA Y EN LA ARQUI-
TECTURA HISTÓRICA Y MODERNA :: SÍNTESIS DE
SUS PROCEDIMIENTOS VERIFICATIVOS :: ORIGEN,
PLANTEO Y GENERALIZACIÓN DE LOS PRINCIPIOS
ESTRUCTURALES :: REFLEXIONES CONDUCEN-
TES Á LA OBTENCIÓN DE NUEVAS ESTRUCTURAS



Fondo bibliográfico
Dionisio Ridruejo
Biblioteca Pública de Soria

6882

BARCELONA

LIBRERÍA DE AGUSTÍN BOSCH

RONDA UNIVERSIDAD, 5

1910

ES PROPIEDAD DEL AUTOR

Sdad. Anón. LA NEOTIPIA, Paseo de Gracia, 77, interior. — BARCELONA

CONTENIDO

	<u>Págs.</u>
PREFACIO	7

PARTE I

FUNDAMENTOS GENERALES

I. — El principio estructural	15
II. — Origen de las estructuras	18
III. — La agrupación	22
IV. — Línea potencial de acción externa.	31
V. — Los dos grandes empirismos	37

PARTE II

SÍNTESIS DEL CÁLCULO DE LAS ESTRUCTURAS PLANAS CON CARGAS EN SU PLANO MEDIO

I. — Trazado de la línea potencial	43
II. — Dos únicos métodos verificativos	49
III. — La ley trapecial.	51
IV. — Ley de articulación	64
V. — Biología estructural	72

PARTE III

ESTRUCTURAS BIRRESISTENTES PSEUDOELÁSTICAS

I. — Monolitismo megalítico	75
II. — Principio orgánico de agregación	78
III. — El concreto y sus estructuras.	80
IV. — La construcción cohesiva	84

	Pags.
V. — Estructuras tabicadas	90
VI. — Estructuras tendinosas	100
VII. — El tendón adherido	114
VIII. — Apéndice (El hierro y el acero fundidos en las estructuras birresistentes)	131

PARTE IV

ESTRUCTURAS BIRRESISTENTES ELÁSTICAS

I. — Presentación de las formas elásticas	135
II. — El <i>empilage</i>	143
III. — El <i>canevas</i> triangular	148
IV. — El empotramiento y la rótula	156
V. — La <i>espiná dorsal</i>	164
VI. — La repulsión del tirante	170
VII. — Estereoestructuras	187
VIII. — Estructuras móviles	196

PARTE V

ESTRUCTURAS UNIRRESISTENTES

I. — Fondo y forma de las estructuras unirresistentes.	211
II. — La Mecánica estereotómica	219
III. — Evolución de las formas aparejadas	237
IV. — Estructuras tensadas	252

PARTE VI

COMPLEMENTO

I. — La estructuración compuesta	269
II. — Imaginativa estructural	276
<i>Syllabus</i> , programa detallado	301

PREFACIO

Las regiones especulativas ó del orden ideal, están saturadas por un ambiente de simplicidad y sencillez inauditas: las superficies se mantienen aisladas en el espacio sin necesidad de existencia física; los medios no ofrecen resistencia alguna; la materia de los cuerpos es completamente isótropa, etc. Si existe alguna variación, ésta obedece siempre á una ley asequible, á una causa enteramente conocida, sin influencias extrañas, sin accidentes imprevistos.

En esta región de idealidad, el hombre argumenta y ratiocina por el privilegio de su imaginación, con rigorismo absoluto, con verdad eterna. Todo cuanto establece tiene una completa certeza en esta región sin tinieblas, inundada perpetuamente de luz merced á un rayo aislado de la Gran Ciencia Divina que

así, por misericordia, se nos deja entrever... Este es el Parnaso de la matemática, cuyos raciocinios se han hábilmente sintetizado en forma de conceptos geométricos y de expresiones analíticas, constituyendo como un espiritual engranaje de racionales deducciones que nos lleva velozmente al descubrimiento de verdades nuevas.

Pero en tratando de aplicar al mundo material tan prodigioso mecanismo, el resultado es á menudo imperfecto, dada la estupenda complicación de todos los hechos que influyen en la vida de realidad cuyas leyes y materias son desconocidas en sus ritmos y propiedades íntimas.

Sin embargo, esta aplicación la ha verificado el Ingeniero, simplificando al efecto la complejidad de los fenómenos naturales por el convencional establecimiento de hipótesis sencillas, tendiendo así un puente ingenioso entre el campo de la realidad y la región especulativa donde actúa la matemática.

Cuando por el método anterior se llegan á alcanzar conclusiones, procede después el interpretarlas en los casos de aplicación; y entonces, naturalmente, como se partió de una hipótesis, solemos desilusionarnos por no en-

contrar en la tangibilidad la concordancia deseada. En definitiva, que con frecuencia discurre inútilmente la técnica por el mundo matemático.

Ciñéndonos ahora al arte de la Construcción, notaremos como el hecho precedente se verifica también en la manera referida.

Hoy, los mayores esfuerzos mentales del técnico constructor radican en el fantástico descubrimiento de las leyes de reacción de la materia contra un sistema cualquiera de fuerzas externo; no es otra la piedra filosofal de nuestra Resistencia de materiales, cuestión que únicamente debe su aspecto de ciencia pura al ropaje analítico con que suele ir revestida. Esta ciencia parte, como sus compañeras, del mundo material, con hipótesis; evoluciona después en la región matemática y regresa de nuevo á nuestras aplicaciones donde interpretamos la última fase de la metamorfosis sufrida en el viaje, por la fórmula inicial.

Los novatos en las ciencias, las imaginaciones aun poco educadas, no se dan cuenta siquiera de este ciclo singular propio de todo estudio técnico, y creyéndose constantemente en la realidad de los hechos, buscan tan sólo

entre las transformaciones algébricas la solución exacta de los procesos naturales.

¿Por qué no evitar, en cuanto sea posible, aquel desorientador y penoso rodeo en los problemas de la Construcción, educando constantemente nuestro sentido en raciocinios y observaciones directas?...

Uno de los medios para ello lo encontraríamos, con seguridad, en el establecimiento de una clasificación metódica y en el ejercicio de una observación sintética sobre los diversos hechos mecánicos del gran arte de construir.

Semejante orden de estudios lo podríamos acoger sin reparo de ninguna clase, en lo que atañe á los resultados beneficiosos que del mismo se hacen esperar, por cuanto no significaría en rigor más que un exacto paralelo del método que se sigue para dar á conocer las artes plásticas en general. En el estudio de las manifestaciones artísticas que se hace en los cursos de la Historia del Arte, al ir analizando las causas determinantes, su evolución y principios generales, vase infiltrando una educación especial, una sensibilidad artística que termina por predisponer admirablemente el espíritu á la concepción de obras bellas.

¿No podríamos, pues, seguir un análogo camino en la enseñanza de las resoluciones mecánico-constructivas, analizando al efecto toda la intuitiva Ingeniería que entrañan las obras de nuestros antepasados, indudablemente precursoras de las actuales estructuras, con lo que á su vez se iría infiltrando una intensa sensibilidad mecánica, más desarrollada y fructuosa de la que hoy se obtiene por el análisis inmediato de las formas constructivas cuya gestación y encuentro ha exigido el esfuerzo de centenares de generaciones?...

El ánimo de los futuros constructores se dispondría, indudablemente por este medio, á la concepción de nuevas formas estructurales exigidas por las necesidades modernas, tenebroso problema que nadie ha enseñado á resolver; desaparecería, además, por la mágica virtud de la síntesis, la disasociación completa que hoy forman los conocimientos técnicos, simples reuniones de problemas desligados, aspectos transitorios de una ciencia arquitectural que aun está por alcanzar.

¿Es que en el conglomerado de hechos sin relación aparente que constituyen el origen de las formas constructivas y de sus métodos de verificación, no habrá alguna esencia co-

mún, alguna ley general, que semejantemente á lo que sucede en otras cuestiones, por ejemplo, en las relativas á la generación y transmisión de la energía, regulen enteramente todos los fenómenos?... ¿Del descubrimiento ó aproximación de esta ley, no podría tal vez venir algún método integral que facilitase la comprobación de estabilidad en todas las construcciones, y que nos diese, además, alguna luz para el hallazgo de las nuevas é infinitas formas estructurales seguramente existentes en la misteriosa región de donde, por la experta mano de mecánicos videntes, han ido penosamente saliendo el dintel, el arco, el tensor y el cantilever?...

Reflexionemos, pues, sobre la naturaleza y función complejas de las formas resistentes de la Construcción; refundamos en un mismo crisol la multiplicada y abundosa serie de métodos verificativos que nos ofrece la Ingeniería; analicemos la evolución, influencias y relaciones de los diversos tipos estructurales históricos y modernos, y seguramente encontraremos, sedimentado en el fondo de todo este interesante análisis, un verdadero estrato sintético, un positivo origen de ventajas prácticas en que inspirar nuestro sentimiento ante el

problema de la Construcción á que estamos constantemente hermanados.

La redacción completa de un estudio de esta naturaleza, exige indudablemente de profundos pensadores, grandes eruditos á la par y sensibles artistas de la Ciencia; exige de hombres, en fin, cuyo corazón vibre al ritmo de su cerebro... Queda, pues, diciendo esto, plenamente justificada la imperfección de las siguientes páginas. Yo, en ellas, no he podido hacer más que exteriorizar defectuosamente un ideal; están escritas á vuela pluma, por la falta del tiempo que exige una meditación detenida; pero van, sin embargo, dirigidas á los ya iniciados en las nobilísimas artes del Ingeniero ó del Arquitecto.

EL AUTOR

Barcelona, 1910

PARTE I

FUNDAMENTOS GENERALES

I.—EL PRINCIPIO ESTRUCTURAL

EN el gran libro de la Naturaleza es donde encontramos la verdad que preside á todas las manifestaciones materiales; en él debemos, pues, leer para alcanzar la realización de una obra lógica. Los seres de todos los reinos naturales, por estar sujetos á las leyes de las fuerzas externas (acción de la gravedad, presiones del viento, etc.), satisfacen á un principio general mecánico, sin el cual no sería posible su estabilidad y su resistencia, y este principio no es otro que el de estructura. Significamos aquí por principio de estructura, la propiedad universal que tienen los seres de estar formados por lo que, en lenguaje mecánico, podríamos llamar materia activa y materia pasiva; es decir, materia encargada de la estática del ser, y materia sin la cual aquella estática continuaría verificándose.

Este principio de estructura, aun siendo general, es más abiertamente manifiesto en el reino animado de la naturaleza, por causa de su dinamismo

ó actividad, que en los demás reinos de ella; el esqueleto del ser animal representa la afirmación más genuina del principio de estructura. El hombre, en sus producciones constructivas, ha sentido instintivamente el referido principio y lo ha ido expresando con criterio más definido á medida de sus progresos en el terreno de la Arquitectura. Hoy, que tenemos alcanzada la plena posesión del principio estructural, al ceñir con nuestra mirada el panorama inmenso de la Arquitectura, señalamos como obras más perfectas aquellas que tienen más felizmente encontradas sus formas resistentes y que, acusándolas con rasgos más precisos, exteriorizan la definición de su equilibrio y hablan, digámoslo así, claramente á las facultades analíticas de nuestro espíritu, satisfaciéndole de un modo entero. El curso de nuestra emoción ante una de estas obras constructivas, es constantemente interrumpido por esos rasgos concretos, de objetivo estructural, que acallan todo temor por la estática y por la resistencia.

Ante la arquitectura gótica, por ejemplo, experimentamos con singular intensidad la anterior impresión, por efecto sencillamente de la racional concepción mecánica de las obras medioevales, cuyas formas resistentes revelan todo un presentimiento de las prodigiosas osaturas de nuestro siglo del hierro. Si con nuestra imaginación derritimos los paños de muro y los cuajados de uno de estos maravillosos monumentos místicos del siglo XIV, veremos en el espacio un ideal esqueleto de piedra, de mecánica divina, tal es la perfección y portento

de aquella nervatura de sillarejo que por un sentimiento casi milagroso va materializando en el espacio las estrictas líneas de presión, á las que debe la mole del templo su estabilidad secular.

En nuestros días, el principio estructural reina como soberano en la construcción, llegándose, en las obras de carácter utilitario, á prescindir en absoluto de la materia pasiva, con lo que la Arquitectura va adquiriendo la nerviosidad característica del siglo moderno, completamente opuesta á la dulce pasividad de arquitecturas antiguas, más amorfas é indeterminadas, llenas de redondez y color, como, por ejemplo, la bizantina y en particular la veneciana.

Resulta interesante descubrir la ley del desarrollo del principio estructural; principio en los comienzos casi insensible, al paso que hoy absolutamente dominante, como ya hemos indicado.

La evolución de esta ley puede observarse con extrema claridad ante una serie de construcciones de la misma naturaleza; por ejemplo, el puente. Al idear el *Pontífex máximus* la forma del arco, por virtud de tan misterioso esfuerzo que, según la leyenda, se le hubo de considerar como producto de la inspiración de los dioses, se sienta el germen estructural del puente de piedra. Véanse los puentes romanos y persas, los de la edad medioeval, los del renacimiento y, finalmente, los puentes modernos, y al contemplar cómo el arco, en un principio simple taladro en un grosero y enorme macizo de mampostería, va idealizándose hasta convertirse,

de un modo insensible, en delgadísimo aro sobre el que descansa el tablero por el intermedio de órganos aislados, constituyendo un conjunto de primorosa filigrana cual blonda ó encaje, con sus puntas apenas mojadas por la superficie del agua, se nos revelará claramente la génesis de estructura, la ley de aligeramiento de masas que, tendiendo á vaciar más y más los macizos, ha acabado por dejar en las construcciones únicamente sus líneas de estricta firmeza; ley de espiritualización, en fin, cuyo *desiderátum* estriba en el empleo de la mínima cantidad de materia, haciéndola trabajar uniformemente en todas las regiones al máximum de su resistencia.

II. — ORIGEN DE LAS ESTRUCTURAS

ESTOS diagramas materiales, de líneas activas, que expresan perfectamente el principio estructural de una construcción, constituyendo determinadas é ingeniosas figuras entre cuyas líneas no hay ninguna de superflua, ¿de dónde proceden?... ¿Cuál es el método deductivo á seguir para encontrar la forma y situación de los miembros estrictamente resistentes que son necesarios á la estabilidad de una obra constructiva?...

Hay que admitir forzosamente la solución de tal problema, como el resultado de una síntesis com-

plejísima de la razón y del instinto, y, por consiguiente, la concepción mecánica de una estructura resulta ser un fenómeno de orden sentimental, análogo al verificado, tratándose de la concepción de una obra artística; y de la misma manera que las manifestaciones de arte en el hombre, en el pueblo y en la raza, son de un modo indudable fruto inmediato del grado de espiritualidad y de las circunstancias del medio ambiente, las producciones del orden puramente constructivo, es decir, las resoluciones mecánicas de un monumento ó de un edificio, dependen, á su vez, de una misteriosa sensibilidad mecánica innata en nosotros, sensibilidad que se influye y educa por efecto de complicadas circunstancias locales de orden social y natural, y que, por consiguiente, debe tener una interesantísima ley de repartición etnográfica, como indirectamente vienen á corroborar algunos modernos estudios alemanes que tienden al descubrimiento de la norma distributiva entre los sistemas de construcción de las moradas del hombre extendidas por toda la superficie del globo.

He aquí precisamente, entre todas estas circunstancias, un horizonte infinito de interesante filosofía y de profundas reflexiones... no hay más que pisar sus umbrales para experimentar la sugestión de mil formas de estructuras y de mil medios constructivos... Vemos al ladrillo, inventado por el hombre asiático gracias á un dictado de la propia naturaleza, que se lo brinda espontáneamente por medio de los *estratus* de arcilla cuarteados al ardor del sol; vemos al puente colgante, típico patrimonio de la

materia fibrosa, en el cruzado ramaje de dos árboles separados por un cauce central, y vemos al mismo principio del arco dovelado, fortuitamente dispuesto en casi todos los roquedales.

Pero no tenemos experiencia bastante para caminar orientadamente por este horizonte infinito de instinto y de inspiración, rehuímos el solicitar á nuestra sensibilidad mecánica y á la misma naturaleza en sus magistrales ejemplos para obtener soluciones en las estructuras que proyectamos; y al decir, engañándonos, que el problema que perseguimos es de un orden matemático ó de un carácter racional, rechazamos sistemáticamente aquellas superiores intervenciones, y abriendo el Código de las formas de estructura empleadas, escogemos una, aparentemente apropiada, anulando, por lo tanto, nuestro sentimiento personal.

Siquiera este Código fuese universal y respondiese enteramente á las necesidades de la presente arquitectura; pero, desgraciadamente, sus páginas substanciosas son contadas y su crecimiento paulatino se hace con lentitud inquietante, por cuanto cada nueva hoja exige el esfuerzo superior de un espíritu mecánico que descubra nuevas formas de armazones resistentes para la actual construcción.

Por otra parte, nosotros raramente nos elevamos á los nobles procesos de la invención y del instinto, por la inercia de un juicio erróneo que rastrea entre las fórmulas de una matemática aparente que es, á lo más, piedra de toque para averiguar, con aproximación discutible, la resistencia de una forma pro-

cedente siempre de la elevada fuente de absoluta verdad.

Realmente, el único origen de las formas constructivas está en un superior nivel de sensibilidad mecánica y de inspiración natural, sensibilidad é inspiración que son innatos en el hombre y que han constituido siempre en él una típica característica, aunque de variable intensidad.

Desde la fecha remota en que apareció la primera construcción, el problema de la determinación de estructuras no ha traspasado el terreno de la percepción mecánica intuitiva; nosotros vemos, por ejemplo, en la aparición de la sobrenatural arcada lanzada sobre el Tíber por el ingeniero romano, y en el nacimiento acaecido en 1875 del célebre cuchillo Dión, de equilibrio misterioso, dos hechos de la misma naturaleza, dos producciones mecánicas evocadas ambas por esta luz divina que, como dice Balmes, existe siempre en el fondo de nuestra alma y nos conduce en todo con admirable acierto si no nos obstinamos en apagarla.

Parece, en fin, deducirse de las líneas precedentes, que el origen determinativo de una forma de construcción debe buscarse en el íntimo recogimiento del Ingeniero que llama exclusivamente, con su amor profesional, á un rayo de la causa mecánica; pero aunque, en efecto, sea así, hay que convenir en que el consejo de acudir á las altas regiones de la inspiración para resolver el problema primordial de una cubierta ó de un entramado, puede no sólo aparecer una extravagancia, sino

resultar una inutilidad, por la rareza con que se presenta el anhelo y vibración espiritual exigidas para ello. Además, tales condiciones entrañan en la vida del hombre una inquietud é idealidad completamente reñidas con el carácter real y árido del problema, inquietud de que tenemos variadísimos ejemplos y que nos confiesa personalmente el gran Stéphenon, al explicar la agitación de que estaba presa su alma durante la concepción del proyecto del célebre *Britannia tubular bridge*.

Resulta, pues, necesario el orientar por el camino del método el misterioso fenómeno de la deducción de estructuras, y por si esta observación pareciese atrevida, podemos ampararla en el pensamiento de Vierendeel, cuando dice que, en ciertas épocas, los elementos de una invención ó perfeccionamiento revolotean por el aire, como en la primavera el polen de las flores, en busca de un espíritu fecundador.

III.— LA AGRUPACIÓN

UNA clasificación racionalmente establecida entre los hechos de orden igual, esclarece y pone de manifiesto los principios por que se rigen aquéllos, ayudando á la inventiva y originando el progreso. En las formas estructurales ó hechos de la construcción, resultará, pues, indicada una división fundamental que metodice su estudio y deslinde sus principios.

Pero la base de la clasificación lógica está en la elección y en la fijeza del concepto distintivo que se desee adoptar, punto evidentemente dificultoso, en tratando de las formas constructivas por mil conceptos variadas y extremadamente numerosas.

Una agrupación de las estructuras por cronología ó períodos históricos, resultaría naturalmente fácil, aunque sin ninguna solidez de fondo y completamente inútil para el esclarecimiento de sus principios de estabilidad; pero, además de estos inconvenientes, resultaría otro por entero inadmisibile, cual es el de una exposición confusa y un desorden acabado de los verdaderos principios estructurales, principios esencialmente mecánicos é inamovibles que encontramos manifiestos en estructuras cuyas edades discrepan en millares de años.

Si estableciésemos la división desde el punto de vista de la naturaleza del material con que se ha realizado la forma, obtendríamos una de estas clasificaciones inocentes y enteramente artificiales, como la obtenida al clasificar por tamaños los ejemplares de una biblioteca, puesto que un mismo principio estructural puede tratarse con materiales diversos, y recíprocamente, con un material determinado podemos realizar distintas formas de estructura.

La geometría de la forma no puede tampoco ofrecer garantía de una buena clasificación á pesar de lo asequible del concepto y de su aparente naturalidad: formas desiguales en perfil pueden trabajar por un mismo principio mecánico, y mecánicas diametralmente opuestas, originan á veces perfiles

y configuraciones exactamente iguales. De aceptar, pues, tal agrupación, se originaría repetición de principios y, por consiguiente, exposición confusa y de resultados estériles.

La Resistencia de materiales es la ciencia que á primera vista parece marcarnos con más sugestión el punto de partida para una división lógica de las estructuras; toda vez que por las leyes de la deformación elástica se altera siempre el perfil de los miembros constructivos, sea cual fuere el material de que estén formados, y que el constructor ha tenido y siempre tiene los medios conducentes para dificultar aquella alteración, se infiere claramente que existen dos grupos generales de estructuras, de fondo mecánico esencialmente distinto: el primer grupo será constituido por las formas libremente deformables y que, por consiguiente, dado el caso usual de verticalidad de cargas, no producirán más que reacción vertical, al paso que las pertenecientes al segundo grupo, por estar en condiciones opuestas, producirán siempre empuje, es decir, reacciones inclinadas que tendremos de contrarrestar.

Á pesar de la observación precedente, la clasificación que ella origina no se presta tampoco de un modo absoluto al estudio metódico de las estructuras, por cuanto la simple presencia del empuje no caracteriza suficientemente el funcionamiento mecánico de una forma constructiva, ya que el empuje puede nacer también por solución de continuidad en la forma, circunstancia que exige para el equilibrio un género de trabajo distinto del reclamado por las piezas flexadas.

Una reflexión detenida sobre los inconvenientes de las clasificaciones anteriores, nos obliga á seguir un camino opuesto y complejo, pero enteramente racional y que permite el agrupar las formas estructurales bajo principios diferentes basados exclusivamente en lo que podríamos llamar la *aptitud que para reaccionar contra las fuerzas externas presentan dichas formas*, aptitud que es de orden puramente mecánico, sin relación alguna con la época y con la geometría de las mismas, y hasta cierto punto independiente también del material, toda vez que entraña principalmente el concepto de la constitución ó contextura de los miembros constructivos. Tal agrupación consiste en el establecimiento de los dos siguientes grupos primordiales de formas de construcción:

1.º *Formas birresistentes*, ó aptas para sufrir esfuerzos de compresión y esfuerzos de tensión; formas cuya realización implica no sólo el empleo de materiales birresistentes, sino un adecuado tratamiento constructivo, en virtud del cual las soluciones de continuidad presentadas por efecto de la utilización de elementos de pequeño tamaño, venga compensada por la acción de medios adherentes de aglutinado, soldadura, roblonado ó ensamblaje.

2.º *Formas unirresistentes*, ó dotadas exclusivamente de potencia para reaccionar contra esfuerzos de un solo sentido, es decir, que tales formas son aptas tan sólo para sufrir tensiones ó para sufrir compresiones. El material de construcción, en este caso puede evidentemente reunir cualquier pro-

piedad, puesto que aun cuando sea birresistente, bastará un simple tratamiento estereotómico ó fraccionado en juntas para anular su resistencia á la tensión y convertir así la forma en unirresistente ó solamente compresible.

El claro deslinde que existe entre estos dos órdenes estructurales, facilita ahora el marcar subdivisiones de grados sucesivos, formando en conjunto una clasificación metódica de una manera análoga á la establecida para el estudio de los seres naturales, cuya armonía encantadora dimana exclusivamente de la gradual particularización con que se van revistiendo sus conceptos por el paso sucesivo del reino al tipo, del tipo á la clase y de la clase al orden. Y así de la misma manera entre la infinidad de estructuras, que también forman á su modo como un reino de organismos de cuya vida nos apercebimos solamente cuando mueren, es decir, cuando sus miembros, confundidos en ruinas, se esparcen por el suelo, existe la clasificación que las distingue y las agrupa por armonías de contextura, de mecánica y de construcción.

Progresando, pues, en el análisis distintivo de las estructuras, encontramos en las del primer grupo dos categorías diferentes radicalmente deslindadas según el valor que resulte para la relación de sus coeficientes de trabajo. Si estos coeficientes son desiguales, como sucede, por ejemplo, en los materiales pétreos y en la fundición de hierro, cuya resistencia á la compresión es superior á la de tensión, sin que haya, no obstante, motivo para despreciar esta última, se originan estructuras que

podemos someter á un ligero trabajo flector y que, por tanto, agruparemos en una categoría de *estructuras pseudoelásticas*; pero si, por el contrario, existe igualdad absoluta entre ambos coeficientes, dentro naturalmente del período elástico de deformaciones no permanentes, resultarán estructuras que con toda propiedad podremos calificar de *elásticas*.

Por otra parte, en el segundo grupo primordial referido (las unirresistentes), existen también estructuras de carácter distinto, y si nos fuese posible el hacerlas pasar aquí todas ante nuestros ojos, veríamos principios constructivos diferentes, según que las reacciones terminales originadas fuesen verticales ó tuviesen dirección oblicua, lo que justifica ahora la subdivisión de tal grupo en dos categorías estructurales: la de formas á *reacción vertical* y la de formas *de empuje*.

Esta mirada compleja al fondo anatómico, y podríamos decir fisiológico, de todas las formas constructivas realizadas por el hombre, permite aún descubrir más ramificaciones que coadyuven á la armonía y al método para su estudio; así, por ejemplo, dentro de las formas pseudoelásticas, encontramos dos especies diferentes, según que los miembros de dichas formas tengan ó no tengan empotrados en su interior elementos longitudinales ó tendones para auxiliar al trabajo de tensión, circunstancia que establece la división de las pseudoelásticas, en *estructuras sin tensor* y *estructuras tendinosas*, cuyas últimas, á su vez, presentan caracteres diferentes según que el tendón esté *adherido*

íntimamente con la ganga de la materia estructural ó simplemente alojado dentro de ella con un pequeño grado de adherencia en el que no sea prudente confiar.

Fijándonos ahora en las estructuras que hemos llamado *elásticas*, veremos como la universalidad de su empleo nos las divide desde luego en dos grupos diferentes, según que estas estructuras tengan carácter *fijo* ó estén destinadas á construcciones *móviles*, destacándose entre las primeras dos subgrupos más, de altísimo interés, que corresponden, respectivamente, á las formas calculables por la grafostática y á las en cuyo cálculo debe forzosamente intervenir la teoría de deformación, formas que distinguiremos con los nombres de *isostáticas* y *no isostáticas*.

De la misma manera, entre las formas unirresistentes de reacción vertical distinguiremos una división dependiente del sistema de su equilibrio, división muy fácil de notar, toda vez que la estabilidad de aquellas formas se resuelve exclusivamente de dos maneras: ó por la presencia de masas que contrabalancean la forma, ó por un apoyo doble, es decir, por un adintelado de dicha forma, y, naturalmente, esta diferencia espontánea nos clasifica las construcciones correspondientes en estructuras *con contrapeso* y estructuras *sin contrapeso*.

Finalmente, las unirresistentes de empuje, tienen carácter y principio radicalmente opuestos, según la manera de producirse su reacción. Si la reacción está repartida á lo largo de una línea, como, por ejemplo, la imposta de una bóveda, la estructura

difiere de un modo esencial de la originada por construcciones que reaccionan solamente contra puntos determinados, y por esta circunstancia debemos distinguir aquí las formas *de empuje repartido* y las *de empuje localizado*.

Toda la clasificación que acabamos de razonar hace exclusivamente referencia á las estructuras simples, ó formadas por uno ó más miembros constructivos de un mismo tipo; pero, naturalmente, las exigencias de la Arquitectura ó Ingeniería, invitan con frecuencia á componer construcciones que involucran simultáneamente varios de los principios anteriores, dando así origen á formas estructurales complejas. Estas formas, cuyo estudio nos servirá de complemento al de las precedentes, las agruparemos bajo el título de estructuras *mixtas* ó *compuestas*, es decir, de estructuras realizadas por la combinación de formas elementales birresistentes y unirresistentes; y, en efecto, hemos de notar como toda construcción mixta es descomponible en estructuras elementales comprendidas siempre en la clasificación descrita.

En resumen; la genealogía, digámoslo así, de las estructuras constructivas existe positivamente, éstas no son manifestaciones aisladas sin ley y sin enlace que formen ramas independientes de un tronco general, sino que, por el contrario, reúnen armonías de conjunto, fundamentos y filiaciones perfectamente marcadas tal como hemos observado, pero que pueden aún resaltar más claramente si bajo la agrupación descrita componemos un cuadro

sinóptico, como se hace en las clasificaciones de otros órdenes de la Ciencia.

Invitamos al lector á que, á guisa de ejercicio, se formule dicho cuadro, y así le irá apareciendo á la vista el embrancamiento sucesivo de todo el reino estructural de Arquitectura. Las dos ramas primordiales de tal embrancamiento, estarán naturalmente formadas por los grupos de estructuras birresistentes y unirresistentes, cada una de las cuales se irá á su vez subdividiendo sucesivamente en los varios grupos antes analizados, formando en conjunto un cuadro cuyas últimas ramificaciones estarán sencillamente representadas por los tipos particulares de todas las construcciones conocidas.

La más interesante originalidad de este cuadro está en que sus ramas podemos definir las de un modo completamente aritmético, estableciendo lo que se nos ocurre llamar el «coeficiente estructural», número que resulta de dividir el coeficiente de trabajo á la compresión por el del trabajo á tensión que permite la estructura en una sección general de la misma; así: el coeficiente estructural de las estructuras elásticas valdrá la *unidad*, y este mismo coeficiente, conservándose finito, es siempre mayor que *uno* en las estructuras pseudoelásticas. En cambio, en las formas unirresistentes el coeficiente estructural vale *infinito* ó vale *cero*, según que ellas sean aptas respectivamente para los esfuerzos compresores ó para los esfuerzos tensores.

Ahora bien; como cada uno de los grupos estructurales tiene evidentemente sus peculiares formas, resulta en definitiva que el coeficiente estruc-

tural puede venir á ofrecernos la configuración de la estructura; deducción que de un modo indefectible viene, en caso de duda, á orientar nuestro lápiz en las líneas configurativas de las formas que proyectemos.

Como vemos claramente, el valor del coeficiente estructural depende de algo más que de la materia con que informemos la estructura: depende de la *constructibilidad* que adoptemos en el tratamiento de aquella materia, puesto que, como ya hemos dicho, un dovelaje hace unirresistente á la estructura realizada con elementos flexibles como el hierro, y un sistema de tendones puede hacer birresistente á un material cuya resistencia tensiva sea peligrosa, como sucede, por ejemplo, con el cemento.

Tal es el fondo mecánico de la agrupación adoptada.

IV.—LÍNEA POTENCIAL DE ACCIÓN EXTERNA

EL equilibrio, en general, de todo sistema mecánico es una sencilla consecuencia de la ley fundamental de la energía por la que se decide el reposo y se regula el movimiento de todos los cuerpos.

El caso particular del equilibrio estático de una estructura, ó lo que es lo mismo, de un sistema material cualquiera, queda luminosamente explicado por la presencia de reacciones internas que contrarrestan con absoluto matematicismo las acciones

externas á que está sujeto aquel sistema, acciones cuyo origen es completamente indiferente y que pueden, por tanto, verificarse por potenciales eléctricos, por tensiones del vapor, por presiones del viento, por peso de materiales, etc., etc.

El análisis de este equilibrio estático resulta fácilmente practicable por la sencilla concepción de un plano transversal que se mueva en el espacio separando constantemente en dos regiones al sistema material. La estabilidad de este sistema, ó estructura en nuestro caso, exige, naturalmente, que en cualquier posición de aquel plano analizador, se verifique el equilibrio entre las fuerzas externas que actúan en una región del mismo, por ejemplo, á la izquierda, y la parte de estructura que ha quedado á la otra región, es decir, á la derecha.

En el caso más general que puede ocurrir, ó sea aquel en que las acciones externas que van quedando á la izquierda del plano analizador, por el hecho de estar situadas en cualquier posición del espacio, tengan por resultante, ó mejor dicho, por sistema equivalente, á dos fuerzas que se cruzan, ó lo que es igual, á una fuerza única y un par, en general situado en un plano oblicuo á dicha fuerza única, será necesario que las reacciones del fragmento de estructura que ha quedado á la región opuesta del plano analizador, equilibren exactamente á aquella fuerza y á aquel par, lo que, en definitiva, equivale á decir que en este caso general estará expuesta la estructura á flexión y á torsión, además de sufrir los esfuerzos normales y tangenciales. Ahora bien; si determinamos el «eje central de momen-

tos», para cada uno de los sistemas de fuerzas externas que van quedando á la izquierda del plano analizador, podremos ir substituyendo á los respectivos grupos resultantes de fuerza y par, que hemos referido, por una fuerza coincidente con dicho eje central, y un par colocado en un plano normal al mismo eje, y entonces, naturalmente, lo mismo que antes, la estructura tendrá que ir reaccionando contra estos sistemas de fuerza, ó eje central, y su par normal correspondiente. Pero, sabiendo que el eje central tiene la propiedad de ser el lugar de los puntos del espacio para los cuales el momento del sistema de fuerzas á que corresponde es mínimo, momento que evidentemente es el del par normal, se verificará que si determinamos la curva envolvente de todos los ejes centrales de momentos de los diversos sistemas de fuerzas que han quedado á la izquierda del plano analizador, obtendremos una línea del espacio de propiedad mecánica notabilísima, toda vez que á lo largo de ella existirán los centros de mínimo momento de los diversos sistemas de fuerzas considerados.

Á esta línea, en general alabeada y que evoluciona de una manera aparentemente caprichosa en el espacio, la llamaremos *línea potencial de acción externa*.

Si la fibra media de la estructura constructiva, la adaptásemos rigurosamente á la línea potencial de acción externa, resultaría una original é interesantísima armadura únicamente sometida á las compresiones ó tensiones representadas por las fuerzas coincidentes con los ejes centrales, y á las torsiones

correspondientes á los pares normales. Esta armadura sin flexión, materializaría, pues, los puntos del espacio más estratégicos, mecánicamente hablando, es decir, aquellos puntos cuya situación es la más ventajosa para resistir á los sistemas de fuerzas externas, y, por consiguiente, la armadura encontrada sería, de entre todas las infinitas existentes, la más racional que la imaginación podría concebir.

Es preciso observar que una construcción esteotómica no es la indicada para realizar la estructura que acabamos de encontrar, por cuanto las dovelas de su despiezo tenderían á rodar alrededor de sus correspondientes segmentos de línea potencial como eje, y podrían realmente llegar á hacerlo, friccionándose por sus caras de junta, por virtud de los pares de rotación á que están sometidas; resulta, pues, solamente indicada la constructibilidad birresistente para estas generales formas arquitecturales, sobre las que más adelante hemos de insistir.

Infiérese, en fin, de aquí, de una manera lógica, y sin dejarnos llevar por exaltadas visiones, que positivamente existe por descubrir un infinito número de estructuras torcidas y apropiadas, de cuya realización resurgiría, indudablemente, un nuevo mundo de formas de construcción, para el cual nuestra conocida arquitectura no significa más que un pobrísimo caso raquítrico y particular, análogamente al representado por la geometría euclidiana, que por muchos siglos ha constituido inconscientemente un simple corolario de la grandiosa ciencia de las formas proyectivas, arrancadas en el siglo

pasado al inagotable arcano del sentimiento por la videncia prodigiosa de Poncelet y generalizadas en nuestros días por el asombroso genio de Staud.

Aquella presentida y general arquitectura, puede efectivamente dar lugar, en virtud de sucesivas particularizaciones, á una serie de más sencillas formas que encierran, en último término, á las que hoy empleamos.

No hay más que suponer el caso en que se vayan anulando los pares finales de fuerza que iban quedando á la izquierda del plano analizador, es decir, que los sistemas de fuerzas correspondientes tengan cada uno de ellos á una fuerza única por equivalente ó resultante. En este caso, existe en el espacio un lugar geométrico de puntos para los cuales no existe influencia flexora, ni de torsión alguna; este lugar es sencillamente la envolvente de aquellas fuerzas únicas, y formará, como antes, la línea de puntos de situación mecánica más ventajosa; esta línea potencial sufrirá ahora solamente compresiones ó tensiones, y la estructura que á ella se adapte será, por tanto, prensada ó extendida con exclusión entera de todos los demás esfuerzos. Evidentemente, que la forma tendrá ahora, como antes, evolución alabeada como caso general.

Si los sistemas de fuerzas que va aislando el plano analizador, son sencillamente sistemas coplanos, entonces estos sistemas tendrán los vectores representativos de sus resultantes situados en un solo plano, y por consiguiente su envolvente, ó línea potencial, será también una curva plana,

curva que precisamente es aquella contra la que reaccionan las estructuras de nuestra actual arquitectura. Sabido es que las formas de nuestra construcción tienen efectivamente cada una su correspondiente *línea de las presiones*, y esta línea, como se comprende, no es otra que la línea potencial que como á caso particular acabamos de deducir de la verdadera línea de potencia externa, de significación enteramente universal.

Si la estructura plana particular se adapta ahora á su línea potencial, por las mismas razones generales de antes, no sufrirá ésta flexión ni torsión alguna sino que experimentará solamente compresiones ó tensiones. El nombre particular, pues, con que de ordinario se conoce á aquella línea, no traduce con exactitud su naturaleza, ya que parece indicar que ella comprime á la estructura, cosa que sucede sólo en ciertos casos, puesto que en otros la extiende, y en los más, que son aquellos en que la estructura no se ajusta al perfil de dicha línea, ella produce también una flexión.

En los sistemas coplanos, ó de nuestra usual arquitectura, resulta interesante notar una circunstancia que puede conducir á la facilitación del cálculo de sus estructuras sometidas á esfuerzos provenientes de conceptos distintos; y ella es, que habiendo fuerzas de orígenes diferentes, puédese buscar el vector resultante de cada uno de los sistemas de una misma especie que van quedando á la izquierda del plano analizador, en vez de buscar el vector resultante total de cada grupo de sistemas; y de

esta manera, obtendremos tantas líneas potenciales de acción externa cuantos sean los orígenes de las fuerzas que atacan á la estructura, y, por tanto, tendremos una, relativa, por ejemplo, á la acción del viento; otra, que expresará la acción de la nieve; otra, la acción de los pesos muertos, etc., con lo que resaltará gráficamente la influencia é intensidad de cada uno de los correspondientes fenómenos. Naturalmente, resulta facilísima á su vez la composición total de dichas líneas, pues basta considerar los vectores respectivos actuantes contra el plano analizador, en cada una de sus posiciones, y componer dichos vectores, cuya resultante nos dará el vector definitivo que actúa contra el plano considerado. La envolvente de todos los vectores definitivos, configurará, por fin, la línea potencial de acción externa, contra la que, en resumen, debe reaccionar la estructura constructiva.

V.—LOS DOS GRANDES EMPIRISMOS

LA conclusión á que conducen las precedentes reflexiones, es sencillamente la de que á cada forma constructiva acompaña una línea potencial de acción externa, es decir, una línea de fuerza contra la cual reacciona la estructura de la forma. Sin admitir esta reacción en los términos explicados, la estática arquitectural no existiría, las formas se derrumbarían ó las estructuras se pondrían en marcha.

El equilibrio, pues, de una forma constituye un

problema de esencia clarísima y de unidad universal, que no podrá, por tanto, sujetarse á particularismos peculiares de cada sistema de construcción; y acabaremos así por comprenderlo, abriendo serenamente los ojos ante el espíritu mecánico del equilibrio de una forma: sea ésta la que fuere, tenga tal ó cual sistema constructivo y esté realizada con material de no importa qué clase, siempre veremos contra uno cualquiera de los planos de sus secciones, aplicadas dos fuerzas externas que se cruzan (caso más general) ó únicamente una sola fuerza (caso de resultante única). Del punto ó puntos de aplicación de estas fuerzas, así como de su dirección y de la magnitud de su vector representativo, dependerá en definitiva la forma é intensidad con que deberá reaccionar la sección considerada, con lo cual podremos estudiar el cálculo que le corresponda. No hay aquí convención ni hipótesis de ninguna clase; el hecho es óptico, gráfico, y está dotado de una plasticidad realmente evidente y palpable. Todo el campo inmenso de la mecánica arquitectural no tiene más problema que el que acabamos de definir, conclusión transparente y del orden de ciencia inmutable, que debe convencernos como el estudio de la resistencia de una forma no significa, en rigor, dificultad ni complicación alguna, representa sólo el *tomar el pulso* de la estructura para reconocer la influencia que en ella ejerce la fuerza externa correspondiente.

Pero, reflexionemos que el problema mecánico hasta aquí analizado nos ha ofrecido clara y precisa-

mente el género é intensidad de los esfuerzos que actúan contra una sección cualquiera de la estructura general; falta ahora determinar, para completar la cuestión, la *manera* como estos esfuerzos actúan, y, por consiguiente, la *forma* precisa como la materia reacciona... ¡Ah! Este es precisamente el paso al empirismo. Hasta aquí, ha habido exclusivamente criterio racional, verdad eterna; desde ahora, aparecen ya hipótesis y convencionalismos. En llegando á la explicación de la manera de reaccionar la materia contra las fuerzas externas, preséntanse opiniones diferentes y apreciaciones personales distintas, en las que juegan la forma de la estructura, el material de que está construída, la constructibilidad que se ha adoptado, etc.

Sin embargo, compréndese que la forma y la constructibilidad son meros accidentes que no pueden alterar la esencia del método racional de cálculo, en el cual teóricamente se debería siempre tener en cuenta la deformación que pueden experimentar, sin romperse, todos los materiales del arte de construir.

El desconocimiento de la ley absoluta y general de esta deformación y la multiplicidad de aquellas apreciaciones personales, son precisamente la causa de que aparezca disgregada en partes sin relación lo que naturalmente debería ser doctrina unitaria, es decir, la *Ciencia de la verificación de las estructuras*, y de aquí la numerosa colección de teorías para el cálculo de bóvedas de piedra, de métodos de cálculo de vigas armadas, de sistemas verificativos de obras de cemento armado, de puentes

colgantes, de sistemas americanos, de muros de sillería, etc., etc., lo que en conjunto imprime un aspecto de *maremágnum* embrollado y dificultoso al transcendental y responsable problema del equilibrio de las formas estructurales.

Si las universales condiciones de equilibrio que nos ofrece la mecánica racional permitiesen, sin apelar á hipótesis, como hoy se hace, el determinar las componentes de las reacciones moleculares que definen el estado elástico general en todos los puntos de un cuerpo cualquiera sujeto á cargas ó fuerzas exteriores, llegaríamos á la resolución mecánica completa de la universal estructura concebida en el artículo anterior, pudiendo, en fin, tratarla por la matemática, con lo que se engendraría una ciencia arquitectónica de grandiosidad solamente comparable con la Astronomía y la mecánica celeste; pero hoy, ¿cómo hacerlo?... ¿Cómo conocer la ley del reparto de fuerzas internas?... ¿Cómo calcular las reacciones finales de la estructura general?...

Actualmente la resolución de estos problemas, salvo casos aislados, sólo se conoce en condiciones particularísimas: en unas, porque las ecuaciones de la estática son suficientes para la determinación, y en otras, porque el sistema de fuerzas externas y la forma de la estructura provocan únicamente en ésta los estados elásticos simple ó, á lo más, doble; es decir, compresión y tensión sencillas ó, á lo más, flexión plana. Y aun en estas condiciones, desde el momento que juega la ley de la Elasticidad, las doctrinas no son enteramente racionales, sino que van revestidas del gran convencionalismo de la iso-

tropía de la materia y de la conservación de sus secciones planas.

Á pesar de esta particularidad de conocimientos, los que, á su vez, como veremos, tienen sus lagunas y dificultades, como no existen otras bases en que sólidamente apoyarnos, á ellos y á sus correspondientes casos deberemos referirnos de aquí en adelante; pero tenemos gran interés en hacer observar como aquella multiplicidad de métodos verificativos que rigen á nuestras construcciones, aquel *maremágnum* de procedimientos de cálculo que hemos dicho rigen actualmente, permiten una beneficiosa integralización ó condensación, toda vez que no constituyen, repetimos, más que casos particulares de lo que debería ser una misma y única ciencia general.

Efectivamente; si reflexionamos sobre el presente de estas transcendentales cuestiones de la Ingeniería, prescindiendo de sus ramificaciones y puntos oscuros, vendremos en conocimiento de la existencia de dos únicas hipótesis fundamentales por las cuales se puede siempre explicar la manera como prácticamente reaccionan todas las formas constructivas.

Estas hipótesis son, sencillamente, la apoyada en la deformación de la materia y la que prescinde de dicha deformación, y aun cuando ninguna de las dos sea absolutamente cierta, existe, no obstante, en su concepción una videncia tan notable, que bien podemos calificarlas de *grandes empirismos*, amén de que con su rutina vienen estableciéndose todos nuestros métodos verificativos.

En la primera de dichas hipótesis, que está solamente planteada con cierta precisión en los casos particulares de que la estructura esté atacada por sistemas de fuerzas externas con resultante única, situada en el plano medio de la estructura, admítase, con arreglo á la teoría de Bernouilli ó de Navier, que *las secciones planas de los sólidos continúan planas después de su flexión*, con lo que se encuentra un reparto lineal de fuerzas internas que permite concretar la que hoy es fórmula fundamental de la Resistencia de materiales (*).

Por el contrario, no admitiendo flexiones de ninguna clase para las barras de sus construcciones, plantean los americanos la *descomposición de la fuerza externa en tantas componentes como barras afectadas*, sentándose así el método de cálculo de sistemas de múltiples elementos articulados en formas de enrejado y celosía en general.

Estos son los dos empirismos mentados, *base científica* de toda la construcción; nuestro sentido nos dirá en cada caso cuál de los dos debemos aplicar.

(*) Momento flector, igual al coeficiente de resistencia multiplicado por la relación entre el momento de inercia de la sección que se calcula y la distancia del punto más alejado de dicha sección al eje neutro de la misma.

PARTE II

SÍNTESIS DEL CÁLCULO DE LAS ESTRUCTURAS PLANAS CON CARGAS EN SU PLANO MEDIO

I.—TRAZADO DE LA LÍNEA POTENCIAL

EL cálculo de la resistencia de una forma constructiva consiste invariablemente en sujetar á un formulaje, ó á un trazado, las leyes empíricas que regulan la reacción mecánica de la materia contra fuerzas externas. La primera cuestión á resolver debe consistir, pues, en la determinación de aquellas fuerzas actuantes contra cada una de las secciones que se trata de calcular en la estructura, dato primordial que hemos visto nos viene dado por la línea potencial de acción externa. Será lógico, pues, en todo género de estructuras, determinar primeramente aquella línea.

La particularidad de formas reinantes en todas las estructuras, dispone las fuerzas externas que actúan sobre éstas, según sistemas coplanos, y por tanto, la línea potencial ó envolvente de las resultantes de aquellas fuerzas, degenera, como se vió, en nuestros usuales casos en línea plana, de forma poligonal ó curva, según las componentes estén

concentradas en puntos de la estructura ó repartidas contra ella, según una ley cualquiera de continuidad. La construcción, pues, de dicha línea, resulta facilísima una vez conocidas las fuerzas actuantes, que están siempre divididas en dos grupos opuestos: uno de ellos formado por las cargas exteriores, y representado el otro por las reacciones terminales de la estructura; contrarrestándose ambos grupos, tendrán, evidentemente, sus resultantes iguales, opuestas y coincidentes sobre una misma recta. El conjunto de las fuerzas que integran los dos citados grupos forma el sistema total de fuerzas actuante contra la estructura, las cuales se representarán gráficamente sobre el dibujo de la misma. En estas condiciones, la línea potencial de acción externa tiene ya un trazado inmediato, por cuanto bastará componer la primera fuerza actuante con la segunda, la resultante de ambas con la tercera, etc., operación que podrá comenzarse indistintamente por uno ú otro extremo de la estructura.

Se llega al mismo resultado ú obtención de la línea potencial, tomando un punto cualquiera del espacio y trazando por este punto, llamado polo, dos vectores de dirección y longitud igual á las dos reacciones finales de la estructura. Trazando ahora, por el extremo de uno de estos vectores, una serie de rectas sucesivas y respectivamente iguales en longitud y dirección á la serie de fuerzas actuantes, obtendremos, finalmente, una figura, ó polígono cerrado, dentro del cual podremos trazar todos los vectores que parten del polo, representando cada vector, en dirección y magnitud, á la resultante

de las fuerzas que están en una cualquiera de las dos regiones del mismo, en virtud de lo cual se infiere, que el vector horizontal representa el empuje horizontal de la estructura. Resulta, pues, muy práctico el empleo de esta expresiva figura llamada *polígono de fuerzas*, la cual concentra, como vemos, no sólo las magnitudes de las fuerzas que obran á lo largo de la línea potencial, sino también la dirección de los elementos de dicha línea, con lo cual podremos, evidentemente, trazarla.

En el caso particular de verticalidad de fuerzas actuantes y libre deformación de la estructura, por ejemplo, cuchillo ó viga, apoyados sobre rodillos á nivel, el polígono anterior puede seguir construyéndose, resultando empero convertido en simple recta vertical, luego todos los vectores degeneran en verticales también, pudiéndose interpretar este resultado como una significación de que la línea potencial se ha abierto, convirtiéndose en dos rectas verticales pasando por los puntos de apoyo de la estructura.

Naturalmente, la conversión recta del polígono de las fuerzas, anula el vector horizontal, lo que en efecto debe suceder toda vez que las referidas estructuras no tienen empuje. Podríamos, sin embargo, suponer que dicho vector no se ha anulado, tomando al efecto un polo cualquiera y uniéndolo por medio de vectores con la recta en que se convirtió el polígono verdadero. Esta consideración nos presenta un polígono falso, con el cual obtendremos una línea potencial falsa también, que se llama polígono funicular. Las estructuras referidas tienen, pues,

infinitos polígonos funiculares ó infinitas curvas potenciales falsas, pero igualmente útiles todas para analizar el equilibrio de la forma constructiva. Es, en fin, la consideración del polígono funicular, un ardid que gracias á la aplicación del concepto fundamental de la geometría proyectiva, permite el presentar una imagen finita y cerrada de la línea potencial, imagen puramente virtual que no debe confundirse con la línea verdadera.

Volviendo al caso general de estructuras con empuje horizontal, es decir al caso de reacciones terminales inclinadas, cuyo conocimiento es necesario, como se habrá observado, para la determinación de la verdadera línea potencial de acción externa, debemos notar la dificultad que algunas veces entraña el encuentro de dichas reacciones finales, á consecuencia del pequeño número de condiciones que la Estática permite plantear. Esta ciencia no nos ofrece más, para los sistemas coplanos á que se reducen nuestras formas constructivas, que las tres siguientes igualdades:

1.^a Igualdad entre sumas de cargas verticales y de componentes verticales de las reacciones;

2.^a Igualdad entre las componentes horizontales de dichas reacciones;

3.^a Suma de momentos de las cargas y de las reacciones, con relación á un centro de rotación cualquiera, igual á cero.

Ahora bien; las reacciones de la estructura no se podrán encontrar con sólo la aplicación de los tres principios precedentes, si no se conoce previa-

mente el punto de paso de una de dichas reacciones y la posición de otra cualquiera de las fuerzas que forman la línea potencial, fuerza que puede ser la misma reacción considerada. Si la constructibilidad de la estructura no ofrece á nuestra intuición los datos referidos, el problema quedará indeterminado estáticamente.

Esta constructibilidad determinativa podrá, por ejemplo, consistir en tres articulaciones de la estructura (lo que equivale á conocer tres puntos de paso de la línea potencial), ó en una sola articulación en un extremo y un carro con rodillos de libre deformación en el otro (lo que equivale á fijar la posición de una reacción y el punto de paso de otra), etc. Pero siempre que estos, ú otros, dispositivos prácticos, no existan, habrá necesidad de acudir á la teoría de la deformación de los materiales, ó á los teoremas que de ella se derivan, para venir penosamente en conocimiento de las reacciones finales de la estructura. Tal sucede, por ejemplo, en los casos de arcos con sólo dos articulaciones, cuyo empuje ó componente horizontal de la reacción nos viene ofrecido por el teorema de Castigliano relativo al trabajo de la deformación *mínimum*, ó por la fórmula de Bresse aplicable á arcos circulares solamente, etc. Con mayor intensidad se manifiesta aún la indeterminación, si el arco tiene empotramiento en sus dos extremos, circunstancia que aparta de ellos á la reacción, escondiéndola secretamente á nuestros ojos y engendrando el par de empotramiento cuya investigación exige el auxilio de las fórmulas diferenciales de la Resis-

tencia de materiales, las que por ser pocas veces integrables por el cálculo, hay que interpretarlas aproximadamente apelando á las cuadraturas...

Esta es la gran dificultad por la que, usualmente, se rehuye el empotramiento, base de economía, principio perfecto de que deberíamos revestir á todas las estructuras birresistentes, pues de lo contrario, ¿qué partido sacamos de la birresistencia de un material, si no obligamos á tensarse y comprimirse todas las secciones de la estructura?...

Después de lo que reza este capítulo, que al fin no hace más que poner al descubierto la esencia de todos los métodos determinativos de la línea potencial, llamada curva de las presiones, compréndese el deplorable estado de la ciencia de la construcción, impotente aun para situar en el caso general aquella línea de acción externa que constituye la piedra única de apoyo de todos los métodos verificativos. ¿Por qué no utilizar nuestro sentido mecánico en los casos en que la Ciencia sea insuficiente, situando á sentimiento la reacción final de una estructura?... Con una cierta abstracción veremos á la forma constructiva aislada en el espacio, sin apoyo material de ninguna clase, manteniéndose únicamente en equilibrio por efecto de los dos grupos contrarios de fuerzas que dijimos anteriormente la solicitan: las cargas y las reacciones. Siendo conocidas las cargas, nuestro espíritu mecánico nos hará sentir aproximadamente la dirección y el paso de las reacciones, ó á lo menos la región en que fluctúan, aun cuando existan empotramientos, pues éstos

representan, al fin, la fijeza de la sección á que pertenecen, lo que exige la presencia de fuerzas que tiendan á hacer girar dicha sección en sentido contrario del en que giraría si no existiese el empujamiento. Todo este interesante proceso es admirablemente comprendido por nuestro instinto, que lo adivina y lo siente merced tan sólo á una ligera educación y hábito; ¿por qué, pues, repetimos, despreciar este maravilloso instinto?... Si lo utilizásemos, se podría obtener la curva potencial externa de un modo rápido en cualquier caso, cuidándose la sucesión de ensayos y realizaciones prácticas de hacernos ver con claridad creciente la situación verdadera de aquella curva fundamental, única base rigurosa de todo cálculo verificativo. De proceder así, aunque parezca chocante, no haríamos más que seguir el camino por donde ha ido evolucionando la misma ciencia matemática, cuyo desarrollo se verificaba antes, á falta de principios rigurosos, por la confianza en la intuición, como nos afirma Poincaré.

II. — DOS ÚNICOS MÉTODOS VERIFICATIVOS

YA que, según dijimos, los medios verificativos de la resistencia, nacen de las diversas maneras de reaccionar la materia contra la fuerza actuante, y no existiendo hasta hoy más que dos explicaciones empíricas de tal fenómeno con lógica suficiente para poder ser admitidas en la práctica, infiérese clara-

mente que á dos, también, podrán reducirse todos los procedimientos de cálculo de construcciones.

Si por circunstancias especiales, bien de disposición estructural, bien de actuación de las fuerzas, no se prestase la resistencia de la construcción á ser interpretada por ninguno de los dos empirismos conocidos, no tendrá ésta método verificativo de seguridad suficiente, y se formarán así las lagunas existentes en la ciencia de que tratamos, de que son patente ejemplo las columnas, cuya carga crítica se han esforzado Euler y Rankine en precisarnos; las piezas torcidas, cuyo reparto de tensiones es aún muy tenebroso; las formas sujetas á cargas intermitentes, cuya resistencia viva Launhardt, Wölher, Weyrauch y otros han intentado encontrar.

Los dos empirismos por que suponemos se rigen los fenómenos de reacción de la materia, no son otros, como se dijo, que la explicación de Navier, y la de los americanos, aplicable la primera á las estructuras para las que se admite flexión en sus miembros, y aplicable la segunda á aquellas cuyos miembros están constituídos por múltiples elementos articulados, ó talmente supuestos, sujetos exclusivamente á tensión ó compresión, con entera independencia siempre del material con que están construídas.

Hay un género de estructuras cuya reacción contra las fuerzas externas puede explicarse indistintamente, en condiciones de poca fatiga, por uno ú otro de los dos empirismos referidos, y estas son las construcciones trianguladas americanas con enlaces europeos ó rígidos, pues atendida la poca

deformación que se las consiente, puede despreciarse la flexión que aquellos enlaces introducen en sus miembros.

La variación de todos los métodos de cálculo es, pues, puramente aparente; los distintos métodos y matices que ocasionan la gran variedad de los Tratados existentes de cálculo de construcciones, son sencillo resultado de las ingeniosidades de sus autores y de los diferentes valores de los coeficientes de trabajo que, naturalmente, variando para cada material, obligan á disposiciones apropiadas, presentando al método con aspectos particulares.

La ley trapecial y la *ley de articulación*, he aquí dos títulos en que podemos fundir todos los procedimientos de estabilidad y cálculo de estructuras constructivas. Estas leyes tienen por respectivos ejes á los repetidos empirismos.

III.—LA LEY TRAPECIAL

ESTA ley, á cuyo significado usualmente restringido daremos nosotros una interpretación completamente general, es la que en esencia expresa el reparto lineal de reacciones en la sección de un sólido, por efecto de una fuerza externa actuante, concepto que en rigor engendra todo el cálculo de las construcciones, así de piedra como de metal; y en su consecuencia, una viga recta, un puente colgante, un arco de sillería, una chimenea de fá-

brica, un cuchillo Dión, etc., no constituyen, en su método verificativo, más que casos particulares de la *ley del trapecio*, como efectivamente veremos.

Esta misma ley, puramente artificiosa, es la propia causa de las bellas armonías y hermosas relaciones que nos ofrece la Resistencia de materiales... bellezas aparatosas, solamente externas y hechas nacer casi ex profeso por la afirmación de aquella ley hipotética. Toda la teoría del núcleo central de las piezas constructivas, que es un sorprendente lazo de fraternidad científica porque llega á ligar las alineaciones geométricas de puntos armónicos con las propiedades elásticas de la materia, si llegamos á analizarla con la amplificadora lente del buen sentido, nos descubrirá el origen de donde procede...

Si contra la sección transversal de una forma, de las que en Resistencia de materiales se llaman prismáticas, actúa una fuerza situada de un modo cualquiera en el plano medio de dicha forma, y además nosotros suponemos aplicadas, precisamente en el centro de gravedad de la sección referida, dos fuerzas más, contrarias entre sí, y paralelas é iguales en magnitud á la fuerza actuante, tendremos en definitiva que la sección considerada estará sujeta á un *par* y á una *fuerza central*.

Este par y esta fuerza central, equivalentes á la fuerza dada exterior, actúan en conjunto sobre la sección considerada de la estructura, de la misma manera que actuaría dicha fuerza exterior obrando por sí sola, y tienen la ventaja de permitirnos el

analizar claramente los movimientos que tienden á imprimir á la sección.

El *par*, como es natural, tendiendo al giro, y pudiendo trasladarse, como sabemos, á cualquier punto del espacio, conservándose en planos paralelos y girar sobre los mismos con tal de que conserve su momento y su sentido de rotación, veremos claramente que será el único causante de la flexión en la sección de la estructura, y, por lo tanto, el momento flector correspondiente será, á toda evidencia, el momento del par. El valor de este momento, así gráfica y tan fácilmente obtenido, es el que substituiremos en la fórmula de Navier, fundamental de toda la Resistencia de materiales, y con ello podremos despejar el valor del máximo coeficiente de trabajo con que por unidad superficial reacciona la sección de la estructura para contrarrestar el efecto del mencionado par de flexión. Tendremos ahora bien en cuenta que el coeficiente obtenido representa una compresión ó una tensión en la estructura, según sea la región de su sección transversal considerada, pues sabemos que en toda sección existen las dos características regiones, la prensada y la tensada, separadas ambas por un eje que pasa por la fibra neutra; pero siempre los esfuerzos referidos se consideran normales á la sección cuya resistencia se analiza.

Por lo que respecta á la *fuerza central*, que hemos dicho antes que actúa contra la sección, el efecto que produce se estudia, á su vez, de la siguiente manera:

Se supone á esta fuerza descompuesta en dos:

una, normal á la sección de la estructura, y otra, paralela á dicha sección; á la primera componente se la llama *compresión* ó *tensión* (según su sentido) y á la segunda componente, como que tiende á cortar la estructura, se la llama *esfuerzo cortante*. Los esfuerzos medios por unidad superficial que producirán ambas componentes, se obtienen prácticamente dividiendo sus valores por el área de la sección. Si en alguna de las direcciones indicadas no hubiese componente, desaparecería, como es natural, el correspondiente esfuerzo; así, en las vigas apoyadas á nivel, con cargas verticales no hay componente normal á la sección, y, por tanto, deja de haber compresión por aquel concepto; en las piezas exclusivamente comprimidas (arcos de piedra teóricamente aparejados, etc.) deja de haber componente paralela á la sección y, por tanto, no hay esfuerzo cortante en la sección normal al eje de dichas piezas. Y á su vez el par flector puede en ciertos casos anularse, basta para ello evidentemente que la fuerza externa original esté aplicada al centro de la sección considerada de la estructura.

En definitiva, vemos como en una unidad superficial de la sección transversal de una estructura, pueden, en el caso general, desarrollarse tres órdenes de reacciones contra la fuerza actuante exterior: una compresión y tensión debidas al *par*, una compresión ó tensión debida á la componente normal de la *fuerza central* y un esfuerzo cortante debido á la componente paralela de dicha fuerza central. Los dos primeros órdenes de reacciones, por ser fuerzas normales á la sección, es decir, paralelas, deberán

sumarse algebraicamente para obtener, en virtud del principio de la superposición de efectos, el valor final de compresión ó de tensión con que por unidad de superficie deberá reaccionar la materia.

Esta conclusión alcanzada es completamente aplicable en la práctica á todo género de estructuras, pues si bien en el estado elástico doble se demuestra teóricamente, en Resistencia de materiales, que de cada molécula de una estructura irradia una reacción resultante, paralela al plano de la flexión, que tiene por valor el radio correspondiente de la llamada «elipse de los esfuerzos moleculares», y que en el estado elástico triple aquella elipse se convierte en el «elipsoide de los esfuerzos moleculares», de cuyas consideraciones se deduce la dirección y magnitud de los esfuerzos mayor y menor con que reacciona la molécula en cuestión, hay que convenir, como francamente advierte Föpl, que tal elucubración científica no rinde interés alguno en los casos de aplicación concreta. Por todo lo que tendremos solamente en cuenta, en la práctica, la conclusión antes alcanzada, repitiendo que ella es completamente aplicable á todo género de estructuras con entera independencia de la clase de materia que las forma, pues bien se trate de obras metálicas, bien de mamposterías, obras de leño, etc., todas en absoluto experimentan sus deformaciones elásticas. Ahora bien; aun cuando sea racionalmente desconocido el rigor de dichas deformaciones, y la repartición de los esfuerzos moleculares, especialmente para los cuerpos que no obedecen de un modo exacto á la ley de Hooke,

ó de la elasticidad, podemos, sin embargo, apoyándonos en la experimentación y en la inspirada idea de Bernouilli y de Navier, admitir el simple giro de la sección transversal de la estructura, alrededor de un eje que pasa por la fibra neutra, y una repartición lineal de reacciones en dicha sección, con todo lo cual se comprende, que si adoptamos un dibujo perpendicular á aquel eje de giro, sobre dicho dibujo vendrán siempre expresadas las referidas reacciones según un diagrama *trapezoidal*; resultado que justifica el título de la ley que sintetiza á todo el cálculo de las estructuras basado en la deformación.

No es extraño, ahora, que ya admitida la ley trapezoidal, arrancada, como vemos, á viva fuerza de un convencionalismo acomodatriz, resulten las grandezas de cálculo y las armonías de que hablábamos, y no debe, por tanto, asombrarnos la conclusión á que se llega para definir al *núcleo central*.

Núcleo central es la región donde la sección transversal de la estructura puede ser actuada por una fuerza externa, para que no se desarrollen más que esfuerzos de un solo sentido en la sección considerada; y como evidentemente los esfuerzos de un sentido vienen separados de los de sentido opuesto por una línea de esfuerzos nulos, si obligamos á que esta línea sea el contorno de la sección de la estructura, el núcleo central quedará determinado. Un elementalísimo tratamiento matemático de la fórmula de la ley del trapecio, nos permite hacer lo indicado, con lo que se obtiene la línea que delimita el núcleo central, línea cuyos puntos resultan

ser los antipolos de la elipse central de inercia para con respecto á una recta polar que va rodando tangencialmente alrededor de la sección de la estructura; artificiosa consecuencia nacida del empirismo establecido con el reparto lineal de reacciones.

Sin embargo, es preciso confesar que, siquiera sea de una manera convencional, hemos llegado á determinar para cada sección de la estructura la región de puntos donde puede actuar una fuerza externa para que se desarrollen solamente en dicha sección esfuerzos de un determinado sentido. Este resultado, alcanzado por la referida ley, forma en debida interpretación, la esencia única que explica el equilibrio y justifica el cálculo de las formas estructurales, en su doble categoría de birresistentes y unirresistentes. En efecto:

Sea cual fuere la estructura ó forma constructiva á calcular, una vez dibujada, se analizan las fuerzas á que está sometida y se distribuye á éstas concentradamente en puntos situados en el eje ó fibra neutra de la estructura, con lo cual, aplicando los medios en páginas anteriores referidos, se podrá construir la línea potencial de acción externa, línea que resultará poligonal por efecto de la supuesta concentración de fuerzas.

Con los datos así dispuestos, puédesse ya verificar sencilla é inmediatamente una sección transversal cualquiera de dicha estructura. Bastará para ello considerar la resultante de las fuerzas que obran á un lado cualquiera de dicha sección, resultante que nos es siempre conocida por tener su situación y su magnitud: la situación es evidentemente la

misma que la del lado correspondiente del polígono potencial de acción externa, y la magnitud es la del vector paralelo á este lado, vector que se encuentra, como sabemos, en el polígono de las fuerzas que previamente habremos construído para la determinación de la línea potencial de acción externa. Tenemos, por tanto, conocida de un modo completo la fuerza definitiva actuante contra la sección considerada de la estructura, y con ello estamos exactamente en las condiciones que supusimos al deducir la ley del trapecio: tenemos una estructura con una sección determinada en ésta y una fuerza externa actuante contra dicha sección; podemos, pues, como antes, considerar á esta sección sometida á un par y á una fuerza; apliquemos, por tanto, la ley del trapecio en los términos entonces explicados, y verificaremos fácilmente la sección de la estructura. Con la aplicación de tal ley, determinaremos el trabajo de compresión y el de tensión á que debe resistir la sección considerada, y como este trabajo alcanza, para cada sección transversal de la estructura, su máximum en las regiones más alejadas de la fibra neutra, allí, en una unidad superficial de dichas regiones, comprobaremos la fatiga del material para cerciorarnos si sobrepuja, ó no, al respectivo coeficiente que dicho material permite.

Deberá además el material resistir al esfuerzo cortante, si es que éste existe, para la dirección de la sección escogida. Tal esfuerzo no será más, á tenor de la definición que dimos, que la proyección del vector actuante sobre el plano de la sección considerada; por lo tanto, la relación entre el valor así

encontrado y el área de dicha sección de la estructura, nos ofrecerá prácticamente la resistencia que á la cortadura debe ésta desplegar por unidad superficial, y tendremos, por consiguiente, necesidad de cotejar también si el número obtenido sobrepaja ó no al coeficiente correspondiente que, como sabemos, tiene cada material experimentalmente calculado.

Vemos cuán elemental resulta el método verificativo de una estructura cualquiera, por la sencilla aplicación de la ley trapecial, gráfico método en cuya resolución no entra más que el lápiz, la escuadra y la fórmula fundamental de Resistencia, constantemente guiados por nuestro sentido mecánico.

Si durante la verificación de las secciones de la estructura no encontrásemos, como es lo corriente, exactamente el mismo valor para su máxima reacción superficial, es decir, si no trabajasen á igual coeficiente todas las referidas secciones, podríamos entonces alterarlas, reduciéndolas ó amplificándolas en área, hasta obtener aquel resultado. Tal operación, fácilmente alcanzada, como se comprende, nos conducirá á la obtención de estructuras llamadas de «igual resistencia», estructuras racionalísimas, y que son las que, entre todas las de su forma, tienen un *mínimum* de materia y, por tanto, un *máximum* de idealidad.

El género del material no tiene, como dijimos, absolutamente ninguna influencia, en la práctica, con

todo el sistema de cálculo expresado; no influyen tampoco la forma de la estructura ni la disposición de sus elementos; el método consiste, inmutablemente, como se ha explicado, en dibujar la estructura, dibujar el polígono de fuerzas, la línea potencial externa y aplicar la ley del trapecio. Lo que puede aparecer una variación de método, es sencillamente cuestión de sentido común, como efectivamente se deduce de una ligera reflexión sobre los siguientes y distintos ejemplos:

Supongamos que se trata de una forma estructural que, por sus condiciones y disposición, pertenezca á las clasificadas (por la agrupación que vimos) en el grupo de las unirresistentes con empuje, v. gr.: un arco despiezado en sillería. Como no podemos admitir para tal estructura más esfuerzos que los de compresión, pues si bien la piedra es también algo tensiva, la existencia de las juntas estereotómicas inutiliza aquella propiedad, resultará condición necesaria al equilibrio de la forma, el que las fuerzas actuantes contra ésta caigan en el núcleo central de las respectivas secciones, núcleo que puede fácilmente deducirse, recordando tan sólo su definición. Debiendo las fuerzas externas actuar contra puntos de estos núcleos, la envolvente de tales fuerzas, es decir, la línea potencial deberá pasar por ellos, y como el lugar geométrico de todos los núcleos forma un alma ó región central de la estructura, venimos finalmente á concluir que, la línea potencial de acción externa en las estructuras estereotómicas debe necesariamente evolucionar dentro de la región central de dichas estructuras. Tal es la primera

base de equilibrio. La segunda base consistirá en determinar la presión superficial en regiones diferentes de las diversas juntas; estas presiones satisfarán á las ordenadas del trapecio, y el medio para determinarlas está en la aplicación de su ley. En fin, la tercera condición de equilibrio está en el valor del esfuerzo cortante, que es, como sabemos, la proyección de la fuerza actuante sobre la sección considerada; valor que se procurará para evitar resbalamientos, acercar á cero cuanto sea posible, en los planos de las juntas, por medio de la normalidad de éstas contra la línea potencial de acción externa.

La estabilidad y resistencia de las formas estereotómicas quedan, pues, verificadas por la ley del trapecio, y esta misma ley verifica en rigor á las estructuras de propiedades opuestas, esto es, á las formas tensadas, v. gr.: un cable de puente, por cuanto la unirresistencia de estas formas las da el mismo carácter general de las estereotómicas, sin más que variar en tensión lo que allí es compresión, y con la particularidad maravillosa de que la flexibilidad ó dislocación de tales estructuras hace que vayan éstas, espontánea y rigurosamente, á amoldar su región central con la línea potencial de acción externa, con lo cual todo el cálculo verificativo se reduce á determinar la tensión á que trabajan sus secciones, en las cuales ha desaparecido el esfuerzo cortante ó transversal.

Si, por ejemplo, considerando ahora otro caso, tuviésemos que comprobar la resistencia de una estructura birresistente, esto es, apta para sufrir compresiones y tensiones, ora fuesen ambas reac-

ciones iguales ó desiguales, con lo que se clasificaría la estructura respectivamente en el grupo de las elásticas ó de las pseudoelásticas, el procedimiento á seguir sería en esencia el mismo: la línea potencial nos ofrece en cada sección de la forma su fuerza actuante, aplicaremos la ley del trapecio y deduciremos así las máximas compresión y tensión superficiales, viendo si superan ó no á los coeficientes respectivos á que puede trabajar el material de la estructura. Respecto al esfuerzo cortante que en cada sección obra, hay que considerar, como siempre, que éste es la proyección de la fuerza externa, ó vector correspondiente, sobre dicha sección; conociendo pues aquella proyección y esta área, la relación entre ambas nos darán el esfuerzo cortante por unidad superficial. No es otro, en síntesis, el camino seguido para calcular una armadura metálica, una bóveda cohesiva de ladrillo tabicado, etc. Haremos, sin embargo, notar que como el reparto de reacciones al esfuerzo cortante, se supone obedece á una ley parabólica que acusa su máxima ordenada en el centro ó fibra neutra de la sección, resulta que si la estructura á calcular tiene cabezas ó cordones exteriores y alma ó nervio central, se deberá considerar únicamente á la sección de éste, como área que resiste al esfuerzo cortante; así como, dado el reparto lineal de compresiones y tensiones originadas por la flexión, es lógico admitir lo que se supone también en la práctica, esto es, que dichas compresiones y tensiones son exclusivamente resistidas por los respectivos cordones referidos.

Un macizo de mampostería, un muro de conten-

ción, etc., se verifican por exacto procedimiento: trazado de la curva potencial y averiguación del trabajo en las diversas secciones de la construcción, gracias siempre á la ley del trapecio, que exige en este caso, como en las formas estereotómicas, el alojamiento de la curva potencial dentro del núcleo central de la estructura, si es que no quieren consentirse las tensiones, circunstancia que tendrá lugar únicamente cuando podamos confiar en la adherencia de los morteros.

Y, en fin, en todos aquellos casos en que la forma de la construcción no acuse de un modo claro sus miembros estructurales, ó, dicho de otra manera, su esqueleto resistente, para la aplicación del razonamiento sintético que venimos haciendo, bastará la descomposición ideal de la obra en partes individuales cuyo cálculo independiente iremos verificando. Así, una bóveda continua la fraccionaremos en regiones transversales, que representarán otras tantas estructuras arqueadas á las que aplicaremos el cálculo explicado; una cúpula esférica no será más que un conjunto de arcos meridianos; una viga continua de varios tramos no significa más que una serie de vigas de un solo tramo con empotramientos en los dos extremos ó en uno sólo de ellos, según la situación, etc. La intuición mecánica facilita estas descomposiciones, haciendo ver claro en cada caso, los esfuerzos á que están sometidas las estructuras resultantes.

Tal es la síntesis de cálculo de todas las formas constructivas en que de un modo directo ó indi-

recto y en mayor ó menor grado interviene la flexión; vamos ahora al de las estructuras constructivas, para cuyos elementos se admiten tan sólo compresiones ó tensiones uniformes. Estas estructuras son las americanas, cuyo prototipo está constituido por formas de enrejado resueltas con barras elementales articuladas entre sí.

IV.—LEY DE ARTICULACIÓN

EL cálculo de resistencia de las estructuras de enrejado articuladas, presenta, al igual que el de las estructuras que acabamos de analizar, una serie de variantes, de aspectos y de procedimientos en apariencia distintos; sin embargo, aquí, como allí, existe la esencia fundamental común, hija del empirismo correspondiente, por cuya circunstancia va á sernos también posible presentar la síntesis de todos los métodos, obteniendo así la regla general y evidente de comprobación de resistencia.

En las estructuras americanas de enrejado, se supone que las concurrencias de las piezas están resueltas con un pasador único ó eje de giro, lo que evita todo efecto de empotramiento elemental en cada una de las barras compositivas. Precisamente por la naturaleza de esta disposición, surgió el empirismo americano, llamémosle así, ó sea la explicación del reparto de esfuerzos en la materia de las referidas estructuras.

El cálculo de estas formas, privilegiada aplica-

ción de la Estática, parte, en definitiva, del principio de uniformidad de reacciones de la materia: las secciones transversales de cada barra, tienden á separarse ó á aproximarse paralelamente en virtud de las fuerzas externas, y á estas acciones se oponen las reacciones de la materia rigurosamente uniformes por unidad superficial.

Para que la verificación de este principio sea posible, es absolutamente necesario que cada barra del sistema esté sujeta á una sola fuerza cuyo vector representativo coincida matemáticamente con el lugar de los centros de gravedad de las secciones transversales de dicha barra. Las piezas compositivas de las estructuras de enrejado, deben, pues, teóricamente ser rectilíneas, y precisamente á lo largo de sus direcciones deberán actuar las fuerzas externas, lo que obliga á suponer la descomposición de éstas en aquellas direcciones.

Queda, pues, planteada la ley de resistencia de las formas de articulación; vamos ahora á aplicar esta ley cuya base original es, como en la ley del trapecio, la línea potencial de acción externa.

Concebida y proyectada la estructura, analizaremos las fuerzas á que, en definitiva, está sometida, y repartiremos tales fuerzas concentrándolas en los diversos nodos ó vértices de la forma de enrejado. Podremos con esto, aplicando los medios oportunamente ya reseñados, dibujar la correspondiente línea potencial de acción externa, que resultará también poligonal en virtud de la concentración referida.

Consideraremos una sección transversal cualquiera de la estructura, y la resultante de las fuerzas

existentes en una cualquiera de las dos regiones de dicha sección (resultante cuyo vector representativo en situación, magnitud y sentido, ya sabemos inmediatamente encontrar), la descompondremos gráficamente sobre las direcciones de las barras interesadas por la sección considerada. La determinación de este problema impone, y en esto principalmente nos apoyamos para calificar de empírico al sistema americano, que á lo más sean tres las barras cortadas por la sección, en cuyo caso las componentes sobre estas tres barras se obtienen así: se une el punto de encuentro de dos cualesquiera de las barras, ó sus prolongaciones, con el de encuentro de la tercera barra y la fuerza total. Descompóngase ahora esta fuerza total, sobre la tercera barra y sobre la línea que une los referidos puntos de encuentro. Tenemos ya, con esto, la componente que corresponde á la tercera barra; basta, pues, descomponer la segunda componente de la fuerza total sobre las dos primeras barras, para tener á su vez las componentes que á ellas corresponden y dejar así la cuestión resuelta. Tal es el sistema seguido por Culman, sistema que originará una figura polar recíproca de la forma estructural, en el caso de verificar la descomposición citada, y todas sus sucesivas en una sola figura aparte é independiente de la de la estructura, como inició Maxwell y concretó más tarde Crémona.

Finalmente, al mismo resultado se puede llegar, es decir, á la obtención de las tres componentes de las barras, aplicando el fecundo teorema de los momentos, ó de Varignone: basta tomar tres veces

los momentos del sistema total, formado por la fuerza externa y sus tres componentes; estos momentos se toman sucesivamente con respecto á los tres puntos de concurrencia de las tres barras que se trata de calcular, y, evidentemente, para cada expresión de momentos planteada, obtendremos el valor de la componente que corresponde á la barra no concurrente al respectivo centro de momentos. Este es el método de Ritter.

Los tres métodos que acabamos de indicar expresan, como es natural, exactamente lo mismo; su variación aparente les da el carácter de sistemas particulares en cuya retención los operadores principiantes se esfuerzan; sucede aquí lo que con los diversos aspectos de la ley trapecial, que ofrecen exteriormente otros tantos métodos distintos de una esencia ó de un principio rigurosamente constante. Ni en la ley trapecial ni en la de las formas de enrejado, hay matices diferentes; se trata, desgraciadamente, de dos leyes empíricas, pobres y simplicísimas, á las que apenas sin esfuerzo mental de ninguna clase, se llega á poseer con todas sus aplicaciones; es suficiente partir de una de ellas y entregar el lápiz y el decímetro á nuestra intuición mecánica, que nos conducirá así, con la claridad y evidencia de la más rudimentaria grafosfática, al resultado que buscamos.

Alcanzadas, pues, las fuerzas que cada barra debe resistir, resulta evidente ya la obtención de la escuadría de dichas barras. Observemos aquí cómo el método ó ley de las formas de enrejado, tiene alguna superioridad sobre la trapecial; pues amén

de que la actuación de las fuerzas externas la vemos en el sistema americano, con mucha más evidencia que en las piezas flexadas, se verifica que en estas piezas las secciones se *comprueban*, al paso que en el sistema americano las secciones de las piezas se *deducen*. Además, en las formas de entejado no hay necesidad de preocuparse de los esfuerzos transversales ó cortantes, ni de la flexión; aquí no hay más, según dijimos, que acortamientos ó estiramientos de barras, debidos exclusivamente á las encontradas componentes. El sistema americano es, pues, de una evidencia y claridad extraordinarias, y si no fuese por la limitación de que en breve hablaremos, dejaría casi por completo de ser empírico.

La diferencia entre acortamiento ó estiramiento de barras, es decir, la distinción entre las que son tensadas y las que son comprimidas, es una cuestión tan puramente intuitiva, de sentido mecánico tan claro, que no hay necesidad de forzar la memoria invocando regla alguna de las muchas existentes, para llegar á la averiguación; la situación relativa de las piezas estructurales y el sentido de la fuerza descomponente, nos indica con sencillez si una pieza está comprimida ó si está tensada.

La limitación del principio que constituye la ley de articulación de que venimos tratando, está precisamente en el número de barras que pueden ser cortadas por una sección transversal de la estructura. Si esta sección interesase á más de tres barras, como que sobre las restantes no puede hacerse descomposición determinada, dadas las condiciones

que nos da la estática, resulta que aparentemente dichas barras serán superfluas para el reparto supuesto de cargas. Sin embargo, cuando la carga sea dinámica, como que á cada posición de ella habrá nueva línea potencial de acción externa, ó, lo que viene á ser lo mismo, nuevos repartos de fuerzas, podrá ocurrir que una barra tensada por un reparto primitivo de cargas, resulte ahora comprimida para la nueva repartición, ó viceversa. Ahora bien; como en el caso de tener las barras una cierta longitud, el coeficiente adoptado para su trabajo á la compresión es siempre menor que el de tensión, pues de esta manera se evitan los peligrosos efectos del flambeo de dichas barras, resultaría necesario para combatir tal flambeo que, en previsión del cambio de sentido del trabajo de una barra, se la calculase siempre en el supuesto de que debe trabajar á compresión. Para evitar esta circunstancia, que no sólo nos conduciría á la adopción de grandes secciones para todas las barras de la estructura, sino que implicaría la admisión de alternancia de esfuerzos en el trabajo de aquéllas, cosa que no es conveniente, es por lo que se apela, en fin, al empleo de barras supletorias ó contradiagonales, con lo que se logra que al iniciarse la compresión en una diagonal, pase inmediata y automáticamente á trabajar por tensión la contradiagonal respectiva, descargando así á aquella barra que queda en descanso completo. La conveniente generalización de este principio conduce, á estructuras de múltiples barras y en forma reticular ó de espeso enrejado.

Á pesar de lo que acaba de exponerse, dispó-

nense también, en casos de cargas estáticas, formas constructivas de malla reticular.

El cálculo de todas estas estructuras de múltiples barras puede hacerse de dos maneras: ó acudiendo á la teoría de la Resistencia de materiales, para con sus principios suplir la deficiencia de la Estática en el problema de descomponer la fuerza exterior en un número de componentes superior á tres, ó en su defecto (y ello constituye el método más práctico usualmente seguido), apelar á la siguiente hipótesis, completamente empírica:

Supónese descompuesta á la estructura reticular en otras de formas simples, estrictamente indeformables, es decir, que en ellas una sección transversal cualquiera no llegue nunca á interesar más de tres barras á la vez. Esta descomposición puede llevarse á cabo por mediación de planos medios de la forma estructural, planos que usualmente resultan ser los proyectantes verticales de la que sería fibra neutra de la estructura. Naturalmente que para cada forma estructural elemental así obtenida, habrá un respectivo reparto de fuerzas de tal modo dispuesto, que las fuerzas totales á que, en definitiva, esté sujeta la estructura general ó primitiva, representen la suma de todas las fuerzas que en conjunto se han empleado en los repartos sucesivos. Procédese ahora al cálculo individual de cada una de las estructuras sencillas, obtenidas en la forma y condiciones referidas, con lo cual conoceremos los esfuerzos á que están sometidas sus correspondientes barras. Evidentemente, la superposición de todas las estructuras sencillas nos ofrecerá la forma

estructural primitiva, y las barras que en esta superposición coincidan, estarán, en definitiva, expuestas á una fuerza total equivalente á la suma de las fuerzas que obraban en las barras coincidentes.

Es preciso advertir, que este práctico método que acabamos de referir, conduce á resultados cuya exactitud es tanto más problemática cuanto mayor es el número de descomposiciones necesario para la obtención de las estructuras elementales.

Todo cuanto llevamos dicho en el desarrollo de la ley de articulación que preside á las formas americanas de enrejado, tiene aplicación completamente general, pues los raciocinios seguidos son enteramente independientes del dibujo de la estructura, habiéndose tan sólo apoyado en el principio de articulación que, como es natural, debe conservarse para el rigorismo del cálculo; por consiguiente, con dicha ley, se calcularán las vigas rectas y las en arco, tengan ó no tengan reacciones inclinadas, y asimismo se calcularán también los cuchillos de armadura, los puentes y en definitiva todas las formas constructivo estructurales.

Antes de proseguir, insistiremos en una particularidad que ya antes se hizo notar relativamente al principio de articulación. Si este principio está aplicado á una estructura indeformable por su triangulación, y además cuidadosamente construída, de tal modo, que haya un perfecto ajuste entre todos los pasadores y los taladros de las piezas conectadas, se verificará que mientras la estructura no esté sujeta á cargas fatigantes, su deformación será casi nula,

como si se tratase de una estructura ideal, absolutamente rígida. Como que en estas mismas condiciones de rigidez, está sensiblemente supuesta una viga ó forma europea, es decir, una estructura de enrejado con enlaces resueltos por ribeteado, infiérese que tal estructura, cuya verificación usual y recomendable se resuelve por la ley trapecial, podrá también calcularse por la ley de articulación, en el supuesto, bien entendido, de que la forma no esté apenas fatigada. Este último concepto es el distintivo característico entre la ley de articulación y la trapecial; la primera es universalmente aplicable á las formas americanas articuladas, sea la que fuere la fatiga, pues tales formas no dejan jamás, ni en el momento de ruptura, de obedecer á la descomposición de fuerzas que originó su ley de equilibrio; no puede, pues, esta ley ser substituída por la trapecial; al paso que la trapecial, no sólo es de resultados problemáticos para casos de excesivas flexiones ó cargas en los que las deformaciones de la fibra neutra no puedan desprenderse, sino que puede, además, ser substituída por la ley de articulación en las condiciones citadas, circunstancias que indudablemente nos ofrecen nuevo motivo para afirmar la inferioridad del empirismo ó ley trapecial.

V.—BIOLOGÍA ESTRUCTURAL

LA síntesis del cálculo que se acaba de desarrollar, ofrece un camino claro y elemental, un medio general é instintivo para la comprobación de resistencia en toda forma constructiva. No hay nece-

sidad de invocar reglas de ningún género, ni recordar fórmulas de clase alguna; se reduce, digámoslo así, el problema, á una especie de análisis biológico de la estructura, á un estudio mixto de anatomía y funcionamiento, que el operador realiza con un criterio exclusivamente personal, con la libertad y exención de trabas característica de la observación desplegada ante un hecho común y sin legislar, para cuya formación de concepto sabemos que el observador apela instintivamente á su interior y á la impresión de su espíritu como única fuente de luz. Se va, con este modo de sentir, de una manera directa y casi mecánica al trazado de la línea potencial de acción externa, dato que nos revela el estado crítico de la estructura, ó sea el conjunto de las fuerzas que la atacan, los puntos vulnerables y las regiones que tiene á salvo.

La construcción de la estructura nos dará su fisiología, es decir, su funcionamiento ó modo de reaccionar contra aquellas fuerzas externas; veremos por la construcción también, si la forma funciona flexándose ó por reparto de reacciones á lo largo de sus barras, y entonces, evidentemente, la aplicación respectiva de la ley trapecial, ó de la de articulación, nos acusará el peligro local, en el punto en que se aplique, y el *diagnóstico* estructural quedará con claridad enteramente formulado.

PARTE III

ESTRUCTURAS BIRRESISTENTES PSEUDOELÁSTICAS

I.—MONOLITISMO MEGALÍTICO

EL monolitismo, en su acepción más general, significa la construcción pétreo sin despiece, formando, por consiguiente, el miembro estructural que se considere, una masa única sin solución alguna de continuidad. Pero las formas de esta propiedad pueden alcanzarse de varias maneras, entre las que figuran como más importantes, el sistema lapidario y el sistema cohesivo. El primero de dichos sistemas es el que precisamente caracteriza al monolitismo megalítico.

Este género de construcción, resuelta antiguamente por la imperfecta escultura ó talla de una sola y única masa de roca, debe en rigor significar la más primitiva y rudimentaria manifestación de toda estructura, puesto que en ella no existen ni la adjunción de piezas ni consolidación de elementos de ninguna clase, circunstancias cuya acentuación van indefectiblemente marcando el progreso de la ciencia arquitectural. Efectivamente, la idea de reunir ele-

mentos para estructurar en conjunto una forma, revela una idea, un principio compositivo sin duda muy superior al entrañado por el simple desmonte exterior de una masa ó por la excavación de una roca; y esta observación resulta comprobada en todo orden de construcciones, incluso en la carpintería naval, que para haber llegado á la concepción estructural de un buque formado por baos, cuadernas y calafateado, ha tenido que partir de la rudimentaria operación necesaria al ahuecado de un tronco.

En la construcción pétreo, por consiguiente, se verifica también esta ley, y aun en sus propios orígenes se encuentran grados sucesivos que acusan escalonada perfección; así, el monolitismo megalítico realizado en bloques transportados (menhires, cromlechs, etc.), tiene un fondo de indudable superioridad sobre los monumentos autóctonos, partes integrantes de un yacimiento natural de roca, labrado localmente bien por el exterior bien por el interior, como son las obras trogloditas, sin preocupación alguna, no ya de la adjunción de piezas, sino hasta del transporte de la masa general. Mientras no haya elementos y remoción de masas, no hay construcción propiamente dicha, y por este concepto la arquitectura autóctona no puede ofrecer interés al estudio de las estructuras.

En cambio, cuando la obra tiene fragmentos confeccionados aparte, poseyendo cada uno de ellos su destino, su lugar determinado y su función, entonces es cuando aparece la idea dominante que concibe y la reflexión que ejecuta, surge la potencia combinatriz y revístese de interés toda la construc-

ción; esto es lo que sucede en los países griegos y orientales en general.

El monolitismo megalítico tiene un notable carácter mecánico al que indudablemente es debida la superioridad de la construcción concrecionada y cohesiva, que en cierto modo es monolítica también gracias, sin embargo, á un proceso artificial; y este carácter es el de que absolutamente toda la forma constructiva, es decir, toda la masa, reacciona por entero contra las fuerzas externas; de manera que por ejemplo, una carga concentrada en un punto cualquiera, hace trabajar á toda la estructura en virtud de la birresistencia y continuidad de su material. Si esta birresistencia desapareciese, es decir, si la resistencia tensiva de la piedra se anulase, conservando tan sólo su aptitud para contrarrestar las compresiones, el monolitismo megalítico apenas tendría importancia estructural, y solamente serían perdurables aquellos de sus monumentos cuyos accidentes y embates no hubiesen desalojado ni por un momento, de su núcleo central, á la curva potencial de acción externa.

Es, pues, evidente que á su birresistencia deben la inmunidad muchos monumentos monolíticos, cualidad de que carecen las construcciones litópolas ó de piezas independientes, puesto que todas sus juntas separatrices significan otras tantas regiones de resistencia nula á los trabajos tensivos. La permanencia de estas construcciones es, pues, mucho más difícil de alcanzar.

II.—PRINCIPIO ORGÁNICO DE AGREGACIÓN

LA naturaleza, maestra admirable de todas las ciencias, nos ofrece también para la arquitectura fecundos principios constructivos. Uno de ellos es el de asimilación, gracias al cual unas veces se generan las estratificaciones y cristalizaciones compactas de los yacimientos de roca y en otras se configuran las cavernosas estructuras de estalactíticos techos.

El proceso mineralógico, productor de tales formas es, indudablemente, muy lento; pero si artificialmente lo aceleramos para proporcionar su duración á los actos de nuestra vida, poseeremos un medio maravilloso para materializar las estructuras que nuestra fantasía concibe; no consiste en otra cosa el principio orgánico de la agregación.

Por la realización de tal principio, se alcanzan las mamposterías en general, ó conjunciones de materia mineral no metálica, en gran número de elementos componentes, unidos de tal modo que forman una sola masa, es decir, un monolito de artificial pudinga, alcanzada con la mixtura de mortero y piedra ó ladrillo. Las formas constructivas llevadas á cabo por este procedimiento de conglomerado, gozarán, pues, de la birresistencia, al igual que los monumentos megalíticos antes comentados, birresistencia que crecerá con la capacidad tensiva de los elementos constituyentes y con la cohesión entre los mismos, producida, evidentemente, por el aglutinante em-

pleado. Otro de los factores que influye directamente en la resistencia final alcanzada por aquellas formas, estriba en la presión á que en la elaboración se someten sus elementos constitutivos, hecho que, en rigor, no tiene otro objetivo que favorecer la cohesión molecular de la materia, fenómeno á que se da una importancia capital en la fabricación mecánica de los elementos de construcción, como, por ejemplo, en los llamados de «piedra artificial», cuya profusa abundancia es de sobras conocida.

El *desiderátum* del principio de agregación ó concreción, sería alcanzar estructuras que, indistintamente, tuviesen en todas sus secciones igualdad absoluta de resistencias unitarias entre la compresión y la tensión. En este caso, la construcción tendría elasticidad completa y no habría diferencia mecánica alguna entre una obra de concreto y una armadura de acero; en ambas, la relación de coeficientes de trabajo (circunstancia que, como hicimos notar, clasifica á la estructura) valdría exactamente la unidad.

Pero, desgraciadamente, aun no ha sido posible llegar al anterior ideal, por cuanto, las cualidades naturales y la adherencia de los materiales que forman el concreto, hacen actualmente superior la resistencia á la compresión que á la tensión, resultando, sin embargo, esta última suficientemente digna de tenerse en cuenta, para que con toda seguridad podamos someter á ciertos esfuerzos tensivos las estructuras concrecionadas y cohesivas, circunstancia por la cual hemos calificado á éstas de «pseudaelásticas», y que nos permitirá, por consiguiente,

fantasear la imaginación, creando un mundo de formas pétreas constructivas con perfiles hasta cierto punto independientes de su línea potencial de acción externa, apreciables cualidad de que no podrán nunca gozar las formas doveladas.

El principio de que estamos tratando atrae hoy poco la atención, tal vez por la misma antigüedad de su origen que le resta interés de novedad; pero de la disección de sus dos típicas manifestaciones, que en seguida vamos á hacer, deduciremos indudablemente cómo el principio de agregación es el llamado á revolucionar los sistemas estructurales y es el que lleva, además, de entre todos los métodos constructivos, una orientación más precisa, y actualmente, más rápida marcha en el camino de perfección.

III.—EL CONCRETO Y SUS ESTRUCTURAS

LA obra concrecionada es la manifestación primera del anterior principio orgánico de agregación, y esta obra que tiene por base el empleo de la cal, se remonta á los períodos antiquísimos en que, según Plinio, levantaban los fenicios sus fortalezas con bloques artificiales que debían de ser elaborados con un mortero imperfecto de cal grasa y materia terrosa análogo al que, según fidedignas comprobaciones, usaba el pueblo persa, donde se encuentra el indudable germen de las escuelas cohesivas posteriores.

Sin embargo, la implantación europea del sistema concrecionado, no tiene lugar hasta el contacto con

Roma de los pueblos asiáticos. La civilización romana, pues, principalmente desde fines de su período republicano y durante toda la época imperial, es á quien se debe el entero desarrollo de la Escuela de concreto, renacida en nuestros días, hace apenas cincuenta años, con el nombre de hormigón.

Las situaciones políticas de los pueblos han sido siempre las causas decididoras de todas sus manifestaciones en no importa qué orden de la actividad; por esto, durante el apogeo de la época romana, cuando la esclavitud ofrece al arquitecto una fuerza ilimitada, aunque inexperta, se engendra casi espontáneamente el sistema estructural que no requiere inteligencia pero sí un gran número de brazos para llevar las formas á su realización. No obstante, esta causa política hubiese sido completamente estéril en la arquitectura, sin otra circunstancia puramente geológica, cual fué la presencia de las arcillas cocidas naturalmente, es decir, de las arenas volcánicas ó puzolanas esparcidas por la localidad romana, arenas que por su propiedad química de ser atacadas por la cal grasa, única entonces conocida, formaban con ella el material cuya hidraulicidad y resistencia ha dado universal fama de solidez á las construcciones de Roma.

Sin embargo, la solidez de aquellas estructuras concrecionadas es principalmente debida á una acción secular, puesto que ni las cualidades originarias del mortero empleado, ni la contextura de las concreciones realizadas, pueden competir con los morteros del siglo XX y con sus fábricas de hormigón. Efectivamente; los morteros que á base de

cemento Portland hoy poseemos, y cuya obtención nos ha absorbido toda la última centuria en constantes ensayos é intensos estudios, pueden ya, á los treinta días de su fraguado, competir con los morteros del panteón de Agrippa y con otros monumentos romanos de extraordinaria dureza, que cuentan numerosos siglos de existencia. Además, el concreto romano distaba mucho de poseer la contextura resistente y uniforme que caracteriza á nuestros hormigones; el concreto romano, en fin, puede afirmarse rotundamente que no era hormigón, sino simplemente un estratus de capas alternadas de mortero y piedra cascada, y semejante contextura nunca tendrá la resistencia de una mezcla rigurosamente uniforme y compacta sin estratificación de ninguna clase, como significan, al fin, los hormigones que hoy fabricamos.

El concreto romano viene, pues, en definitiva, á reducirse á una roca esquistosa de formación artificial, generada por hojas horizontales de piedra y mortero dispuestas sobre un cimbraje ó alojadas entre dos muros, según se tratase de erigir bóveda ó muralla, roca cuya final cristalización tardaba bastante en verificarse merced á la lentitud de fraguado y endurecimiento de los materiales usados. Por este medio, naturalmente, debían las estructuras de tener un extraordinario grueso, originándose por consecuencia una rigidez característica que permite el comparar aquellas formas cupulares á verdaderos cascarones exentos de elasticidad y productores exclusivamente de reacciones verticales.

La fuerza elástica de las estructuras concrecionadas no se presentó con sensibilidad suficiente, hasta

tanto que el establecimiento de los sardineles de ladrillería en forma de nervios empotrados en la masa, permitió la reducción de los gruesos, en cuyo preciso instante se inclina la reacción, apareciendo, por consecuencia de su componente horizontal, un empuje, que es contrarrestado por un aumento de peso en los muros de estribo. La reducción del espesor de la bóveda implica, pues, un aumento de espesor de los estribos, irrisoria compensación que conduce al arquitecto romano al ensanche y ahuecado de los muros, afirmando así un maravilloso instinto mecánico que sintetiza completamente toda la teoría estática de los momentos de las fuerzas. El «Panteón» es una demostración elocuente de estas observaciones.

No obstante, aquí muere la racionalización mecánica de las estructuras romanas por consecuencia necesaria de la característica general del concreto. Realmente; la mezcla de concreto, bien sea practicada en la forma de los romanos, bien en la de nuestros hormigones, no puede calificarse, por buenos que sean los materiales empleados, de verdadero sistema cohesivo, es decir, de sistema considerablemente resistente á la tensión, y de un modo particular si se emplea en gruesos pequeños, condición necesaria para la economía y la factibilidad de formas estructurales ligeras. Es un hecho innegable que no se construyen arcos ó cúpulas de espesores reducidos con sólo el empleo de hormigón; pero, en cambio, si substituimos la grava de éste por otro género de material que en vez de estar dispuesto á granel y sin ley en la masa, permita por su forma,

amén de la adherencia, una orientación armónica y común en todos sus elementos ó una geometría particular en su posición, digámoslo así, entonces será, como veremos, cuando se plantea el verdadero sistema cohesivo de que vamos á tratar.

Al hormigón, este gran favorito de la gruesa Ingeniería de obras, que ha resuelto las fundaciones de arquitecturas colosales y que está en la actualidad permitiendo la separación de las dos Américas por el canal del Panamá, le está precisamente, en este orden de trabajo, reservado el gran papel de atlante y de coloso, pero en las formas estructurales que se elevan gentilmente y avanzan en sentido horizontal, engendrando intensas flexiones, no puede ni podrá nunca, por sí solo, competir con la portentosa cualidad elástica que se puede provocar en los materiales pétreos tratados por el sistema cohesivo. Aunque bajo el mismo principio orgánico de la *agregación*, las estructuras *co:crecionadas* difieren, pues, esencialmente, de las formas *cohesivas*.

IV. — LA CONSTRUCCIÓN COHESIVA

LA significación verdadera de forma cohesiva, es la de una estructura con sus células formatrices totalmente orientadas y fuertemente adheridas, constituyendo un conjunto birresistente y capaz, por lo tanto, de sufrir esfuerzos de tensión, además de los de compresión.

Ordinariamente, estas condiciones se satisfacen

con el ladrillo, con el aparejo de éste y con un buen mortero, circunstancias que respectivamente vienen á resolver la existencia de las células, su orientación y la adherencia entre las mismas.

Este principio orgánico lo encontramos en los distintos períodos arquitecturales de varias maneras realizado, incluso algunas veces con el racional empleo de alfarería hueca; y este mismo principio renace en la actualidad, con un extraordinario vigor cohesivo, por efecto de la posesión sintética de las experiencias pasadas y principalmente por los progresos recientes de la ciencia química de los morteros. De seguir acentuando su perfección, serán las estructuras cohesivas, indudablemente, las llamadas á revolucionar el arte de construir y emanciparlo, tal vez, hasta del hierro, material engañoso por su momentánea potencia, de utilidad discutida y de nula perduración en su empleo al descubierto.

La primera manifestación de la escuela cohesiva la encontramos, indudablemente, en las construcciones de la Persia y del Egipto, realizadas con un rudimentario mortero de cal y además con el ladrillo, legado precioso de las remotas civilizaciones asirias. Estas construcciones son de un modo positivo las precursoras verdaderas de las célebres escuelas de arquitectura cohesiva, implantadas en los albores de la era cristiana, escuelas que, partiendo de Bizancio, se desarrollan paulatinamente, creando las inmortales bóvedas que por generación portentosa y por misterios de cohesión se tienden en el vacío, engendrando después la construcción musulmana y erigiendo, por fin, en España, los soberbios ejemplares

de Córdoba y de Granada. La tierra cocida, moldeada previamente en diversas formas, y además el mortero, son los materiales fecundos de donde han resurgido todas aquellas arquitecturas cuyas flores más preciadas condensa admirablemente la prodigiosa estructura de Santa Sofía, de Constantinopla.

La época medioeval, con sus extraordinarios alardes en mampostería de talla y su prescindimiento del sistema cohesivo, demuestra un increíble dominio instintivo de la estática, creando las catedrales góticas, estos místicos poemas de piedra que nos recogen el espíritu y nos sorprenden la inteligencia, pero no logran, sin embargo, desterrar más que temporalmente á la estructura cohesiva, que resucita después en el renacimiento arquitectural con la vida y el vigor luminosamente reflejadas en los grandes ejemplares de la arquitectura italiana.

Brunelesqui, en el siglo XV, es quien de una manera contundente afirma la potencia de la construcción cohesiva, erigiendo la cúpula grande, gentil y hermosa de Santa María de las Flores, con una osadía y facilidad nunca soñadas. Brunelesqui es quien en esta misma bóveda condensa todo un presentimiento de la teoría de los momentos de inercia, estructurando, al efecto, lo forma con hoja doble y espigones intermedios, con lo cual campea la T en la construcción cohesiva, exactamente como si se tratase de una estructura metálica, circunstancia, en verdad, de pura lógica, por ser birresistentes, al fin, ambas especies estructurales.

Sin embargo, todas las citadas manifestaciones no constituyen más que antecedentes genealógicos

de la prosapia arquitectural, digámoslo así, relativamente á la construcción cohesiva, puesto que sus estructuras son una función directa del material adherente y mortero, y por consiguiente los períodos de la anterior reseña, que al fin reflejan la historia de dicho material, deben ir seguidos de la época brillante iniciada, á fines del siglo XVIII, por Smeaton en la construcción del célebre faro de Eddystone, por Parker con la invención de su cemento romano, y principalmente, ya en el siglo XIX, por el gran ingeniero Vicat, creador de la industria de cementos-cales hidráulicos, y por el descubrimiento del Portland artificial llevado á cabo por el famoso yanqui Apsdin. Durante esta época, pues, de tan fecunda labor, se inventa é industrializa, de un modo definitivo, el material de gran resistencia y de potente energía cohesiva llamado mortero hidráulico, cuya cristalización completa no exige para nada la presencia del aire, maravillosa y característica cualidad de que no gozaron los morteros históricos.

Se comprende ahora con evidencia, el porqué las estructuras cohesivas, orgánicas y vivas, en fin, cuyo germen hemos encontrado tan lejos, allá en las primitivas escuelas asiáticas, educatrices de toda la Europa, no hayan llegado hasta hoy á alcanzar su ufanía y su desarrollo completos. Hoy, el principio cohesivo llega efectivamente á resolver por sí solo, no ya la parte de macizo y forjado de una obra, sino su región estructural ó resistente, es decir, su armazón, ó esqueleto: es, en realidad, frecuente el

ver al aplanado y vibrante arco de ladrillería y Portland tenderse entre pilares del mismo material, distanciados á más de veinticinco metros, formando así una osatura que substituye, á veces, con ventaja á la resuelta por columnas de fundición y cuchillos metálicos de armadura. En las construcciones del comercio y de la industria, caracterizadas por la cubrición de grandes plantas, la osatura anterior se multiplica frecuentemente, tendiéndose aquellos arcos entre tramos sucesivos, formando naves longitudinales y transversales, solamente realizadas en armazón cohesivo y con exclusión entera del hierro; pues si bien figura éste en algunos casos como cuerda de los arcos, para contrarrestar su empuje, viene en otros completamente eliminado resolviéndose el contrarresto por un órgano exterior, es decir, por espigones ó muretes al final de las tramadas, y cuyo papel es rigurosamente el mismo que el desempeñado por los contrafuertes de los templos medioevales.

Á la audacia del constructor catalán es á quien se debe en España tal método estructural y su infinidad de variantes, que, naturalmente, al enriquecer al método, nos permiten realizar con los imperecederos materiales de la arcilla y el cemento, todas las formas que pueda dictar la exigente arquitectura del siglo presente.

Merece notarse que el verdadero papel celular que hemos asignado al ladrillo en todo el sistema estructural de la construcción cohesiva, está notablemente caracterizado en la ladrillería hueca fabricada mecánicamente. Los órganos arquitecturales así realizados, tienen una contextura tan admirable-

mente orgánica por virtud de la célula hueca y del material cohesivo que la adhiere fuertemente á sus inmediatas, que bien podríamos calificar de verdadera *histogénesis estructural* á su correspondiente método constructivo, método que, en rigor, no significa más que la reaparición moderna del seguido en las construcciones bizantinas y musulmanas, al emplear en ellas las ánforas y otros elementos de alfarería hueca. La construcción cohesiva en ladrillo hueco, por sus consiguientes ventajas de ligereza y aislamiento, tiene en la actualidad una grande aplicación en todas las localidades de clima extremado.

Pero, nos resta aún el definir la verdadera apoteosis de la construcción cohesiva ó sea su grandioso paso de concurrencia á la estructura completamente elástica, y lo decimos así, porque realmente á un solo punto se dirigen ambos géneros estructurales, á un punto único que nos ofrece el medio de explotar enteramente á la materia en general, á un punto, en fin, inaccesible á la ciencia pura, pero que ya es posesión completa de nuestro sentido práctico: la reacción, por flexión, del material pétreo. Muy cerca ya de este ideal ha, indudablemente, llegado la construcción cohesiva que estamos definiendo, pues de otro modo no se explica la permanencia alcanzada por las estructuras arqueadas, que antes se han referido y cuyo equilibrio sería comprometido en extremo si tuviere por única razón el alojamiento preciso de las curvas de las presiones en los núcleos centrales de los arcos correspondientes; con seguridad, pues, en aquellas estructuras hay algo

de deflexión perfectamente resistida. Esta deflexión es aún más comprendida en los muros ordinarios de mampostería en ladrillo, pues es notorio y sabido que puede en tales muros, una vez el mortero ha cristalizado, el abrirse grandes huecos adintelados de luces considerables, cosa que no sería posible si el muro que así queda colgado no trabajase exactamente como una viga flexada.

Y á propósito de esta observación, hácese digno el notar la abundancia lastimosa del metal que á veces se coloca en forma de viguetas para adintelar los huecos referidos, ya que el máximo trabajo de tales viguetas consiste en soportar un triángulo de obra que gravita sobre las mismas, y aun la totalidad de la carga es puramente temporal, pues dura sólo el tiempo que el mortero necesita para fraguar, esfuerzo que se bastaría á sufrir un simple apeo accidental, atinadamente dispuesto.

Vemos, pues, en resumen, como la mampostería de ladrillo y buen cemento, tiene su sensible resistencia á la flexión, pero esta resistencia se puede hacer crecer en proporción sorprendente, y precisamente éste es el grandioso paso verificado por las estructuras tabicadas.

V.—ESTRUCTURAS TABICADAS

ESTE género de estructuras, que simboliza la conclusión definitiva del sistema cohesivo, tiene una característica singular que le distingue de todas las demás nacidas por el principio general orgánico

ó de agregación. Tal singularidad es sencillamente una cuestión de orientación de elementos.

Si estos elementos ó células formatrices, es decir, los ladrillos, se les orienta, al configurar la estructura, de manera que sus caras de mayor extensión sean paralelas á la dirección de las fuerzas externas en vez de serle sensiblemente normales, que es el caso en que se suponen las formas cohesivas anteriormente tratadas, obtendremos lo que se llama una estructura tabicada.

Es, en fin, la estructura tabicada una forma cohesiva en la cual sus elementos se han polarizado en el sentido de la línea potencial de acción externa. Por esta disposición, ó aparejo por canto entre los ladrillos, resulta una fina lámina de obra de fábrica, con la contextura del tabique, lámina cuyo afinamiento ó delgadez es altamente necesaria á los fines de su realización y de su trabajo, por lo cual se confecciona usualmente en rasilla ó baldosa de poco espesor en substitución del ladrillo común.

Debe, no obstante, hacerse notar que una sola lámina de fábrica, en las condiciones definidas, no gozaría jamás de las maravillosas condiciones elásticas que han dado fama á las estructuras tabicadas. Por excelente que fuese el mortero que enlaza ó suelda las testas de las rasillas, resultaría siempre una forma de equilibrio casi inestable, equivalente, al fin, á una estructura de piezas independientes, cuya dislocación y caída es absolutamente inevitable en el instante preciso en que sale de su núcleo la línea potencial de acción externa; peligro inminentísimo en la referida lámina de fábrica, dada la delgadez de

su espesor, especialmente cuando su forma no se desarrolla precisamente en sentido vertical, sino que avanza horizontalmente en el espacio siguiendo no importa qué trayectoria.

La lámina elemental no goza, pues, de la resistencia característica de las llamadas estructuras tabicadas; esta resistencia surge espontáneamente, cual misteriosa sorpresa mecánica, desde el momento en que se procede al doblado de aquella lámina, revisitiéndola al efecto, cual de un forro general, por medio de una segunda lámina de igual naturaleza y confección que la primera, con la condición indispensable de soldar á ambas por medio de mortero y de evitar además su coincidencia de juntas. Desde este instante, la estructura pasa categóricamente á la posesión de una birresistencia notable y muy superior á la de las demás formas cohesivas, birresistencia que va progresivamente aumentando con la cualidad de los materiales de construcción, hasta el punto que no es ya quimérico esperar un día en que los esfuerzos tensivos que aquéllos puedan sufrir, se nivelen sensiblemente con los de compresión, en cuyo caso la estructura tabicada alcanzaría la dócil flexibilidad del sensible muelle de acero. Actualmente, la resistencia tensiva de la arcilla cocida, y en especial la del suelo de Cataluña, así como la potencia á que han llegado los modernos cementos, permite ya el confiar seguramente en la marcadísima elasticidad de las formas de que tratamos, hasta el punto de que su cálculo se realiza por la estricta aplicación de la ley trapecial con despreocupación entera de ajustar el perfil de la estruc-

tura á la línea potencial de acción externa, verificándose, en fin, estas formas de la misma manera que se verifican las de hierro laminado.

Estas propiedades elásticas de las estructuras tabicadas, vienen, tal como se ha dicho, principalmente provocadas por la íntima unión entre sus dos hojas elementales, unión resuelta, como se comprende, por la potente soldadura que produce el buen mortero, quien es el que reacciona, además, contra el máximo desgarramiento longitudinal que se presenta invariablemente en la región de fibras neutras de toda forma flexada (*). Vienen, por otra parte, singularmente favorecidas dichas propiedades en virtud de la alternancia de juntas entre las rasillas, y del mínimo número de las de orden transversal ó normal á la estructura, número mínimo que evita las contracciones y que efectivamente se alcanza por la disposición en panderete de dichas rasillas, es decir, por su aparejo de tabique.

Si la hoja elástica así obtenida, es decir, por la soldadura de dos láminas, se la desea aumentar aún en resistencia, bastará sencillamente añadirle, por soldadura de mortero también, una tercera y aun una cuarta lámina extendidas á lo largo de toda la superficie de la primera, ó interesando solamente las

(*) El valor teórico del desgarramiento longitudinal por unidad de superficie que, por efecto de la flexión, se produce en un punto de un plano paralelo á la capa de fibras neutras, es igual: al momento estático, con relación al eje neutro, del fragmento de sección transversal que separa el plano considerado, multiplicado por el esfuerzo cortante, y dividido por el producto del momento de inercia de toda la sección transversal, por el ancho del prisma en la región cuyo desgarramiento se analiza.

regiones de más flexión, es decir, de máxima separación para con respecto á la línea potencial de acción externa, análogamente á lo que se hace en el reparto de los palastros que estructuran las cabezas de una jácena ó viga de puente.

El origen de este interesantísimo método estructural no está en nuestros tiempos, ni siquiera en la era cristiana, sino que se remonta á las construcciones paganas de la antigua Roma. En el instante en que los romanos doblan, para reforzarlo, al cimbraje permanente de baldosa que hace típico al método constructivo de sus obras de concreto, nace de un modo espontáneo la bóveda tabicada, como se la ve ya con sistemático empleo en las Termas de Caracalla. La mágica de la estructura, resulta tan extraordinariamente *frappante*, que á partir de la civilización romana, corre velozmente por la costa latina, levantándose numerosos ejemplos en toda la larga cintura que media de Nápoles á Cartagena, ejemplos que son después profusamente imitados en las regiones del interior ya desde fines de la época gótica, pero especialmente durante el pleno Renacimiento. Sin embargo, la elasticidad de estas formas dista un grado inmenso del que alcanzan las que hoy construimos, debiéndose tal circunstancia á la calidad excelente de los morteros modernos que han venido á reemplazar á la cal grasa y al yeso, únicos materiales entonces empleados. La riqueza de tales morteros, hoy universalmente fabricados, y las circunstancias especiales de nuestra rasilla regional, produjeron la admirable conjunción que ha dado

fama mundial á la «bóveda catalana», así llamada porque, efectivamente, á Cataluña se debe el mayor grado de perfección del principio tabicado; pero es indudable que nuestra misma estructura puede realizarse en países diferentes tratándola con nuestras prácticas y atendiendo convenientemente á la fabricación del ladrillo, circunstancias que, comprendidas, han originado su actual desarrollo no sólo en las demás regiones españolas, sino también á la otra parte del Atlántico, allá en la América del Norte, donde se conoce al mágico arco con el nombre de *timbral-arche*. Es, no obstante, digno de notarse que para originar tal desarrollo ha sido necesaria la presencia de constructores catalanes, tal era la fantasmagoría de que estaba revestida, y aun lo está en otras naciones, esta elemental hoja de doble tabique que constituye la más preciada herencia de los ingenieros romanos.

Una de las características de la estructura tabicada, cuyo principio y evolución se acaba de reseñar, es, indudablemente, el empuje que imprime contra los puntos en que apoya, empuje que proviene de la necesidad de oponerse á la libre dilatación de las formas. Si su contextura y sus materiales permitiesen la igualdad absoluta de resistencias tensivas y comprensivas, podríase montar la estructura sobre rodillos de dilatación, con lo cual se deformaría, produciendo el consiguiente incremento de reacciones elásticas interiores, hasta el preciso instante en que éstas equilibrasen á las fuerzas externas, instante en que cesaría completamente toda

deformación. Este es el caso de los arcos metálicos de reacción vertical.

La manera de evitar la libre dilatación, esto es, de contrarrestar el empuje, es, evidentemente, una cuestión secundaria, pero que, sin embargo, algunas veces ha sorprendido, disfrazando á la estructura con un sello personal; no obstante, repetimos que esto es un sencillo accidente de la construcción tabicada, como lo es, en general, para toda estructura, puesto que, en efecto, el medio de equilibrar el empuje no modifica jamás la esencia de la forma constructiva; así, por ejemplo, un arco de reacción inclinada, trabaja y se calcula exactamente lo mismo, tanto si está alojado entre muros de suficiente momento estático para resistir el empuje, como si este empuje está contrarrestado por un adecuado tensor ó, en fin, por pilares inclinados, que contengan en su eje, á la reacción final del arco de que se trata. Si, además de esta libertad de contrarresto, se tiene, pues, en cuenta otra libertad no menos grande, esto es, la procedente de las infinitas generaciones á que se presta la estructura tabicada por virtud de la reducción de su célula formatriz, ó rasilla, que va adaptándose universalmente á superficies de cualquier orden, tendidas en el vacío como por arte de encantamiento, merced al fraguado rápido del yeso que suele emplearse en la confeción de la primera lámina, se comprenderá cómo la imaginación del constructor puede fantasear con libertad entera, y jugar con el principio tabicado, en la seguridad más absoluta de ver satisfechas siempre sus concepciones, merced á la mágica, en fin, de

esta estructura privilegiada que hasta parece complacerse en ir materializando una á una las visiones más exigentes.

En la estructura tabicada, tiene, pues, un mundo entero de soluciones la imaginación del artista y el genio del ingeniero, soluciones que se aplican no ya á la arquitectura civil en la construcción de nuestras afamadas escaleras y pisos, sino en la misma construcción industrial, principalmente en la factura de cubiertas, constituídas por inmensos témpanos cilíndricos, unas veces con generatrices ya horizontales, ya en pendiente, y otras veces en formas ó superficies váidas y envolventes de complicadísima generación. Sin esperar siquiera futura perfección, es decir, en su propio estado actual, permite ya la estructura tabicada el realizar de por sí, con exclusión de toda viga y de toda armadura, una construcción cualquiera de compleja configuración, desde las mismas fundaciones hasta el tejado, inclusive.

Si particularizásemos la alusión que acabamos de hacer á toda la arquitectura tabicada en general, describiendo siquiera algunos ejemplos de las soluciones existentes tan sólo dentro del radio de nuestra ciudad condal, nos veríamos obligados á llenar un tratado entero con formas originales de bóvedas apoyadas en pilares inclinados, de témpanos estructurando cubiertas en diente de sierra, de cañones curvilíneos con nervios de tabique, de formas cupulares con lunetos variados, de pasarellas de gran luz con intradós semitubular, de recintos rectangulares cubiertos á doble hoja, de trompas y apechi-

nados en especialísimos perfiles, y en fin, de soluciones más complejas resueltas por la combinación infinita de elementos sustentantes cohesivos y de ténpanos sustentados tabicados, constituyendo, en conjunto, un arte estructural universalmente aplicable á los fines de la construcción, tanto ingenieril como arquitectónica, arte que á juzgar por la intensa evolución que está ahora experimentando la ciencia de la fabricación, compacidad, composición, dosificación, y resistibilidad de los morteros, debe aún progresar, tendiendo, por consiguiente, á la obtención de la estructura por excelencia económica é inoxidable, permanente, universal y elástica.

Si en la arquitectura tabicada que se acaba de definir, viese el constructor de excesiva prudencia, una amenaza constante producida por la tensión á que se permite trabajar las formas estructurales, podremos invitar á proyectar tales formas bajo un principio de modernación y racionalidad tales, que haga desaparecer todo escrúpulo é infiltre el mayor grado de convencimiento y fe.

Consiste, sencillamente, tal principio, en ajustar los perfiles de las formas tabicadas, precisamente á sus líneas potenciales de acción externa, es decir, á lo que se llaman sus líneas de presiones, con lo que evidentemente se alojan tales líneas en el núcleo de las formas y desaparece en absoluto la tensión de las mismas. Solamente cuando alguna carga exótica ó dinámica pueda alterar temporalmente la línea de acción externa, se originará algún esfuerzo tensivo en la estructura, esfuerzo que por

ser, además de local, poco intenso, pues no es corriente el caso de alteraciones notables en la línea de acción externa, será siempre seguramente resistido por la estructura tabicada, la cual ya hemos visto que permite, dada su naturaleza, exposiciones mucho mayores.

De esta manera resultarán para perfiles de los arcos tabicados, simples arcos catenarios ó trozos de parábola; para formas de témpanos de bóveda, superficies de velámenes hinchados por el viento, etc., todo por la ley evidente de ser las líneas de las presiones inversión sencilla de las formas tensadas, observación de interés y de resultados fecundos sobre la que volveremos, necesariamente, al tratar de las estructuras unirresistentes.

Sin embargo, para que la invitación precedente, que al fin reprime y guía un tanto á la fantasía cuya entera libertad antes se ha proclamado, no aparezca como un retroceso ante la afirmación de cualidad elástica atribuida á la estructura tabicada, terminaremos este estudio repitiendo que no hay necesidad de ajustar los perfiles estructurales á la línea potencial de acción externa, con tal que se verifique la resistencia de la estructura, teniendo á la vista los coeficientes tensivos y adherentes de sus materiales y la ley trapecial que conocemos, por cuyo cálculo entrará además en los espíritus racionalistas el convencimiento de la elasticidad de aquellas formas, supuesto que no hubiesen tenido ocasión de apreciar la realidad de ciertas paradojas típicas de la construcción referida, como son, por ejemplo: una solera ó dintel tabicado de medio metro de ancho y

cinco de luz, construído en cuatro hojas y puesto de plano sobre apoyos á nivel y soportando una carga de cuatro mil kilogramos; un techo con viguetas de hierro y bovedillas tabicadas de forjado, cuya resistencia va considerablemente creciendo con sólo ir aumentando el peralte de las bovedillas; un ténpano cilíndrico de bóveda tabicada sufriendo una gran carga y apoyándose exclusivamente por los cuatro vértices de dicho ténpano, etc., etc. Paradojas todas cuya única y evidente explicación estriba en admitir la elasticidad de las formas tabicadas y en considerar que se verifica en ellas la ley de la flexión, que nos dice cuanto crece una resistencia con el incremento del momento de inercia de la forma correspondiente.

VI — ESTRUCTURAS TENDINOSAS

ATCHINSON, el profesor americano, nos dice que la verdadera construcción arquitectónica debe ser como la madre Naturaleza nos demuestra en la más perfecta de sus obras: el hombre; expresión clara, que viene en definitiva á afirmar cómo las obras del hombre deben siempre inspirarse en las del Creador. De la observación, pues, sobre éstas, deduciremos la lógica de nuestras producciones.

La anterior afirmación está desprovista en apariencia de todo interés, por lo mismo que refleja una verdad evidente, un principio ya consabido en todos los órdenes de la mentalidad actual, y, sin embargo, toda insistencia es poco en lo tocante á

dicha afirmación. Hay que confesar ingenuamente la lentitud cerebral del hombre para posesionarse de los hechos naturales, pues éstos en su sencilla presentación tienen una complejidad tan estupenda que no suelen ser comprendidos más que á fuerza de reflexiones y de lecciones de experiencia. Se hace indispensable la manifestación de accidentes y la concurrencia de peligros que aleccionen materialmente á las profesiones humanas, para que éstas progresen, se perfeccionen y se orienten hacia el camino de imitación de las obras maestras de la Naturaleza.

He aquí, pues, exactamente, la vía penosa á seguir antes de llegar á la racional concepción de un hecho arquitectónico. Hoy, vemos un evidente sistema estructural en las formas constructivas de principio orgánico, realizadas en cemento ó mamposterías cohesivas y tendones de metal que las refuerzan estratégicamente en las regiones vulnerables. Hoy, comprendemos como todas estas formas que aquí calificamos de «estructuras tendinosas», vienen en definitiva tan solamente á imitar la arquitectura zoológica de los vertebrados, compuesta por el conjunto de esqueleto, músculos y tendones, y, á pesar de todo, esta solución evidente que llevamos en nuestro ser y que hemos tenido siempre á la vista, ha necesitado de seculares períodos para llegar al estado en que hoy la poseemos.

El germen del racionalísimo tendón estructural, se remonta indudablemente á los tiempos homéricos, á la edad del cuarzo y del bronce, en que las

obras elementales, los pobres muros de arcilla, poseían, para mayor cohesión, atirantados de madera empotrados en su masa.

La verdadera función de estos atirantados de madera, viene con admirable videncia á definirla Phylón de Bizancio, más adelante, esto es, hacia el siglo II antes de Jesucristo, al transcribir la idea de que «las mamposterías de fortificación debían poseer vigas anegadas para repartir el efecto de la presión de los proyectiles».

Pero en épocas posteriores en que la calidad y cohesión de las mamposterías fué aumentando en condiciones, atrofióse lentamente el maderamen de atirantado, acabando por desaparecer del todo; retroceso constructivo que se encargó de advertir oportunamente la misma Naturaleza con las subterráneas conmociones que han expuesto sin cesar al suelo de Oriente, obligando á los maestros bizantinos á provocar la reaparición de los tendones para la fortificación de sus fábricas, llegando á ser carta de naturaleza, en todos los edificios del bajo Imperio, las estructuras atirantadas para precaver los efectos de los fenómenos sísmicos ó de trepidación.

Pero el leño empotrado en fábrica, sin circulación de aire, se altera y desorganiza perdiendo absolutamente toda su resistencia, por lo cual el efecto de la estructura tendinosa bizantina es tan sólo pasajero, temporal; dura lo que tardan en enfermar sus tendones, y hay, por consiguiente, necesidad absoluta de solucionar el problema, procurando que una resistencia oportuna venga á substituir al trabajo del atirantado interno cuando se inicie la decrepitud

de éste. Tal observación constituye indudablemente uno de los principales factores originarios de las célebres combinaciones de arcadas y formas cupulares cuyo sucesivo y mutuo contrarresto ha dado fama inmortal á las arquitecturas de Oriente.

Débase, pues, notar el porqué estas arquitecturas, aun después de su concepción completa, no se emanciparon jamás del atirantado en leño, atirantado cuyo valor mecánico fué inapreciable, precisamente, durante el período de construcción y del fraguado de sus mamposterías. Realmente; hasta que la forma estructural no está por entero terminada, no puede, evidentemente, contarse con su equilibrio; de aquí la presencia de empujes temporales durante la construcción, empujes cuyo contrarresto fué siempre confiado al tirante de leño. Por otra parte, durante la erección de una fábrica, preséntanse siempre diferencias de asiento, fenómeno muy sensible en la época de referencia, no sólo por el elevado número de juntas que caracteriza á la ladrillería, sino por el excesivo grosor de mortero que se sabe estas juntas poseían, circunstancias que agregadas á la deficiencia de las fundaciones, punto negro, digámoslo así, de toda la arquitectura pasada, y cuya solución perfecta se debe únicamente al ingeniero moderno, hizo en definitiva que las obras, en su erección, tuviesen que tratarse de una manera muy delicada, abundando, por consiguiente, los atirantados en los muros y en los arcos, disponiéndose, además, cinchos de maderamen en las bases de las cúpulas, y encegando otras veces enteramente las aberturas durante la elevación de la obra, etc.

En terminando completamente la construcción del edificio, y en desapareciendo de un modo absoluto la frescor de los morteros, podía con seguridad confiarse en la estructura cupular y de arcuación. Ésta no debía, pues, entrar en actividad hasta el citado momento, que coincidía con el desencegado de las aberturas y el cortado al rape de los tirantes que atravesaban las luces libres de los huecos de la construcción. La forma estructural, tanto por lo admirable de su composición mecánica, como por la cristalización completa de su mortero, era ya desde entonces inmune á los empujes y á la trepidación.

En la arquitectura italiana, más que por efecto de tradición, por el desamparo de las formas empleadas y la sísmica propensión del suelo en algunas de sus regiones, se perpetúa el tirante en las estructuras, tirante metálico ya y completamente á la vista en todas las construcciones desde comienzos de la edad media. Débese, sin embargo, notar que el tirante completamente libre no constituye un tendón estructural: el tirante á la vista significa simplemente un contrarresto, y la forma resolutive del contrarresto no modifica en lo más mínimo la esencia de la estructura; no es, pues, estructura tendinosa, propiamente hablando, el atirantado pórtico del Palacio Ducal de Venecia ni ningún arco de fábrica con cuerda de metal.

El Renacimiento, este período portentoso de admirable conjunción artística, en que reverdecen y abren nuevas flores todas las ramas latentes que dieron mayor ufanía á las civilizaciones pasadas, pro-

duce también en las estructuras que estudiamos su consiguiente influencia. Significa el Renacimiento una etapa arquitectural en que la construcción litópola ó con sillares independientes, se desenvuelve prodigiosamente engendrando cúpulas y dinteles; formas constructivas en las que el despiezo estereotómico produce indefectibles é intensísimos empujes para cuyo equilibrio obliga el estilo al empleo de atirantados internos, reapareciendo así, aunque de un modo convencional, la estructura tendinosa de la época bizantina.

No obstante, en las obras de talla del Renacimiento, no sobreviene la cohesión de los materiales á substituir, con la sorprendente oportunidad de las arquitecturas orientales, al tendón leñoso en el momento de su decrepitud; aquí el tendón tiene función perpetua, y esta longevidad que la madera no alcanzaría en las condiciones de tirante enterrado, precisamente por estas mismas condiciones la resuelve el hierro, por cuanto así encuéntrase á salvo de todas las destructoras causas de oxidación. Desarrollase, pues, por tal motivo, el tendón metálico en la entraña misma de la construcción dovelada, formándose de esta manera una original estereotomía birresistente; síntesis admirable de todas las arquitecturas pasadas, que permitió el equilibrio de la grandiosa cúpula, con entraña metálica, de San Pedro, en Roma; que realizó el equilibrio de la famosa columnata con que Perrauld ciñó al Louvre, de París; y con que, finalmente, el gran genio de Soufflot compuso la orgánica estructura del actual Panteón de franceses ilustres.

El armazón metálico formando tendones en las obras de sillería, tiene, sin embargo, un papel más racional, si es lógicamente aplicado á las estructuras cohesivas de ladrillo y mortero. Estas estructuras de naturaleza ya algo tensiva, encuentran un auxiliar poderoso en el tendón de hierro, que sin sostener á los miembros de ladrillo, les evita solamente las flexiones peligrosas.

El acierto y la justicia de la estructura está, en estos casos, en hacer campear los tendones, exclusivamente, en el interior de la masa ó ganga de ladrillería, con lo que, si el genio é instinto mecánicos del autor son elevados, resultan formas constructivas adaptables á todo programa y á toda exigencia moderna, formas exteriormente revestidas de un alarde y atrevimiento completamente autorizado por la energía de su tensor de sección calculada y de asegurada defensa contra todos los accidentes que constante ó temporalmente tienden á atacar al hierro. Por este medio se logra unas veces la inseparabilidad de dos pilares de ladrillo: basta disponerlos con almas de metal arriostradas entre sí por un tirante superior, oculto en las fajas horizontales de obra, desde cuyo momento queda asegurada la resistencia flectora de los pilares, que pueden ya recibir en cualquier punto de ellos el arranque de los arcos; otras veces, por medio análogo, avanza normalmente á un muro el atrevido cuadrante de ladrillería, permaneciendo misteriosamente colgado por la acción de un tendón interno que substituye al empuje del otro cuadrante que falta como complemento indispensable para resolver el equilibrio. Finalmente, y

entre otros mil ejemplos, notaremos que si la estructura cohesiva se la resuelve aligerada, nervada y á doble hoja, como hicieron con admirable tino los santos padres de la arquitectura cuatricentista, se puede, con la simple adjunción de los tendones metálicos, dotarla de una rigidez y de una agilidad verdaderamente sorprendentes. Á este principio estructural debe la ciudad de Turín el maravilloso monumento concebido por Antonelli, mole grandiosa, elegante y apiramidada que se eleva con silueta feliz hasta hender las propias nubes, señalando al mundo la capital antigua del reino piomontés.

Por todas las anteriores disertaciones habremos podido comprobar cómo la resolución mecánica de las construcciones, es decir, el modo de sentir y materializar las estructuras, es realmente dependiente de la sensibilidad y del genio personal; pero habráse, además, notado la influencia que en estas producciones humanas tienen las leyes universales de la naturaleza, y en particular las condiciones de orden y ambiente local. Esta última circunstancia es singularmente influyente en la América septentrional, patria del acero y de los mecanismos, emporio de los millones y, por esto mismo, centro de la economía. Si la economía pudiéramos especializarla, diríamos que en los Estados Unidos las estructuras tendinosas se han ido desarrollando por la triple economía del fuego, del dinero y de la superficie.

La primitiva construcción americana llamada incombustible, nació de la substitución del madera-

men de los edificios por el material metálico, empleado sucesivamente en los estados forjado, fundido y laminado, en forma no sólo de tensores y envigados, sino especialmente de elementos de fachada, para proteger de esta manera al macizo de mampostería contra las calcinaciones y desmoronamientos producidos por los frecuentes incendios. Algo más tarde, la experiencia de los grandes fuegos demostró elocuentemente el error que significaba la colocación del metal como elemento protector, toda vez que este material, en contraposición á su elevada resistencia mecánica, tiene la debilidad de oxidarse indefectiblemente, si bien con cierta lentitud, por el aire, en cambio, con aterradora rapidez por el fuego. Vieron, pues, los americanos cómo, á pesar de su gran resistencia, la mayor vulneración estaba por parte del metal, y tuvieron así la videncia de trocar los papeles, á cuyo efecto protegieron al hierro con la mampostería, asignándole así, por transgresión paulatina, todo el desempeño de la función resistente, y dejando al material pétreo el carácter exclusivo de elemento de forjado y de protector del metal.

Tales son los comienzos de la construcción norteamericana, que, como vemos, fué, en un principio, debida al instinto de combatir los incendios.

Como todas las demás actividades, la edificación no puede menos de ser mecánica en la América, y por consiguiente, allí se construye verdaderamente á máquina. El laminaje metálico es económico y abundante con pasmosidad, y por esto el tendón campea pródigamente en todas las construcciones,

dando á la vez solución al problema económico del terreno. La reducción de superficie horizontal de los edificios ha obligado el desarrollo vertical de la población, con lo que se han engendrado las construcciones que miden centenares de metros de altura, dotadas, por esto mismo, de un cimbreo que haría imposible todo equilibrio sin la presencia del tendón de metal.

Las conflagraciones señalaron, pues, en un principio, al tendón metálico su sitio apropiado, en el mismo seno de las mamposterías, y las circunstancias de estricto orden económico facilitaron después el desarrollo del sistema tendinoso; pero ahora falta ver la racionalización completa del sistema, la concepción definitiva de la estructura, la definición, en una palabra, del *skeleton* ó *cage* americanos. Esta ha sido la grandiosa obra intuitiva de los arquitectos yanquis.

La estructura moderna americana, no es una estructura tendinosa usual, no significa un simple auxilio por medio del tensor localmente situado en los puntos más flexados de una obra cohesiva. La estructura americana es formada por algo más que por un conjunto de elementos resistentes á la extensión, independientes y perdidos en el interior de una mampostería; la estructura americana, en una palabra, representa todo un sistema tendinoso de miembros relacionados y conectados en tal forma, que en conjunto realizan un verdadero esqueleto con sus piezas reunidas por íntima consolidación. De esta manera, se logra que los pesos y los esfuerzos de los

órganos constructivos, así exteriores como interiores, sean íntegramente transmitidos, desde el tejado hasta las fundaciones, por medio de la férrea nervadura que se extiende en continuidad absoluta por toda la edificación.

Sin el anterior carácter distintivo y esencial, no hay *skeleton*, propiamente dicho, y taxativamente, tal como indicamos, viene definido en las actuales Ordenanzas de la construcción de Chicago (*Chicago Building Ordinance*).

Este *skeleton* tiene, pues, en rigor, una misión superior al tendón propiamente dicho, nacido en las arquitecturas pasadas, toda vez que la función del hierro para cumplir las ordenanzas de Chicago, debe ser doble; debe, en una palabra, auxiliar á la mampostería no sólo atirantándola, sino descargándola, parcial ó totalmente, á los efectos de su presión vertical. De aquí se originan dos tipos estructurales perfectamente deslindados:

El primero es aquel en que el armazón metálico es suficientemente resistente para sufrir por sí sólo su peso propio, y, además, el de toda la mampostería de la obra; y el segundo de dichos tipos corresponde á los armazones que resisten la carga, en conjunción con la mampostería. Compréndese cómo en el primer tipo la mampostería de la obra tiene un papel secundario, un papel, digámoslo así, de ropaje ó vestimenta decorativa y protectora del hierro; no constituye, pues, dicho tipo estructural, propiamente hablando, la llamada estructura tendinosa, ya que en ella el tendón ha sufrido una hipertrofia exagerada, por la que ha llegado á resistir total-

mente las flexiones y compresiones de la obra. En cambio, en el segundo tipo de estructura, la mampostería juega un papel resistente de consideración, ayudando al *skeleton* y comunicándole estabilidad, además de protegerle contra los fenómenos de oxidación; estas racionales estructuras se calculan admitiendo que, en una sección cualquiera, las compresiones están repartidas sobre la mampostería y sobre el metal, á tenor de sus áreas y de sus coeficientes de carga, y las tensiones, donde las haya, deben ser sufridas exclusivamente por el metal; además, el revestimiento de obra en estas estructuras hay que irlo elevando paulatinamente desde la base del edificio, en contra de lo que puede hacerse con las del tipo primero cuyo revestimiento es posible empezar (y frecuentemente se ve así) por los cornisamentos y partes altas, toda vez que dada la resistencia compresora y flectora del esqueleto, no hay necesidad alguna de mantener á bajo nivel el centro de gravedad del edificio en ningún período de su construcción ni de su vida.

Á propósito de esta última observación, debe comprenderse cómo los inusitados *sky scrapers* de Nueva York, indefectiblemente estructurados en las formas indicadas, están sometidos á una verdadera vibración cuyos efectos de inercia son tan intensamente manifiestos en las partes altas del edificio, que llegan en ciertos casos á desprender, ó más propiamente, á sacudir las piezas de mampostería ó sillares mal afianzados, por cuya circunstancia resulta un problema interesante y de resolución no descuidada el sistema de afianzar y conectar la obra

con el esqueleto, debiendo, para ciertas regiones, tener en cuenta hasta la densidad del material, en previsión de la fuerza viva que podría éste alcanzar durante los movimientos vibratorios referidos, que á su vez pueden verse seriamente multiplicados por las trepidaciones sísmicas.

La construcción americana ha transgredido completamente la estructura tendinosa de las épocas bizantinas y del Renacimiento. Hase dicho que en tales épocas la construcción era todo carne, y que ahora, en la arquitectura newyorkina, la construcción es todo hueso, y realmente sucede así. Una estructura más justa, una solución más perfecta, la encontraríamos, indudablemente, en un sistema intermedio que gozase de un reparto más equitativo de trabajos, y que tuviera una ponderación más equilibrada de materiales. La realización hasta hoy más perfeccionada de esta ideal estructura, la encontramos en las obras de hormigón y de cemento armado.

Antes de terminar el presente artículo de estudio general de estructuras tendinosas, notaremos dos aspectos del tendón metálico, hasta aquí no reseñado, cuales son: el tendón aparente y el tendón por ligamento. Al decir tendón aparente no nos referimos al tirante rectilíno de contrarresto, pues ya se insistió en que éste no modifica la esencia estructural, sino que hacemos referencia á la faja de metal que adosada longitudinalmente contra una estructura generalmente cohesiva, la fortifica con energía, ostentándose al exterior. Un ejemplo nota-

ble de esta forma de tendón, en la que el criterio mecánico de un constructor ingenioso puede ver ley general y grandiosa aplicación, está, v. gr.: en un dintel de ladrillería de extradós recto y de intradós curvo, girando, á guisa de bambalina, su convexidad hacia el suelo. Este dintel, de equilibrio imposible sin una gran fuerza cohesiva en el mortero empleado, pasa, en cambio, á gozar de una resistencia extraordinaria, desde el momento que plegamos contra su intradós un fleje de metal, con sus extremos, naturalmente, afianzados con solidez. El tendón aparente puede, pues, ser de una eficacia indiscutible; sin embargo, su situación no es enteramente racional, toda vez que dicho tendón, por el mero hecho de su oxidabilidad, debe ir protegido por una capa de materia que le aisle de la humedad ambiente y, si es posible, que le proteja también contra la acción del fuego, circunstancia felizmente resuelta por los americanos al enterrar el tendón en la ladrillería, dado el carácter casi refractario de ésta.

Respecto al que hemos calificado de tendón por ligamento, es más propio, en rigor, de las construcciones estereotómicas, que no de las cohesivas, puesto que su principal papel está en engatillar los sillares, tendiendo al monolitismo de la masa fraccionada; sin embargo, en ciertos casos, y esto es frecuente en Inglaterra, empléase el tendón en forma de ligamento ingenioso en los casos de estructuras sujetas á distintos asientos, como, por ejemplo, sucede al tratar de añadir, no importa en qué dirección, á un muro ya construído, otro de nuevo;

en este caso, las consecuencias de asiento, debidas á la fundación y á la compresibilidad de las juntas de mortero, han surtido ya todo su efecto en el muro primitivo, y, por consiguiente, al presentarse en el nuevo, sobrevendría, de un modo indefectible, la desunión de ambos. Resuélvese tal problema con tendones de ligamento, empotrados dentro la obra en la región de la juntura, en forma de articulación metálica ó, si se quiere, de bisagra, que permite al nuevo muro un ligero movimiento descendente y de giro horizontal.

VII.—EL TENDÓN ADHERIDO

EL tendón metálico, al adherirse sólidamente por todos los puntos de su longitud en la ganga pétreo que consolida, resuelve, indudablemente, uno de los más grandes problemas de la construcción, toda vez que ello equivale á ingertar á la obra de fábrica, la alta propiedad tensiva de que goza el perecedero material metálico, constituyendo de esta manera una estructura completamente perdurable y casi completamente elástica. Este género de estructuras con tendones adheridos, tiene las mismas ventajas que hicimos resaltar en el capítulo precedente al analizar las formas tendinosas en general; pero, en el caso presente, dichas ventajas alcanzan una perfección de todo punto extraordinaria, por virtud simplemente de la adherencia del tendón á la fábrica, circunstancia que se supuso antes no existente, ó,

al menos, que alcanzaba un grado de eficacia muy discutible para poder ser tomada en consideración de una manera segura y práctica en los cálculos verificativos.

Con el tendón adherido fuertemente á la obra de fábrica, podemos descargar á ésta de una manera absoluta, de todo esfuerzo tensivo; podemos, además, declinar al tendón de metal todos los esfuerzos cortantes, así transversales como longitudinales, esfuerzos, en fin, para cuya resistencia es poco apta la mampostería. La realización de este hecho constituye casi un *desiderátum* de la construcción, constituye el establecimiento de una división perfecta del trabajo de reacción molecular de la estructura, un dominio completo, en fin, de nuestra voluntad en el interior del órgano arquitectural, y no vacilamos, por tanto, en invitar al lector á que reflexione sobre la grandiosidad del problema resuelto.

La feliz idea de adherir el tensor al resto de la masa, aparece ya vislumbrada en la construcción de la histórica Pompeya, en cuyas casas era frecuente el techo estructurado por un tejido de junco revocado con capa de mortero terroso, produciéndose así por la lógica conjunción y adherencia de ambos materiales, un abovedado de poco espesor y de considerable resistencia. Este principio constructivo, de admirable videncia mecánica, se perdería indudablemente después, por no haber llamado la atención la pequeña magnitud de sus aplicaciones, así es que no lo vemos reaparecer hasta que florece la ciencia química de los morteros en la primera mitad del

pasado siglo, cuando el célebre Lambot presenta en la Exposición de París á su buque estructurado por una *carcasse* de barras metálicas y un forjado ó revocado de cemento. Así nace el cemento armado cuyas producciones en sus comienzos van constantemente unidas á los nombres de Coignet, Monnier, Fairbain, etc., pero cuyos estudios recientes, iniciados por el célebre Cottancin en sus construcciones de *sidero-ciment*, son más bien obra colectiva de naciones que de constructores aislados, como lo prueba la intensidad y desarrollo extraordinario que las estructuras de cemento y hormigón armado van tomando en Alemania, Inglaterra, América y Francia, de donde llegan algunos sistemas que han dado ya resultado en las estructuras españolas.

El tendón, en las formas de cemento y de hormigón armado, se esparce en la masa estructural, extendiéndose con verdadera ramificación hacia todos los puntos comprometidos principalmente por los esfuerzos tensivos.

Tal ramificación llega, á veces, á alcanzar el aspecto de una red completamente alojada en el seno de la forma constructiva, y siempre este sistema tendinoso, tiene la particularidad de que no hay necesidad de llevar sus extremos al amarre en puntos fijos ó exteriores de la estructura, toda vez que dicho amarre tiene lugar por todos los infinitos puntos de la superficie de los tendones por virtud de la adherencia entre éstos y la ganga del cemento, cualidad que precisamente caracteriza al sistema que estudiamos.

Esta colocación estratégica y feliz del sistema de tendones, en la propia entraña de la estructura y en reunión tan íntima con ella, se logra fácilmente con el especial método de construcción empleado, que consiste en un sencillo moldeo de las formas estructurales, formas que una vez fraguadas ó cristalizadas se desencofran, y conservan perpetuamente la reunión íntima con sus tendones por la circunstancia fortuita de tener prácticamente las mismas contracciones y dilataciones que ellos.

El sistema de tendones en el cemento armado debe estar colocado en el sitio que produce máximo efecto; situarése por lo tanto, especialmente, en la región de las tensiones, pero como, además, debe alcanzar el mínimo de peso, se dará por esto mismo á cada tendón la más pequeña sección posible. En ambas circunstancias, estriba la racionalización del referido método estructural. Como las ventajas del hormigón ó cemento armados se hacen ostensibles y grandiosas, pero á condición de llenar aquella racionalización, de aquí la necesidad de un cálculo verificativo de las correspondientes estructuras, por más que éstas hayan nacido, como todas, en la esfera del sentimiento y exclusivamente en ella puedan progresar sin necesidad, como veremos, de cálculo de ninguna clase.

Si, oportunamente, hicimos notar el empirismo de la teoría de la flexión que al fin hace referencia á los cuerpos de compacta y uniforme constitución molecular, ¿qué no sucederá en las estructuras de hormigón armado cuya contextura experimenta en

cada sección una serie de cambios bruscos?... Hay en todo este estudio un verdadero caos por el que á duras penas pueden andar los más grandes filósofos y observadores modernos de las propiedades elásticas de la materia; es, pues, prudente y positivo el pasar por encima y á una cierta altura, todo el abrojososo horizonte de estas cuestiones falsas, apoyándose tan solamente en cuatro conceptos de suficiente fijeza en que parecen insistir las argumentaciones de los teóricos de profesión. Vamos á condensar brevemente tales conceptos, para poder así definir el método de cálculo usualmente seguido en las estructuras elásticas de cemento armado.

Se parte del supuesto que existe una solidaridad perfecta entre el hormigón ó cemento y su sistema de tendones, solidaridad que puede real y confiadamente admitirse, toda vez que el desgarramiento longitudinal á lo largo de la región ocupada por el tendón resulta inferior á la adherencia que, con singular energía y de un modo natural, se obtiene siempre entre el metal y su ganga en la confección de estas estructuras. Sin embargo, como precisamente en el agarre del tendón á la masa, consiste la eficacia y el carácter del cemento armado, suelen los escrupulosos constructores comprobar esta circunstancia, viendo si el referido desgarramiento (calculable por la teoría de la flexión), es ó no superior al producto que resulta de multiplicar la superficie tendinosa por el coeficiente experimental de adherencia, que depende, naturalmente, de la clase del cemento. Pero los modernos ensayos sobre esta cuestión han hecho ver un fenómeno que es ente-

ramente intuitivo y que podía ya antes haberse vislumbrado; éste consiste sencillamente en el papel jugado por el límite de elasticidad del metal. Se comprende que si el límite de elasticidad se alcanzase por un excesiva tensión del tendón, podríase originar la restricción en alguna de las secciones de éste, y es claro que el cemento, no pudiendo seguir á dichas secciones, en la relativamente considerable reducción de área que por virtud de la restricción experimentan, originaría, por obligada consecuencia, el desencolado del tendón, indefectible causa de la decrepitud de la estructura. Se refiere, pues, en definitiva, la adherencia en cuestión, á dicho límite de elasticidad, y la experiencia parece demostrar que mientras tal número no se alcance, lo que está evidentemente á nuestra mano (pues todo es cuestión de someter á prudente trabajo el metal), podemos confiar con la solidaridad perfecta entre el tendón y la masa.

Otro punto de partida, para la verificación de las presentes estructuras, está en la admisión de la invariabilidad de forma de las secciones planas de los miembros constructivos durante el fenómeno de la flexión; es decir, que en el cemento armado, lo mismo que en los otros materiales, se aplica la ley trapecial que conocemos y por cuya virtud admítase también el consabido reparto lineal de reacciones moleculares. Tal hipótesis, generalmente admitida, á pesar de los escrúpulos de Bach, Sanders y otros, facilita extraordinariamente los cálculos, resuelve de sobra, por lo que tienen de matemático, á estas cuestiones, y viene á generalizar aún más

de lo que dijimos á la ley trapezial. Dentro de esta misma hipótesis, se hace en los cálculos una convención realmente chocante, pero que da sus resultados en lo que toca á la seguridad estructural; consiste tal convención en suponer que la sección transversal que se considere en la pieza flexada, gira, naturalmente, alrededor del eje que pasa por la fibra neutra, eje que, como es sabido, divide en dos regiones á la sección en cuestión; de estas dos regiones, la una trabaja á compresión, siguiendo la ley trapezial ya citada, pero la otra región, que es precisamente la en que se alojan los tendones y que siguiendo la misma ley debería trabajar á tensión, se la supone en descanso absoluto, es decir, que no se tienen en cuenta las tensiones sufridas en ella, y solamente se calcula la tensión que corresponde al lugar de dicha región ocupado por los tendones cuya área transversal puede así fácilmente determinarse. Equivale, en fin, esta convención, á suponer que el hormigón ó el cemento no tienen absolutamente resistencia tensiva, lo que evidentemente significa una excesiva prudencia.

Finalmente, por lo que se refiere al trabajo compresivo que resulta de la flexión, se le confía casi siempre de un modo exclusivo al cemento y, por consiguiente, no suelen armarse con metal las regiones comprimidas de las estructuras, exceptuando los pequeños estribos ó piezas que tienen por objeto combatir los deslizamientos longitudinales; y, además, en las condiciones ó límites normales á que se hacen dichas estructuras trabajar, se supone una invariabilidad absoluta del coeficiente de elasticidad

á la compresión, tanto para el hormigón como para el cemento.

Vemos, pues, el cúmulo de hipótesis y convenciones que rigen la *Ciencia* de materiales aplicada á las estructuras de tendón adherido, confirmándose así, á plena luz, cómo un criterio superior pueda con sólo su misterioso, pero justo instinto, obtener estructuras tan racionales como las del más hábil calculista, circunstancia que explica el sinnúmero de fórmulas prácticas y medios verificativos empíricos que existen en esta cuestión y que son exclusivo fruto del sentido personal de los numerosos constructores actuales del cemento armado. Pero aquí, en las páginas de este libro, cuyo principal objeto es el de transparentar las armonías entre las estructuras constructivas y la sencillez entrañada por los pobres medios verificativos hoy existentes, haremos abstracción de todos los formulajes personales aludidos y, apoyándonos únicamente en las hipótesis referidas, pasaremos á indicar, en lo que tengan de mecánica evidente, los métodos de cálculo usualmente seguidos, comenzando por el de las vigas sometidas á flexión.

Estriba, principalmente, la cuestión en determinar el eje neutro, que, como es sabido, en estas formas, lo mismo que en todas las construídas con materiales cuyos coeficientes de resistencia á la tensión y compresión sean diferentes entre sí, no pasa por el centro de gravedad de la sección considerada, sino que tiene una situación dependiente de los elementos de dicha sección y de la relación entre los coeficientes de elasticidad entre el metal y el cemento.

Los tratados particulares dan fórmulas que sitúan, en función de los referidos datos, al eje neutro.

Situado dicho eje en la sección que se verifica, supónese que por efecto de la flexión ésta gira alrededor de aquél, engendrándose las consiguientes reacciones moleculares, por compresión sobre el eje neutro y por tensión debajo del mismo. La suma de los momentos de estas compresiones y tensiones para con respecto al eje neutro, ha de ser evidentemente igual al momento flector de las fuerzas exteriores de la pieza flexada, y se supone, para establecer fácilmente esta condición, que la mitad de aquel momento flector equilibra el momento de las reacciones moleculares compresivas, y la otra mitad equilibra el de las reacciones tensivas. Falta, pues, solamente para haber alcanzado la solución del problema, el determinar estos momentos de reacciones moleculares, lo cual, en verdad, resulta facilísimo. Por lo que respecta al momento de las fuerzas compresivas, una vez admitida la ley trapezoidal, se obtiene con sólo multiplicar el área de la sección comprimida, por el esfuerzo compresivo medio que asignemos al cemento y por el brazo de palanca correspondiente, que se comprende es igual á los dos tercios de la altura que tiene la región comprimida de la sección. Finalmente, el momento de las reacciones tensivas se calcula aún con más facilidad, pues, como dijimos, que no se le consiente al cemento esfuerzo tensor de ninguna clase, no habrá que considerar su área y bastará, por tanto, tomar la de la armadura de metal, que multiplicada por el coeficiente de tracción que se le asigne y por

el brazo de palanca, que es aquí, á toda evidencia, la distancia del centro de la armadura al eje neutro, nos dará, por último, el momento buscado.

De la igualación de estos momentos interiores al semimomento flector, nacen las dos ecuaciones de equilibrio de la pieza flexada y que nos permiten calcular, respectivamente, el cemento de su región comprimida y la armadura de metal.

La esencia del método es, en una palabra, sencillamente la misma que conduce á la fórmula de Navier, fundamental de toda la teoría de la flexión para los sólidos de contextura uniforme, pero con la conveniente interpretación para poderla aplicar á nuestro caso en que el sólido tiene cambios de contextura.

Hay que advertir que, como se declinan sobre el metal los esfuerzos transversales por temor de que no sean resistidos por el hormigón ó cemento, hay que comprobar, en las diversas secciones de la pieza, si su armadura, calculada como precedentemente se ha indicado, resiste ó no al esfuerzo cortante correspondiente, y en caso negativo se la aumentará en lo que convenga. Es decir, que la armadura se la debe calcular por la flexión y por los esfuerzos cortantes, adoptando, naturalmente, la sección que resulte mayor.

Si la pieza á calcular tuviese compresión, además de flexión, como sucede, por ejemplo, en arcos, en muros de contención, etc., etc., no habrá más, para hacer la verificación, que añadir algébricamente, á los coeficientes de trabajo calculados como

precede, el respectivo esfuerzo compresivo. La correspondiente línea potencial de acción externa nos dará, como siempre, junto con el polígono de fuerzas que sirvió para determinarla, el par de flexión externa y el esfuerzo compresivo en cada caso.

Si se tratase de un pilar vertical con carga centrada, se le podrá calcular por las fórmulas de Rankine ó Euler, suponiéndole todo él en hormigón ó cemento, que á mayor seguridad se le puede cinchar para evitar las expansiones transversales producidas por la excesiva compresión, cinchos que ordinariamente vienen substituídos por una armadura metálica interna en el pilar, compuesta de barras longitudinales, frecuentemente trabadas entre sí por ligaduras transversales. Ni los cinchos ni estas armaduras es posible calcularlas con suficiente garantía.

Cuando el pilar tenga una carga excéntrica, habrá evidentemente la flexión producida por el correspondiente par flector externo en cada sección, además del trabajo que haría dicho pilar, si esta misma carga, que ahora es excéntrica, fuese centrada; por tanto, se le calculará exactamente por las fórmulas de Rankine ó de Euler, como antes, y se añadirán al trabajo que ellas acusen el que corresponda al referido par flector externo. La armadura interna que resista á la tensión originada por esta flexión, se calculará por el método indicado precedentemente al tratar de las piezas flexadas.

Visto el ojo de buen cubero que preside á los cálculos de las estructuras realizadas en cemento

armado, debemos por esto mismo insistir en la atención á desplegar por lo que atañe á la situación de sus tendones. Si la obra está bien confeccionada, y su sistema tendinoso racionalmente situado, tenemos ya asegurada la principal garantía de estabilidad y equilibrio, y estas son, precisamente, dos cuestiones que resuelve tan sólo la práctica y el instinto. Es preciso, al proyectar este orden de estructuras, anticiparse, más que en ningún otro, al fenómeno mecánico de la deformación. Si nuestra videncia es suficiente, veremos, á través de una cierta concentración espiritual, la elástica verdadera de la estructura, y allí, en las regiones de mayor radio de sus partes convexas, deberemos precisamente aplicar los tendones. Recomendamos, á este efecto, la realización de un ejercicio insistente, que se puede fácilmente lograr invocando concepciones de formas estructurales, con varias disposiciones perfiladas en curva ó en recta, con apoyos ó con empotramientos, etc., y sujetas todas á sistemas de cargas arbitrarias y originales, á efectos de dilatación que sobrevienen con intensidad considerable por consecuencia, usualmente, de variaciones de temperatura, etc. Iremos de esta manera educando nuestro sentido y vislumbrando, con claridad creciente, la verdadera deformación, viniendo, por fin, á deducir las regiones estructurales que deben armarse con el sistema de tendones.

Por último, la anterior meditación, que viene en rigor á constituir como una autosugestión para ponernos en armonía con la esencia mecánica del problema, nos hará comprender el porqué, en ciertos

casos, se dispone también armadura en la región que aparece exclusivamente comprimida; nos mostrará, á su vez, la razón de las armaduras transversales que se sitúan en un pilar ó pie derecho; y nos indicará el motivo verdadero que ha originado el sistema de hormigón conocido por el nombre de *fretado*, etc. No hay, pues, ley matemática conocida y sí sólo un criterio especial, una educación característica y una original sensibilidad mecánica para presidir positivamente á todas estas cuestiones.

La osatura ó sistema tendinoso de las estructuras en cemento armado, aunque tiene su situación precisa é inmutable en el interior de dichas estructuras, afecta, sin embargo, individualmente considerada, formas distintas que dependen del criterio de cada constructor, estableciéndose en apariencia sistemas diferentes, que en el fondo, como es natural, tienen todos exacta finalidad. Entre las formas típicas é inconfundibles de estas osaturas, universalmente aplicables á toda clase de estructura, resaltan de un modo notable las de Monnier, Hennebique, Möller, Degon, Wünsch y Melan, cuyas formas no describimos porque significaría esto descender á detalles y adminículos de construcción.

Las cualidades de que gozan las estructuras tendinosas con el tendón adherido, son real y verdaderamente de altísima apreciación. En primer lugar, la estructura crece en resistencia con la edad, consecuencia natural de la petrificación que va alcanzando el cemento de buena fabricación, y de la con-

servación indefinida que en el interior de su ganga tiene el tendón metálico, fenómeno cuya explicación química estriba en la producción de un silicato doble insoluble, que se forma por la acción entre el hierro y el cemento, silicato que reviste al metal de una capa totalmente protectora. Otra de las características de tal sistema de estructura está, precisamente, en la rigidez extraordinaria de sus formas elásticas, propiedad que podemos sintetizar diciendo que las piezas flexan poco y que recobran en seguida su forma primitiva, circunstancia ventajosísima tanto para la garantía de los cálculos, que bien la necesitan en este caso, como para los efectos de las cargas dinámicas, toda vez que la rigidez significa, en resumen, una menor amplitud de vibración en las formas y, por consiguiente, una mayor resistencia viva de las mismas.

Resulta, además, muy notable y característico, en el cemento armado, el hecho singular de que vienen extraordinariamente retardadas las cargas de rotura después de los señales de decrepitud alcanzados por esfuerzos excesivos ó por mala ejecución. Queremos con esto decir, que si, por ejemplo, en una estructura de mampostería usual, ha sido necesario aumentar en un treinta por ciento la carga que ha iniciado grietas, para provocar en definitiva la rotura, en cambio, si la estructura tiene tendones adheridos, hase de aumentar aquella misma carga iniciadora de las grietas, en un noventa por ciento, para alcanzar el derrumbamiento. No significan, pues, las señales peligrosas, en las formas de cemento armado, el desequilibrio cercano de sus es-

estructuras, contrariamente á lo que sucede en todos los demás sistemas en que el más pequeño signo de decrepitud suele anunciar un próximo fin.

La resistencia á conmociones sísmicas y trepidaciones de toda clase, constituye, para terminar, otro rico patrimonio también de las estructuras en hormigón armado, principalmente si todos sus miembros están solidarios por virtud del sistema de ejecución seguido, que debe consistir en un moldeo de toda la obra en conjunto, para obtener el monolitismo universal de la misma.

Las ventajas precedentes y otras muchas de detalle y de orden económico en que no debemos entrar, han hecho que se propagase con rapidez extraordinaria el sistema constructivo de estructura tendinosa con tendones adheridos. Y este mismo sistema se ha extendido también á la esfera de la gruesa ingeniería de obras, pues no son sólo ya formas estructurales de la usual edificación, como placas, vigas, muros y escaleras, las que resuelve el cemento armado, sino que las grandes construcciones industriales que en la actualidad se exigen, como puentes y viaductos, tuberías, gigantescos entramados, estaciones ferroviarias, etc., se realizan seguramente por tal sistema. Conocidas son, entre otras, el gran viaducto de Sitter (Suiza), terminado en 1908, con un tramo central de ochenta metros de luz; el sifón del Sosa, en España, proclamado como la mayor tubería del mundo, con cerca de cuatro metros de diámetro; la nueva estación de mercancías, de Newcastle-on-Tyne (Inglaterra), el depósito británico más vasto que se conoce, reali-

zado sin la intervención de una piedra ni una viga de metal, apoteosis completo del cemento armado que impera soberano en los muros, cubiertas y pisos de carga, estructurando en unas regiones superficies lisas, pero en otras superficies caladas, verdaderas triangulaciones ó cuchillos de forma que, á distancia, aparecen como construcciones de calderería; tal es la finura y la elegancia alcanzada por el sistema tendinoso en la resolución asombrosa de un problema de resistencia.

No podemos terminar este capítulo, sin señalar, á lo menos, el nuevo rumbo á que insensiblemente se orienta el principio portentoso del tendón adherido. Efectivamente; hoy se hace ya algo más que armar con tendones una ganga de cemento moldeado, no hay ya necesidad de que sea precisamente el referido aglutinante el material de aquella ganga; puede emplearse perfectamente otro género de material, por ejemplo, el vidrio mismo, que en fusión permite estructurar placas y otros miembros con osatura de metal fuertemente adherida en su entraña; díganlo sino las producciones admirables y de extraordinaria resistencia, elaborados en *fer grille*, salidas de la manufactura Saint-Gobain, ya empleadas en muchos casos y especialmente en las cubiertas vítreas de las grandes naves francesas de estaciones de ferrocarril. Pero se va aún más lejos con este mismo principio, llegándose ya actualmente á prescindir en un todo del penoso moldeo que los anteriores métodos exigen para la realización de las formas estructurales; se puede realmente combinar

el tendón adherido con el ingenioso sistema de la bóveda tabicada, y á este efecto, intercalando entre las hojas ó láminas compositivas de la estructura de tabiques un cierto número de tendones ó flejes de metal que adhieren fuertemente, como en el cemento armado, á la ganga del mortero que suelda aquellas hojas, se obtiene una estructura original y económica, resistente y elástica que sintetiza de un modo admirable las ventajas de la construcción cohesivo-tabicada y las que son propias del hormigón armado. Este procedimiento, sencillo y practicable, ofrece formas estructurales que además de reunir las excelentes cualidades indicadas, posee otra de apreciables, cual es su alta resistencia al fuego, por efecto del mayor grado refractario, que respecto al cemento, alcanza el material de arcilla cocida.

El ancho campo en que dijimos puede moverse la fantasía del constructor en estructuras tabicadas, se enriquece por el anterior sistema con más vastos horizontes, que á su vez pueden generalizarse, si consideramos que, por una transgresión feliz del sistema, en ciertos casos se estructura en el espacio exclusivamente con el hierro comercial laminado, por ejemplo, un esqueleto de no importa qué complicación y atrevida forma, el cual puede después vestirse con buen mortero y ladrillo en disposición tabicada, obteniéndose finalmente una arquitectura original de equilibrio fantástico, pero altamente resistente, porque obran con energía los metálicos elementos latentes en el interior á los que adhieren fuertemente el aglutinante y el ladrillo.

VIII. — APÉNDICE

No debemos terminar la filosofía de las estructuras birresistentes pseudoelásticas, sin detenernos siquiera un instante en las formas constructivas convenientemente tratadas que son propias del hierro fundido, material de nuestra Ingeniería que se prodiga con abundancia y que goza precisamente de las cualidades pseudoelásticas con que se caracterizan aquellas estructuras.

La fundición, esta materia intermedia entre el mineral de hierro y el hierro propiamente dicho, este producto obtenido en los altos hornos y del que por la operación del pudelaje se obtiene finalmente el hierro, es frecuentemente empleado para la realización de formas estructurales, mediante el consiguiente moldeo, después de una segunda fusión, en el cubilote. El conocimiento de la fundición data, en rigor, desde la misma época en que se descubrió el hierro, puesto que tal materia es un producto accesorio que se ha formado accidentalmente siempre en los hornos, por primitivos que hayan sido, de tratamiento del mineral, por efecto del íntimo contacto del combustible con el hierro, el que absorbe así un exceso de carbono convirtiéndose en fundición. Sin embargo, las aplicaciones definitivas á la construcción, la adopción, en fin, de formas estructurales de este material data, aproximadamente, de unos dos siglos atrás, época en que se estableció

la primera fundería en Coalbrookdale (Inglaterra). Unos años más tarde, siguieron otras fábricas al establecimiento de la referida, y con ello el arte de la construcción se vió impulsado por el hierro fundido, comenzando así á estructurar por sí sólo los miembros arquitecturales.

Como la propiedad mecánica característica de la fundición, ha sido siempre la superioridad del coeficiente de resistencia á la compresión respecto del de tensión, y como, además, los miembros constructivos de la referida arquitectura se consolidaban íntimamente por uniones de pernos ó tornillos, resultaron, en fin, las formas estructurales de condición pseudoelástica taxativamente marcada.

La arquitectonografía de la fundición, empleada en forma de estructuras birresistentes, constituye indudablemente uno de los más interesantes períodos del estudio histórico de la construcción metálica, época que comienza francamente en el año de 1803 con el establecimiento del célebre puente del Louvre (*Pont des Arts*), en París, que hoy se conserva en perfecto estado, al cual siguieron cronológicamente, entre otras interesantes obras, el famoso *Pont du Carroussel*, que inauguró el racional sistema de los miembros constructivos tubulares ó huecos; la armadura de la Catedral de Chartres, que substituyó á la primitiva cubierta leñosa, incendiada en 1836; la estructura hermosa y decorada empleada al descubierto, por el gran Stüler, en el Museo de Berlín; la celebrada cubierta proyectada por Labrouste, en la Biblioteca de Santa Genoveva, de

París; el afamado Palacio de Cristal, de Sydenham, (Londres), construido por Paxton, etc., etc.

Todas estas formas, que revolucionaron el arte de estructurar y que decayeron en parte después con la aparición de la calderería para dar paso á la estructura metálica completamente elástica, hanse seguido, sin embargo, empleando en parte, y anuncian, actualmente, tomar cierto incremento en virtud de algunas propiedades de que goza la fundición, especialmente la de ser menos oxidable que el hierro laminado. Pero la característica moderna de las construcciones de fundición, está en el empleo del acero fundido, que tiene las mismas ventajas que el de hierro colado, careciendo, en cambio, del principal inconveniente de ésta, cual es su fragilidad para las trepidaciones y choques. Realmente, la fundición de acero es apreciable por su comportamiento en los choques, que los resiste casi tan bien como el hierro.

Es interesante notar la manera como en la actualidad renacen las estructuras de fundición, manera por cuya virtud se cambia en cierto modo el coeficiente estructural de las formas, pasando éstas así de birresistentes á unirresistentes por efecto sencillamente del carácter estereotómico ó de despiezo que va acentuando la arquitectura de la fundición; por tal motivo, hemos, con más oportunidad, de volver á este tema, siendo este lugar tan solamente el indicado para definir la existencia del sistema de construcción referido. Por el empleo de la fundición pueden producirse formas estructurales de variación extraordinaria, y que, por gozar un tanto

de la propiedad birresistente, serán aptas, aunque con poca intensidad, para sufrir trabajos de flexión; por consiguiente, sus perfiles podrán ligeramente discrepar, como en las estructuras tabicadas, de la línea potencial de acción externa. Es, no obstante, muy prudente asegurar el paso de dicha línea por puntos especiales de la construcción, para tener así la seguridad de que irá ciñendo á la estructura, evitando con ello el que se aparte demasiado de la misma, y eliminando, por consiguiente, las flexiones excesivas; como precisamente tales flexiones suelen verificarse en los empotramientos, de aquí que en las estructuras de fundición, contrariamente á lo que sucede en las completamente elásticas, como las de hierro y acero laminados, sea lógica la introducción de rótulas ó pares de articulación en substitución de aquellos empotramientos, con lo que se permitirá el libre giro de las secciones. Los alemanes han comprendido perfectamente este principio, disponiendo con articulaciones en su base y capitel á las columnas que sostienen los viaductos del Metropolitano de Berlín; y asimismo los ingleses, entre otros notables casos, ejecutaron el de las columnas articuladas de la famosa Sala *Olympia*, de Londres.

PARTE IV

ESTRUCTURAS BIRRESISTENTES ELÁSTICAS

I.—PRESENTACIÓN DE LAS FORMAS ELÁSTICAS

POR gradación sucesiva, en las páginas anteriores hemos ido revistando principios estructurales dotados de elasticidad cada vez más notable, hasta el momento actual en que damos con las estructuras por excelencia flexibles, tan genuinas é interesantes, que forman un grupo completamente aparte de las precedentemente estudiadas y de las que más adelante hemos de analizar cuando tratemos de las formas unirresistentes.

Nos encontramos ya, desde esta página, entre una frondosidad arquitectural verdaderamente aturdidora, tal es la copiosidad de formas, la infinidad de aspectos, la multitud de maneras con que se nos presentan estas estructuras de evolución rápida y de mágica generación, concepciones atrevidas del cerebro positivista y mecánico de nuestros días, que ha imprimido á su arquitectura este sello de neurosis y de fiereza, tan opuesto á la serenidad de las

estructuras clásicas y á la piadosa expresión que respiran las obras románticas de la edad pasada.

Estas estructuras están viviendo intensamente; son como sistemas nerviosos en continua tensión; tienen, pues, un principio distinto, una fisiología diferente de la que caracteriza á las construcciones muertas cuyo equilibrio consiste en el descanso por gravedad de unos cuerpos sobre otros. Tal vez esta función activa, reflejo admirable y verdadero del frenético ambiente del presente siglo, es lo que explica el carácter pasajero ó la perduración limitada de nuestra arquitectura de materiales elásticos; explicación atrevida y de orden filosófico de que podemos, sin embargo, perfectamente prescindir, si aceptando un motivo más asequible, buscamos el porqué de la corta vida de dicha arquitectura en la vulnerabilidad que tienen el hierro y el acero, cuando se les expone completamente al desnudo.

Las construcciones que vamos á analizar, constituyen la realización más perfecta del principio estructural, principio que simboliza, al fin, el esqueleto, la forma estrictamente resistente, llevada á cabo con exclusión completa de material inerte. Por esto, tales formas se presentan cual diagramas reales de líneas de fuerza, configurando los arcos y vigas, brazos y tirantes, que convenientemente dispuestos, y á veces con multiplicación espantosa, forman los enrejados caóticos de nuestros estatúmenes industriales. Por esta razón, la constructibilidad de las estructuras elásticas se basa, amén de las leyes compositivas que veremos, en la conexión de todas aquellas piezas componentes, conexión que se puede establecer

con igual solidez, sea el que fuere el sistema que se adopte para resolverla: bien sea el de pasadores de articulación en las concurrencias de las piezas, que significa, como sabemos, el sistema americano, bien el de los enlaces rígidos empleado en las estructuras europeas.

El descarnado de estas construcciones, la ostentación de estos esqueletos, crea innegablemente una arquitectura nueva desde el punto de vista del arte; las formas carnosas de las arquitecturas cohesivas y de las estereotómicas de piedra, no cuadran ni son adaptables en manera alguna con la estructura elástica al desnudo, por cuya razón el único arte de éstas consiste, frecuentemente, en la adopción de perfiles generales ó sentidas curvas con accidentación y movimiento atinado, principio de estética que en sus aplicaciones desciende á veces hasta al tratamiento de los pequeños miembros de aquellas estructuras; no es otra la razón de las celosías curvilíneas de ciertas formas constructivas cuyo carácter rigorista y extremadamente utilitario, no ha podido menos de disimular así un tanto el innato sentimiento de belleza que posee el hombre y cuya extirpación completa resulta ser un hecho casi del todo imposible.

En todas las estructuras elásticas impera una composición absolutamente liberal, no habiendo siquiera necesidad alguna de plegarse á formas planas, aunque éstas usualmente dominan, á consecuencia de una cierta pobreza de imaginación por parte del que las proyecta y por el instinto, á la vez, de buscar una máxima facilidad de construcción. El empleo de formas con doble curvatura oca-

sionaría, en general, un trabajo por torsión; pero esto no significaría particularidad alguna para las estructuras, las cuales podrían perfectamente calcularse con el conocimiento previo de la línea potencial de acción externa, respecto á cuya línea puede evolucionar independientemente la forma, dada su elasticidad, la cual es completa en el caso que estudiamos. Precisamente en esta independencia que señalamos, tienen su característica las formas elásticas, y de nada serviría su elasticidad, ó hablando en términos más precisos, su birresistencia absoluta, si adaptáramos aquellas formas á la línea de acción externa, circunstancia que evidentemente equivaldría á despremiar la cualidad tensiva del material empleado, cualidad cuyo alcance, en cierto grado, constituye, como se ha visto, los más grandes afanes de los constructores en obra cohesiva.

Hay que confesar que en las estructuras elásticas es en donde los métodos verificativos de nuestra resistencia de materiales gozan de más autoridad y producen más confianza, á pesar del empirismo por que se rigen, pues la igualdad sensible que entre las resistencias á la compresión y á la extensión de que gozan, permite eliminar la vacilación existente en los demás casos respecto á la posición del eje neutro, que actualmente coincide con los centros de gravedad de las secciones transversales de las formas. Esta circunstancia, unida á que la textura fibrosa de los materiales empleados parece responder, más que otros, á la ley trapezoidal de la deformación plana, hace, finalmente, que las estructuras tengan hoy una verificación relativamente

garantida, y de un modo especial las isostáticas, pues, por lo que respecta á aquellas cuyas reacciones finales se determinan á su vez por la teoría de la flexión, ya hemos dicho oportunamente, hablando en general, las lagunas que aun entrañan.

De todas maneras, gracias á la referida confianza relativa del cálculo verificativo y gracias también á la industrialización del acero, que desde 1855 ha inmortalizado el nombre de Bessemer, hoy se alcanzan unas estructuras de un peso muerto mínimo y, por consiguiente, con una delicadeza tan verdaderamente ideal, que semejan no ya esqueletos, sino, en ciertos casos, reales telarañas, cuya resistencia estaría, sin embargo, completamente asegurada para los efectos de las cargas estáticas, pero que en tratando de someterlas á fuerzas dinámicas (aspecto del problema en el cual el cálculo decididamente se estrella), hay que reforzar un tanto las secciones verificadas, haciendo lo que se llama *dejar hierro*, según frase confesional de los ingenieros prácticos que sienten elevadamente su arte.

El actual estado de la ciencia verificativa, que permite comprobar el trabajo por milímetro cuadrado en no importa qué sección de una estructura sujeta á una ley cualquiera de cargas, es relativamente reciente. No hace mucho (en el año 1866), aun no se conocía la manera de tener en cuenta los efectos de fuerzas y presiones inclinadas en una armadura, y por esto, los cuchillos de forma se calculaban con un exceso de carga vertical para tener así la seguridad de que podrían resistir también á las fuerzas no verticales, como la presión del viento.

Tal es, precisamente, el método de cálculo seguido por el insigne ingeniero Mr. Barlow en las armaduras gigantes de la St. Pancras Station, de Londres. Otro ejemplo demostrativo de esta misma idea, nos lo da bien claramente la experiencia con el tensiómetro, aparato cuya aparición reveló el atraso en que se encontraba el cálculo de las estructuras, puesto que al aplicarlo á las barras de éstas acusaba esfuerzos que casi nunca concordaban con los deducidos analíticamente; la verdad de esta última afirmación es bien notoria, entre varios hechos, por el realizado en 1879, en el puente de Nantes (ferrocarril de Nantes á Châteaubriand), en que se sabe que el ingeniero Dupuy hizo minuciosas experiencias, obteniendo en todas la conclusión citada.

Con sinceridad, repetimos, pues, de nuevo, que el cálculo de las estructuras elásticas ha ciertamente progresado; pero es preciso renovar las afirmaciones defendidas en la «Síntesis del cálculo», ó parte segunda de este libro: toda la ciencia verificativa se basa en la aplicación de la ley trapecial, ó la ley de articulación, empíricas ambas, pero con un empirismo que da satisfactorios resultados, principalmente en las estructuras elásticas, siempre y cuando en su aplicación nos mantengamos muy lejanos del límite de elasticidad para evitar deformaciones excesivas y permanentes.

Una circunstancia originalísima hemos, además, de señalar en lo que atañe á la verificación de las estructuras elásticas, y estriba en la posibilidad de resolver, tal vez, en ellas el grandioso problema de la determinación racional de la figura de su esqueleto,

problema cuya solución se vislumbra á través de la ley de las figuras recíprocas que liga la forma de la estructura con la de su trazado grafostático. Si tan prodigiosa resolución se alcanzase, ¡qué positiva arquitectura de lógica estricta no obtendríamos!... Y si esta misma resolución, yendo aún más lejos en nuestro ideal, pudiéramos generalizarla por las leyes superiores de una hipergrafostática del espacio, ¿qué maravilloso mundo de estereoestructuras no resurgirían infinitamente superiores, más útiles y generales que las humildes planoformas de que no sabemos salir?...

Volviendo, para terminar, á la realidad de la arquitectura presente de formas elásticas, hemos de dolernos al ver limitados por la decrepitud de su materia, como ya dijimos, los horizontes portentosos que parecen consentir. Así el material leñoso, como el metálico, con que se realizan aquellas estructuras, son destructibles en alto grado, pues, aun sin contar la fácil desorganización del primero, existen respectivamente en ellos la combustibilidad y la conductibilidad para el calor, que los hace á ambos extremadamente susceptibles á la acción de este agente, constante destructor de la arquitectura en todos los tiempos: el fuego. Por lo que se refiere especialmente á las formas de metal, ya se sabe, en convicción, quién pone término á su vida, que es sencillamente su oxigenación atmosférica; contra la que, y aun aplicando toda la moderna ciencia de protección de armazones desnudos de hierro laminado, no puede prolongarse aquella vida más allá de los ciento á ciento cincuenta años.

La grandiosidad y resistencia de las estructuras elásticas, está, pues, por ironía, en contradicción con su vida, en cuyo corto período, la ley compensatriz de los hechos de este mundo parece haber acumulado toda la grande energía que las obras de piedra ó ladrillo despliegan sosegadamente en su existencia secular.

La frondosidad estructural, la copiosidad de formas que, dijimos, reina en esta arquitectura de materiales elásticos, realizada con la madera y principalmente con el hierro y el acero, hace extremadamente difícil una reflexión metódica y una deducción lógica de principios de orden general que constituyan, digámoslo así, las guías en que poder deslizar nuestra imaginación durante el interesante y complexísimo proceso que viene, en resumen, á significar la determinación de una forma constructiva. Hay infinidad de tipos de armaduras, de puentes y de entramados, pero, precisamente, esta abundancia hace presagiar la existencia de infinitos tipos más que aun están por descubrir, por cuya razón no hemos de sujetarnos á la adopción sistemática de los hoy conocidos; pero se hace indispensable que sinteticemos á éstos y planteemos siquiera las leyes generales de configuración, pues éstas que, indudablemente, serán limitadas, se concentran ya en la actualidad, si no todas, á lo menos en su mayor parte, en el campo de las estructuras conocidas. El planteo de estas leyes nos dará aquellos principios, aquellas guías de nuestra imaginación, las que bien entendidas por nuestro cerebro y enteramente sen-

tidas por nuestro espíritu, serán fuente inagotable de las variadísimas formas que constantemente están exigiendo al ingeniero la industria y el comercio, entre cuya evolución marchamos. Pero este trabajo, de tan fácil definición, significa, sin embargo (y lo repetimos en descargo de nuestro poco acierto), una dificultad extrema por requerir un criterio sintético de indudable superioridad, sin el cual es infalible una desorientación completa al penetrar en el horizonte vastísimo de las estructuras elásticas.

Los capítulos que siguen no hacen más que indicar vagamente un camino á seguir para llegar á la posesión de este estudio.

II.—EL «EMPILAGE»

LOS elementos compositivos de la estructura elástica, en general, son piezas lineales, longitudinales, barras, en fin, cuya mutua combinación origina siempre el estatumen constructivo. El material de tales elementos, con tal que éstos sean elásticos, no influye en la esencia combinatriz de los mismos; por ello es que las estructuras realizadas, por ejemplo, en madera, obedecen á principios análogos, por no decir exactos, á las por que se rigen las combinaciones estructurales del hierro laminado. Toda la diferencia estriba en el valor de los coeficientes de resistencia, circunstancia que no podrá influir más que en la magnitud de la sección transversal de las piezas, pero no en la configuración

general de la estructura, que será la misma, por consiguiente, en las carpinterías que en las caldererías, ya que en ambas el *coeficiente estructural*, como hemos llamado á la relación de los coeficientes de trabajo á compresión y tensión, vale sensiblemente lo mismo, es decir, la unidad, y se ha basado, como se recordará, toda la clasificación de estructuras precisamente en el valor de dicho coeficiente.

Sirve el anterior razonamiento para justificar el que vayamos á buscar un origen leñoso al principio del *empilage*, que vamos á definir, y que preside también, convenientemente modificado, á algunas estructuras de metal.

La disposición adintelada de los elementos flexibles, y especialmente la combinación en enrejado ó retícula de los mismos, que, entre otros, constituyen los medios racionales para explotar la cualidad birresistente del material, entraña un conocimiento ó instinto mecánico superior que, indudablemente, ha sido precedido de un principio estructural más sencillo y asequible, cual es el del *empilage*. Significa el *empilage* una sencilla disposición de las piezas de estructura, realizada por amontonamiento de las mismas, disposición rudimentaria que con seguridad está inspirada en la que ofrecen las pilas naturales, y sin ley aparente, del material depositado por accidentes fortuitos.

La facultad ordenatriz y de geometrización que posee el hombre, ha transformado esas pilas en los primeros monumentos estructurales, y, al efecto, la superposición en horizontal de troncos de árbol, con cruzamiento sucesivo, ha resuelto la erección

de construcciones altas en las que la propiedad elástica aun no se ve explotada, porque, en rigor, el único principio aplicado es sólo el de gravedad ó de cargas superpuestas. Por este elemental sistema de estructura, ligeramente perfeccionado á consecuencia de las entalladuras que para el mutuo ensamblaje se disponen á los extremos de los troncos que se cruzan, se rigen aún, en la actualidad, las edificaciones elementales de algunos países montañosos y abundantes en bosques, como lo dicen claramente los chalets de la Noruega y los de los altos valles de la India, en la región del Himalaya.

Si en el *empilage* antes descrito nos separamos de la estricta vertical, elevando al efecto, con declive externo ó interno, las caras de la construcción, iniciamos de momento la explotación de la cualidad birresistente de la materia é introducimos así en el *empilage* el germen racional de la estructura elástica. Sucede esto precisamente al ir disminuyendo ó aumentando de longitud, sucesivamente para cada techo, á aquellos troncos que se entrecruzan, con lo cual se comprende que se obtienen, respectivamente, formas abovedadas, y en saledizo exterior; formas que por cierto constituyen rigurosamente los principios estructurales de las pirámides de Oriza y de los puentes de Srinagar (Cachemira).

El principio del *empilage*, en la forma definida, tiene una importancia realmente transcendental. Es un principio de estructura con aplicaciones numerosas y que vemos por doquiera continuamente repetido. Es este, exclusivamente, el principio en que están inspirados los célebres techos leñosos de

Sebastián Serlio, arquitecto bolonés del siglo XVI, techos que consisten en la confección del entramado horizontal, con barras de longitud menor que la luz del recinto á cubrir; el principio de sucesivo apoyo característico del *empilage*, auxiliado del arte de carpintería que por virtud del ensamblaje ha permitido, en este caso, la situación en un solo plano horizontal de todas las piezas que vendrían á constituir los techos superpuestos del *empilage* primitivo, constituye sencillamente la estructura de Serlio, entre cuyas ingeniosas variantes se cuenta el techo celebrado de la llamada por los franceses *Maison de Bois*, antiguo castillo de recreo del rey de Holanda.

Nuestras mismas estructuras modernas, de madera ó de metal, que forman los embrochalados y otros entramados horizontales de piso, no son otra cosa que los racionales *empilages* ya empleados remotamente en las terrazas de los palacios persas, como también, precisamente, *empilages* significan las actuales superposiciones de cavíos, correas y enlatado que, formando la estructura de cubiertas inclinadas, descansan sobre los pares de las armadu-correspondientes.

El principio del *empilage* que acabamos de revisar, tiene toda su racionalidad en las estructuras que no estén solicitadas por intensas fuerzas que tiendan á su deformación, y esta circunstancia, naturalmente, se verifica en los entramados horizontales y aun en los ligeramente inclinados, puesto que las fuerzas de gravedad no dan sobre ellos sen-

sible componente y queda, por tanto, asegurada toda indeformabilidad; pero así que los esfuerzos solicitantes son manifiestamente oblicuos al entramado, por causa de una inclinación importante de este mismo, ó de aquellas fuerzas, desaparece al instante la racionalización del principio estructural que estudiamos, haciéndose necesario la aplicación de otro completamente distinto, cual es, sencillamente, el de la triangulación tensada.

Por este motivo, precisamente, no tienen propiedad alguna un gran número de construcciones resueltas por *empilage* como, por ejemplo, las moradas palafíticas de los habitantes lacustres de la antigua Helvecia, que nos han mostrado las indagaciones modernas en los lagos suizos; como, por ejemplo también, algunas viviendas actuales de la Nueva Guinea que reflejan, en resumen, aquellos mismos *empilages*, etc.; pero donde más manifiestamente vemos reflejada la impropiedad absoluta que presenta el *empilage*, cuando no está oportunamente aplicado, es en las armaduras verticales de las históricas arquitecturas de la India, Grecia y Japón, estructuradas todas ellas bajo el principio común de estricta superposición de piezas.

Finalmente, para hacer sentir con toda su exactitud el principio del *empilage*, bastará citar el concepto estructural que preside á la composición del templo dórico. La superposición por gravedad de los cuerpos que estructuran dicha construcción, constituye un prototipo del principio de que tratamos, pero este prototipo que caracteriza al clasicismo de la arquitectura helénica en piedra, pierde

toda su racionalidad en la construcción elástica, observación singularísima, porque precisamente en material elástico engendröse el templo griego, como nos demuestran Vitrubio, Pausanías y otros autores que han descubierto la armonía estructural existente entre el primitivo templo de madera y el posterior, construído en mármol.

III.—EL «CANEVAS» TRIANGULAR

TOMEMOS un bastidor cuadrado con articulaciones en sus vértices, y materialicemos las diagonales por medio de dos muelles ó resortes helizoidales de acero. Pleguemos y despleguemos el anterior bastidor, con lo cual irá afectando perfiles de los infinitos rombos existentes, perfiles que representarán trabajos diferentes en los elementos del aparato descrito, puesto que dependerán del esfuerzo que hayamos desarrollado en las deformaciones imprimidas. Por tal inocente, pero vivo experimento, nuestro espíritu mecánico percibirá la realidad del «paralelogramo de las fuerzas»; vislumbrará ciertas relaciones entre las figuras y los trabajos con que reacciona aquel bastidor; sentirá intensamente el principio del tensor ó tirante, así como el del tornapuntas ó compresor; y comprenderá, finalmente, la indeformabilidad del triángulo, de esa figura elementalísima, de estabilidad inalterable, por cuya exclusiva multiplicación, cual fecunda célula estructural, se alcanzan universalmente los armazones

constructivos de material elástico con que se enorgullece nuestro siglo.

El triángulo, trabajando efectivamente en la forma antes descrita y dispuesto en no importa qué tamaño, campea como soberano en nuestras armaduras, retículas ó *canevas*, cuya idealidad y rigidez grandiosas tienen su secreto precisamente en el arriostrado que permite el elemento triangular. El triángulo es, por fin, quien resuelve el elemento de atirantado en toda clase de estructuras, y sienta, por esto mismo, el principio de la triangulación tensada, primordialísima idea de toda la carpintería y calderería de construcciones.

El peculiar trabajo de la figura triangular no es realmente un conocimiento conquistado por completo en nuestros días, pues su aplicación parece indudable en muchas construcciones remotas; pero en cambio la posesión entera del principio de triangulación, si no es patrimonio exclusivo de la época moderna, no se remonta tampoco más allá de la medioeval. El principio en cuestión, necesariamente, por lo indispensable que es á todo estatumen constructivo, ha presentado síntomas constantes en todos los períodos arquitecturales, ha ido revoloteando, digámoslo así, como una precursión feliz, á través de todos los estilos históricos, pero sin posarse jamás definitivamente en ninguno de ellos hasta la presentación de la época gótica.

Los jabalcones dispuestos en algunas aberturas de la primitiva construcción del Egipto, constituyen, por nuestros datos, el más antiguo germen de la

forma triangulada, germen que desaparece para no presentarse hasta mucho más tarde, en la época de la plena Grecia, configurando los perfiles de los cuchillos de armadura que soportaban las cubiertas de los templos clásicos. Pero estos cuchillos, aun cuando triangulares, están resueltos, como indicamos en el capítulo anterior, por un sencillo *empilage*, puesto que en ellos los pares transmiten su carga contra la pieza horizontal no sólo á sus extremos, sino también á su punto medio por efecto del pilarrejo ó pieza vertical, que obliga de esta manera á trabajar por flexión á lo que aparentemente significa un tirante, pero que, como advertimos, no trabaja en realidad como tal. Por consiguiente, el cuchillo griego no corresponde á la triangulación tensada.

Aunque la arquitectura india, por efecto de los tornapuntas frecuentemente colocados para sostén de la volada libre en las carreras horizontales de su abundante construcción leñosa, presenta con cierta claridad la concepción triangulada, sin embargo, hay que convenir que á quien corresponde, de una manera definitiva, el descubrimiento precioso del constructivo triángulo con un lado tensado, es á la civilización romana, que afirma claramente la posesión del principio de que tratamos, con la franca inauguración del cuchillo de armadura atirantado, abriendo así la puerta á todas las formas estructurales de material elástico que han venido más tarde. La armadura romana, resuelta por los *capreoli* y el *transtum*, de que nos habla Vitrubio, esto es, por los pares y el tirante, es la única forma que permitía entonces el cubrir las luces de más de veinte

metros de las basílicas de Trajano y de Fano, sin embargo, la armadura romana era aún de concepción pobre; tenía sí, concebido, como hemos dicho, el principio de triangulación tensada, pero esta concepción entrañaba un raquitismo: la armadura en cuestión estaba formada por un sólo triángulo, el principio de la adjunción triangular, por el cual se multiplica, hoy casi al infinito, la magnitud y la potencia de las estructuras elásticas estaba completamente ignorado; no se había, en fin, presentado la ocurrencia de reticular trianguladamente la forma general por el sencillo empleo de piezas oblicuas. La precisión de esta observación tiene bastante alcance para comprender la grandiosidad é importancia de la triangulación, y viene, además, claramente confirmada en el portentoso ensayo de construcción metálica realizado asimismo por los romanos en la célebre cúpula de las termas de Caracalla, que nos describe Samuel Ware en su *Vaults and bridges*; esta cúpula de treinta y cinco metros de diámetro estaba estructurada por un costillaje de cobre y latón formando retícula, pero la malla de esta retícula era estrictamente cuadrada.

Y aprovechando la oportunidad de la referencia de esta cuestión, advertiremos que á primera vista parece lógica y suficiente la malla cuadrada para constituir la retícula de un costillaje en bóvedas de revolución, y asimismo se comprendió al estructurar la bóveda de la Bolsa de Comercio, antiguo *Halle au blé*, en París; pero desde que el principio de triangulación arraigó completamente por la abundancia y profusión de nuestros hierros laminados,

se resuelven ya aquellas mismas estructuras con retícula triangulada por oponerse en absoluto á la tendencia rotatoria que acompaña á las formas cupulares, viniendo esto confirmado con la reciente estructura adoptada en la nueva Sinagoga de Berlín.

La retícula cuadrada fué, pues, primeramente comprendida y preséntase con antelación á la retícula triangular; la génesis de ésta debe haberse formado subdividiendo los armazones con piezas oblicuas, y es interesantísimo notar la rareza con que éstas se presentan en las construcciones antiguas, observándose además que en ningún códice que trate de la construcción se hace nunca referencia al empleo de dichas piezas. En la misma construcción romana, iniciadora, como hemos dicho, de la triangulación tensada, no existen más ejemplares de piezas inclinadas subdividiendo polígonos, que las de la estructura del puente Danubio, conocida por los bajorrelieves de la columna de Trajano, con la circunstancia notable de que tal parquedad en el empleo de dichas piezas es sistemáticamente imitada en toda la época de la arquitectura italiana que siguió, por tradición, empleando los métodos y formas desarrollados en Roma.

Llegamos, por fin, á la época medioeval, en que florece, junto á la piedra, la rama de la arquitectura leñosa, precursora indudablemente de nuestras formas estructurales metálicas; y aquí encontramos cómo la construcción de las grandes Catedrales, cubiertas por tejados de madera, y la ejecución de gruesas armaduras para el ataque ó defensa de las

plazas fuertes, exige ingeniosos sistemas contrarios á la carpintería antigua, que buscaba su solidez únicamente en maderos descomunales y de escuadrías enormes; aquí, en la época gótica, se utilizan, por el contrario, las piezas de secciones menos fuertes, enlazándolas por otras inclinadas formando tirantes y tornapuntas ó cruces de San Andrés, configurándose completamente una infinidad de estructuras rígidas y resistentes, á base de la repetición triangular, aplicadas á entramados verticales é inclinados, cubiertas y armazones de toda la construcción.

Queda, pues, de una manera casi definitiva, establecido, en tal período, el principio de la triangulación tensada, y por esto el *invento* del americano Town, realizado en 1840, con sus vigas de celosía construídas en madera, produce, al que conoce la evolución de las estructuras, un efecto parecido al «descubrimiento del Mediterráneo». El principio de triangulación, propiamente, es inventado por los arquitectos medioevales, y sus ventajas se sintieron tan claramente que no vaciló en adoptarse desde los primeros albores de la arquitectura metálica, iniciada con el empleo de estructuras realizadas en piezas de hierro forjado enlazadas entre sí por medio de pernos y ensambladuras. El *canevas* triangular es, pues, el que resuelve las formas de aquella nueva arquitectura, como viene, entre otros ejemplos, demostrado por el puente sobre el Crou, en Saint-Denis, que realizó, en 1808, el gran ingeniero Bruyère, autor asimismo de otro puente en hierro forjado y cuyo proyecto no llegó á realizarse, puente que de-

bía cruzar el Sena, en París, ante los Inválidos, por medio de un solo tramo de 130 metros de luz; tal inusitada abertura, hasta entonces jamás concebida, se hubiese exclusivamente alcanzado por el misterio poderoso del *canevas* triangular.

Al venir, poco después de la época de referencia, á substituir definitivamente la fundición al hierro forjado, formando así una como era de transición entre la arquitectura de forja y nuestra moderna calderería, aparece la notable originalidad de retroceder el fecundo principio de que tratamos, notándose, al efecto, como todas las construcciones son compuestas con líneas variadas y leyes difusas que acusan claramente una ausencia completa de criterio definitivo dando por resultado un inconsciente olvido del principio de triangulación, olvido que llega á interesar hasta el comienzo de la misma calderería, tal vez porque la plancha de palastro, cuyo laminaje precedió al de las profusas barras de perfil racional, no se presta de un modo directo á las configuraciones de enrejado. Las dos joyas de la histórica ingeniería inglesa, llamadas el *Ironbridge* y el *Britannia bridge*, constituyen, respectivamente, las más claras pruebas que podemos aducir para demostrar el citado retroceso del fecundo principio de triangulación: la primera de estas estructuras está realizada en fundición, material no apto para los esfuerzos tensivos, y configurando motivos curvos y arcos con enrejado de malla rectangular; y por lo que respecta á la otra estructura, es sencillamente en forma de tubo de sección rectangular, con sus paredes en maciza placa de palastro.

Finalmente, al venir el laminador á invadir nuestro comercio con la abundancia prodigiosa de barras laminadas cuya constructibilidad consiste en su combinación por cruce y su unión por ribeteado, renace con gran vigor el principio de triangulación, enseñoreándose por completo de la arquitectura del metal laminado, haciéndola progresar con intensidad asombrosa y presidiendo ya definitivamente á todas sus manifestaciones.

El principio que venimos analizando tiene, pues, una serie de fluctuaciones y un germen sumamente antiguo, pero su definitivo arraigo, á pesar de la evidente sencillez que entraña, ha necesitado muchos siglos para establecerse. El misterio de este hecho está, seguramente, en nuestra lentitud de comprensión. Por increíble que parezca, los principios elementales, hoy contados, que posee el gran arte de construir, han costado al hombre muchos millares de años de ensayos, intentos y reflexiones; la posesión completa de aquellos principios, no viene más que á fuerza de esta penosa labor; en cambio, el germen de ellos, es decir, el instinto constructor del hombre, es espontáneo y manifiesto en casi todas las etapas arquitecturales.

En la actualidad, por fin, parece haberse ya enteramente comprendido la fecundidad constructiva de la triangulación tensada: ella es la base de nuestras estructuras de contraviento, de nuestros mil tipos de cuchillos de forma, de entramados, de vigas y de obras elásticas de toda clase; pero, ¿por qué hemos de suponer que esta flor ya se ha abierto por completo? ¿Por qué no esperar del principio

de triangulación más portentos estructurales? No creemos que pueda negarse la justicia de esta sospecha esperanzada.

IV.—EL EMPOTRAMIENTO Y LA RÓTULA

ESTOS dos dispositivos, aparentemente secundarios detalles de la constructibilidad de formas elásticas, integran de por sí otros dos principios generales de la misma importancia que los anteriormente estudiados al ocuparnos del *empilage* y de la triangulación.

El empotramiento, perfecto ó imperfecto, poderoso y fecundo auxiliar de las formas estructurales de leño y de metal, significa un principio esencialmente moderno de la construcción elástica. En ninguna obra de la historia de la arquitectura, aparece tal principio intencionadamente explotado, y en el mismo estudio arquitectonográfico del metal púedese observar claramente como en sus primeras estructuras, y hasta en muchas de las actuales, preside exclusivamente el dispositivo de articulación ó rótula que constituye, á toda evidencia, un principio primitivo, elemental y enteramente opuesto al que llamamos «de empotramiento».

La superioridad inaudita que el principio de empotramiento tiene sobre el de rótula, consiste, como es sabido, en que por efecto de la sujeción que significa en la sección de la pieza en que está aplicado, modifica esencialmente la elástica de la

forma constructiva, toda vez que aquella sujeción influye en las restantes secciones, ciñendo sus movimientos y originándose directamente un increíble aumento de resistencia.

La mecánica racional no ha podido aún descubrir el velo misterioso que oculta el fenómeno del empotramiento, y por esto, al tratar de analizarlo, se cae indefectiblemente en la ley de la deformación de la materia, este *refugium peccatorum* que á fuerza de penoso trabajo, en casos muy contados, nos puede sacar de apuros. La ley de la deformación, como también en ocasiones la propia grafostática, nos confirman, sin embargo, el beneficio que reporta el principio de empotramiento; así, por ejemplo, en tratándose de piezas rectas empotradas, nos dice claramente como el momento flector en una sección cualquiera, es igual al que tendría la misma pieza igualmente cargada, supuesta sin empotrar, *menos* una función determinada del momento de empotramiento, conclusión que comprueba como el empotramiento equivale, al fin, á aligerar la estructura.

Este aligeramiento conduce á dos ventajas grandiosas que han coadyuvado potentamente á la propulsión de la arquitectura metálica: la economía de las formas y el aumento de su magnitud.

Parecen, pues, indudables las ventajas del empotramiento, y, realmente, cuando á la conclusión de orden científico, antes referido, unimos nuestra alta intuición mecánica que nos confirma plenamente cómo una forma empotrada tiene mayor resistencia que otra de las mismas condiciones supuesta tan

sólo apoyada, no nos explicamos como al principio de empotramiento no se le ha dado, aún, más universal aplicación.

El motivo único de tal explicación debe estar, como ya dijimos, en el fantasma del cálculo: en términos generales, así que campea el empotramiento en una estructura, se envuelven con el misterio las reacciones de la misma; las leyes de la Estática retroceden impotentes á falta de medios para descubrir aquellas reacciones; pasa la estructura á la categoría de las no isostáticas, y quedando desde luego tenebroso el problema, hay que acudir á la Resistencia de materiales para venir á situar aquellas reacciones con grandes penas y en contados casos.

En cambio la rótula, dispositivo de articulación, que enlaza los miembros arquitecturales, permitiendo el libre giro de las secciones de enlace, viene, digámoslo así, á quitar la vida en tales secciones á la forma arquitectural, con lo que perdiendo ésta absolutamente toda energía en los puntos referidos, no puede ya repeler á la curva potencial de acción externa; es, en fin, incapaz para reaccionar contra dicha línea, y, naturalmente, viene ésta á pasar por el eje de articulación, marcando así al operador, con matemática fijeza, uno de los puntos de su trayectoria. En llegando á triplicar tal hecho en una misma forma, queda la estructura completamente isostática, con lo que las sencillas leyes de la mecánica racional nos ofrecen inmediatamente el valor de las reacciones, resultando ya inocente el problema de la verificación.

Esta es la única explicación de la presencia de

articulaciones en las estructuras; ellas realmente introducen una facilitación en el cálculo de su resistencia, pero á costa de energía, con sacrificio de su luz, ó en perjuicio de su importe. El empotramiento, por el contrario, significa ahorro de hierro, es decir, economía de plata, y, precisamente por esto, su presencia en las construcciones industriales es intensamente solicitada. Los cuchillos del *Palais des Beaux Arts*, de París (Exposición del año 1889) y, principalmente, las gigantescas formas con más de ciento diez metros de luz de la estupenda Galería de Máquinas, si hubiesen estado resueltas sin las tres articulaciones, hubiesen indudablemente causado una impresión sensacional en el público científico, que vió en aquellas formas muertas, solamente impreso, aunque con rudeza inaudita, el factor de magnitud.

Desde el año 1863, en que por el nacimiento en Alemania de los arcos con tres articulaciones, probaron los ingenieros la comodidad de su verificación, se han ido después extendiendo estas formas por algunas grandes construcciones de Inglaterra, Bélgica y Holanda, si bien con poca frecuencia en la primera de dichas naciones, dando también resultado en los citados ejemplos de París, y, algo más tarde, apareciendo asimismo en la América del Norte, al erigirse en 1893 la Exposición de Chicago, cuyo célebre Palacio de las Artes liberales batió el *record* de las luces de cuchillos de armadura.

En las formas unirresistentes, cuyo estudio hemos aún de hacer, viene forzosamente exigida la presencia de la rótula en ciertos casos, por carecer aquellas estructuras de la elasticidad necesaria; pero

aquí, en las construcciones cuyo «coeficiente estructural» es la unidad, por igualarse completamente sus resistencias compresiva y tensiva, hay que insistir en que la rótula es un dispositivo que desmerece en alto grado la jerarquía de la estructura. Así lo comprendió, indudablemente, el espíritu científico del ingeniero Schwedler, al componer las armaduras para la sala de hornos de la Sociedad Imperial de Gas, de Berlín, con una articulación hábilmente disimulada en el vértice de las mismas; las armaduras en esta construcción aparecen en rigurosa continuidad, sin embargo, al analizar su dibujo en los planos del proyecto, se descubre un ingenioso dispositivo que permite el libre giro de la sección del vértice; la articulación existe, pues, pero la dignidad del ingeniero no ha consentido el ostentarla.

Hay casos, sin embargo, en que la rótula, ó, á lo menos, el principio de facilitación de movimientos que en definitiva viene á significar, tiene un empleo no solamente conveniente, sino también indispensable, toda vez que por su virtud se pueden ahorrar grandes obras y dejar en libertad la hercúlea energía molecular que, principalmente en el metal, desarrollan los fenómenos de dilatación y contracción, debidos á las variaciones de temperatura en general. El corriente caso de apoyo, por ejemplo, de una viga de puente en los vértices de sus estribos, representa sencillamente una articulación, y, al efecto, no sólo se perfecciona ésta por medio de la consiguiente rótula, sino que el constructor, frecuentemente, añade el carro consabido con rodillos de libre dila-

tación. El conjunto de rótulas y rodillos que á tales efectos se disponen en las estructuras de metal, exigen para su estratégico reparto y situación en dichas estructuras, un concepto claro de los movimientos que se trata precisamente de facilitar, y sus interesantes detalles, en los que se cuentan á veces los taladros colisos practicados para los roblones de piezas empalmadas, corresponden analizarse en los Tratados usuales de la construcción en metal.

Pero exceptuando las exigencias citadas, y hasta armonizándolas con ellas mismas, hay que hacer campear el empotramiento en todas las estructuras elásticas, bien sean éstas las que se desarrollan exclusivamente en sentido vertical (pies derechos, columnas, torres, chimeneas, etc.), bien las que avanzan horizontalmente para cubrir y salvar espacios (armaduras y puentes).

Respecto á las estructuras que se desarrollan verticalmente, por si nuestra intuición no bastase á ver las ventajas del empotramiento, será suficiente el invocar las afamadas fórmulas de Euler, de las que se deduce claramente que, por ejemplo, la carga crítica de una misma columna se va sucesivamente duplicando á medida que introducimos el principio de empotramiento, pasando, al efecto, aquella carga, por los números uno, dos y cuatro en los respectivos casos de doble articulación, una articulación y un empotramiento, y dos empotramientos, dispuestos naturalmente, en los extremos de dicha columna.

No es menos ostensible el beneficioso efecto del empotramiento en todas aquellas estructuras que se

desarrollan por avance horizontal, y así lo comprendió maravillosamente la portentosa intuición de Clapeyron al inventar la viga célebre que lleva su nombre, y que por transformación sucesiva da lugar á la viga Cadiat y á los puentes de varios tramos con viga continua y, finalmente, también á los puentes en arcuación con sus extremos enclavados contra rótula, pero con mucha mayor altura de viga en dichos extremos que en la clave, formas todas que en rigor envuelven un principio de categoría igual á la que caracteriza al empotramiento.

Donde este fecundo principio ha producido, indudablemente, más asombrosos resultados, es en las estructuras inglesas llamadas por *cantilever*, inspiradísima forma que se ha extendido haciendo prodigios y que entraña el principio de empotramiento engendrando solamente reacciones verticales. Es el cantilever una forma de extremada sencillez, que se equilibra por contrapeso como si fuese una balanza; esta forma ya presentida en los pabellones reales de la remota arquitectura asiria, como veremos al tratar de la construcción estereotómica, ha dormido sin ser comprendida por espacio de muchos siglos, renaciendo ahora con infinita potencia, como si quisiera resarcir á la humanidad de los beneficios de que la ha privado durante aquel plazo secular.

El sistema cantilever constituye el verdadero perfeccionamiento de la viga armada cuya teoría data de la segunda mitad del siglo pasado. Entre las portentosas ventajas del cantilever, resultan apreciables las de su reacción completamente vertical que, en las grandes aplicaciones á que se

presta aquella forma, favorece en alto grado el problema de las fundaciones de la obra; evita el cantilever los penosos y resistentes andamiajes que para el montaje de las estructuras exigen otro género de formas; y, en fin, tiene la ventaja de que la combinación de estas estructuras ha consentido salvar luces verdaderamente espantosas... basta combinar dos cantilevers opuestos y colgar, entre sus extremos, á un tramo central, para triplicar inmediatamente las luces más extraordinarias que se habían salvado antes de la implantación de aquella forma prodigiosa.

Las dos grandes aplicaciones de la forma cantilever, radican principalmente en las cubiertas, y en los puentes. Respecto á las cubiertas, encontramos felicísimos ejemplos en el inventario profuso de la arquitectura del metal, como, v. gr.: en la Galería de Minas de la Exposición de Chicago, y también en algunas estaciones ferroviarias de Inglaterra, entre las que indudablemente resalta de un modo extraordinario, por el profundo sentimiento mecánico que concentra, la celebrada armadura, sin tirante y sin empujes, de la Liverpool Street Station, de Londres. En cuanto á los puentes... nuestra pobre pluma no puede siquiera aspirar á traducir la grandeza que entrañan ni tan sólo de un modo imperfecto... La majestad de los cantilevers americanos del Niágara, del Frazer, del Queensborough y del Blackweles island bridge, así como la de los *Ponts grues* franceses de Passy y de Mirabeau, la de los *Auslegerbrücken* alemanes, y, especialmente, la del viaducto gigante del Forth (Esco-

cia), necesitan dignamente la pluma del Dante Alighieri para comunicar al espíritu la vibración compleja de poesía mecánica que emana de aquellos asombrosos enrejados de acero, de aquellas estructuras atlánticas que abrazan delicada y amorosamente, sin tocarlas en ningún punto, á las más anchurosas rías del mundo.

V.—LA «ESPIÑA DORSAL»

BAJO este título agruparemos algunas reflexiones que la construcción metálica nos ha sugerido, y que en esencia vienen á demostrar cómo en la composición de sus estructuras ha ido paulatinamente tomando pie el principio científico de los sólidos de igual resistencia, principio que literalmente interpretado, sin pararnos en nimiosidades y detalles, transparenta claramente una directa tendencia á imitar la completa racionalidad con que la naturaleza reviste á los estructurales esqueletos de la mayor parte de sus seres, proporcionando con justicia admirable la figura y sección de cada miembro al papel resistente que desempeña, y supeditando, finalmente, todo el sistema al espinazo general, forma la más importante y que caracteriza de por sí á la estructura.

Por esta ley superior de armonía mecánica se configuran actualmente todas las formas de construcción; pero especialmente en las armaduras elásticas, es donde vemos más marcada dicha ley estruc-

tural, así en sus figuras generales como en los más insignificantes detalles.

En las primeras estructuras de metal, la composición ofrecía el aspecto de un dibujo cuyas líneas fuesen trazadas todas ellas con un grueso de rigurosa igualdad; la estructura era, sencillamente, la materialización de un sistema de ejes rectos ó curvos por medio de herrajes de igual sección; este hecho, sobre el que llamamos la atención del lector, tenía lugar no sólo en las primeras formas constructivas de fundición (como nos demuestran claramente, entre otros ejemplos, los puentes de Ironbridge y de Sunderland), sino en las armaduras y entramados de techo primitivos, resueltos á la forja con barras de hierro de sección rectangular, unidas entre sí por medio de tornillos y ensamblajes típicos de cerrajería. En todas estas formas, repetimos, la estructura se configuraba con piezas sensiblemente de una misma sección, se asignaba á todas ellas una misma importancia, originándose, por consiguiente, un derroche de metal; á la materia no se la explotaba más que en los puntos aislados pertenecientes á las piezas de mayor luz y más trabajo, perdiéndose miserablemente la energía del hierro en el resto de la estructura.

El genio de Polonçeau rompe más adelante la anterior rutina, y al efecto, con su clásico cuchillo de armadura, y con los arcos tubulares del puente del Carroussel, en París (1832), demuestra poseer una videncia completa en lo que debe ser la mecánica de las estructuras elásticas, puesto que las dos citadas obras maestras integran, respectivamente, el

racional principio de los sólidos de igual resistencia y el del aumento de momento de inercia en las piezas flexadas; la popularidad de aquellas obras nos dispensa completamente de entrar en su descripción.

Sin embargo, los esfuerzos de Polonçeau, por sí solos, no bastaban para abrir á la construcción metálica la luminosa vía de la perfección que hoy está siguiendo; aquellos esfuerzos sirvieron solamente para alumbrar el ingenio de los constructores, decidiéndoles á adoptar en los entramados unas formas estructurales que constituyen feliz precursión de los hierros laminados con perfil racional. Á tal efecto, comenzaron en Francia á presentarse armaduras con miembros perfilados bajo forma de T, pero con el alma ó espina vertical independiente del ala horizontal; la conexión entre estas dos partes de la T establecíase, solamente, merced á frecuentes bridas de hierro forjado, unidas á la pieza por medio de pernos. No hay necesidad de recalcar la admirable intención de estas formas que se emplearon, desde 1840, en varias armaduras de importancia histórica grande, como son, por ejemplo, la del Palacio de Justicia de Tours, y la de la Aduana de París; pero se comprende desde luego la problemática eficacia resistente de aquellos perfiles, por cuanto la independencia de sus elementos evitaba que el correspondiente momento de inercia total alcanzase el alto valor del de las formas que con igual sección hoy laminamos. Pensóse, pues, en dar una solidaridad absoluta á los elementos configurativos de aquellos perfiles, y ocurrióse el laminarlos en una sola pieza, habiéndose, al efecto, en la época

de referencia, resuelto en Inglaterra el grandioso problema que fué por primera vez aplicado á la cubierta del embarcadero de Euston Grove (en el ferrocarril de Londres á Birmingham), cuyos pares están formados por hierros laminados de perfil en T, configurado, efectivamente, en una sola masa.

Cesaremos ya desde aquí el hacer historia, aunque indudablemente ésta es interesantísima; baste el haber indicado el nacimiento de la primera barra de perfil racional laminada. Á partir de tal momento multiplicanse extraordinariamente los perfiles comerciales de hierros cilindrados, substitúyense á los ensamblajes resueltos por entallas, muescas y roscas, los ensamblajes ribeteados, de insuperable economía, y queda definitivamente engendrado el arte portentoso de la «calderería», base fundamental de las estructuras elásticas de nuestro siglo.

El dinamismo intelectual que toda esta evolución significa en los constructores, es de una intensidad y rapidez verdaderamente extraordinarias; la mágica mecánica que el maravilloso perfil en doble T posee, y que en los períodos seculares de toda la construcción no se había sentido más que de una manera vaga y confusa, aparece con la fundación de la calderería, esplendorosamente interpretado. La doble T, el miembro constructivo, en fin, provisto ya de espina dorsal, se enseorea por completo de todas las estructuras, perfilando con su fecunda figura no sólo las piezas de pequeño trabajo, sino las de máxima potencia, siempre con materia proporcional, siempre con fatiga ó trabajo igual; basta, sencillamente,

aumentar de altura la T para aumentar prodigiosamente su resistencia; desaparece así la igualdad absoluta primitivamente reinante entre los miembros constructivos de una misma estructura, y se acentúa definitivamente el principio racional del esqueleto, apareciendo, por tal principio, todas las piezas con masa y con perfil apropiado á su resistencia, presentando ya, por tal hecho, las estructuras todos sus miembros con importancia diferente, y viéndose en ellas el espíritu justo y analista del ingeniero que ha fortificado equitativamente las formas fatigadas y aligerado las de menor esfuerzo, para lograr de esta manera un trabajo sensiblemente uniforme por milímetro cuadrado en no importa qué sección transversal de la estructura proyectada.

La máxima utilización de la materia que este sentimiento entraña, la racionalidad positivamente asombrosa que tal modo de construcción refleja, ha sido, como vemos, únicamente debida al instinto mecánico de dotar á los miembros estructurales con esta forma, con esta configuración que hemos calificado de «espina dorsal» y de la que están desprovistos casi todos los herrajes de las antiguas construcciones. Las piezas elementales aisladas puestas de canto; los conjuntos de piezas elementales puestas en planos también de canto para formar los robustos miembros de estructura, y, en fin, la configuración de todos estos miembros geometrizando formas situadas á su vez en planos de canto, constituyen en esencia una imitación feliz de la disposición maravillosa en espina dorsal.

Haciendo presidir este principio en la composi-

ción de estructuras, es como lograremos dotar á éstas de una resistencia portentosa, con una economía de material portentosa también. Entre la infinidad de ejemplos notables, que sugieren manifiestamente la idea de resistencia que transparenta la gran pieza dorsal que sirve de base á la composición, podríamos citar los célebres puentes del tipo *bow-string* (arco-cuerda) como el Saltash bridge; (Inglaterra) cuya pieza dorsal está constituída por un enorme tubo de sección elíptica; los del sistema alemán *Pauli*, como el de Maguncia sobre el Rhin, y, finalmente, los de dobles arcos opuestos, como el de Hamburgo, cuya estructura se extiende sobre el Elbe en tramos de cien metros, dibujando, análogamente al anterior, por sus curvas y gruesos espinazos, una serie alineada de gigantescas figuras lenticulares.

Por su directa relación con el orden de ideas que exponemos en este capítulo, hemos de citar, finalmente, el principio de los sólidos de igual resistencia, que permite llevar á la completa perfección la idea de repartir equitativamente la materia en los miembros estructurales, á tenor de las diversas resistencias que en cada una de sus secciones deben desplegar. Por este ideal, que el análisis alambica pero que el instinto ha creado, se alcanzan los perfiles típicos de las estructuras elásticas, que ora apoyadas simplemente, ora con articulaciones, ó bien en otros casos, en combinación atinada de apoyos y empotramientos, acusan invariablemente una expresión de justicia y de equidad en el reparto de toda

su materia, que las hace por sí hermosas, señalando un horizonte de bellísima arquitectura genuinamente típica del acero laminado, como nos dicen elocuentemente los modernos viaductos de Passy y d'Austerlitz, con los que actualmente cruza el Sena el Metropolitano de París.

VI.— LA REPULSIÓN DEL TIRANTE

HAY, en verdad, en la arquitectura, algunas formas estructurales cuya indiferente aceptación por parte de la gente entendida no se puede explicar más que admitiendo en ella una falta de filosofía ó de amor hacia el arte que practican. Este preámbulo, en apariencia impertinente, significa una llamada al interés y á la admiración que debemos sentir por una forma constructiva de misterioso equilibrio que ha venido á resolver, de una manera prodigiosa, el problema que durante siglos enteros ha sido la preocupación constante de los grandes artistas de la ciencia arquitectural, el problema, en fin, del contrarresto de una forma sin órganos externos ó contrafuertes y sin órganos internos ó tirantes. Hace sólo treinta y cinco años que la cuestión está enteramente resuelta en el terreno racional de la construcción elástica, pero este espacio hubiese ya podido ser suficiente, al menos, para despertar el entusiasmo y extender las aplicaciones de tan transcendental solución constructiva, que indu-

dablemente contiene el germen de una serie de estructuras que aun están por inventar.

Vamos ahora á ver por que pasos sucesivos hase, por fin, llegado á la solución aludida, y de este modo, si admitimos siquiera la inercia en la fuerza de las evoluciones, comprenderemos cómo, efectivamente, muchas nuevas estructuras de cubierta han de irse encontrando paulatinamente en lo futuro.

«Luz y pendiente»; he aquí los dos conceptos creatrices de las formas de cubierta. La luz, ó el ámbito de las crujías á cubrir, ha sido siempre un factor de considerable magnitud y constantemente creciente por las exigencias cada día mayores de la sociedad y sus actividades; la pendiente ó el ángulo de inclinación, que aumenta con la latitud del lugar, es una consecuencia natural del oficio de la cubierta, que por conjunción feliz viene á auxiliar la imaginación del hombre en la concepción racional de la correspondiente armadura, puesto que, efectivamente, al configurar una cubierta preséntase como una reminiscencia espontánea de la forma de sólidos de igual resistencia apoyados por los extremos, por efecto natural del peralte central que resulta al componer la cubierta con dos vertientes.

Las estructuras de cubierta en general, son indudablemente, de entre todas, las más interesantes y difíciles de resolver; todo el mérito de las formas estructurales radica precisamente en las que se desarrollan por avance horizontal, desarrollo á que tenazmente se opone la fuerza de la gravedad; la

historia de la construcción podría hacerse por la historia de la cubierta; la parte siempre débil y vulnerable de la construcción, está precisamente en la parte protectora, en la que por excelencia debería ser la más vigorosa é inmune; ¡ironías demostrativas de la imperfección de nuestras obras!...

La pendiente de una cubierta, entraña, indefectiblemente, el empuje que es preciso contrarrestar; de aquí la presencia primitiva del tirante que cierra por su base horizontal al triángulo configurativo de las cubiertas generales de vertiente doble. Pero el tirante, este obstáculo visual que cruza atrevidamente las naves y los espacios, como alardeando de ser la clave del equilibrio constructivo, es no sólo un impertinente elemento que desvirtúa la grandiosidad y el despejo de los grandes recintos, sino que, en realidad, constituye un verdadero embarazo en frecuentes construcciones, cuyo programa industrial requiere para sus naves una gran altura libre bajo el techo.

La estructura elástica ha resuelto, por entero, la supresión del tirante, desterrando definitivamente este elemento ya vulgar que constituye un triste recurso en la arquitectura actual. Nuestra construcción, más exigente y más perfecta que la de nuestros antepasados, no debería realmente emplear jamás el tirante para contrarresto de las grandes formas de estructura. El tirante, nacido en Roma, empleado en Bizancio y extendido por la Italia después, fué abiertamente combatido por los constructores de la Edad Media en sus arquitecturas de piedra, valién-

dose de los geniales contrafuertes ú órganos externos de contrarresto, cuya energía mecánica contrasta admirablemente con la prodigiosa esbeltez, delicadeza y filigrana de los botareles y arbotantes que albergan, cual estuches, á las líneas potenciales perdidas en el espacio.

Aquellos mismos constructores románticos inspirados tal vez en algunas rudimentarias armaduras de la primera época románica, que se empleaban como á cubierta protectora de las bóvedas ligeras, iniciaron decididamente en las armaduras de sus techumbres de madera, la repulsión manifiesta del tirante de contrarresto; encuéntrase ejemplos notabilísimos que lo demuestran así, en todas las escuelas góticas y especialmente en la inglesa, entre cuyos ejemplares figura la famosa armadura de Westminster, de veinte metros de luz, compuesta á base de un potente arco ojival que á manera de nervio y por medio de ingeniosa triangulación, está enlazado con los pares de cubierta, estructurando en conjunto forma de una gran rigidez.

Dentro del análisis que nos ocupa, resulta interesante observar la presencia de los techos bombeados, y sin empuje, formados en su estructura resistente por una serie de cordones en tablón de canto, cubriendo algunas grandes salas de la arquitectura italiana en el siglo XV. El Palacio municipal de Padua tenía, principalmente, una armadura de este tipo, que ha podido tal vez servir de origen á la célebre estructura francesa, que más adelante creó Filiberto Delorme, y que consiste, en rigor, en la

yuxtaposición de dos arcos formados por un dovelaje leñoso, de piezas en panderete y juntas contrapeadas, consolidados entre sí por medio de clavijas y cuñas. Pero este sistema, análogamente á lo que sucede con la conocida armadura Emy, compuesta á guisa de muelle ó resorte por virtud de un conjunto de tablas previamente curvadas, viene en definitiva á significar una solución estructural sin empuje, ó al menos con un empuje tan notablemente aminorado, que pueda con seguridad confiarse al momento estático de los muros el contrarresto correspondiente.

Como vemos, la anterior solución, aunque verdaderamente ingeniosa, significa de un modo llano la «escapada por la tangente» en el dificultoso problema de suprimir el tirante. Las formas que acabamos de citar evitan, sí, el empleo del contrafuerte ó del tirante, y aun hay que confesar que hacen algo más, pues evitan también el apelar á nuevo medio de contrarresto por la razón sencilla de que no dan empuje sensible...; sin embargo, tal anulación de componente horizontal, en la reacción de la estructura, no habrá podido lograrse sin algún consiguiente perjuicio, y, en efecto, la más ligera reflexión lo descubre inmediatamente. Si imaginamos un arco, ó, más generalmente, una forma estructural elástica, con momento de inercia considerable para combatir la flexión, se verificará que al someterla á un cierto trabajo, la deformación consiguiente provocará la serie de fuerzas interiores elásticas, que irán constantemente en *crescendo* hasta que ellas equilibren de un modo exacto á las fuerzas

exteriores. En este instante cesará en absoluto la deformación, por haber alcanzado la estructura lo que podríamos llamar su «régimen de equilibrio». Ahora bien; en nuestra mano está la medida de aquellas deformaciones: cuanto mayor momento de inercia, mayor rigidez, y menos deformación, originándose, por consiguiente, un menor empuje, una verticalización más completa, en fin, de la reacción final. Tal es el principio mecánico de los cuchillos italianos y franceses, antes reseñados; principio que podríamos perfeccionar, llegando á la absoluta anulación del empuje, disponiendo en los dos puntos de apoyo de aquellas formas, ó al menos en uno de dichos apoyos, una placa con rodillos de dilatación, para dejar así en libertad completa las pequeñas fluctuaciones deformatrices que indudablemente tiene el cuchillo del tipo Delorme y, que en definitiva, deben siempre perjudicar en mayor ó menor grado á la fábrica en que se apoya.

Se nos alcanza ya, perfectamente, cómo el principio de aquellas formas estructurales arqueadas y sin empuje, tiene una limitación manifiesta, puesto que no resulta práctico, ni económico en manera alguna, el tener que apelar exclusivamente á una gran altura de la forma para resolver la cuestión del empuje. Por esto se explica, que aun cuando en el año de 1850, el célebre Director de los Jardines del Duque de Devonshire, Mr. Paxton, desenterrase el principio de la armadura de Filiberto, en su famoso proyecto de *Crystal Palace* de Sydenham (Londres), no lograrse en la construcción metálica hacer escuela tal sistema, por cuanto si bien los

arcos del *Crystal Palace* no dan empuje, fué éste anulado gracias á una altura de dos metros y medio que tienen aquellas formas, altura realmente extraordinaria si se atiende que la luz que salvan no llega siquiera á diez y siete metros. Consideremos ahora el ámbito espantoso de ciento trece metros, que dijimos, oportunamente, poseía una nave de la Exposición de Chicago, y comprenderemos cómo el tipo de las estructuras de libre deformación, no hubiese podido allí aplicarse, y, por tanto, dicho tipo no resuelve más que muy incumplidamente el problema de la supresión del tirante.

Debemos, pues, retroceder este camino, porque no nos conduciría á la solución racional, que al comenzar hemos anunciado. La orientación indudablemente cierta para llegar á la supresión del tirante, la encontramos en la tendencia á elevarse éste en los cuchillos de armadura, por cuyo hecho se han obtenido formas de transición que aun cuando participan, en rigor, del mismo principio mecánico, definido al tratar de la armadura Filiberto, conducen, sin embargo, á un resultado positivamente distinto.

La elevación del tirante en los cuchillos de forma, sean éstos de recto ó curvilíneo perfil, parece un accidente sin importancia, y, sin embargo, constituye un hecho singularísimo de poderosa influencia en la construcción de metal. La idea aparece planteada con entera claridad, precisamente en las escuelas góticas de carpintería de armar, á que antes nos hemos referido, en cuya época se registran, además, en las regiones de la Escandinavia algunas

iglesias cubiertas con armaduras que entrañan el mismo principio de las que posteriormente se llamaron de «tipo Ardan», consistente en el empleo de dos tirantes inclinados que cruzándose al centro del cuchillo van á conectarse con los pares opuestos en puntos intermedios de la longitud de éstos. El principio del cuchillo Ardan es susceptible de complicación extraordinaria; basta multiplicar la triangulación y reforzarla con manguetas, acopladas á cepo, para tener una numerosa serie de variantes de formas estructurales, dotadas todas ellas con notable rigidez.

Dicha rigidez, sin embargo, puede aumentarse aún, considerablemente, estructurando la forma á guisa de doble viga armada, una para cada par del cuchillo, y haciendo después indeformable el conjunto, con tirantes inclinados dispuestos en una forma análoga á la que caracteriza la estructura anteriormente descrita. Bajo esta composición se obtienen los cuchillos de forma, sistema Moller, cuya resistencia é indeformabilidad puédesse aumentar á su vez cuajando todos los compartimientos con tablas engargoladas ó machihembradas, las que prestándose perfectamente á un calado decorativo, disimulan con elegancia la pesadez del forjado.

Todas las precedentes estructuras, tienden evidentemente á obtener formas diáfanas y libres del embarazoso tirante que en los cuchillos primitivos cruza la crujía al nivel de los puntos de apoyo, circunstancia que si la pendiente de la cubierta es pequeña, no tiene, indudablemente, la importancia que en los casos de grandes inclinaciones de pares,

como sucede en los países septentrionales por consecuencia del clima, á cuya observación es debido que las formas del Norte hayan, como se ha dicho, intentado primeramente resolver la dificultad.

La tendencia á elevar los elementos de atirantado fué inmediatamente heredada por las formas de la arquitectura metálica, que se apoderaron de aquel principio de las estructuras leñosas perfeccionándolo ingeniosamente. El cuchillo de armadura de tipo inglés, con tirante en ángulo, constituye una demostración evidente de nuestra aserción y á este cuchillo siguieron otros, inspirados en la misma idea, que han tenido gran aceptación, contándose entre ellos los inventados por los constructores catalanes, Torras y Arájol, en cuyos respectivos talleres fueron construídos una serie de notables ejemplares de estas formas, que se calificaron con los nombres de «cuchillo parabólico» y «cuchillo racional».

Dejando aparte estas dos últimas formas, que han aparecido posteriormente como una reminiscencia modificada del referido tipo inglés, debemos advertir que la idea de despejar la nave con la elevación del tirante, se ve claramente marcada también en las estructuras alemanas, como lo dicen las celebradas cubiertas de la fábrica de gas de Darmstadt y la más moderna del Gewerbehalle de Stuttgart.

Á todas las anteriores armaduras, siguen en orden de perfección las perfiladas á manera de arcos de igual resistencia apoyados por los extremos, con una considerable altura en el centro para disminuir así las deformaciones y evitar, por tanto, el empuje.

Como el cordón inferior de estas formas hace á toda evidencia el papel de tensor, por esto pueden ellas considerarse como una metamorfosis de los cuchillos de armadura anteriormente descritos con sistema de tirantes elevado, por cuya razón las citamos, haciendo además notar que ellas constituyen un notable grupo de formas estructurales llamados de «tipo falciforme», entre las que se considera como primera ó inaugural la de la estación de *Lime Street*, en Liverpool, construída en 1851, forma estructurada, en su cordón superior ó comprimido, con rails sistema Vignole, lo mismo que sus montantes. Esta armadura, que tiene una luz de cuarenta y siete metros, sirvió de perfecto ensayo para establecer, tres años más tarde, otra construcción del mismo tipo, estructurada ya en hierros de T, con la respetable abertura de sesenta y cuatro metros, en la estación de Birmingham; son también de este mismo tipo las cerchas de la cúpula del *Albert Hall*, de Londres. En Alemania existen armaduras relativamente modernas cuyo principio compositivo no difiere, en rigor, del que acabamos de referir, tal es, por ejemplo, la que cubre la fábrica de electricidad de Colonia.

No obstante, la racionalidad de los anteriores tipos referidos, hay que convenir, que en tratando de luces superiores á las citadas, la elasticidad de la forma provoca peligrosos empujes cuya anulación exigiría caer de nuevo en el inconveniente de que, dijimos, adolecen los arcos de reacción vertical; por esto los ingleses muestran tener un admirable sen-

tido mecánico, al romper con su propia tradición de los cuchillos falciformes, cuando para las grandes cubiertas establecen unas formas de armaduras aparentemente inspiradas en las estructuras alemanas de la antigua estación del Este (Berlín), y de la fábrica de gas, de la propia ciudad; pero así como estas dos últimas estructuras tienen cuchillos en arco con triple articulación y el nivel de su nacimiento está á una regular altura sobre el suelo, por lo cual hay necesidad de contrarrestar su empuje á fuerza de un gran espesor del muro de apoyo, en cambio, en las nuevas estructuras inglesas á que aludimos, la solución acusa un pensamiento enteramente original: los puntos terminales de la armadura llegan al suelo, y las articulaciones se suprimen quedando así la forma empotrada en terreno firme y cruzando en continuidad absoluta el espacio, como un seguido aro de metal. De este tipo son, entre otras, las armaduras de la St. Pancras Station, de Londres; de la St. Enoch Station, de Glasgow; de la Estación central de Manchéster, y otras muchas cubiertas de construcciones pertenecientes á la industria particular inglesa.

Con la disposición referida, pasan las fundaciones de la estructura á representar el papel de contrafuertes, con la singularidad, empero, de que ahora esta función está notablemente favorecida por el propio terreno, circunstancia que de no bastar, puédesse evidentemente reforzar con un tirante subterráneo, como en rigor sucede con la primera de las citadas estaciones que fué construída por la Compañía *Midland*, en 1866, llamando entonces poderosamente

la atención por la grandiosa luz de aquellas formas (que llega á los 73 metros), y por la belleza de la arquitectura de toda la obra en general. Actualmente, á pesar de nuestro hábito en ver manifestaciones intensas de la arquitectura industrial, aun el ingreso en el gran *hall* de la St. Pancras, causa una sensación profunda que no se puede olvidar; tal es la majestad que respira toda aquella construcción grandiosa y austera calificada como una de las más hermosas estaciones ferroviarias del mundo.

Es necesario observar la poderosa influencia que en el perfil de la armadura ejerce la innovación inglesa de llevar sus extremos al suelo: para evitar excesivas fatigas á la flexión, tiende á rectificarse el perfil de los semicuchillos, y á este efecto, se aplana la arcuación por los riñones, perdiendo elevación la forma general, con lo que indudablemente se restringe el espacio abrazado por la armadura, caracterizándose así con una cierta tristeza el ambiente de las naves británicas, tristeza que singularmente armoniza con el clima del país.

La construcción francesa no es susceptible al anterior ambiente, no vibra al ritmo de la simpática melancolía de Inglaterra; de aquí, que vuelvan en la vecina república á elevarse por los riñones los perfiles estructurales, engendrándose el fuerte empuje contra las jambas de las armaduras que ya después del ensayo inglés, siguen en las grandes construcciones llegando invariablemente hasta el mismo suelo. La consecuencia lógica de esta observación, está en el renacimiento del tirante que ya se había logrado abolir por completo; sin embargo, el orgullo

del ingeniero no consiente en demostrar la pobreza del recurso; acude al tirante, sí, mas para no manifestarlo al interior de las naves, lo eleva extremadamente, acentúa la corriente de elevación del tirante que hicimos notar, hasta el extremo de pasarlo al trasdós de la armadura. Esta es la génesis explicativa de la aparición del célebre cuchillo de forma de la Galería de Máquinas de la Exposición de 1867, en París. En esencia, el cuchillo en cuestión estaba formado por dos jambas verticales, empotradas por sus pies en el suelo y atirantadas por sus extremos altos con una pieza horizontal; entre ambos pies derechos ó jambas se tiende un arco tangente en su vértice con la referida pieza de atirantado. Se trata, en fin, de un cuchillo de forma, con tirante al exterior, solución que por lo chocante sugiere la posibilidad de otra, no menos original, cual sería la prolongación, á manera de *tijera*, de los pares rectos de un cuchillo usual, poniendo el tirante en los extremos altos de dichos pares, con lo que evidentemente habríamos también pasado al extradós el tirante interno.

De todas maneras, la solución adoptada en la Exposición de París constituye un paso decisivo á la forma más racional de armadura elástica hoy existente: el «cuchillo Dió». En efecto; disimúlese la ridiculez exterior del tirante de aquella forma, bajándose algo el nivel de sus extremos (pero permaneciendo siempre al exterior), con lo cual una buena porción central de dicho tirante vendrá, naturalmente, á adaptarse al perfil curvo del extradós de la forma del cuchillo, haciéndose invisible en dicha

porción; ribetéese este tirante al cordón superior de la forma, con lo cual ya no habrá necesidad de que sea continuo el tirante en cuestión, pues bastará, á toda evidencia, reducirlo á sus dos partes extremos que irán así cada una de ellas consolidadas simultáneamente á la forma ó arco del cuchillo y á su jamba vertical. Tenemos de esta manera completamente disimulado el tirante, debiendo advertir que el razonamiento no es caprichoso, toda vez que existe exactamente aplicado, desde 1869, en el *Palmen Garten*, del Jardín Botánico de Francfort, una de tantas construcciones que pasan casi desapercibidas y que, sin embargo, constituyen observación preciosa para explicar incomprensibles metamorfosis y génesis arquitecturales.

En este estado, el transcendental problema de los cuchillos de armadura, preséntase la Exposición de París del año 1878. Los certámenes universales constituyen algo más que una muestra al mundo de lo que produce la actividad humana, constituyen gigantescos pasos de la Industria y del Arte, pasos que si se hiciesen más frecuentes anticiparían seguramente el progreso. En la sala de máquinas de la referida Exposición aparece una estructura que la Sociedad de los Ingenieros civiles de Francia calificó de «completamente nueva», una estructura cuya estabilidad, según frase taxativa de los arquitectos de aquella nación, constituye realmente un *tour de force*; tal es la armadura inventada por el genio ó videncia mecánica del gran M. de Dión. ¿Habríase inspirado M. de Dión en el antes citado *Palmen Garten* de Francfort?... Esta es la pregunta

misteriosa que hasta hoy nadie ha respondido. Los inventos, indudablemente, tienen su época, como las flores, y por esto suelen abrir su corola en varios cerebros á la vez; son los inventos, en rigor, como una producción colectiva que viene á tachar así de una manera disimulada el individualismo de los hombres... El prodigioso cuchillo Dión aparece, con poco interregno de diferencia, en la época de la construcción de las grandes estaciones ferroviarias inglesas y del Jardín Botánico de Francfort, con cuyas formas tiene indudables analogías de principio; el tipo Dión es, pues, una flor prodigiosa de la mecánica arquitectural que germinó simultáneamente, por las génesis explicadas, en Inglaterra, en Alemania y en Francia.

Cábele, sin embargo, á Dión la gloria indiscutible de haber multiplicado los prodigios de aquella forma, sintiéndola y definiéndola con una intensidad portentosa. Imaginemos un nervio de bóveda que arranca del suelo y recortado, como en una sola pieza, sobre plancha de metal; este es el cuchillo Dión. El cuchillo Dión simboliza la afirmación más absoluta del principio de empotramiento, la oposición más enérgica al dispositivo de rótula, y de aquí precisamente la racionalidad sorprendente que en la arquitectura elástica tiene aquella forma.

Con seguridad que la maravilla de este principio no fué generalmente comprendida, pues no de otro modo puede explicarse la reaparición de la rótula elemental en una serie de construcciones que han venido después. En 1885 constrúyese en Londres la grandiosa Sala *Olympia*, en cuya original estruc-

tura campea de nuevo la rótula con una esplendidez ridícula: en cada forma resistente transversal hay la friolera de ocho rótulas, dispuestas naturalmente de un modo especial para evitar la deformabilidad que resultaría por el hecho de emplear más de tres articulaciones. En la grandiosa Galería de Máquinas de la Exposición francesa del año 1889, ya dijimos que las armaduras eran á triple rótula. En muchas modernas construcciones, como la de los Talleres de Zeppelin, de Friedrichshafen, levantados en 1909, siguen empleándose las rótulas, si bien en este ejemplo, sólo existen en número de dos, dispuestas en los apoyos terminales del cuchillo.

Ya sabemos la única ventaja de las rótulas en las estructuras: la facilitación del cálculo de resistencia, y en este concepto solamente podría aconsejarse la articulación, pero al menos deberíamos procurar no multiplicarla de un modo exagerado, pues que únicamente la reducción de articulaciones (dejando á lo más *dos*) permite resolver grandes problemas de la construcción elástica y obtener económicas formas de cuchillos y armaduras.

El principio de absoluta supresión de las rótulas, es decir, el tipo Diön, en definitiva, hase ido, sin embargo, empleando, aun á costa de su dificultad de cálculo, en ejemplos numerosos, entre los que resultan efectivamente notables las estructuras de la estación de Calais, y especialmente las de la de Lille (1891), cuyos sentidísimos perfiles son indudablemente los que poseen el mayor grado de esbeltez y gentileza que han alcanzado hasta hoy las armaduras metálicas.

La nueva estación de Madrid (Atocha), de la Compañía de los ferrocarriles de Madrid á Zaragoza y á Alicante, tiene su nave central de 152 metros de longitud, estructurada también con elegantísimos diones de 48 metros de luz, separados entre sí de unos 16 metros y medio. Estas formas Dión, que fueron en 1891 construídas en los talleres de Willebroech (Bruselas), son realmente notables por su ideal y ligerísima esbeltez, á pesar de lo cual ha sido necesario un formidable empotramiento en sus pies derechos, empotramiento que pasa desapercibido porque aquellos pies, una vez ingresados en el subsuelo, se ensanchan extraordinariamente para aplacarse contra macizos enormes de mampostería á los cuales van sólidamente amarrados por robustos pernos de gran longitud. El inefable sentimiento mecánico del Dión, su misteriosa manera de trabajar, en fin, viene perfectamente transparentado en estas formas de la estación de Madrid, al contemplar en sus dibujos de construcción la singular armonía existente entre la ligereza de la forma y la fortaleza ó vigor de sus empotramientos terminales.

Finalmente, por conveniencias de arquitectura y de iluminación, el ingeniero Vierendeel ha ideado un tipo de armadura que le llama cuchillo parabólico, y cuyo perfil viene á estar delimitado por una línea quebrada en fragmentos alternados: unos verticales y otros con la inclinación de cubierta; la marcha de esta línea quebrada va ciñendo lo más próximamente posible á la línea potencial de acción externa, es decir, á lo que se llama línea de las presiones, que corresponde, como es sabido, en el caso de

cargas verticales, repartidas uniformemente en proyección horizontal, á una parábola, de donde debe originarse el nombre que su autor da á la estructura. Nosotros no vemos ninguna diferencia esencial mecánica entre este cuchillo y el inventado por Dión; se trata únicamente de cuestión de forma, y por consiguiente, las piezas trabajarán, en efecto, de un modo algo distinto, pero la esencia mecánica del principio y el procedimiento de cálculo, es, naturalmente, el mismo que preside al fecundo tipo del cuchillo Dión.

VIII.— ESTEREOESTRUCTURAS

LA imaginación de un verdadero artista de la ciencia constructiva, concibiendo en el grandioso medio de las tres dimensiones, ha de verse forzosamente chocada por la característica general, que preside á las estructuras metálicas. Estas estructuras, á pesar de su potencia casi ilimitada y de sus rigoristas y geniales principios, constituyen, al fin, formas particulares, evolucionan, de ordinario, sus recortados miembros en un solo plano, no reconociendo, aparentemente, por decirlo así, la dimensión tercera, este maravilloso factor que generaliza la ciencia de las formas y del movimiento.

Constituyen, sencillamente, las construcciones metálicas, consideradas en su forma matriz resistente, simples casos particulares de unas estructuras estéreas, aun no conocidas, soluciones elementales,

en fin, que podemos calificar justamente con el nombre de «planoestructuras».

Esta observación, viene á recordarnos la juventud de que gozan aún, en el presente, las construcciones elásticas; cuando la dolorosa ciencia experimental haya pasado, con secular duración, por sobre de esta arquitectura, indudablemente, sus estructuras revestirán la grandiosidad de concepción que es imposible de alcanzar en los comienzos de ningún arte. Veamos, sino, las producciones constructivas de la piedra y de las mamposterías, hojeemos el voluminoso inventario de sus portentos monumentales y, en ciertos capítulos, nos encontraremos con grandiosidades de composición estructural, verdaderamente prodigiosas: por ejemplo, las infinitas combinaciones cupulares de la arquitectura bizantina; los complicados tejidos nerviosos de algunas Catedrales del siglo XV, lanzados con forma de redes en el cielo de sus naves góticas; la composición abovedada de las obras del Renacimiento, cuajadas de líneas curvas, de lucernarios, de aristeros y lunetos, etc., composiciones todas que forman en conjunto, un caudal inmenso de estereoestructuras, florecidas á fuerza de siglos de prácticas y de construcción.

Positivamente, pues, las armaduras elásticas, tienen aún, en su composición, conceptos embrionarios. Crecen y se desarrollan, siguiendo exactamente el proceso en que se desplegaron aquellas arquitecturas de piedra, en las que la planoforma precedió, por millares de años, á las citadas estereocomposiciones. Hoy las planoestructuras de la cons-

trucción elástica, debieran, sin embargo, *estereorizarse* con cierta rapidez, ya que, no sólo poseemos los ejemplos de la pétreo arquitectura, sino que todas las condiciones del material empleado, es decir, del hierro y del acero, concurren, francamente, á la facilitación de una concepción general y superior. No hay más que atender á la tenacidad del hierro y del acero y á la continuidad absoluta que por los ensamblajes permiten, para comprender la posibilidad de originales combinaciones no factibles con otros géneros de material. La estructura elástica, debería, en definitiva, resolverse en el espacio, con miembros rectos ó curvos, y con curvaturas simples ó dobles, y, por tanto, con formas alabeadas, en la generalidad de los casos. Lo que hoy es *dovela* de la construcción metálica, es decir, el triángulo, pasaría de esta manera á una categoría superior, convirtiéndose en tetraedro; el tetraedro, pues, figura estérea indeformable y de inalterabilidad absoluta, constituiría admirablemente la célula estructural de las composiciones generales del hierro y del acero.

La consecuencia de este hecho implicaría, naturalmente, la creación de una nueva Resistencia de materiales, de una nueva mecánica, en fin, que vendrían á generalizar los particulares principios que hoy tenemos y que parten, ordinariamente, de sistemas coplanos de fuerzas. Las líneas potenciales planas de acción externa, contra las que reacciona hoy la estructura, pasarían á alabearse, con lo que los trazados verificativos caerían de pleno en la grafostática del espacio. Los miembros construc-

tivos trabajarían á algo más que por flexión, engendrarse en ellos la torsión también, y esta complicación de esfuerzos vendría, es verdad, á dificultar el cálculo, pero racionalizaría, indudablemente, las disposiciones constructivas, produciría soluciones generales y despertaría en nosotros la facultad combinatriz de formas estructurales, excitándonos á la vez con alta intensidad el sentimiento mecánico.

Si bien no es posible prever si la arquitectura metálica llegará ó no á alcanzar este grado superlativo de grandiosidad en sus obras, en cambio, es fácil demostrar cómo su evolución tiende francamente á ello.

Los romanos, al inventar el cuchillo de armadura con tirante, se ven obligados, al adoptar sistemáticamente tal forma en las cubiertas, á retrogradar el grandioso paso que con la implantación de la bóveda ellos mismos imprimieron á la estructura estérea. La planimetría del cuchillo elástico obligó, en la cubrición de las naves, al empleo de una serie de armaduras puestas en planos paralelos, transversales á las crujías, para resolver la estructuración de su planta rectangular. Aquella forma plana, propia y perfectamente indicada para salvar la distancia entre dos puntos, tiene, pues, necesidad absoluta de sucederse con repetición exacta al tratar de aplicarla á la techumbre de un recinto.

En la construcción gótica, fuente abundante de nuevos principios, se observa ya un sistema original, completamente opuesto al romano, para las armaduras de cubierta: la sucesión sistemática de

cuchillos de armadura es tan sólo aparente; la estructura de los armazones de cubrición es enteramente original, entrañando un claro principio de la estereocomposición, que por causa inexplicable aun es la hora que pasa desapercibido. La usual estructura de las cubiertas góticas, estriba en el empleo de carreras longitudinales y continuas, puestas sobre las crestas de los muros, y atirantadas, las de un muro contra las de su paralelo, por medio de las mismas piezas horizontales ó tirantes de los cuchillos maestros de armadura. El número de estos cuchillos es escaso en cada cubierta, es decir, que están entre sí grandemente distanciados, y el enlace de unos á otros se hace, por su parte alta, por medio de la cumbrera del tejado, pieza que suele estar formada por una importante viga longitudinal armada de celosía. Entre cada dos cuchillos maestros de armadura, vienen á situarse formas secundarias, sencillos pares de cubierta que apoyan por su parte alta en la cumbrera referida, y estraban ó tornapuntan por su parte inferior contra las carreras de que se habló. No hay necesidad ya de detallar más, para que la imaginación del lector descubra, en la forma estructural descrita, todo un principio estéreo, de concepción superior al de las cubiertas romanas y hasta diremos al de las cubiertas presentes. Es, en una palabra, la armadura gótica una generalización prodigiosa de las racionales estructuras elásticas que suelen emplearse en la forma cupular; en dicha forma suélnese evitar los tirantes de los cerchones meridianos, disponiendo al efecto el cincho horizontal, que es en

definitiva el elemento que se encarga de contrarrestar los empujes; la nave gótica es, en esencia, un fragmento de estructura cupular para rotonda de radio infinito, el cincho horizontal circular se ha convertido en elemento rectilíneo, representado claramente por las carreras antes citadas.

La estereoestructura de las formas elásticas viene, pues, indudablemente presentida en la arquitectura gótica del leño.

Aun cuando el principio estructural de las cubiertas medioevales no ha sido, y en verdad no atinamos por qué motivo, imitado por la actual arquitectura metálica, no obstante, la tendencia á las composiciones estéreas ha continuado acentuándose, como vienen claramente acusando las notables formas de revolución que el metal ha resuelto, aunque bajo una concepción extremadamente sencilla ó particular, cual es la de imprimir un giro á una cualquiera de las formas planas que ya conocemos, giro que de ser completo, origina las estructuras cupulares de revolución que tienen meridianos por formas resistentes. Entre estas últimas estructuras figura como más imponente ejemplo histórico, la célebre rotonda de la Exposición de Viena del año 1873, formada á base de dos conos truncados, y un cilindro intermedio, para cubrir en definitiva un recinto circular de ciento cinco metros de luz; resuelta bajo el mismo principio, de revolución de formas planas resistentes, cuéntase la hermosa cúpula del jardín de invierno del Parque Real de Laeken (Bruselas), y, finalmente, existen también otra infinidad de estructuras llamadas hemisféricas,

poligonales y ojivales, cuyo ejemplo es muy frecuente al osaturar las bóvedas y cúpulas de la arquitectura monumental, constituyendo todas, á su manera, como un velado principio de la estereocomposición elástica.

La revolución del cerchón matriz ó resistente, que, como acabamos de ver, sintetiza la idea original de las cúpulas precedentes, puede ser incompleta, y entonces resultan interesantísimas y originales estructuras, especialmente indicadas para la cubrición de espacios de planta en sector ó trapecio circular, como, por ejemplo, las rotondas de locomotora; pero este fecundo principio puede asimismo ser aplicado á la composición de armaduras para recintos rectangulares; no es, en rigor, otro el principio de las bóvedas de abanico de la arquitectura inglesa en piedra, cuya estructura nervada parece como que invite al constructor á que se la imite exactamente, reproduciéndola con toda fidelidad en acero.

Tenemos, además, en la construcción con materiales elásticos, una verdadera serie de composiciones que indican claramente la tendencia á alcanzar la plena concepción de las que hemos llamado estereoestructuras. La enunciación detallada de todas ellas haría, sin embargo, un estudio penoso de pura reseña, por lo cual nos limitamos solamente á indicarlas como fuente de inspiración en casos particulares; todas las armaduras llamadas «de pabellón», resueltas á base de troncos piramidales y combinaciones tetraédricas, constituyen indicio claro del principio estructural de formas del espacio; la

flecha célebre que refuerza la aguja de la Catedral de Colonia es un interesantísimo ejemplo de ello, así como lo son igualmente todas las restantes estructuras apiramidadas de las conocidas torres metálicas de Blackpool (Inglaterra), Notre Dame de la Fourvière (Lyón), y la propia osamenta gigante de la popular Torre Eiffel, de París.

Á la arquitectura de la fundición de hierro se debe un ejemplo grandioso, una verdadera revelación del principio estructural concebido en el espacio: la antigua Bolsa de Amberes, cuyo patio estaba cubierto por uno de los armazones más racionales y grandiosos que un artista y un sabio á la vez haya podido concebir; tal era la racionalidad y el arte que en consorcio admirable entrañaba aquella portentosa estructura de fundición, moldeada en formas y perfiles góticos, cubriendo espacio rectangular y cinchada por un invisible polígono de doce lados resuelto con barras de hierro dulce. Un incendio derrumbó á aquella forma, inestimable joya de la arquitectura del metal.

En los puentes y viaductos modernos, encontramos, con mayor intensidad, impresa la orientación hacia la estructura estérea, más general y más estable que la representada por las antiguas planofomas. El viaducto famoso del Garabit constituye, por la portentosa luz de su arco (ciento sesenta y cinco metros), un documento de gran valor en las construcciones de acero, pero su composición revela un atraso manifiesto respecto de otras construcciones del mismo género, como, por ejemplo, el puente metálico de Oporto, sobre el Duero (camino de Lisboa á Oporto),

cuyo arco está constituido por dos formas armadas acopladas entre sí y alabeadas de manera que, en planta, se proyecta el puente como la sección de una lente bicóncava, garantía evidente de su estabilidad. En el gran viaducto del Tanus sobre el Viaur, en la línea de Carmaux á Rodez (Francia), tenemos otro ejemplo, si cabe, más elocuente de la estereocomposición metálica; la estructura es un simple resultado de combinación alternada de gigantescos tetraedros y pirámides cuadrangulares cuyas aristas están resueltas cada una á base de potentes vigas armadas.

Indudablemente, estas dos últimas estructuras entrañan una mecánica profunda y una resistencia extraordinaria contra la acción externa del viento, principio fundamental originario de la estereocomposición en las construcciones de que tratamos, como indirectamente vienen á atestiguarlo los famosos ingenieros Fowler y Baker, al justificar la adopción de los que podríamos llamar *estereo-cantilevers*, en la grandiosa osamenta del puente del Forth.

Finalmente; la estereoestructura metálica parece en la actualidad orientarse hacia las formas de las arquitecturas pétreas; díganlo sino las composiciones de acero de las dos modernas estaciones ferroviarias de París, que poseen las Compañías de *Paris, Lion, Mediterranée* y de *Orleans*, en cuya última, especialmente, es notable la forma resistente de la cubierta, pues configura todo un sistema de bóvedas vaídas y lunetos de indiscutible hermosura y grandiosidad, pero ciertamente no originales de la archi-

tectura del metal, cuya personalidad y condiciones creemos no hace necesario el pedir prestadas al renacimiento arquitectónico sus formas estructurales.

En resumen, la planoestructura típica de la construcción metálica, tiende decididamente á la resolución de las formas en el espacio de tres dimensiones.

VIII.—ESTRUCTURAS MÓVILES

LA solución de la obra material humana jamás será definitiva; nos dice esto claramente la evolución constante de nuestras actividades que tiende á resolver los problemas, cada vez con carácter más general, hecho que presenta singular armonía con el proceso de formación de todas nuestras ciencias.

La génesis de las estructuras arquitecturales está experimentando exactamente aquel complicado proceso; la limitación primitiva de los materiales constructivos ha ido desapareciendo; las formas elementales de las obras arcaicas se han ido complicando; la estereoestructura significa ya una nota reinante en muchos sistemas de construcción, cuyos miembros constitutivos tienden, como vimos, á abandonar el sencillo plano. Finalmente, otro rasgo de vida aun mucho más general, ha sentado sus reales en las estructuras arquitectónicas de nuestra ingeniería; este rasgo es el «movimiento».

Las composiciones fijas, por complicación que entrañen, por grandiosidad que respiren, tienen ya hoy, por el solo hecho de su quietud, un interés

inferior al de las estructuras móviles, que significan, en fin, la completa vitalidad de todos los principios de aquéllas, por medio del sugestivo fenómeno locomotriz.

Las necesidades modernas de la Industria y del Comercio han sido, indudablemente, las principales causas originarias de las estructuras móviles, amén de que otras circunstancias de origen higiénico y científico han coadyuvado también, como veremos, á la creación de tales construcciones.

El problema completo que encierran estas formas estructurales, es de una complicación extraordinariamente superior al de las construcciones fijas, pues además del estudio del movimiento y de su mecanismo productor viene el de verificación de la estructura en las críticas posiciones por que ésta pasa durante su viaje, posiciones que si bien en ciertos casos no implican modificación en el equilibrio, pueden perfectamente, en otros muchos, alterarle de un modo manifiesto.

Los movimientos de que se dota actualmente á las estructuras que analizamos, hay que convenir en que son aún de sencilla trayectoria y, por lo general, limitados; se reducen simplemente á desplazamientos ascensionales unas veces, de traslación horizontal otras, y, con más frecuencia, á rotaciones alrededor de ejes fijos horizontales ó verticales, con las que se obtienen, respectivamente, las estructuras basculantes y rotatorias. La velocidad hasta ahora alcanzada en todos estos movimientos es relativamente lenta, y el mecanismo motriz que para ello se emplea, basado, en los casos usuales, en la directa aplicación

de la fuerza hidráulica ó eléctrica, tiene, en cierto modo, una independencia completa con la forma constructiva que afecta á la estructura. Existe, pues, por ahora, solamente planteado, aunque con gran intensidad, el problema de las estructuras móviles, cuya limitación y lentitud de movimientos, originadas por la inercia de las enormes masas á mover, hace vernos, junto con la falta de relaciones racionales entre el motor y la estructura, una como imperfección en la solución general de todas estas formas, que en la actualidad representan sólo el embrión originario de una arquitectura dinámica superior que, indudablemente, el ingeniero está llamado á resolver para la satisfacción de los transcendentales fines de la Industria.

Por consecuencia del movimiento y de la alteración de sus condiciones de equilibrio, exigen actualmente, las estructuras de que tratamos, el ser realizadas con el tipo estructural de coeficiente *uno*, que es precisamente el tipo de las armaduras elásticas de madera ó de metal. Con dichos materiales se construyen, pues, siempre aquellas formas cuyos miembros pueden así reaccionar indistintamente contra todos los esfuerzos de tensión y compresión que se presenten.

Por cuanto precede, se comprende la dificultad de un análisis metódico sobre las estructuras móviles, toda vez que éstas no sólo entrañan principios heterogéneos y complejos, sino que no existe aún doctrina formada sobre tan original arquitectura. La única síntesis que su estudio hoy permite hacer, está en la agrupación, por oficios, de sus más inte-

resantes ejemplares, y, á este efecto, los revistaremos de un modo general, adoptando una clasificación de cuatro grupos, que abarcarán, respectivamente: los puentes; las cubiertas y las armaduras; los andamiajes y grúas, y, finalmente, las estructuras varias.

Los puentes movibles merecen, realmente, comentarse á primera fila en las estructuras que analizamos, no sólo por formar el grupo más nutrido sino por ser indudablemente las más antiguas también. Como á dato arqueológico, creemos posee interés la cita de Diodoro relativa al puente sobre el Eufrates, en Babilonia, y construído bajo el reinado de Semíramis, puente estructurado por un tablero horizontal tendido á lo largo de una serie de pilas en piedra, con sus sillares consolidados por clavijas de plomo. Por la circunstancia de creerse movable el tablero, es decir, fácilmente retirable, al objeto de cortar el paso durante la noche, descubrimos en esta obra el nacimiento del filón constituído por la interesante arquitectura de los puentes dotados de movimiento.

La primera imagen mecánica, ya algo precisa de estos puentes, hay que buscarla precisamente en las plataformas levadizas de la ingeniería militar, tan fecunda durante el interregno de la Edad Media al siglo pasado, en la construcción de plazas fuertes aisladas por un foso cuyo cruce se lograba por el puente levadizo. La rapidez que, en ocasiones, durante un sitio, por ejemplo, exigía el movimiento del puente, fué indudablemente la causa de las inge-

niosas disposiciones que afectan estas estructuras, cuyo principio mecánico estriba principalmente en mantener el equilibrio del puente en todas las posiciones que debe ocupar, al objeto de permitir un fácil manejo con el solo esfuerzo de uno ó dos hombres.

La satisfacción de dichas condiciones teóricas entraña en la práctica considerables dificultades, por la circunstancia de implicar tal sistema el vencimiento de una resistencia variable en la abertura y el cierre del puente, ya que su brazo de palanca es constantemente distinto durante el giro. Por esta razón, á pesar de las ingeniosas disposiciones mecánicas de Belidor, Poncelet, Derché, Peaucellier, Wagner, etc., aplicadas todas á construcciones militares, se substituyó aquel sistema, al tratar del establecimiento de los primeros puentes para la industria, por otro que consiste sencillamente en tomar un eje de revolución vertical para el oportuno movimiento, con lo que se han engendrado los puentes llamados «giratorios», entre los cuales figuran, actualmente, como más notables, el de *Hollandsch-Diep* (verdadero brazo de mar, en el cual se confunden una parte de las aguas del Meuse y del Rhin), cuya estructura está formada por una sola viga armada de unos 33 metros de longitud que gira alrededor de un eje céntrico vertical; el de Newcastle-on-Tyne, de tipo análogo al anterior; el tendido sobre el Dee, en Hawarden (Inglaterra), que tiene la particularidad de que los dos brazos son de desigual longitud, etc., y, finalmente, cuéntanse en esta clase, aunque con tramo móvil doble,

y por consiguiente con dos ejes de giro verticales, los célebres *Drehbrücke*, sobre el Canal de Elba, y el famoso *Pont-tournant*, de Brest, cuya celebridad es debida á la grandeza de su magnitud (117,50 metros luz) y á la sencillez con que se pone en movimiento por la acción de sólo cuatro hombres.

Para evitar la pérdida de espacio, que el radio de giro ocasiona en los puentes del tipo anterior, se han ideado los de estructura ascensional; en ellos la viga se eleva vertical y paralelamente á sí misma con un mismo esfuerzo también, gracias á la racional instalación de contrapesos que acompaña invariablemente al puente. Uno de los más notables y modernos casos de tal género de estructura móvil, lo constituye el *Hubbrücke*, de Magdeburgo, formado por una artística instalación de viga parabólica de acero, que corre entre dos resistentes torres de fábrica, las cuales llevan en su parte superior al sistema de poleas de suspensión.

Los puentes rotatorios y basculantes, así como los de movimiento ascensional, tienen por fundamental principio el de mantener invariable la posición del centro de gravedad del sistema, con lo que, naturalmente, se relega al mecanismo motriz, tan sólo el papel de vencer las resistencias pasivas debidas al frotamiento. Este mismo resultado puede, en rigor, obtenerse si todo el estatumen movable, en sus distintas posiciones, mantiene su centro de gravedad en constante desplazamiento sobre un mismo plano horizontal, idea feliz que partiendo elementalmente de los puentes *corredizos* se ha después generalizado sugiriendo los *folding bridges*

(puentes plegables) en cuya concepción los ingenieros americanos han derrochado un extraordinario ingenio, como lo demuestran las numerosas y gigantescas instalaciones de este tipo existentes en Chicago, Milwankee, etc.

Para beneficiar la economía de la estructura y principalmente del tiempo que se pierde en las operaciones de abertura y cierre del puente, lo que naturalmente supone una interrupción perjudicial en el tráfico, hase ideado una estructura original, en la que la parte móvil queda reducida á su más simple expresión. Tal es el principio de los puentes transbordadores de Rouen y Vizcaya, constituídos esencialmente por dos elevadas estructuras metálicas, emplazadas una en cada orilla del cauce y reunidas por sus partes altas con un puente horizontal. Una estructura pequeña, á manera de plataforma, pende colgada por cables, de un carro, que discurre por rails del puente superior, y al que una instalación mecánica sencilla imprime movimiento, con lo que se despide así fácilmente aquella plataforma, sobre la que pueden cruzar, frecuentemente, el río los carruajes y peatones, realizándose, en cierto modo, la simultaneidad del tráfico rodado y fluvial.

Es preciso hacer presente que en las estructuras móviles han influído en la actualidad los progresos de la mecánica, que han resuelto segura y rápidamente la remoción de las grandes masas representadas por los enormes cantilevers de los puentes. Por este motivo, indudablemente, parecen renacer ahora los puentes levadizos de las fortificaciones pasadas; pero, naturalmente, con una mag-

nitud en extremo multiplicada. Así han nacido los *Klappbrücken* alemanes, entre los que figuran el *Die Schmiedebrücke eiserne strassenklappbrücke* en *Königsberg* ^{i/pr.} y el del puerto de *Stettin*, con un brazo basculante el primero y con los dos basculantes el segundo, constiuyendo ambos puentes ejemplos notables de la armonía reinante entre aquella arquitectura dinámica de que hablábamos antes, formada por las móviles estructuras gigantes de acero y las composiciones artísticas de las torres y edificios que albergan las instalaciones de su mecanismo motriz. Indudablemente, desde este último punto de vista considerado el problema de las estructuras móviles, llévase la palma una construcción inglesa, ante cuya presencia experimentase la más honda sensación que pueda causar la Ingeniería arquitectural; aludimos al *Tower bridge*, de Londres, cuyas dos soberbias torres góticas, erguidas en medio del Támesis, tienden, con majestad, á las orillas del río las guirnaldas gigantes de acero de donde penden las regiones extremas del puente, uniéndose dichas torres por lo alto de sus vértices, con un tramo horizontal de más de sesenta metros de luz, en cuya parte inferior basculan los dos cantilevers del puente propiamente dicho para dejar paso á los grandes buques del tráfico de los Docks. Á la austeridad y hermosura de esta construcción de atlantes, únese el interés de su sistema estructural y de su mecanismo motriz, el que, junto con los acumuladores hidráulicos y los enormes contrapesos de los tramos móviles, se ocultan misteriosamente en el fondo de las pilas en que se cimentan las dos torres.

Es de advertir que el problema maquinal de estos puentes basculantes ha sufrido, con el poderoso incremento de magnitud experimentado, una mayor complicación por efecto, principalmente, de la gran resistencia que la presión del viento opone, en ciertas localidades, al giro de las extensas superficies de tablero, ordinariamente asfaltadas, que sobrellevan los cantilevers móviles.

Finalmente, entre los puentes que pueden calificarse como de estructura móvil, podemos citar los flotantes cuyo tablero se apoya, unas veces, sobre boyas, barcazas ú otros elementos, ordinariamente arriostrados entre sí con ingenioso cordaje, sosteniéndose otras veces, por flotación directa á guisa de armadías; y por último, los llamados puentes volantes ó transportables, que suelen, como los anteriores, aplicarse á fines provisionales, pudiéndose, por tanto, armar fácilmente, gracias al original despiezo de su estructura, formada por miembros de un reducido número de tipos. El ingenio de los constructores americanos acaba de producir un interesante tipo de estos puentes desmontables, en el que con solamente tres series de piezas, se puede rápidamente estructurar una forma arqueada de notable rigidez para salvar luces considerables.

Hay un campo de estudio también extensísimo é interesante en la arquitectura moderna, con el problema de las cubiertas móviles. El origen de este problema está en la necesidad de descubrir total ó parcialmente un recinto para los fines de la higiene ó por reclamo de la ciencia é industria. Encontra-

mos respectivos ejemplos de estos casos, en algunos locales de recreo extranjeros, como el *London Pavilion Piccadilly Circus*, de Londres, y en el hoy derruido *Hippodrome de l'Alma*, de París, célebres ambos, principalmente el segundo, por las grandiosas dimensiones de sus lintornes móviles; y además en las cúpulas de los grandes ecuatoriales de nuestros observatorios. En los primeros ejemplos citados, la cubierta es corredera sobre rails, y en el último la construcción es giratoria, permitiendo dejar al descubierto el meridiano de observación. Entre estas cúpulas dotadas de movimiento, constituyen celebridad la del Observatorio de Niza, construída por Eiffel, que se apoya en un anillo hueco estanque, flotando en un recipiente anular con líquido incongelable; y la del moderno observatorio de Yerkes; mereciendo también citarse la que existe en el observatorio Fabra, de Barcelona.

Los recientes progresos de la navegación aérea han producido asimismo cubiertas móviles, si bien en este caso resulta, en rigor, dotada de movimiento toda la estructura de la construcción, como se ve en los *hangars* flotantes que se orientan debidamente para facilitar la entrada de los dirigibles.

Existe un grupo numerosísimo de construcciones provisionales y auxiliares, que forma interesante estudio de estructuras móviles también; éste es el constituido por los andamiajes y grúas. Renunciamos desde luego á relacionarlos para no caer en un pesado estudio de reseña, que no es el que nos hemos propuesto presentar; baste sólo indicar que

los andamiajes propiamente dichos tienen su origen en los albores de la arquitectura monumental, habiendo empezado evidentemente con disposiciones elementalísimas, no sólo por el desconocimiento mecánico del problema, sino por la interesante é inmutable ley observada en toda la arquitectura histórica: ley que consiste sencillamente en evadir las construcciones auxiliares. Esta ley, que con pasar desapercibida, es, sin embargo, la causa indudable del ingenio que encierran los procedimientos constructivos de nuestros antepasados, ha ido sucesiva y gradualmente debilitándose, hasta que, en virtud de una reversión absoluta, ha llegado en nuestros días á conceder, en las grandes obras, mucha más importancia á la construcción auxiliar que á la definitiva, mecánicamente considerado el problema, como es natural.

Sin embargo, en el renacimiento arquitectónico comienza ya á incrementarse el empleo de las estructuras de andamiaje, pero la definitiva dotación de movimiento á éstas no queda planteada hasta el siglo pasado en que aparecen por vez primera las grandes armaduras en leño correderas y giratorias, de las que nos ofrecen interesante modelo los andamios construídos por Albertini y Campanino, para las respectivas restauraciones del templo de San Pedro y del Panteón de Agrippa, en Roma.

Este género de estructuras móviles, ha tomado después tal ufanía que en la actualidad resulta poco menos que imposible el entrar en su descripción, tal es el ingenio que en ellas se despliega y la variación de formas y de movimientos que afectan.

Los numerosos andamiajes, puentes de servicio y dispositivos de montaje de las estructuras fijas, constituyen, en fin, una arquitectura pasajera y provisional, pero eminentemente positivista, y sujeta, por tanto, á todos los rigorismos del cálculo y de los metodos verificativos.

Las grúas movibles, variante notable de las formas anteriores, entrañan además el problema de la estructura elástica, constituida por el armazón en que van aquéllas montadas, formando un interesante conjunto, que en las modernas instalaciones suele afectar ingeniosísimas disposiciones y permitir variados movimientos. Los tipos fundamentales de las grúas á que aludimos, están representados por los sistemas llamados á «coordenadas rectangulares» y á «coordenadas polares», constituídos respectivamente por los puentes correderos de montaje y por las grúas giratorias de pescante variable. Entre los ejemplos notables de estas estructuras movibles se cuentan los modernos «Titanes», potentes instalaciones para la construcción de escolleras, y las grúas modernas de muelle, cuya última y original característica, está en que su estructura móvil forma puente, para así dejar libre el espacio inferior por donde invariablemente discurren los vagones del tráfico. Si la grúa corre paralelamente á un almacén cercano, su sistema de puente se resuelve con mucho ingenio, merced á una armadura en ángulo recto, los extremos de cuyos lados poseen ruedas que corren por dos rails: [uno situado en el suelo y otro en la pared del almacén, á bastante altura del suelo. Si no existe construcción inme-

diata para la colocación de aquel rail superior, la grúa continúa formando puente, pero merced á una mayor complicación de su estructura, que puede consistir, como se ha hecho recientemente en las instalaciones del puerto de Venecia, en dos formas arqueadas planas, que se proyectan en planta según las diagonales de un cuadrado cuyo centro está en el eje de la vía que corre bajo estas originales estructuras rodantes.

Con las construcciones móviles de los géneros referidos, y con otras mil, dotadas también de movimiento, como diques flotantes, cascos de buque, puertas de esclusa, *chassis* de vehículos, formas de gasómetro, etc., puede ser indudablemente formada ya una rama frondosísima y original de las estructuras elásticas; pero en esta rama hemos de ver tan sólo el anuncio de una arquitectura especialísima del porvenir, á la que se va tendiendo por una vitalización sucesiva de los órganos arquitecturales. No son ya sólo las construcciones citadas las que se dotan de movimiento; en los modernos establecimientos comerciales del extranjero, resulta casi por completo animada su arquitectura interna, cuajada de numerosos ascensores, mostradores correderos, plataformas rodantes, escaleras móviles, etc., respirando en conjunto una vida y dinamismo que falta sólo completar con el movimiento de la estructura total; observación que no es del todo quimérica, si se atiende á la idea varias veces emitida, y aun creemos ensayada, de las viviendas auto-orientables, heliostáticas, en fin. Sin embargo, aun encauzando con

más serenidad la imaginación, no pueden negarse las crecientes exigencias industriales y mercantiles, por cuya virtud van constantemente en aumento los órganos constructivos móviles, con los que, repetimos, vase engendrando una como arquitectura animada de extraordinario interés, y cuyo estudio reclama poderosamente la intervención de toda la moderna Ingeniería.

PARTE V

ESTRUCTURAS UNIRRESISTENTES

I.—FONDO Y FORMA DE LAS ESTRUCTURAS UNIRRESISTENTES

VAMOS á ver el carácter de las estructuras más limitadas para reaccionar contra las fuerzas externas; de las estructuras que bien por su constructibilidad, bien por las cualidades de la materia que las realiza, tienen una relación de coeficientes de trabajo fuera de la finitud; de las formas, en fin, cuyo coeficiente estructural vale infinito ó vale cero, por ser, respectivamente, aptas tan sólo para resistir esfuerzos de compresión ó esfuerzos de tensión.

Este carácter restrictivo de la estructura, puede no sólo satisfacerse realizándola, al efecto, con los materiales y principios de constructibilidad propios de las formas birresistentes, sino que podrá realizarse también dicha estructura empleando materia y principios constructivos que permitan únicamente la presencia de esfuerzos de un sólo sentido. Por virtud de esta característica, las estructuras unirresistentes pueden frecuentemente resultar más económicas y propias que las anteriormente presentadas; al téc-

nico corresponde en cada caso decidir, pues, del género estructural más oportuno.

Si bien en la práctica no hay actualmente materiales de construcción que posean en absoluto el carácter de unirresistentes, puesto que, en mayor ó menor grado, todos ellos tienen una cierta aptitud para compresión y tensión á la vez, en cambio, por efecto exclusivamente de los sistemas de constructibilidad adoptados, pueden las estructuras adquirir las rigurosas condiciones que las hacen aptas únicamente á esfuerzos de un solo sentido. Así, con el empleo del material elástico, en forma, unas veces, de sucesivas piezas convenientemente enlazadas, ó dispuesto, otras veces, con elementos de gran longitud y reducidísima sección, se obtienen las estructuras no aptas para los esfuerzos compresivos; este es el caso, por ejemplo, de las cadenas y cables ó estructuras de tensión. Si la forma constructiva tiene una serie de soluciones de continuidad, como planos ú otras sucesivas superficies de apoyo, anúlase evidentemente en ellas la resistencia tensiva, obteniéndose sólo estructuras aptas á compresión, como las que se realizan, por ejemplo, con la piedra aparejada.

El material es, pues, en rigor, independiente de las estructuras; la *constructibilidad* es tan sólo quien precisamente las puede caracterizar. Así se explica la diversidad de materiales con que se construyen las formas tensadas y explicase, además, la particularidad interesante, de poder tratar por los principios de la estereotomía á las construcciones de metal: hoy, realmente, obsérvase, principalmente

en Francia, una intensidad de corriente en la construcción de este original orden, como vienen á demostrar, entre otras obras, los puentes resueltos á base de un despiezo en dovelas de fundición de hierro ó de acero, entre los que constituye verdadero *chef d'œuvre* la grandiosa estructura estereotómica de los aplanados y vibrantes arcos en acero moldeado, que forman el puente de Alejandro III, en París.

La verdadera racionalidad de una estructura consiste, en general, en adaptar la constructibilidad á la naturaleza de la materia empleada, de aquí la fama del puente anteriormente citado y de todas las obras que, cual él, por estar realizadas con material poco tensivo, tienen un tratamiento resuelto por dovelaje.

Obsérvese, además, como el dovelaje representa la multiplicación de elementos iguales, por lo que viene admirablemente indicado un molde de los mismos. El principio estereotómico, genuinamente pétreo, puede, pues, generalizarse de un modo extraordinario, aplicándolo, por esto, no sólo ya á la fundición, como en el referido ejemplo, sino también á la cerámica, al vidrio, á los aglomerados sílicocalcáreos, y á otros cuerpos económicos de fácil moldeabilidad. La generalización de estas consideraciones permite lógicamente deducir, que la construcción futura irá extendiendo á materiales diferentes las constructibilidades que hoy parecen tan sólo típicas de una clase determinada de materia.

La línea potencial de acción externa, en todas las estructuras unirresistentes, debería, en rigor, coincidir con el lugar geométrico de los centros de gravedad de sus secciones transversales; de esta manera el trabajo se repartiría por igual en cada una de dichas secciones, y sería entonces muy fácil el darlas las áreas rigurosamente precisas para que la estructura fuese de igual resistencia; pero dado que este grado de teorización no se pueda en la práctica alcanzar, es absolutamente indispensable, al menos, que aquella línea de acción externa se aloje completamente en el núcleo central de la forma; sin la satisfacción de esta ley primordial no sería posible el equilibrio, puesto que entre los esfuerzos que actuasen en una sección transversal de la estructura, los habría de sentidos contrarios, circunstancia que no admite la construcción de que se trata, por ser ésta exclusivamente compresible ó extensible.

Resulta, como vemos, una misma ley de equilibrio para las estructuras comprimidas y para las tensadas; en ambos géneros de estructura hay coincidencia exacta de cada miembro con su línea potencial de acción externa, cuya línea pasa por tal motivo á *comprimir* la estructura ó á *extenderla*, pudiéndonos ya desde este momento llamar línea de las presiones ó línea de las tensiones, nombres que en las estructuras birresistentes, cuyo estudio ha precedido, hubiesen tenido notoria impropiedad.

Entre las construcciones de miembros comprimidos y las de miembros tensados, existe una ver-

dadera *conjugación*, es decir, una relación sencilla que permite el paso de las formas de una clase á las formas de otra clase, toda vez que ambas satisfacen, como hemos dicho, á una sola y única ley. Por consecuencia de esta conjugación, se verifica que dos estructuras de las mismas condiciones satisfacen á un mismo perfil, es decir, que v. gr.: dos arcos de igual luz y flecha, y sometidos á una misma repartición de cargas, trabajando uno por compresión y por tensión el otro, tienen una misma ecuación para su línea media, de manera que la misma figura debe afectar un arco de sillería racionalmente trazado, que un cable colgante, si ambas estructuras tienen de común las citadas circunstancias. La diferencia de forma es puramente aparente á los ojos profanos, pues la primera estructura es, por ejemplo, cóncava mientras que la segunda es convexa, pero basta invertir una de las dos formas para que la coincidencia pueda efectuarse con toda exactitud.

Extendamos, ahora, esta consideración á las estructuras superficiales y deduciremos que la ecuación racional de una bóveda, realizada en piedra de talla, será la misma que la afectada por un *velarium* que cubriese el mismo recinto y estuviese sujeto á la misma ley de repartición de cargas.

La explicación de esta interesante ley de conjugación de formas es puramente instintiva, puesto que debiéndose adaptar siempre las estructuras comprimidas y las tensadas á la línea potencial de acción externa, y siendo ésta, una función directa de la constructibilidad y de las cargas, y no variando además tales datos, ha de permanecer constante

aquella. La inversión de posición que las estructuras comprimidas tienen respecto de las tensadas, es una simple consecuencia del cambio de sentido de las fuerzas internas con que reaccionan ambas clases de estructuras; así, en las tensadas, hay una autoadaptación de la forma á la línea potencial de acción externa por efecto de la flexibilidad que tienen, al paso que en las comprimidas hay que *invertir* el perfil, puesto que las fuerzas internas han *invertido* también su sentido.

Compréndese, pues, perfectamente, el porqué el perfil racional de un arco estereotómico deba precisamente ser el de una catenaria invertida, si las cargas del arco están repartidas uniformemente por metro lineal de su longitud; ó deba, en otro caso, ser una parábola, si aquella repartición es uniforme por metro lineal de proyección horizontal.

Resumiendo; el perfil de las estructuras estereotómicas debe ser el de un polígono de tensiones invertido, y, por esto, los arcos afectarán perfiles de cables y las bóvedas se configurarán, en general, con formas propias de velas hinchadas.

De aquí la sencillez que puede presidir á la determinación de los perfiles de las estructuras unresistentes: basta para ello determinar los polígonos de tensiones referidos, que no son más que casos particulares de la ley general, que ya conocemos, relativa á la línea potencial de acción externa. Esta línea, en nuestro caso, puede de un modo fácil deducirse experimentalmente: basta construir á escala reducida, con simples bramantes ó con telas, según se trate de estructuras lineales ó superficiales, la forma que

se trata de realizar; sujetar, después, esta forma á una repartición de cargas, con arreglo á la misma ley que se verifique en la construcción (circunstancia que, en la práctica, se realiza valiéndose de pequeños recipientes que contienen granalla de plomo), y la estructura afectará, inmediatamente, de un modo espontáneo y riguroso, los perfiles racionales que se deseaba encontrar. Este medio, nos da, también, como se comprende, la dirección de los empujes terminales y, por tanto, la inclinación que deberán tener los elementos de sustentación, para que, á lo largo de su eje, se aloje completamente la reacción final de la estructura, circunstancia que nos inducirá al empleo de columnas caídas, tensores inclinados, etc., todo lo cual configurará en conjunto una original estructura de irreprochable racionalidad mecánica. No es otro, en rigor, el método experimental, seguido por el arquitecto Gaudí, de Barcelona, en la determinación estructural de la iglesia, en construcción, para la Colonia Güell, y de otras obras análogas.

Hay que advertir, sin embargo, que ciertas exigencias arquitecturales ó constructivas, unas veces, ó la carencia de esta visión mecánica, otras, hace que los perfiles de las estructuras unirresistentes comprimidas no satisfagan siempre al perfil de los polígonos y formas de tensión, en cual caso hay que comprobar si en la región de todo el núcleo central de dichas estructuras existe espacio suficiente para la fluctuación de la correspondiente línea de las presiones, línea que si llegase á salirse de dicho núcleo, que, en los casos ordinarios, viene repre-

sentado por el tercio céntrico de las formas, originaría, en éstas, trabajos tensivos, sobreviniendo, por consecuencia, la ruina de las mismas.

Obsérvese cómo, por encima de la sencillez que entraña el equilibrio de las formas estructurales comprimidas, existe una aureola indudable de dificultad positiva, y ella está precisamente en la exigencia de tener que adaptarse de un modo sensible tales formas á su línea potencial de acción externa. Esta circunstancia, unida á otra de orden estereotómico que más adelante analizaremos, no ocurre ciertamente en las construcciones birresistentes, pues, en ellas, no sólo hay una entera continuidad práctica de la materia, sino una original independencia entre los perfiles y sus líneas potenciales, independencia muy sensible en el primer grupo de dichas construcciones, es decir, en las pseudoelásticas, y, en absoluto completa en el segundo grupo, ó sea en las elásticas. Tales observaciones vienen, pues, á limitar el pensamiento del constructor, obligándole á la adopción de formas y perfiles determinados y á un ingenioso fraccionamiento ó despiece de los mismos, opuestamente á lo que sucede al concebir las estructuras birresistentes, en cuyo acto la imaginación posee una entera libertad. Colígese de aquí, la importancia y mérito de la construcción no elástica, y por tanto, el vasto horizonte que ante sí tiene para extenderse aún en todo orden de perfecciones y adelantos.

Representan, en fin, las construcciones unirresistentes, pese á su antigüedad, una obra naciente é

imperfecta, mucho más desconocida que la arquitectura del metal, nueva flor cuyas hojas acaban apenas de abrir los ingenieros de nuestro siglo. Veremos esta misma imagen más clara y mejor focada en el capítulo siguiente.

II.— LA MECÁNICA ESTEREOTÓMICA

LAS construcciones estereotómicas, es decir: las estructuras que trabajan por compresión y están formadas únicamente por una serie de piezas sin más enlace entre sí que el mutuo apoyo verificado á lo largo de las respectivas superficies de junta, pueden en rigor compararse á montones de cuerpos, á *empilages* de sillería, ó de otro material distinto de la piedra, que se equilibran, en fin, mecánicamente tan sólo por *gravedad*. Son, en una palabra, tales construcciones, estructuras muertas, por carecer de la vitalidad elástica que constituye el privilegio de las obras birresistentes. Hay, realmente, en toda estructura elástica, un principio de energía y de vida que se opone con original tenacidad á su desequilibrio, como afirmando la presencia de un sorprendente espíritu natural de animación que nos está constantemente tranquilizando respecto de la estabilidad. Este espíritu ó principio, viene por la vía original de la ciencia de la construcción, á confirmarnos la ley mantenedora de la vida: el movimiento; y, en efecto, en la construcción elástica existe una verifica-

ción completa de tal ley, por cuanto las estructuras correspondientes están en una actividad constante por experimentar, constantemente también, las contracciones y dilataciones originadas por los indefectibles cambios de elástica.

Por el contrario, en las estructuras despiezadas, principalmente en las de carácter aligerado ó no formadas por grandes macizos, es decir, en los pilares, arcuaciones y nervaduras pétreas, en general, nuestro sentimiento advierte como una inestabilidad inquietante que nace precisamente de la ausencia de aquella vida y de la conciencia instintiva que tenemos de que el equilibrio es deficiente, artificial, pues está producido de un modo exclusivo por nuestra mano y merced á argucias ó artificios de pura posición.

Por ley compensatriz, el material corriente de las estructuras estereotómicas ó litópolas, es la piedra, cuya general inalterabilidad por los agentes atmosféricos es lo que resuelve la duración de la obra. Si las armaduras elásticas no fueran oxidables, alcanzarían una perduración incomparablemente superior á toda la arquitectura monumental. La cuestión de duración es, pues, un accidente del orden químico, y ello no reza con la esencia mecánica de que aquí estamos tratando.

Por estas elementales ideas compréndese fácilmente cómo, en términos generales, son más interesantes y complicadas de estudio las estructuras estereotómicas que las elásticas, toda vez que en las primeras el equilibrio solamente depende de la mano del hombre, al paso que en las segundas,

por encima del tratamiento que se las da, existe la salvaguardia de la elasticidad con que la sabia Naturaleza las ha revestido. De aquí, precisamente, procede el progreso rápido de la arquitectura del metal una vez iniciada, y de aquí también el atraso completo que en la actualidad revisten las estructuras estereotómicas, á pesar de los millares de años con que vienen evolucionando.

Si el lector ha reflexionado sobre la índole mecánica de la construcción aparejada, indudablemente estará conforme con la conclusión precedente, pero si esta reflexión no le ha sugerido, si ha visto tan sólo en las estructuras de piedra un mundo suntuoso de belleza y una prosapia arquitectural de nuestros hermosos monumentos... entonces, con seguridad absoluta, le sorprenderá intensamente el que proclamemos el atraso de un sistema constructivo que, por haber ya llegado á la cúspide de su perfección, ha designado por sucesores al hierro y al acero, que imperan en nuestro siglo. Sin embargo, es completamente cierto que la construcción estereotómica merece en la actualidad un estudio profundo para llegar al descubrimiento de sus *leyes generales*, que, como veremos en seguida, son por ahora del todo desconocidas.

Los principios mecánicos del despiezo, aparentan ser bien simples y completamente definidos; basta decir que todos ellos se encierran en tres elementales conclusiones que, respectivamente, hacen referencia: al ángulo que con los lechos de las piezas pueden formar las fuerzas compresoras; al punto de

paso que en aquellos lechos pueden tener las resultantes de dichas fuerzas compresoras, y al valor de la presión máxima por unidad superficial que resisten las piezas de la construcción.

La aclaración de estas conclusiones, es bien sencilla, también:

Al objeto de evitar el resbalamiento de una pieza sobre otra, es necesario que el vector representativo de la presión, que la primera transmite á la segunda, corte al lecho ó superficie de junta, entre ambas piezas, bajo un ángulo no menor que el complementario del llamado de «rozamiento».

Además, á fin de evitar esfuerzos tensivos en la zona de la superficie de junta, cuyos esfuerzos originarían (toda vez que la resistencia á la tensión en dicha zona es nula) el basculeo ó giro de una pieza sobre otra, se hace necesario que la resultante de la presión atravesase á la junta precisamente por un punto interior de su núcleo central.

Y, finalmente, es preciso, para prevenir el aplastamiento de las piezas, que la presión máxima por unidad superficial no rebase el coeficiente de seguridad al trabajo por compresión, en el material de que se trate. Esta presión máxima, cuyo valor nos viene determinado, como sabemos, por la ley trapecial, puede, en la práctica, sensiblemente considerarse que vale el doble de la presión media, es decir, de la que resulta de dividir la presión total por el área del lecho, que es el caso más desfavorable, porque equivale, evidentemente, á suponer que la presión resultante no pasa por el centro de gravedad del referido lecho.

Estas son, sencillamente, las leyes fundamentales de la mecánica estereotómica; ahora, para la aplicación de estas leyes, es decir, para averiguar si se satisfacen ó no, se hace necesario el determinar, para cada estructura su correspondiente línea potencial de acción externa (es decir, la línea de las presiones en nuestro caso), pues ya sabemos cómo tal línea, en unión de su polígono de fuerzas, nos ofrece para cada sección de la estructura la resultante de las fuerzas externas que obran contra dicha sección. Ahora bien; ya se analizó oportunamente la entraña de esta cuestión; allí, pues, nos remitimos, pero hase de observar aquí una particularidad ciertamente original:

Una estructura estereotómica no tiene definición exclusiva de empotramientos ni de articulaciones, puesto que toda vez que no es posible, para mantener el equilibrio, el permitir rotaciones de unas dovelas respecto á las otras alrededor de las aristas de junta, en todas las juntas podráse suponer existente una cierta condición de aparente empotramiento; pero, en cambio, por lo mismo que la libertad en ellas es completa, puesto que hay una solución de continuidad absoluta (toda vez que en las obras de sillería el mortero es usualmente considerado sólo como un transmisor de cargas, pero sin eficacia adherente), se verifica que también en todas las juntas existe, más ó menos acentuado, el principio de la rótula.

De este principio de rótula proviene, precisamente, el conjunto de múltiples rotaciones elementales, sin ley asequible á nuestro espíritu, cuyas

rotaciones originan la *dislocación* de la estructura, gracias á la cual puede ésta experimentar algunas variaciones de perfil y ceder, sin derrumbarse, á ligeros movimiento del terreno, fenómeno curioso (que algunos técnicos califican malamente de elasticidad de las obras doveladas) del que tenemos repetidas pruebas en toda la construcción gótica que, como es sabido, al igual que la generalidad de las arquitecturas no modernas, posee una deplorable deficiencia en lo que atañe á la infraestructura ó solución de las fundaciones.

Precisamente por el anterior fenómeno de la dislocación, se han deslizado los analistas á fin de plantear el método para determinar la curva de las presiones en las estructuras arqueadas. En efecto; las tres regiones de máxima dislocación, digámoslo así, que presentan dichas estructuras, coinciden sensiblemente con la clave y con los riñones del arco. En el riñón del arco existe situada la llamada «junta de rotura», es decir, aquella junta radial que forma aproximadamente con el horizonte un ángulo igual al de rozamiento (entre los 30 y los 40 grados) y que, por consiguiente, indica que para colocar, durante la construcción, las dovelas superiores es necesaria la presencia de una cimbra, sin cuyo artefacto dichas dovelas resbalarían. Ahora bien, las dos juntas de rotura situadas de la manera referida, y, además, la existente en la clave, vienen á representar tres articulaciones de máxima sensibilidad y á ofrecernos, por tanto, la determinación de la línea de las presiones. Queda ya sólo, para

precisar el paso de dicha línea, el conocer cuál de los puntos de las referidas juntas deben precisamente jugar el papel de articulación, puesto que si bien nuestro sentido mecánico ve perfectamente que la junta de clave tiene su articulación en el estradós y las de rotura en el intradós, y lo ve, decimos, claramente, porque dichos puntos son los de báscula al iniciarse al desequilibrio en los arcos circulares y en los rebajados, no se pueden tomar tales puntos en la posición referida, por la sencilla razón de que caerían fuera del núcleo central, por consiguiente, se tomarán los que estando situados en el mismo núcleo estén más próximos á los de verdadera báscula, viniéndose por todo esto á suponer, en definitiva, que la línea de las presiones pasa por el tercio superior de la clave y por los tercios inferiores de las juntas de rotura. Tal es el método que la experiencia ha sugerido á M. Méry.

Habiendo así acomodado el problema del equilibrio de los arcos de sillería á la ciencia de la estática, basta plantear sus relaciones fundamentales para resolver la cuestión. Supóngase, al efecto, la mitad del arco, equilibrado por el empuje horizontal incógnito aplicado al tercio superior de la junta de clave; tómese el momento de esta fuerza respecto al punto situado en el tercio inferior de la junta de rotura; tómese, además, respecto al mismo punto, el momento del peso propio y de las cargas que corresponden al medio arco en cuestión; iguállese á cero la suma algébrica de todos estos momentos, y deséjese, finalmente, el empuje horizontal. El valor de este empuje es, evidentemente, la distancia polar

del polígono de las fuerzas; queda, pues, éste determinado, y, por consiguiente, conocida la línea potencial de acción externa...

Si las articulaciones ó puntos de paso de la línea potencial fuesen efectivamente reales, la racionalidad del método anterior sería completamente irrefutable; pero, en la actualidad, aquel método tiene un fondo de fantasía y de conveniencia acomodadora que le desautoriza completamente en el terreno rigorista de la Ciencia, convirtiéndole tan sólo en *medio* para averiguar la posibilidad de una solución de equilibrio de la forma estructural.

Los ingenieros alemanes, con su característica videncia, comprenden que la filosofía de los hechos constructivos es solamente un eco de los mismos, es decir, que éstos con sólo filosofarlos no se alteran, toda vez que en ellos preside la inmutabilidad mecánica; comprenden, en fin, cómo hay que traducir en realidades las consideraciones especulativas anteriores para que ellas sean ciertas en la esfera de lo tangible, y á este efecto, materializan con sorprendente perfección el principio vago de la triple rótula que antes se ha definido.

La característica de los puentes alemanes de sillería, y también á veces de hormigón armado, construídos en estos últimos años (á partir sensiblemente de 1902), estriba en la presencia de verdaderas articulaciones dispuestas en las juntas de rotura ó sea en el nacimiento de los arcos, si éstos son escarzanos, y ordinariamente en la clave también. Tales articulaciones se resuelven de dos maneras

distintas: ó por medio de un verdadero órgano ma-
quinal formado por dos cojinetes y un gorrón de
acero, ó más usualmente, por la adopción de lecho
cilíndrico en la junta donde se desea que juegue la
articulación. Esta solución última, que no por ser
sencilla deja de acusar un sorprendente ingenio, se
realiza en la práctica labrando en granito las dos
dovelas que configuran la rótula; las caras de mu-
tuo apoyo de estas dos dovelas son cilíndricas,
trazadas á simple arco de círculo, con centro á un
mismo lado de la junta, pero con radio distinto
para cada dovela, correspondiendo, naturalmente,
el radio menor á la junta convexa y el mayor á la
cóncava. Suele además intercalarse en el tercio cen-
tral de estos lechos cilíndricos, una lámina de plomo
de unos dos centímetros de espesor, genial dispositi-
vo que asegura el reparto de la presión en una
cierta superficie sin perjudicar en nada el libre giro
elemental.

Liebold y otros ingenieros del Imperio alemán,
aplican ya sistemáticamente los anteriores dispositi-
vos á las geniales y atrevidas estructuras de piedra,
como, por ejemplo, la del Nekarhausen y otras, que
poseen luces extraordinarias y reducidísimas fle-
chas. Si los morteros empleados en estas estructuras
aplanadas, han sido escrupulosamente escogidos y
ensayados, y, además, se disponen en ellas las arti-
culaciones referidas, puede entonces, con cierta pru-
dencia, jugar en la verificación correspondiente, la
teoría del arco elástico, con lo que comienza á mix-
tificarse la verdadera esencia estereotómica de la
construcción. Esta es la tendencia moderna de las

grandes y aligeradas obras de cantería aparejada, realizadas por los ingenieros alemanes.

Suponiendo ahora que á pesar de la nebulosidad que hemos visto envuelve á la determinación de la línea de las presiones, nebulosidad que constituye la primera conclusión que deducimos para demostrar el atraso de las estructuras estereotómicas, se lograra por el método alemán ó por la aplicación de otros principios, el precisar la situación de aquella línea, corresponde inmediatamente el desplegar gran atención al hacer el despiezo para evitar de un modo absoluto los esfuerzos cortantes desarrollados en las formas. El esfuerzo cortante en una junta estereotómica, es decir, la proyección sobre ella del vector que representa el esfuerzo actuante contra la junta, es, naturalmente, la causa de los deslizamientos de unas dovelas sobre otras, deslizamientos que evidentemente no tendrán lugar hasta tanto que dicho esfuerzo cortante no supere al producto de la presión normal á la junta por el correspondiente coeficiente de fricción; sin embargo, conviene evitar, si es posible, de un modo absoluto, cualquier valor de esfuerzo cortante, por nimio que sea, ya que la sola presencia de dicho esfuerzo hace que en las trepidaciones á que esté sujeta la obra se multiplique la tendencia al deslizamiento dovelar, lo que explica la relativa facilidad con que se han desmoronado ciertas construcciones militares de fortificación por efecto no sólo del choque de los proyectiles enemigos, sino á causa principalmente de la vibración originada por los disparos

de las baterías propias. En los puentes ó viaductos, y, en general, en las obras sujetas á la acción trepidante de grandes cargas rodadas, sucede un fenómeno análogo.

Generalizando, pues, la observación anterior, hay que proceder á un despiezo por juntas normales á las diversas evoluciones de la línea potencial de acción externa, único medio, que poseemos para anular la componente de aquella línea sobre las superficies de junta.

La línea potencial es independiente del despiezo; pero vemos como éste puede provocar descomposiciones en los vectores que por su envolvente configuran aquella línea, de cuyo fenómeno emana precisamente la esencia científica del aparejo, como ya previó el gran Adhemar en sus célebres refutaciones á los sistemas de construcción de los pasos oblicuos, que en un principio propuso Clapeyron. Esta idea, suficientemente generalizada, viene indudablemente á orientarnos por el camino que conduce al descubrimiento de una relación, con seguridad existente entre el aparejo, el equilibrio y la línea potencial de una estructura; la determinación completa de esta relación misteriosa nos revelaría la regla abstracta del despiezo mecánico de las formas estereotómicas... pero el problema no está hoy todavía resuelto.

Existe ordinariamente una confusión lamentable entre el *aparejo* y la *labra* de las piezas; significa de ordinario la Estereotomía, el conjunto de operaciones gráficas conducentes á la obtención de todos los datos determinativos de los sólidos, con frecuencia

complicados, que configuran las piezas de la estructura dovelar; significa además la Estereotomía el orden de operaciones y la factura material de las mismas, para arrancar de la entraña del bloque informe al complejo poliedro matemático que contornea la dovela... Todo esto no es estereotomía, en el aspecto lógico de la ciencia estructural del despiezo; todo esto es, sencillamente, una *estereografía*, un arte de dibujar y obtener sobre un solo plano los elementos estéreos pertenecientes á formas de sólidos más ó menos complicados. Desde este punto de vista, en efecto, la ciencia estereotómica ha se revestido ya del carácter definitivo de doctrina clásica y constituida, como lo indica claramente el que desde la formación de la Geometría descriptiva, en el siglo pasado, viene la Estereotomía figurando como asignatura consabida en las Escuelas de construcción existentes en todo el mundo... De ordinario, no se paran mientes en el fondo mecánico del problema, á no ser por los pequeños detalles de orden puramente práctico, como, por ejemplo, el consejo de evitar las juntas dobles, los ángulos agudos, etc., etc.; pero respecto á la mecánica del aparejo, circunstancia esencial que es precisamente la base del equilibrio, no se dice nada general y concreto, y, sin embargo, la primordialidad de la cuestión es evidente que está en la resolución de aquel equilibrio por virtud de alguna ley que ligue las fuerzas externas con el despiezo que se adopte.

Se objetará tal vez que existen reglas clarividentes, de carácter general, que apoyándose en propiedades geométricas de las superficies estructurales,

dictan el aparejo de éstas; conforme; pero estas reglas, dictadas por el sorprendente ingenio de Monge, no significan, al fin, más que la teorización de uno de los detalles prácticos antes aludidos, cual es el de evitar los ángulos agudos, detalle que así, ingeniosa y efectivamente queda realizado, si tomamos, como aconseja Monge, las líneas de curvatura de la bóveda por líneas de junta, en cuyo caso resultan desarrollables los lechos de las piedras, engendrados por normales á la bóveda, y, naturalmente, se resuelve también la ortogonalidad entre las líneas de junta. Pero esta ley genial, que produce en ciertos casos verdaderos poemas de armonía matemática, como se ve, por ejemplo, al aplicarla á las bóvedas elípticas escalenas, no es, sin embargo, la ley mecánica general del aparejo. La regla de Monge, significa únicamente un grado intermedio y precioso de la ley, desconocida y mecánica, á que aludimos, es tan sólo una *generalización limitada* del aparejo de algunas construcciones elementales, y en efecto, así lo comprendemos al intentar la aplicación de la teoría del aparejo por curvaturas á una bóveda cilíndrica con esviaje, en cuyo caso ésta se derrumba; apliquemos la misma ley á un túnel de gran pendiente, y éste cae; sirvámonos de aquella ley para el despiece de una trompa de revolución, y ella se desequilibra. ¿Es, pues, falsa la ley de Monge?... ¡No! Lo que hay, es que es una ley de no suficiente carácter general, como hemos dicho; una ley, en fin, que viene á afirmarnos cómo la ciencia estereotómica atraviesa actualmente la evolución normal que caracteriza á los períodos de formación

de todas las ciencias, que sabemos comienzan y se desenvuelven por el sucesivo descubrimiento y estudio de casos particulares, casos que gradualmente van presentándose con mayor generalidad, hasta llegar á uno de grado suficientemente complejo, el cual por abarcar ya á todos los anteriores nos da la norma general de los mismos; entonces sólo es cuando se conoce la base fundamental de la ciencia en cuestión. En la Estereotomía hase de verificar exacta gestación.

El puente oblicuo marca la etapa en que termina la ley de Monge, pues no pudiendo esta obra aparejarse mecánicamente, según las leyes por aquel geómetra sentadas, induce la idea de nuevos aparejos de equilibrio que son iniciados por el ingeniero inglés Chapman, en la construcción de los puentes del condado de Kildere (Irlanda), en cuyas construcciones se descubre ya el intento de descomponer los vectores de la línea potencial al objeto de llevar el empuje á los estribos. Estas estructuras, que datan aproximadamente del año 1830, tienen una definición mecánica bastante luminosa en la propia obra de su autor titulada *Oblique bridges*, definición que aclara y precisa ya de un modo completo algo más tarde, en 1842, Mr. Adie, con el sistema de los *equilibrated courses*, por él preconizado, sistema que no es, en definitiva, más que el método de aparejo por lechos cilíndricos á lo largo de las trayectorias ortogonales de las secciones del puente producidas por planos paralelos á las embocaduras, en cuyo sistema ve Nicholson una simplificación notable por el mero

hecho de substituir á dichas trayectorias por hélices de gran paso, sentando así el método helizoidal inglés, cuyo análisis es debido á Watson Buck, Fox, John Hart y otros insignes ingenieros británicos.

Sin embargo, á pesar de las simplificaciones reportadas por el anterior sistema de las hélices, se siguió empleando en Francia el método original con todo su rigor, gracias á los estudios de Lefort (1854), á quien se debe la ecuación diferencial y la integrada correspondiente á las líneas de junta.

Las precedentes citas, que son solamente las más notables de la fecunda arquitectonografía de los puentes oblicuos, sirven sólo para ver la relativa juventud, el interés y los profundos estudios evocados por la aparición de los cilindros en esviaje, con los cuales comienza á sentirse el verdadero espíritu mecánico de los despiezos estereotómicos.

Y no es sólo el puente oblicuo, desarrollado por la industria de los ferrocarriles, el elemento que cambia radicalmente la faz de las construcciones que trabajan por compresión de sus elementos, sino que existen otros géneros de construcciones, especialmente en Francia, en las que se revela un esfuerzo portentoso de resolución nueva en el despiezo, una como precursión de un aparejo mecánico racional y general, todavía no encontrado. Entre las obras aludidas, merecen mención especial las célebres trompas del puente de Tours, que ensanchan el paso, en los extremos, para mejor envocar su tránsito. Estas trompas, construídas el siglo pasado por el célebre inspector general de *Ponts et Chaussées*,

M. Bayeux, tienen un despiezo originalísimo, y de un sentido mecánico sorprendente y genial: las líneas de junta seguidas, vienen á ser las trayectorias ortogonales de la curva generatriz de la construcción, advirtiéndose que esta generatriz varía notoriamente de forma en sus diversas posiciones, circunstancia que, á pesar de complicar extraordinariamente el problema, no dificulta al autor su resolución, por haber éste sabido encontrar ingeniosas simplificaciones, que no hacen, sin embargo, para los efectos prácticos, cambiar en nada la esencia teórica del aparejo.

Son, realmente, en la vecina república muy frecuentes las construcciones de esta naturaleza, por lo que el espíritu observador tiene ocasión de ver los esfuerzos de los estereotomistas franceses en encontrar el aparejo mecánico ideal. El mismo *Pont Royal* de París, tiene á su vez, en las trompas extremas, soluciones de despiezo altamente interesantes y completamente desligadas de las líneas de curvatura de la superficie que informan.

Existe, pues, indudablemente, alguna solución general que se pugna por encontrar, y dentro de la cual caben las leyes del insigne Monge, como soluciones particulares, viniendo, entre otras razones, á demostrarlo el que al anular el esviaje de un puente oblicuo, degeneran en generatrices del cañón, es decir, en líneas de curvatura de éste, las trayectorias ortogonales del aparejo mecánico racional.

Si suponemos, para terminar, que la bóveda cuyo despiezo se busca, es un cilindro en pendiente,

las dificultades crecen de todo punto, hasta el extremo de que, con frecuencia, hay que apelar, para el equilibrio, al empleo de los llamados *ancrages* ó tendones locales de consolidación, realizados en hierro, cuya presencia en una construcción estereotómica es completamente irrisoria, por equivaler á trocar radicalmente el trabajo, que debe únicamente ser compresivo entre las piezas constitutivas ó el dovelaje.

Para los cilindros en pendiente, se debe al gran Resal la continuación de la videncia mecánica de la estereotomía, iniciada con los puentes oblicuos horizontales; sienta este célebre ingeniero, con un espíritu generalizador excepcional, unas ciertas reglas de aparejo que vienen, en definitiva, á constituir como un caso más amplio de las que rigen en los puentes oblicuos, ya que, efectivamente, un cilindro en bajada y un cilindro en esviaje, son, de un modo general, dos cañones cuyas embocaduras verticales cortan oblicuamente al eje. Á tal efecto, dedúcese que:

Las curvas de las juntas discontinuas, trazadas sobre el intradós, deben estar en planos paralelos á la dirección de las fuerzas exteriores ó cargas. Estos planos se distribuirán de manera que, por un cambio regular y gradual de orientación, pasen desde la dirección de una embocadura de la bóveda á la de otra embocadura; los lechos discontinuos podrán ser planos. Las curvas de las juntas continuas, trazadas en el intradós, serán trayectorias ortogonales de las anteriores; y las correspondientes superficies de junta ó lechos, serán superficies alabeadas engendradas por una normal á la curva de juntas discon-

tinuas, situada en el plano de esta curva, cuya normal se irá desplazando sobre la línea de junta continua.

Estas reglas estereotómicas, de colosal instinto mecánico, sintetizan todos los despiezos racionales de las bóvedas cilíndricas, y ellas, que en la práctica son susceptibles de simplificación, sin que se altere la esencia de las mismas (aquí precisamente juega el espíritu de práctica y de economía que debe desplegar el ingeniero), puédense perfectamente aplicar lo mismo á las bóvedas en pendiente, que á las bóvedas en esviaje, y á las cilíndricas de eje horizontal con testas en talud, etc.; y, finalmente, dan también resultado al aplicarlas á los cañones en gran pendiente y gran esviaje, á la vez; estructuras estas últimas de tan complejísima mecánica, que indudablemente hubiesen hecho retroceder, cincuenta años atrás, á los ingenieros más hábiles, y lo decimos así, por cuanto el mismo Dejardin, en su *Établissement des voûtes*, publicado en 1845, aconsejaba el evadir, á ser posible, la construcción del puente oblicuo, merced á un cambio de alineación en el trazado del camino, dada la dificultad, entonces aun reinante, en el problema del aparejo.

Con todas estas novísimas leyes del despiezo mecánico, ¿se ha llegado ya á la generalización de las reglas estereotómicas?... Evidentemente que no, pues ellas, en rigor, no hacen más que descubrir la esencia real del equilibrio de un conjunto litópolo, es decir, de un montón geometrizado de piezas talladas, en cuya estabilidad juega toda una mecánica grandiosa cuyos principios solamente son conocidos

en casos particularísimos, mientras que en otros de mayor generalización (que la Ingeniería y la Arquitectura futuras irán indudablemente exigiendo), alcanzan un grado tan complicado, que apenas hoy pueden veladamente presentirse.

Las disertaciones anteriores vienen, en definitiva, á demostrar como, hasta hace muy poco, no hemos abierto los ojos ante el problema mecánico de la ciencia estereotómica; y, efectivamente, hace tan poco, es tan reciente el descubrimiento, que aun pasa completamente desapercibido, viniéndolo á probar el hecho de que los estudios del despiezo se hacen preceder á los de la mecánica de la construcción en la mayor parte de las Escuelas especiales, con lo cual se significa á la Estereotomía como una estricta aplicación de la Geometría descriptiva. Si á esta observación unimos el principio incontrovertible de que todas las ciencias son indefinidas en la extensión de sus investigaciones, vendremos á convencernos, finalmente, de que las estructuras unirresistentes y litópolas, es decir, las construcciones estereotómicas, están en la actualidad dentro un grado de formación en absoluto embrionario.

III.—EVOLUCIÓN DE LAS FORMAS APAREJADAS

EL capítulo anterior presenta, en cierto modo, á la estereotomía futura; vamos en éste á hacer pasar ante los ojos del lector á la interesante película de la estereotomía histórica, por lo beneficioso

que resulta siempre el descubrir la estela, el camino, en fin, por donde han discurrido, antes de llegar á nosotros, las actividades humanas. Esta película será un simple bosquejo cronológico de nuestras reflexiones, que haremos correr á gran velocidad.

Las líneas potenciales de las construcciones primitivas fueron siempre verticales, no hay en ellas el cierre en la finitud, no hay, en fin, las compresiones en las estructuras que avanzan sobre la dirección horizontal. Estas estructuras trabajan, pues, por flexión; de aquí la impropiedad científica de las portentosas obras del Egipto y de la Grecia, cuya hermosura han proclamado á cuatro vientos todos los tratados de las Bellas Artes.

Las estructuras egipcias y helénicas, de sus mejores tiempos, las de Ramsés y de Pericles, son estructuras de reacción vertical, los monolitos que apoyan en sus pies derechos ó columnas, son piezas flexadas. La estereotomía, pues, nace con flexión de sus elementos, y el objeto racional de la estereotomía está precisamente en la abolición de toda flexión.... Reversiones y misterios de la ley de la ciencia. Todas las formas arquitrabadas y las en saledizo, típicas de aquellas arquitecturas de reacción vertical, entrañan la flexión de sus piezas, si bien es verdad que la reducción de intercolumnios ó pequeñez relativa de luces, implica un trabajo tensor muy limitado en la piedra.

El afán de aumentar las luces, por el anterior concepto restringidas, origina la combinación del dintel y del principio de las piezas en saledizo,

engendrándose así las estructuras de reacción vertical también, pero equilibradas por un contrapeso colocado en el saledizo (en la parte opuesta de aquélla sobre que carga el dintel). Tan ingenioso principio estructural es oriundo de la Asiria, y él nos revela un fondo rigurosamente exacto al de los modernos cantilevers. Realmente; un monolito de gran anchura, situado transversalmente sobre un muro ó columna con sus elementos salientes cargados, significa una balanza, una pieza contrapesada con empotramiento central que trabaja, en fin, al igual que los cantilevers.

Hasta aquí tenemos, pues, estructuras sin empuje, con manifestaciones impropias, pero en compensación muy duraderas. Es, en efecto, esta la causa verdadera de la longevidad de las obras antiguas; la ausencia, en ellas, de reacciones inclinadas, constituye una garantía de estabilidad, á la cual es sabido que atentan constantemente mil accidentes, como la deficiencia de las fundaciones, las conmociones sísmicas, etc., etc.

En las estructuras, el manejo de la reacción inclinada, implica un conocimiento de elevación indiscutiblemente superior al exigido en el caso de ser vertical la reacción; por esto no aparece hasta bastante tarde, la forma en empuje, iniciada en la Persia con sus portentos de construcción birresistente, y en Etruria y Roma, con la invención del despiezo arqueado.

Una vez iniciada la estructura estereotómica con empuje, no se la abandona ya más, sino que, por el

contrario, se cultiva y acaricia el principio en tal forma, que llegan á obtenerse, del mismo, resultados verdaderamente prodigiosos. Comiénzase aceptando el empuje uniformemente repartido á lo largo de las impostas de las estructuras abovedadas, ya cilíndricas, ya cupulares, lo cual exige, naturalmente, el empleo de muros de gran espesor en toda su longitud, para ir, así, contrarrestando la reacción inclinada que campea por todas partes; de aquí, precisamente, la pesadez de las formas constructivas primeras, pesadez á que se opone evidentemente la ley general que preside en la evolución de todo género de estructuras, ley de aligeramiento de masas, de espiritualización de formas, ley, en fin, que armoniza con el mundo de idealidad á que el hombre va tendiendo por la labor prodigiosa y noble de su órgano cerebral.

Los esfuerzos del constructor dirígense, pues, á domar el empuje, á hacerlo dócil en su mano y poderlo así dirigir á los puntos convenientes de la estructura general; y, efectivamente, acaba por lograrse la localización completa de las reacciones terminales de las bóvedas, con lo que ya sólo reclaman éstas, para su equilibrio, un número determinado de contrafuertes, situados únicamente en los puntos de paso de aquellas reacciones. Queda, por tan admirable principio, resuelta la delimitación estrictamente resistente de la obra; queda, en fin, precisado el principio estructural ó de esqueleto, con lo cual pasan á desempeñar un papel secundario, puramente de aislamiento, los grandes macizos primitivos de abovedados y de muros, siendo ya dable

por esta sola razón el reducir extraordinariamente los espesores hasta el punto de llegar aquellos macizos á convertirse en simples elementos de cuajado, sin resistencia alguna á la carga.

Este resultado que significa, en una palabra, la maravillosa revelación constructiva de la época gótica, plantea en la arquitectura, de una manera definitiva, el principio de la división de funciones en el material; se agrupa éste en dos órdenes: el uno, corresponde únicamente á la resolución mecánica y de equilibrio, al esqueleto, en fin, de la obra; y el otro, corresponde tan sólo al cierre y tabicado, sin papel activo de ninguna clase, quedando así dibujada con una precisión completa la estructura de la construcción.

El problema, resuelto de un modo definitivo por los constructores medioevales, es de una magnitud y transcendencia asombrosas en la construcción este-reotómica, y, por consiguiente, la gestación verificada para llegar á tan luminoso resultado, hubo de ser verdaderamente secular; tamañas conclusiones no pueden, en efecto, ser hijas de un hombre ni de una sola generación, sino que constituyen siempre un fruto colectivo de varias generaciones sucesivas, de una raza, de toda una era, en fin. Y, efectivamente, sucede así.

La idea de *estructurar*, es decir, de concentrar en regiones aisladas la materia resistente de una construcción, aparece iniciada de un modo manifiesto en las obras sirias y armenias constituídas por formas pétreas en arcuación, doveladas y con estra-

dós plano, sobre el que carga la techumbre representada por un sistema de lajas de piedra. El arco toral de las bóvedas romanas, de la época republicana, comprueba también claramente el espíritu de reforzar á trechos los cañones aparejados, y, algo más tarde, con la invención de la bóveda en arista, se ven enérgicamente propulsadas aquellas tendencias por una circunstancia puramente casual. Débese, en efecto, atribuir á casualidad la conjunción portentosa de las tendencias mecánicas referidas, con la aparición de la bóveda en arista, por cuanto ésta engloba de un trazo todo el mundo arquitectural de la crucería que resuelve la localización de los empujes á lo largo de los planos de las aristas de cruce.

Inventada ya la crucería elemental, por metamorfosis sucesivas se desenvuelven las estructuras de arista, comenzando por la adopción de témpanos con generación cilíndrica, y acabando por los de forma bombeada, típicos de las generaciones bizantinas. El contrafuerte adquiere carta de naturaleza en todas estas estructuras, para contrarrestar los empujes locales, pero con la original característica de que en todo el período á que aludimos, se mantiene dicho órgano siempre en el interior de las construcciones.

Durante esta evolución interesante de las estructuras despiezadas, la estereotomía propiamente entendida, es decir, el arte estereográfico de definir y plantillar geoméricamente los sólidos, es aún desconocido; de aquí la dificultad insuperable de los aparejadores romanos y bizantinos, que, por no

comprender la definición superficial de las piezas de los aristeros, por no tener educada su mentalidad en la concepción del espacio, apelan á soluciones originalísimas y realmente dignas de estudio, porque ellas descubren una como psicología constructiva en aquellos de nuestros predecesores que, teniendo ante sí los mismos problemas que nosotros, y debiendo de resolverlos, se encontraban faltos de nuestros medios, por lo cual apelaban á subterfugios ingeniosísimos, en los que, indudablemente, gastaron más energía y arte del que hoy, merced á los procedimientos estereográficos modernos, se requiere para resolver la forma de piedras más complicadas. ¿Será esta, verdaderamente, la causa de la construcción nervada que nace en el siglo XI?... Es lógico, al menos suponerlo, por cuanto dicha construcción, es decir, la arquitectura gótica propiamente dicha, viene de un trazo á eliminar todas aquellas dificultades de las estructuras despiezadas, haciendo á éstas mucho más sencillas y mucho más fecundas y universales. La característica de la estructura gótica está en construir los aristeros con piedras independientes de las bóvedas simples que concurren en ellos, formando así, cada aristero, un arco aparejado como los arcos ordinarios, es decir, con secciones radiales. Sobre estos aristeros, ó armaduras de piedra, descansan ó estriban las bóvedas simples correspondientes.

El sencillísimo principio anterior permite la composición de complicadas bóvedas y su facilísima realización. El constructor se fija previamente los aristeros de perfiles variados (circulares, curvas de

segundo grado en general, líneas ojivales, etc.), como si fuesen los ejes de una osatura. Se materializan estos aristeros por medio de arcos de piedra dovelados, y, en seguida, los espacios comprendidos entre los mismos, se rellenan con bóvedas simples usuales, y el problema de la construcción queda por entero terminado. Como los aristeros pueden tener peraltes arbitrarios y distintos, la plementería ó bóveda de relleno, propiamente dicha, pierde su generación cilíndrica, adoptándose al efecto generaciones de superficies de revolución, ó hasta, á veces, generaciones inciertas. Los aristeros á su vez crecen en número, formándose así una escuela típica, francesa, de nervios multiplicados, originada por los constructores de Ajou, escuela que algo más tarde es transportada á Inglaterra por los arquitectos de la dinastía de los Plantagenets, y allí adquiere el principio constructivo una ufanía y complicación prodigiosa, pero, puramente en apariencia, pues el fondo de la composición estructural es de una simplicidad sorprendente: baste decir que en la escuela inglesa, los nervios de las bóvedas son en número tan elevado y en combinación tan compleja, que forman verdaderas lacerías ó bordados de estrellada planta, y, sin embargo, todos ellos tienen un mismo galve, una misma plantilla, y el trazo de todos es exclusivamente á compás ó con línea circular.

La exagerada multiplicación de los nervios en las estructuras góticas británicas, origina la reincorporación de los mismos á la masa de la bóveda, con lo que desaparece la independencia de los aristeros, pasando éstos á representar puramente papel deco-

rativo en los intradoses abovedados, pero con la particularidad notabilísima de que la estructura estereotómica sigue conservando el precioso principio de la localización de empujes. Corresponden á esta rica época de la arquitectura inglesa, los célebres *fan vaulten roof* ó bóvedas en abanico, de las que, entre otras muchas, existe un ejemplo filigranado, irreprochablemente hermoso y de admirable conjunción armónica entre la mecánica y la estética, en el célebre claustro de la catedral de Gloucester. La estructura de las *fan vaulten* es de un ingenio grandioso en medio de su simplicidad: la semirrevolución de un segmento curvilíneo alrededor de su tangente vertical, constituye, como sabemos, su esencia de principio, del que se pueden obtener fecundas combinaciones, desplegando solamente una cierta ingeniosidad. Estas bóvedas se han aplicado á cubierta de recintos de plantas variadísimas, y ellas asimismo permiten el estructurar un techo apoyado sobre columnas, como sucede en los casos de cubriciones superficiales grandes; entonces estas columnas son los ejes de revolución completa del arco generador de la bóveda en cuestión, dispositivo que origina una singular estructura como de conos invertidos, apoyados por su vértice contra las referidas columnas. La imaginación de los constructores ingleses, en el paroxismo de su arte gótico, y por tanto, en las puertas de la decadencia ya, logra en la estructura, que acabamos de comentar, el esconder toda apariencia de sustentación á aquellos conos invertidos, resolviendo al efecto, y por un original artificio de forma, una cubierta colgada, con regiones pen-

dientes, faltas de sustentación aparente, que despierta una inquietud inefable en el espíritu del observador. Basta ingresar en el interior de la nave de la catedral de Oxford para experimentar, por el más elemental sentimiento mecánico, la referida impresión.

Durante toda la construcción de la plena arquitectura gótica, aparece siempre en el exterior de las obras un órgano cuyo aspecto varía indefinidamente, pero cuyo oficio es constantemente el mismo: el de contrafuerte. El contrafuerte gótico es, en rigor, como una materialización de la línea potencial de acción externa, línea que, después de haber pasado por los ejes de los nervios, en la terminación de éstos afloraría al vacío, con lo que sobrevendría indefectiblemente el derrumbamiento de la obra; de aquí, precisamente, nace el contrafuerte, órgano constituido, en un principio, por un murete sencillo adosado al lugar de la reacción que se trata de evitar, pero que más adelante, con la presencia de las tres naves en la arquitectura mística, de las cuales, la central tiene más elevación que las laterales para así recibir luz directa por sus altas aberturas, obligase á transmitir los empujes de ella, á través del espacio, salvando la anchura de las naves laterales merced á los arcos aislados ó botareles tendidos en el espacio, arcos que, en ciertos casos, llegan á poseer dos y hasta tres tramos, para el paso sucesivo de las crujías, cuando éstas figuran en mayor número en la construcción á que se aplican.

El arbotante, es, pues, un puente de rasante inclinada que sigue sensiblemente la alineación de la

curva de las presiones, con la circunstancia de que en él las cargas vienen representadas por las reacciones ó vectores finales de aquella línea de presiones, y, naturalmente, este fenómeno produce una carga en el dovelaje, así como en tratándose de un puente real, las cargas contra el dovelaje originan las reacciones; pero la mecánica relativa en ambos casos es exactamente la misma. Esta observación indúcenos á creer que la presencia de articulaciones en los botareles de una estructura gótica, originaría un trabajo más racional en dichos órganos, los cuales podrían así verificarse ó calcularse de la misma manera que las estructuras despiezadas alemanas, que como dijimos poseen articulación.

Es ya conocida, y, por lo tanto, no hay que entretenernos en detallarla, la interesantísima conjunción entre la mecánica y el arte de la arquitectura gótica: los botareles dobles y triples, uno encima de otro, presentan puntos aislados de apoyo contra los muros, que pueden así debilitarse con calados y *vitalls* sin temor á la estabilidad; los altos pináculos vestidos de encrespada flora son sencillos pesos muertos que verticalizan el vector final de la línea de las presiones; los pies derechos ó montantes de estructura complicada, en su parte baja de reducida sección, pero que en su parte alta, merced á saledizos, columnitas y *triforiums*, dan riqueza y complejidad al órgano de sustentación que forman, vienen á expresar verdaderas piezas articuladas en su pie, y de gran momento de inercia central, para de este modo amoldarse al papel constructivo que en la obra desempeñan, circunstancia que repre-

senta una verdadera videncia mecánica de los geniales constructores que las realizaron, etc.

Indudablemente que si la civilización del Renacimiento no hubiese venido á truncar el espíritu científico de aquellos constructores de la época mística, hubiesen ellos llegado á soluciones aun más clarividentes en sus estructuras, y quién sabe si como por el ingenio de los contrafuertes, abolieron el tirante, por otro ingenio en el que ni remotamente podemos nosotros dar, hubiesen á su vez abolido el contrafuerte, creando un tipo estructural de más misterio y más grandeza, si es dable alcanzarla, que la de los prodigiosos templos medioevales, hermosísimas joyas forjadas con arte y ciencia en el sagrado fuego del fervor.

La grandiosa actividad que las asociaciones de tallistas técnicos de la piedra alcanzaron en las diversas manifestaciones propias de su dominio durante la Edad Media, fué rápidamente decayendo, hasta que más adelante las construcciones de fortificación de los siglos XVII y XVIII hicieron, en cierto modo renacer, con sus métodos nuevos de defensa de plazas, el principio de la estructura estereotómica, originando complicados problemas de la sillería, como barbacanas, baluartes y penetraciones abovedadas, pero ya sin el empleo, en estas últimas, de los arcos aristeros independientes, dispositivo por cuya virtud no sólo significaron los góticos al principio estructural, sino que simplificaron, como vimos, al problema propiamente estereotómico de la penetración. Infiérese de aquí, que

en la época de referencia, aun cuando la construcción pétrea aparejada renace, retrotráense, sin embargo, los despieces á los primitivos intentos y, en efecto, obsérvase cómo los aparejos bizantinos de piedra con doble ramal, uno para cada témpano de bóveda concurrente al aristón, vuelven á aparecer, si bien con un cierto grado de perfección, debido al mayor conocimiento del dibujo que entonces ya se tenía, por comenzarse á iniciar de un modo instintivo la ciencia de las proyecciones, presentida por Frézier, el ingeniero de Luis XV, y otros precursores de la estereotomía, ciencia que fué más adelante codificada por el espíritu sintetizador del gran geómetra Monge.

En definitiva, la estructura litópola ó á piezas superpuestas renació, pero aun sin la franca escuela que tiene en la actualidad.

Lo que realmente es digno de observar en la ley de evolución estructural de la época á que acabamos de referirnos, es la tendencia al aligeramiento de las formas. Esta tendencia fué decididamente planteada por el célebre Perronet, sobre el año de 1790, con la construcción del famoso puente de la Concordia, emplazado frente á la Cámara de los Diputados, en París. Perronet, con una audacia en aquel entonces realmente asombrosa, combate de frente el sistema de construcción pétrea anterior á su tiempo, sistema que venía aún á constituir como una rémora del arcaico método romano, por el que se empleaban masas enormes para el contrarresto de las formas abovedadas. Este método que aplicado á la estructuración de puentes, dió lugar á la llamada «regla

del $\frac{1}{5}$ », por el hecho de que el grueso de las pilas alcanzaba una quinta parte de la luz de los tramos, fué indudablemente la causa de que hayan desaparecido, por el ímpetu de las corrientes de los ríos, la mayor parte de los puentes de la Edad Media; comprendiéndolo así Perronet, inició el sistema de las pilas débiles y aligeradas, con un grosor exclusivamente adaptado para resistir la resultante vertical de los empujes de cada dos tramos conjuntos, con lo cual es cierto que se dificultaba la construcción del puente por no hacerse posible la sucesiva erección de sus bóvedas, pero, en cambio, se oponía un mínimo obstáculo al paso de las aguas y se resolvía completamente la perduración de la obra.

Fué aún más lejos el célebre director y fundador de la Escuela de Caminos de Francia, es decir, el propio Perronet, por cuanto además de realizar en su nación numerosas construcciones con el sello del aligeramiento explicado, llegó á proyectar, en 1792, sin que se llegara á construir, por falta de elementos, un puente dovelado de 126'50 metros de luz!!!, espantoso ámbito á que en nuestras obras presentes de piedra no hemos aún llegado, puesto que, en la actualidad, el puente de sillería de mayor amplitud del globo es el de Plauen (Sajonia), que cuenta 96 metros de abertura.

Perronet fué, pues, el precursor, el apóstol, digámoslo así, de la estructura de puentes aligerados, y sus principios arraigaron hasta el extremo de que en todas las construcciones posteriores se ha seguido exactamente aquella escuela, como vienen á confirmar las afamadas estructuras del viaducto d'Au-

teuil, París; el puente de Montereau; los viaductos d'Albi, sobre el Tarn; el puente-canal de Béziers; el viaducto de Wiesen, ferrocarril de Davos-Filizur, (Suiza); la célebre moderna estructura de Séjourné, en Fontpedrouse (Pirineos Orientales); el puente de Orleans, de tímpanos vaciados; la moderna bóveda (1910) de Montanges, de 80 metros de luz, etcétera, etcétera; formas todas á cual más aligeradas y atrevidas, cuyas grandes luces y alturas han sido salvadas en piedra y con una idealidad aparentemente temeraria.

No podemos terminar este boceto analítico de las formas estereotómicas, sin mentar siquiera el resurgimiento actual de la construcción despiezada en el Imperio alemán, el cual, gracias á su total florecimiento en estos últimos años, ha podido proporcionar, tanto por el arte privado como por el nacional, numerosos, modernos é interesantes problemas á la técnica de la talla pétrea. No hay que hablar de los progresos de los puentes estereotómicos alemanes, porque ya en el capítulo anterior, con oportunidad, nos referimos á ellos; bastará sólo afirmar la personalidad y modernismo racional que respiran los despiezos de las composiciones abovedadas, cuyas obras, principalmente la región de los aristeros, tienen un tratamiento genuinamente nuevo, que, sin ser inspirado en las soluciones bizantinas ni en las góticas, participa, sin embargo, de las ventajas de ambas y está exento de sus inconvenientes.

Tal es, en síntesis, el juicio de la estereotomía

alemana, interesante de todo punto, y en cuyos trazados y dibujos se habla, con una claridad asombrosa, el lenguaje técnico universal de las proyecciones, definiendo con sencillez los intrincados problemas de las penetraciones, resueltos todos con una eficacia mecánica verdaderamente irreprochable. Lamentamos no ser este el sitio para describir los despiezos, pero nos remitimos para ello á los tratados alemanes, entre los que merece palma la reciente obra luminosa del sabio Théobald Müller.

IV.— ESTRUCTURAS TENSADAS

EN el orden de las estructuras simples, nos resta aún por analizar aquellas que exclusivamente reaccionan por tensión, por no experimentar en sus secciones transversales esfuerzo compresivo alguno.

Un material cualquiera, con tal que su resistencia tensiva no sea nula y que la constructibilidad adoptada lo consienta, es decir, que la materia sea continua, ó que, en su defecto, exista el conveniente enlace entre cada una de las partes y sus inmediatas, podrá, en rigor, servir para realizar formas tensadas; sin embargo, en la práctica, estas estructuras se suelen confeccionar con cables ó cadenas metálicas, y hasta, á veces, con material orgánico, ordinariamente del reino vegetal.

Compréndese, dada la contextura de las formas de que tratamos, la extraordinaria sensibilidad que éstas tendrán para adaptarse á líneas de todo perfil,

pues, en rigor, la flexibilidad que reúnen, equivale á la posesión de un número infinito de rótulas de articulación, por efecto de las cuales hácese la estructura completamente deformable. Este es, precisamente, el punto negro de las formas tensadas, ya que en sus aplicaciones á la construcción definitiva, débese siempre apelar á dispositivos auxiliares que contrarresten aquella deformación, obligando á conservar los perfiles de equilibrio que naturalmente afectan estas estructuras al tenderlas en su sitio.

Realmente, las estructuras tensadas se pliegan por sí solas al perfil equilibrado, y como su resistencia flectora es prácticamente nula, aquel perfil equilibrado resulta ser la línea potencial de acción externa, condición indispensable, como sabemos, para anular los pares de flexión. Resulta, en fin, que la estructura elástica tiene una *self adaptación* á la línea potencial, con lo que ésta pasa efectivamente por el eje de las formas, lo que, por otra parte, debe verificarse evidentemente, toda vez que el miembro estructural tiene infinitas articulaciones ó rótulas, como se ha dicho, y sabemos que toda rótula es inmutablemente un punto de paso de la línea de acción externa.

La tendencia moderna de toda la arquitectura tensada, está, pues, en combatir su mayor enemigo: la deformabilidad; circunstancia que se debe evitar, no sólo por el interés (cuyas causas se advierten) de conservar el perfil proyectado, sino también por los grandes esfuerzos que ciertas deformaciones originarían, haciendo con ello completamente inútil la

primitiva verificación mecánica. En los actuales puentes colgantes ha admirablemente resuelto esta cuestión, convirtiéndolos al efecto, de un modo irreprochable, en verdaderos sistemas rígidos, en *canevases* reales de triangulación enteramente tensada.

Por la interesante ley de conjugación que, dijimos, liga á estas estructuras con las estereotómicas, anteriormente vistas, dedúcese que la verificación de ambos grupos constructivos debe obedecer á un principio común, y, efectivamente, así sucede, con la circunstancia, empero, de que en las formas tensadas preside un mayor rigorismo y exactitud, debido á que en ellas son completamente conocidos los puntos de paso de la línea potencial de las tensiones.

Con esta línea de tensiones, se opera exactamente lo mismo que con la que antes era línea de compresiones; ambas líneas son sencillamente casos particulares, como hemos repetido varias veces, de la llamada línea potencial de acción externa, y satisfacen, por tanto, á iguales leyes mecánicas. Según esta consideración, en una forma tensada, por ejemplo un cable colgante, se podrán facilísimamente encontrar las reacciones finales, puesto que su componente horizontal, ó empuje, es determinable por la estática, tal como sucede en las formas de tres articulaciones y en los arcos estereotómicos. Si las cargas de la estructura que consideramos, son verticales (que es el caso más frecuente), sucederá, como en todas las demás estructuras, que la

componente horizontal de las fuerzas que actúan en un punto cualquiera, será constante; el valor de esta constante, que es sencillamente la «distancia polar», ó el vector horizontal del polígono de las fuerzas, se buscará considerando la porción de cable comprendida entre uno de sus puntos de amarre y el punto más bajo, en el cual supondremos aplicado el empuje horizontal, empuje que, naturalmente, substituye á la acción ó fuerza de la otra mitad de cable que hemos suprimido; y luego tomaremos momentos de esta fuerza y de las que actúan sobre el trozo considerado de cable, respecto al punto de amarre del mismo. De la igualdad entre los momentos así obtenidos despejaremos el empuje, esto es, la componente horizontal de las tensiones. Evidentemente que esta componente constante, nos dará ahora la tensión definitiva que sufre el cable en uno cualquiera de sus puntos; bastará, sencillamente, proyectar dicha componente sobre la tangente al cable en el punto que se analiza; compréndese que esta tensión, así obtenida, es á su vez igual al correspondiente vector del polígono de fuerzas. Finalmente, la sección del cable en un punto cualquiera, la obtendremos dividiendo su tensión por el coeficiente de trabajo del material con que realicemos la estructura.

No existe, pues, como vemos, diferencia alguna de fondo entre el método verificativo de las estructuras tensadas y el de los demás géneros estructurales, corroborándose, por tanto, la ley unitaria que se explicó al hacer la síntesis del cálculo de construcciones.

Las ecuaciones de las curvas catenaria y parábola, nos permiten dibujar con absoluto rigorismo la curva de las tensiones, es decir, la línea central ó eje de las estructuras tensadas, en los dos casos usuales, que sabemos significan, de repartición de cargas; sin embargo, atendida la proximidad entre una y otra curva, cuando ambas tienen una misma flecha y unos mismos puntos terminales (datos que se nos fijan al proyectar la estructura) puede sensiblemente emplearse siempre la parábola, dada la mayor sencillez de su ecuación.

Si la ley del reparto de cargas no fuese uniforme, bien por metro de proyección horizontal, bien por metro de cable, existe el expedito y seguro procedimiento de determinar experimentalmente el polígono ó línea de las tensiones; ya se habló de este tema al tratar de las estructuras estereotómicas.

Si la forma tensada tuviese varios tramos, es conveniente asegurarnos de la verticalidad absoluta de la reacción que corresponde á los puntos ó pilas intermedios; circunstancia que se realiza con tal que las parábolas de los distintos tramos, tengan todäs un mismo parámetro, es decir, sean segmentos de una misma parábola; observación que á su vez nos da el medio fácil de ir averiguando las distintas flechas que habrá que adoptar para cada tramo, si éstos fuesen entre sí de luz diferente.

Es conveniente observar además en los estudios verificativos de las estructuras tensadas, la influencia ejercida por las variaciones de temperatura, por cuanto éstas implicarían diferencias de longitud, que naturalmente, según los casos, producirían au-

mentos ó disminuciones de tensión. Es fácil someter al cálculo este fenómeno, para así venir en deducción de cuál será la tensión horizontal en los casos de temperatura extrema.

La deformabilidad que, dijimos, es altamente perjudicial á estas estructuras, se ve singularmente favorecida por la acción del viento, y por esto hay que afianzarlas invariablemente por medio de los *haubans* ó tirantes supletorios. Estos tirantes tienen, además, notable y frecuente aplicación al verticalizar las reacciones finales de la estructura, atirantando, al efecto, las pilas de término ó sean los muros ú otros órganos de donde arranca dicha estructura y, en tal concepto, hemos de ver en los *haubans* desempeñar exactamente el papel de los contrafuertes de las construcciones góticas, con la sola diferencia de que ahora el trabajo es tensivo, mientras que en aquella arquitectura era compresivo.

En las construcciones tensadas encontramos, al igual que en las comprimidas ó estereotómicas, casos de empujes repartidos y casos de empujes localizados. Por ejemplo, un *velarium* colocado entre dos muros paralelos ó dos ejes, y unido á ellos á lo largo de todo su borde, viene en esencia á representar una bóveda invertida, con empuje repartido contra toda la imposta; pero si entre los dos órganos que sobrellevan el *velarium*, disponemos cables tendidos transversalmente y sólo sobre ellos hacemos descansar la vela en cuestión, la estructura originada será de la categoría de las tensadas, con empuje localizado. En este último caso, los referidos cables transversales hacen exactamente

el papel de los nervios de las bóvedas medievales.

Descubrimos, pues, por la anterior presentación de formas tensadas, toda una arquitectura fecunda y original, en que nuestra imaginación, con sólo los referidos principios, puede encontrar infinidad de formas racionales y apropiadas á los fines económicos y utilitarios de la arquitectura industrial. No hacemos más que señalar este horizonte de la construcción, advirtiendo de paso, que en él, podríamos plantear formas duraderas y estables, es decir, estructuras definitivas, si por virtud de algún ingenioso método práctico resolviéramos el problema de la inalterabilidad de tensores, y, especialmente de tejidos, órganos que como vemos constituyen la base principal de la arquitectura tensada, cuyo oficio, exceptuando los puentes colgantes, no ha traspasado aún el terreno de las aplicaciones provisionales.

El puente colgante es, indudablemente, el ejemplo más atractivo de la arquitectura tensada, y también la forma con que dicha arquitectura se ha desarrollado de un modo más universal; será, pues, de utilidad el croquizar siquiera la génesis y evolución del puente colgante, máxime en la actualidad, en que este tipo estructural parece renacer con una gran potencia, enriquecido con principios esencialmente modernos.

La idea original del puente colgante, seguramente inspirada por disposiciones naturales de los Andes americanos, y no de la China, como se suele creer, por la razón de ser precisamente la América

patria innegable de estas estructuras, consiste en suspender el tablero de paso, por medio de tirantes que penden verticalmente del cable tendido sobre el cauce ó región que se trata de salvar. La primera realización francamente caracterizada de este principio estructural, data del año 1796, en que Finley construye en los Estados Unidos un puente cuyas catenarias estaban formadas por cadenas de hierro. A partir de esta época, se desarrolla ya la construcción de los puentes colgantes americanos, intentándose poco después la substitución de la cadena primitiva por el cable de alambres de hierro, ensayo que se aplicó por primera vez en Filadelfia en el año de 1815. El principio de la estructura colgante es ya por el éxito de los anteriores ensayos, acogido abiertamente en Inglaterra y en Francia, tomando muy pronto carta de naturaleza en esta última nación, como habrá podido observar el que haya viajado por la vecina república, completamente surcada de puentes colgantes.

El primer puente colgante de la referida nación, fué construído en el mismo sitio que actualmente ocupa el puente de Alejandro III, en París, por el gran Navier, á quien le fué encomendado el proyecto en el año de 1825, bajo la Restauración francesa; sin embargo, como dato científico interesante, hay que hacer notar que aquella obra no prosperó, pues, una vez inaugurada, tuvo que derruirse inmediatamente, dados los alarmantes síntomas de debilidad que acusaba. Tal vez esta será la causa de que no se haya construído ya ningún otro puente colgante en París... Efectivamente; en la capital francesa, dentro

de sus propias murallas, existen en la actualidad unos veintiséis puentes y ninguno de ellos es de tipo colgante, pero, en cambio, en provincias, abundan extraordinariamente estos puentes, siendo notables los de Lyon, Tarascón, Avignón, Valence, etc., con la particularidad de que todos ellos están trazados bajo un mismo patrón: en cada pila de sustentación se levanta invariablemente un arco triunfal estilo renacimiento, arrancando de la cornisa de dicho arco los cables de suspensión.

El puente de Friburgo (Suiza), que, de los colgantes de gran luz (217 metros), es el primero que se construyó en el continente, es del mismo carácter que los últimamente citados puentes de Francia. Es célebre, en Friburgo, también, el puente que salva el valle del *Gotteron* (de 172 metros de luz), por la circunstancia de tener un cable con amarres desnivelados, y, además, porque su ingeniero, monsieur Chaley, que lo construyó en 1837, parece que se inspiró en la misma naturaleza de la localidad para hacer económica esta famosa y pintoresca construcción, pues dados los macizos de roca que componen el valle, le bastó á Chaley el abrir en dichos macizos un taladro en forma de U, situado en plano vertical, para pasar por él al cable de suspensión, que en definitiva viene así á constituir como un cable sin fin, de amarre completamente asegurado.

Durante todo el período de construcción de los puentes colgantes, á que nos hemos referido, pareciese observar en ellos defectos de tal monta, que hacen al ingeniero temer el entregarlos al tránsito rodado por camino de hierro. Siéntase la conclusión

de que no sólo el efecto de los vientos violentos perjudica notoriamente á estas estructuras, sino que muchos de sus accidentes son debidos á la isocronía de vibración que produce en ellas el paso cadencioso de un ejército y hasta del ganado. Preséntase, pues, un período de vacilación, en que se ve en el puente colgante tan sólo el mérito de simplicidad y de elegancia, singularmente armoniosa con la propia naturaleza y el paisaje, al que imprime un sello artístico de gracia inexplicable...; el agreste valle que salva el conocido *Clifton bridge*, en Inglaterra, constituye un notable ejemplo de la poesía que entrañan los puentes colgantes; pero, amén de esta circunstancia, no se ve en dichas estructuras nada más, ni un presagio siquiera de los portentosos problemas y de las luces exorbitantes que hoy llegan á alcanzar.

El verdadero progreso de los puentes colgantes originase, indudablemente, por los alrededores del año 1856, con la inauguración en tal fecha del puente del Niágara, cuyo principio constructivo reunía una novedad verdaderamente transcendental: la rigidez del tablero. Hasta aquí, todos los puentes referidos se caracterizaban por la flexibilidad de la plataforma, que constituye propiamente el camino ó vía de paso; la flexibilidad de dicha plataforma, era una consecuencia de los frecuentes puntos de apoyo que ella tiene con los numerosos tirantes de que va suspendida, por cuya razón puede perfectamente construirse con un momento de inercia despreciable. Al construir en el referido puente del Niágara, el tablero suspendido, en forma de una

verdadera viga tubular de celosía, dotada de gran rigidez y además afianzada con numerosísimos *hau-bans*, viga por cuyo interior pasa una carretera y por cuya parte alta circulan los trenes, se descubre el originalísimo fenómeno de que el paso por el puente de un convoy férreo cargado y á la gran velocidad de unos cuarenta kilómetros, produce menos trepidación que un grupo de veinte jinetes al trote. Compruébase, además, en la construcción de los grandes puentes colgantes que siguieron después, el principio de que con el aumento de luz hácese mucho menos sensibles los efectos de pendolaje y vibración producidos por el paso de los trenes, beneficio, indudablemente debido á la mayor masa de la estructura, para con respecto á la del convoy.

Por todas estas circunstancias vese ya, definitivamente, reivindicada la forma estructural colgante, si bien con tablero rígido, lo que en cierto modo significa como una mistificación del primitivo tipo, toda vez que con esta forma el puente en cuestión trabaja, en rigor, como una viga rígida usual, poderosamente descargada, empero, por el efecto del cable superior, circunstancia que, naturalmente, debe así tenerse en cuenta en la verificación de los correspondientes cálculos de resistencia. Es interesantísima la teoría de Levy sobre estos puentes de tablero rígido, teoría que, fundándose en la conservación de la forma parabólica del cable de suspensión durante el paso de las cargas á que se sujeta el tablero, viene á deducir que éste, en cada uno de sus puntos de suspensión, se sujeta espontánea-

mente, al cruzarle un convoy, á cargas iguales dirigidas de abajo arriba, lo cual explica la referida descarga ó aligeramiento experimentado por el tablero.

Así concebida la estructura, se la aplica ya frecuentemente en su misma patria original, en América, donde se han apreciado todas las ventajas del puente colgante con tablero rígido, entre las cuales es apreciablesima la de la facilitación de montaje que permite.

Es interesantísimo notar que, paralelamente con la anterior corriente productora de la rigidez del tablero, se inició otra que tendía á dar rigidez al cable, dejando flexible al tablero. El primitivo ejemplo que comprueba nuestra aserción data sensiblemente del año 1835, en que se construyó el puente de Mannheim, sobre el Nekar, formado por una arcuación triangulada colgante, como por un arco de celosía en posición invertida. El puente de Pittsburgo, sobre el Monongahela, significa, en rigor, una modificación perfeccionada del tipo á que aludimos, pues está constituido por dos vigas rígidas articuladas en su unión y en los estribos, formando el conjunto de ambas vigas, un verdadero arco de tres articulaciones, invertido también. Esta última, es una notable estructura de 244 metros de luz, tratada con un singular cariño arquitectural, pero que no ha logrado hacer definitiva escuela por el hecho de que parece va imperando el primer modo de hacer rígido el sistema.

De todas maneras, deducimos por estas últimas citas, como el sentimiento de dotar de rigidez al

punto colgante se inició por caminos distintos, prevaleciendo, sin embargo, el primero, es decir, el de tablero en viga de celosía, cómo lo demuestra el que los grandes puentes americanos modernos pertenecen precisamente á este tipo. La serie de estos grandes puentes fué abierta en 1887, con el famoso *Brooklyn* sobre el Eats River, en Nueva York; gigantesca estructura de unos 490 metros de luz libre, con cables de acero de diez y seis pulgadas, y cuyo tablero está constituido por seis vigas rígidas. Á este puente siguieron los famosos y modernos *Manhattan bridge* y *Williamsburg bridge*, tendidos sobre las rías de Nueva York, también; su tipo y magnitud no difieren esencialmente de las del *Brooklyn bridge*, pues, como él, tienen el tablero rígido y completamente estructurado por envidados de celosía que dan paso á ferrocarriles, tranvías, carruajes y peatones. La diferencia fundamental entre estos dos últimos puentes y el del *Brooklyn*, está que á consecuencia de la mayor rigidez de su tablero, hase podido reducir el número extraordinario de *haubans* que en el *Brooklyn* hacen el efecto de verdadera red; y otra diferencia está en que los pilares de sustentación de los cables son de metal armado, en vez de estar contruidos en piedra. Los cables de suspensión en los *Williamsburg* y *Manhattan bridges*, poseen respectivamente $18 \frac{3}{4}$ y $21 \frac{1}{4}$ pulgadas de diámetro.

No están aún los americanos satisfechos con haber tendido estas catenarias monstruosas sobre el mar que les circunda y por las cuales fluye la vida

pletórica de Nueva York. Hace apenas un año que el *Bridge Commissioners* ha propuesto á la Legislatura de la ciudad de los *sky scrapers* la erección de una obra casi inconcebible: una estructura colgante sobre el Hudson River, que cual verdadera aorta del pueblo americano, ponga en comunicación el corazón de Nueva York con la Nueva Jersey, estructura por la cual diariamente puedan circular centenares de miles de personas con cuyo óbolo, por pequeño que fuese, se ha calculado sería posible amortizar con gran rapidez la suma exorbitante de cincuenta millones de dólares á que asciende el presupuesto de la estructura proyectada, cifra á que de mucho no ha llegado hasta ahora el presupuesto de ningún puente del mundo. Esta creación de la moderna Ingeniería la constituirá un puente de tablero rígido, como los anteriores, pero de una luz mucho mayor y suspendido de cinco cables de acero con la friolera de sesenta y un centímetros de diámetro cada uno!... La estructura de los pilares de sustentación de los cables, tiene una resolución interesantísima en miras á la arquitectura y á la mecánica; estará constituida por un entramado de acero que forma cuerpo con las grandes vigas del tablero, de manera que éstas vienen á estar sólidamente empujadas en los pilares, precisándose así el principio de rigidez de una manera notabilísima; á su vez las pilas están parcialmente revestidas de enorme sillaría, dibujando, en cierto modo, la robusta silueta de gigantescos obeliscos egipcios, con lo que respira todo el puente una majestuosa monumentalidad y una grandeza verdaderamente aturdidora.

Los grandiosos progresos que la estructura general de los puentes colgantes ha experimentado en estos últimos años, han sido, de un modo indudable, la causa de que recientemente se vaya introduciendo en Alemania tal género de construcciones. Entre los ingenieros alemanes comienza, en efecto ahora, á sentirse un ambiente favorable hacia el puente colgante, como puede observarse á juzgar por los actuales y frecuentes concursos en su nación realizados, en lo referente á la construcción de puentes en general, concursos en los que comienzan á llamar la atención los numerosos proyectos de estas estructuras suspendidas, verdaderamente raras en Alemania, hasta hace unos años, sobre todo en tratando de luces de una cierta consideración.

La nota final, que en orden á perfección se ha imprimido al puente colgante, débese ciertamente al malogrado ingeniero francés, M. Gisclard, con la construcción del célebre viaducto suspendido de la Cassagne (Pirineos Orientales). Este viaducto, en cuya inauguración (1909) pereció su célebre autor, junto con otros ingenieros (á consecuencia de haberse despeñado el tren de prueba en que iban todos reunidos), sintetiza admirablemente las dos corrientes manifestadas durante toda la interesante gestación técnica que ha dado origen á los modernos puentes colgantes. M. Gisclard, en trabajos muy anteriores á la concepción del viaducto mencionado, ya se había distinguido con poderosas y felices ideas de originales estructuras suspendidas, llegando, en 1908, á proponer un tipo de puente

colgante, constituido por dos vigas horizontales rígidas, puestas una á continuación de la otra, con una rótula de articulación en el sitio del empalme de ambas y el correspondiente carro de dilatación al extremo de una de ellas; naturalmente, el conjunto de estas dos vigas estaba suspendido de una catenaria superior por el intermedio de frecuentes cables ó tirantes y triangulado el conjunto en numerosos *haubans*.

Tan marcada orientación hacia la resolución de la rigidez del sistema, la completó de un modo admirable Gislard, en su viaducto de la Cassagne. La estructura de dicho viaducto viene constituida, en esquema, por una viga general rígida, suspendida de un ingeniosísimo sistema de cables que forman una perfecta triangulación tensada, y por tanto, que constituyen á su vez un sistema indeformable isostático, es decir, calculable todo él gráficamente. Para hacer rígido por completo al sistema de suspensión, apeló su autor al empleo de los «cables Ordish», es decir, á catenarias supletorias de las que penden tirantes que sostienen á los cables oblicuos de la triangulación, con los que se evita la flexión ó flecha de éstos, haciéndolos trabajar como varillas tensadas, rigurosamente rectilíneas.

En virtud de tan feliz disposición estructural, el puente alcanza una indeformabilidad comparable á la de los cantilevers, á pesar de mantenerse la construcción enteramente suspendida, puesto que no sólo el tablero, sino los elementos de sujeción, forman, así individual como conjuntamente, perfectos sistemas dotados de la más completa rigidez. Por

esta razón, decíamos que M. Gisclard había condensado los principios de indeformabilidad, que antes se han referido, en su famoso puente, que es el primero que la Francia emplea para el paso de vía férrea.

Otra de las ventajas del puente Gisclard está en la facilidad de montaje que permite: el viaducto de la Cassagne se ha montado ingeniosísimamente, comenzando por la instalación de cables provisionales de transporte aéreo, para así realizar la fábrica de las pilas; los pilones metálicos que éstas sobrellevan, se han, á su vez, erigido con el empleo de grúas autoelevatrices. Terminados así los pilones del puente, alojáronse sobre ellos los cables Ordish y los de suspensión; de esta manera los referidos Ordish afianzaron, durante el período del montaje, á los pilones, sirviendo, además, de transporte aéreo para la montura del tablero rígido, operación que se hizo por partes, comenzando por el centro y progresando después simultáneamente hacia los dos extremos.

PARTE VI

COMPLEMENTO

I. — LA ESTRUCTURACIÓN COMPUESTA

Las formas resistentes de una construcción pueden evidentemente resolverse combinando entre sí los principios y formas elementales que rigen á las estructuras, hasta aquí explicadas. Viene, en efecto, indicado en ciertos casos el empleo simultáneo de los principios estructurales propios de las obras birresistentes y unirresistentes con todas sus variantes características de las arquitecturas pseudoelástica, elástica, comprimida y tensada, con lo cual se obtienen ingeniosas y complejas disposiciones constructivas, cuyo análisis y deducción es fácil ya resolver por partes, conociendo las leyes de las estructuras simples ó elementales. Precisamente por este motivo, podremos ser muy breves en el desarrollo del actual capítulo.

Las estructuras de la naturaleza á que aludimos tienen, como todas las demás, sus orígenes en fechas remotas del arte perpetuo y universal de la construcción, puesto que siendo instintivo el em-

pleo simultáneo de materiales diferentes en una obra determinada, compréndese la posibilidad de encontrar aplicado en la arquitectura antigua, con más ó menos precisión, el principio de las estructuras compuestas.

En la época presente, como veremos, este principio está completamente esclarecido y racionalizado; pero hay que convenir en que su acentuado germen se remonta á la civilización griega y aun á sus pueblos antecesores, puesto que en las respectivas arquitecturas fué enteramente conocido el sistema de cubrir las construcciones monumentales con un sistema de placas de piedra descansando sobre entramado leñoso, método que de un modo indudable acusa una intención marcada de estructura mixta ó compuesta. Sin embargo, la definición completa de tal método estructural, puede afirmarse que data del típico sistema de construcción de techumbres empleado en la arquitectura románica: al efecto de proteger las bóvedas de los edificios contra la acción de las aguas, tan frecuente en los climas lluviosos, se apelaba al trasdosado de dichas bóvedas por medio de cubiertas usuales, con lo que la estructura general de techo quedaba así totalmente formada por una bóveda, una armadura leñosa sobre la bóveda, y, un material de cubrición. Este complejo sistema de cubierta fué después sistemáticamente adoptado en la construcción gótica, cuyos ejemplares sábase que tienen invariablemente protegidos sus interesantes abovedados con armadura elástica, sostenedora del tejado propiamente dicho, original práctica constructiva que ha venido frecuentemente

perpetuándose hasta nuestros días, en que está aún completamente en boga.

El metal, puesto en juego con la estructura cohesiva, viene también en cierto modo á formar con ella, desde su aparición, interesantes sistemas de estructuras compuestas, y aun el mismo metal en su adopción aislada, pero empleado en estados diferentes dentro de una misma estructura, ha producido ejemplos notables de este género estructural, entre los que ha alcanzado fama la celebrada cubierta histórica (1833) del teatro Alejandrino de San Petersburgo, proyectada por Clark, en la que se encuentran hábilmente combinados los miembros de hierro con los de fundición, á tenor del papel mecánico que en la armadura desempeñan.

El anterior principio, original de Clark, lo vemos después aplicado felizmente en los cuchillos de armadura de la estación de Courtrai, constituídos por una forma metálica de 38 metros de luz, que arranca del suelo, y constituida en su parte flexada por hierro laminado, y por pies derechos de fundición en sus elementos verticales ó jambas comprimidas, sistema que se ha aplicado á varias estaciones en Inglaterra.

Puede verse fácilmente, entre estos progresivos ejemplos, una marcada tendencia á la resolución de un problema de carácter completamente racional, cual es, el que entraña la división del trabajo en los miembros de una forma constructiva. Efectivamente; si la estructura es compleja, es decir, si está constituida por un cierto número de estructuras sencillas,

será de absoluta lógica el realizar cada una de ellas con los materiales y la constructibilidad más indicados á la posición y naturaleza de sus correspondientes líneas potenciales, de manera que vendrá, pues, indicado el empleo de formas birresistentes para aquellas partes de estructura que no se amolden á su línea potencial de acción externa, y el empleo de las formas unirresistentes, para las que puedan ajustarse á sus respectivas líneas de potencia. Con esta ley llegase á la estructuración racional de las formas compuestas, y engéndranse interesantísimas construcciones constituídas por miembros de distinto coeficiente estructural, lo que indudablemente puede producir complejos esqueletos cuyas piezas estén formadas: unas por arcos de sillería, otras por cables colgantes, otras por vigas de acero laminado, etc., coadyuvando todas en conjunto al equilibrio racional de una misma y única construcción.

Encuentra el ingeniero, y el arquitecto también, en esta general concepción de la estructura resistente, un campo vastísimo donde desarrollar su ingenio y su arte, puesto que, efectivamente, la propiedad del principio entraña la verdad constructiva, base no sólo de la economía en unos casos, sino de la racionalidad de la obra monumental en otros.

Dentro del primer aspecto de la cuestión que acabamos de apuntar, es decir, en el terreno genuinamente industrial, encontramos una interesante serie de numerosos ejemplos, cuya reseña es por demás penosa, observándose empero en todos ellos una especie de restricción que sería muy útil desva-

necer, induciendo al constructor á más amplia aceptación del principio fecundo de la estructuración compuesta. En Barcelona mismo, es muy frecuente la sustentación del sistema de bóvedas tabicadas por envigados de metal, formando así cubiertas de edificios industriales de una notable economía y una lógica completa; este es, sencillamente, un caso de adjunción feliz de las estructuras pseudoelásticas con las elásticas. Este mismo caso lo encontraremos aplicado en la construcción de algunos actuales tipos de depósito, de estructura ingeniosísima: basta disponer un sistema de vigas T, verticales, que se proyecten en planta sobre los vértices de un polígono regular; al tender entre cada dos vigas una bóveda cilíndrica tabicada, de generatriz vertical, que vuelva su convexidad hacia el interior del polígono, se formará económicamente un recipiente de resistencia extraordinaria á presiones internas, y, por lo tanto, muy indicado para el envase de flúidos. Como es natural, hay que cinchar superior é inferiormente al envigado referido, con lo que éste podrá trabajar á flexión y las bóvedas del forjado á compresión; el trabajo en los materiales está, pues, dividido con lógica irrefragable.

El principio económico que rige hoy la construcción de los grandes puentes de piedra, parece condensarse en la reunión también de dos sistemas estructurales: el de la sillería, ó unirresistente, con el del cemento armado, ó pseudoelástico. Tal es, en síntesis, el método constructivo de los modernos puentes de Luxembourg y Toulouse, construídos por Séjourné con delgados arcos de sillería, para-

lelos, y sustentando superiormente un tablero realizado en cemento armado. De estos dos puentes, el último, llamado *des Amidonniers*, ha sido dicho que representa en nuestra época, lo que los célebres puentes de Neuilly y de la Concordia, en tiempos de Perronet. Séjourné es, pues, el Perronet de nuestros días, por haber llevado los puentes de piedra á un grado de idealidad asombrosa, gracias, como vemos, al principio de la estructuración compuesta.

La construcción monumental puede asimismo, como dijimos, beneficiarse altamente con el principio de la estructuración compuesta. Bastará como á ejemplo, citar dos interesantes casos que se encuentran aplicados á dos iglesias, en París. Uno de ellos es la de Saint-Pierre, Montrouge, en la que el sistema resistente vertical está resuelto con piedra (muros, pilares y demás elementos de sustentación), y, en cambio, toda la estructura en avance horizontal, que está enteramente acusada, encuéntrase resuelta en madera, constituyendo uno de los entramados leñosos más famosos de la Francia, y que ha dado justa celebridad á su autor M. Vaudremer. La otra referida iglesia es la de Saint-Augustin, celebrada obra de Víctor Baltard, en la que se entraña toda una compleja y armónica estructura de piedra y de fundición, con este último material ostentado á plena luz, y reforzando las regiones donde puede iniciarse alguna ligera flexión, como en las secciones transversales de la bóveda de la gran nave, en las pechinas del crucero y en la cúpula central.

Otros ejemplos puédense aun citar, si bien de menos nombradía, en cambio, tal vez, más interesantes, desde el preciso punto de vista de la estructura compuesta, como v. gr.: el templo de Masny, realizado con arcuaciones de piedra, columnas de hierro fundido y cubierta leñosa, etc.

Finalmente, repetimos que el principio de estructuración compuesta, puede sugerir al constructor, si éste lo siente con toda su amplitud, una serie de formas racionales y genuinamente nuevas que indudablemente le conducirán, unas veces, á soluciones económicas en alto grado, y otras, á concepciones de un desconocido *cachet* arquitectural. Así, por ejemplo, si consideramos, en los abovedados góticos, substituída su plementería de piedra por otros tantos tímpanos realizados en forma de velamen permanente, resultará una originalísima disposición, con nervatura de piedra, ó comprimida, y forjado determinado por estructuras tensadas. Y este mismo principio, como es natural, con la consiguiente interpretación y precauciones mecánicas, originará una fantástica estructura al substituir el sistema de nervios de piedra por otro de nervios de metal, circunstancia que permitirá, á su vez, la inversión de dichos nervios, con lo que éstos pasarán á formar una verdadera red, á gran malla, de miembros extendidos, entre los cuales, con cierto ingenio, podránse voltear tímpanos abovedados de ladrillo ó piedra, viniendo así, efectivamente, á obtener una estructura equilibrada, de racional establecimiento, ya que en ella estará atinadamente

dividido el trabajo á tenor de las condiciones y propiedades de los materiales integrantes.

En la concepción de la obra que acabamos de describir, no hay diferencia de fondo alguno con la ideada por Vierendeel, que consiste en emplear nervaduras de hierro armado, en forma de arcuaciones góticas, y tender sobre las mismas un sistema de bóvedas bizantinas de ladrillería. Aquellas arcuaciones que por ajustarse sensiblemente á la curva potencial, tienen muy reducido momento de inercia, podemos evidentemente invertirlas, con lo que su trabajo interno cambiará de signo, pasando de compresivo á extensivo, quedando, por lo tanto, así, fácil y lógicamente concebida la original estructura antes mentada.

No hay, pues, límites en la imaginación para crear este género de estructuras compuestas; adjuntando el sentido mecánico á la erudición ó conocimiento de las formas estructurales simples, tendremos siempre abundantes medios para resolver, en cada caso concreto, el sistema estructural más adaptado á las exigencias del problema; exigencias que por ser constantemente nuevas, lógicamente deberían originar formas nuevas también.

II. — IMAGINATIVA ESTRUCTURAL

HEMOS aún de insistir en el transcendental interés de un problema varias veces apuntado en el transcurso de estas páginas: el problema de la deter-

minación de una forma de estructura. Vamos á precisar de un modo resumido, ahora que ya conocemos todos los principios estructurales, la manera como podemos orientarnos en esta original cuestión, que no tiene leyes codificadas, ni siquiera precedente alguno.

Una estructura ó forma resistente en general, sea arco de sillería, armazón de hierro, etc., viene, en definitiva, á representar un conjunto material del espacio que está en equilibrio bajo la acción de un sistema de fuerzas externas. Este sistema de fuerzas está constituido por las cargas que atacan á la estructura y por las reacciones terminales. Respecto á las cargas, se ven naturalmente influidas por la forma y el material de la propia estructura. En cuanto á las reacciones finales, hay que tener siempre presente que su situación y magnitud depende no sólo de las cargas, que en definitiva deben contrarrestar, sino de la constructibilidad adoptada en la estructura; y compréndese así fácilmente, por cuanto si consideramos, por ejemplo, tres formas arqueadas rigurosamente iguales, pero con disposiciones diferentes en su terminación: articulaciones en la primera, carro de libre deformación en la segunda, y empotramientos en la tercera, las reacciones de las tres formas, aun sujetándolas á un mismo sistema de cargas, serán por completo distintas, especialmente tratándose de sufrir pesos móviles. Es evidente que en estos tres casos, lo mismo que en cuantos puedan imaginarse, las reacciones satisfarán á las condiciones generales de equilibrio

que nos da la mecánica racional, es decir, la estática; pero como el número de éstas no es suficiente, resulta indeterminada la averiguación de aquéllas; infinitas reacciones podrán, pues, contrarrestar á las cargas dadas. Las condiciones que faltan para eliminar esta indeterminación, nos las ofrece espontáneamente nuestro criterio y la teoría de la elasticidad, viniendo por tales medios á deducir el punto de paso de las referidas reacciones, la presencia y magnitud del empuje horizontal, etc., elementos todos que computan con la mecánica racional, ofreciéndonos, finalmente, las reacciones terminales de la estructura, problema primordial en que se reúne siempre toda la atención y toda la dificultad, hasta el extremo de que si las reacciones vienen inmediatamente ofrecidas, desaparece á los ojos del técnico todo el interés y todo el mérito estructural.

Hemos evocado el precedente razonamiento para iluminar, en lo mayor posible, el problema enunciado al comienzo de este artículo, y conocer así la verdadera naturaleza de su fondo.

Recordemos ahora que las cargas actuantes, junto con las reacciones terminales, constituyen el sistema total de fuerzas, por cuya sucesiva y conveniente composición, obtiéndose la línea potencial de acción externa. La estructura reacciona contra esta línea de fuerza; es, pues, necesario, para deducir la estructura, partir del conocimiento de dicha línea; pero como las reacciones terminales que en ella intervienen, dependen á su vez de la estructura, resulta, en fin, que nos encontramos en un círculo

vicioso, en una ecuación con varias incógnitas. Si no vienen nuevas relaciones á ligar estas incógnitas, el problema resulta imposible de resolver; la «cuadratura del círculo» en la mecánica arquitectural está en cierto modo representada por la cuestión que se acaba de plantear. Por esto dijimos en las primeras páginas, que el hallazgo de una forma de estructura era exclusivamente fruto de una elevada inspiración del alma.

Aun suponiendo la línea potencial de acción externa enteramente determinada, el número de estructuras aptas para reaccionar contra ella sería en realidad infinito, pues se comprende que al cortar á dicha línea por un plano, cualquier punto de éste sufrirá el efecto de las fuerzas que actúan en una cualquiera de las dos regiones que separa, con tal de unir invariablemente dicho punto á las referidas fuerzas. Aquel punto podrá pertenecer, pues, al eje de la estructura, y, por tanto, el número de estructuras, para un mismo caso, se eleva á un prodigioso infinito de orden superior.

Sin embargo, de entre todas estas estructuras habrá, indudablemente, algunas más ventajosas ó particulares, por ir pasando por los puntos del espacio, en los que el sistema de fuerzas externas actúa con más singulares condiciones. Una de estas particulares estructuras será, ciertamente, la que no sufre flexión, es decir, la que está solamente sujeta á tensión ó compresión y á torsión; esta privilegiada forma debe ser, como se recordará, la que va ajustándose á los ejes centrales de mo-

mentos de los sistemas de fuerzas externas, ejes que en el límite, si las cargas tienen ley continua de reparto, formarán una superficie alabeada, á cuya arista de restricción deberá amoldarse la estructura para estar efectivamente exenta de los esfuerzos flexores.

Si los ejes centrales de momentos á que acabamos de aludir, en vez de cruzarse en el espacio, como es lo general, se cortasen, la superficie alabeada, que es su lugar geométrico, degeneraría en superficie desarrollable, pasando entonces la referida estructura á amoldarse con la arista de retroceso de aquella superficie. Y, finalmente, la línea estructural se convertirá en una envolvente de rectas coplanas, en el caso de que todos los ejes centrales de momentos se sitúen en un mismo plano.

Habrás, seguramente, notado que en los tres casos referidos, la envolvente de los ejes es sencillamente la línea potencial de acción externa, y si llega á ser posible, como en efecto es muy probable, dada una ley de repartición de cargas, determinar la ecuación general á que satisfacen aquellos ejes, ella nos ofrecerá fácilmente las ecuaciones de la línea potencial, que serán, naturalmente, las ecuaciones de la estructura sin flexión; conclusión, en realidad, sugestiva, porque indudablemente reviste de una soñada grandiosidad científica á todo el arte arquitectural...

Pero, despertando otra vez á la realidad de los hechos, recordaremos cómo la determinación de la

línea potencial exige el previo conocimiento de las reacciones de la estructura; luego la solución general para el hallazgo de ésta no podrá tener lugar más que en casos especialísimos.

Hay uno de estos casos realmente interesante, y del cual en breve sacaremos útil partido: es aquel en que *à priori* se puede, efectivamente, situar en el espacio, de una manera sensible, el punto de paso de ambas reacciones y la dirección de una de ellas, datos que, juntamente con las cargas de la estructura, nos determinan, á toda evidencia, la línea potencial. Este originalísimo hecho, que, como sabemos, no se verifica de ordinario, á no ser que se adopten determinadas precauciones, puede realmente provocarse. Es, en efecto, posible el obligar á que las reacciones de la estructura satisfagan cumplidamente á las condiciones que últimamente hemos fijado, y bastará para ello, refiriéndonos ya desde ahora á formas planas con cargas en su plano medio, el suponer articulados los extremos de la forma incógnita sobre dos rótulas de libre giro y en la manera siguiente dispuestas: una de estas rótulas tendrá su eje fijo en un estribo de la construcción, y la otra estará montada sobre un carro de dilatación, que resbalará contra un plano de apoyo correspondiente al segundo estribo, plano que será normal á la dirección que nos convenga asignar á la reacción correspondiente. En estas condiciones, todas las estructuras que se tiendan de una á otra articulación, supuestas naturalmente, atacadas por el mismo sistema de cargas, tendrán la misma línea potencial, y podremos, con ello,

ajustarlas á esta línea, ó situarlas, respecto á ella, en determinadas posiciones.

La conclusión práctica que del anterior razonamiento se deduce, es realmente de un gran interés, por cuanto nos permitirá anular el esfuerzo que queramos dé entre todos aquellos con que reacciona la estructura. En efecto; siendo tres los géneros de esfuerzos con que reacciona la forma (flectores, tangenciales y normales), bastará, como sabemos, amoldar el eje de la estructura á la curva potencial, para evitar los dos primeros; pero si son los últimos los que deseamos evitar, es decir, los esfuerzos normales, podremos á su vez lograrlo, sin más que adoptar por eje de la estructura una línea tal, que, en todos sus elementos, la fuerza exterior actuante le sea constantemente perpendicular. Ahora bien; esta fuerza actuante está dirigida según la tangente, á la línea potencial; por consiguiente, el eje de la estructura referida vendrá á representar como una trayectoria ortogonal de las diversas inclinaciones por que va pasando aquella tangente, es decir, una trayectoria ortogonal de la familia de líneas representadas por las diversas posiciones que adoptaría la línea potencial, al suponer que se desplaza verticalmente en su plano, idea que nos da el medio fácil de calcular la ecuación del eje de la estructura, siempre y cuando, naturalmente, tenga ecuación la línea potencial primitiva. Pero si esta línea no tiene ecuación, como sucede, v. gr.: en el caso de ser poligonal por efecto de una concentración de cargas, entonces, por medio de un sencillo trazado gráfico, también obtendremos,

como se comprende, el perfil buscado. En definitiva, pues, puédesse siempre llegar á deducir una originalísima estructura, arqueada y sin compresiones, sujeta por tanto, exclusivamente, á los esfuerzos flectores y á los cortantes.

Para tener más clara idea de la forma estructural que se acaba de deducir, imaginemos concretamente un caso particular; por ejemplo: el de una línea potencial convexa hacia la parte superior, línea que, pasando por dos puntos á nivel, es, además, simétrica respecto al eje vertical situado entre dichos puntos. En este caso, la trayectoria ortogonal correspondiente, presentará dos ramas opuestas, una á cada lado del eje vertical, acordándose ambas tangencialmente sobre tal eje, con lo que se comprende que éste contendrá un punto de retroceso de la referida trayectoria. Vendrá, en fin, esta trayectoria, es decir, el eje de la estructura sin compresiones, á recordar el perfil afectado por la evoluta geométrica de la línea potencial.

Todas las formas constructivas deducidas por la anterior y original ley de ortogonalidad, forman una familia numerosa de estructuras exentas de todo esfuerzo normal, á las que, con propiedad, podemos calificar de *estructuras ortogonales*. En este concepto, la viga recta, con cargas verticales y apoyos á nivel, no es más, evidentemente, que un sencillo caso particular de las estructuras ortogonales, por cuanto no sólo está desprovista de compresiones, sino que, además, su eje cumple con la condición de ser constantemente perpendicular á la línea potencial, que está entonces representada,

como sabemos, por las verticales que pasan por los apoyos de la viga.

Antes de progresar en estos razonamientos, precisa una observación, que sin duda se le habrá ocurrido al lector, y es la de que en la deducción de la estructura ortogonal, no se ha hablado para nada del peso propio de la armadura, factor cuya influencia hízose tan sólo notar en el comienzo del presente artículo. El material y el perfil adoptados para la construcción ortogonal deben indudablemente influir en el sistema de cargas que ataca á la estructura, puesto que ésta no tendrá, en general, el mismo peso ni la misma ley de repartición que afectaban á la estructura originaria, de cuya línea potencial se partió; infiérese, pues, de aquí, que dicha línea potencial habrá, tal vez, modificado su perfil (lo que es muy fácil de comprobar) y, por consiguiente, la estructura deducida no será rigurosamente la ortogonal deseada.

Será, por lo tanto, preciso, para efectivamente lograr la concordancia de ortogonalidad entre la estructura y su verdadera línea de acción externa, el desplegar, por parte del operador, un cierto artificio ó un conveniente tanteo, en cuya circunstancia tan sólo la práctica y el buen sentido nos podrán guiar, empero con la seguridad de llegar siempre, con mayor ó menor precisión, á un resultado suficientemente exacto.

Volviendo ahora sobre las estructuras ortogonales, hemos de hacer notar cómo su deducción nos

pone en camino de descubrir una serie de interesantes formas constructivas completamente nuevas, algunas de ellas muy económicas, de fácil montaje y de singular apropiación en ciertos casos.

Para comprender la realidad de tal afirmación, supongamos materializada la estructura ortogonal que antes se imaginó, es decir, la que vino á recordarnos la evoluta geométrica de un arco ó línea potencial primitiva. Esta estructura vendrá configurada por dos sencillos arcos situados en un plano vertical, girando ambos su convexidad hacia arriba, naciendo estos arcos de los estribos, ó puntos de apoyo correspondientes, y uniéndose entre sí los otros dos extremos en un punto situado en el centro de la luz y á más bajo nivel que los apoyos, punto que es sencillamente el de retroceso que dijimos presenta esta estructura. En este punto, naturalmente, habrá que afianzar sólidamente los dos arcos, haciéndolos allí solidarios para resistir al correspondiente momento flector que tendrá, de ordinario, una gran intensidad. Hase así salvado, por una estructura originalísima, una luz de no importa qué magnitud, pues evidentemente la resistencia estará asegurada, proporcionando los momentos de inercia de la forma á sus correspondientes flexiones.

La estructura que se acaba de describir tiene una mecánica de fondo racionalísimo y á la vez un aspecto sumamente chocante, aspecto que provendrá de la original visión de sus dos arcos, los cuales descendiendo, á partir de los apoyos, irán á reunirse en la profundidad del cauce ó espacio que cruzan,

sin tener allí en su punto de unión ninguna pila ni elemento de sustentación, por existir solamente en tal punto reacciones horizontales que mutuamente se contrarrestarán.

Sin variar ahora la configuración ó sentimiento general de la estructura que estamos analizando, modifiquemos, á tenor de las exigencias ó circunstancias de cada caso, la curvatura de los dos arcos componentes, y hasta si conviene modifiquemos también la constructibilidad adoptada en sus puntos de nacimiento, todo lo que naturalmente originará un cambio de reacciones que exigirá á su vez la determinación de una nueva línea potencial. Obtendremos así estructuras si se quiere más adaptables ó más prácticas que la ortogonal, las cuales trabajarán ya no sólo á flexión, sino con esfuerzos normales también, y á cuyas estructuras lo mismo que á la teórica que nos las ha sugerido, podremos adaptar un tablero longitudinal, con lo que én este caso habremos dotado á la construcción con una aptitud para cargas móviles, perfectamente indicada si se tratase, en fin, de resolver un puente. El referido tablero tendrá, evidentemente, por condición lógica, el de poseer su eje en el plano de los dos arcos, pudiendo, por tanto, apoyar sobre ellos, transmitiéndoles así su peso y sus cargas, por el intermedio de simples pies derechos, y, si conviene, podráse también suspender dicho tablero de la estructura arqueada por medio de tirantes, y, en fin, podráse igualmente disponer de manera que corte á los dos arcos, en cual caso vendrá parte de él (su región central) apoyado sobre aqué-

llos, y otra parte (sus regiones extremas) suspendido de los mismos.

Todas las formas constructivas ortogonales, lo mismo que sus derivadas de que acabamos de hablar, proceden, como se ha visto, de la consideración de una línea potencial primitiva, convexa hacia la parte superior; pero es fácil ampliar ahora esta misma génesis estructural, partiendo de una línea de acción externa contraria, esto es, invertida, como la que es propia de los puentes ó cables colgantes. Para ello, bastará, en un principio, adoptar, en los extremos de la estructura que va á deducirse, una constructibilidad de articulaciones y carro de dilatación que reúna las condiciones generales que se refirieron en el primer caso, único medio, como se comprende, para conservar la dirección y sentido de las reacciones terminales, condición *sine qua non* para que no altere el sentido de la línea potencial. Así las cosas, por un sencillo trazado de trayectoria ortogonal á las diversas tangentes de la línea de acción externa, ó cable colgante en nuestro caso, obtendremos ahora, lo mismo que antes, una estructura nueva, exenta también de esfuerzos normales, la cual vendrá, en rigor, á representar la misma que anteriormente se dedujo, pero en posición invertida, lo que, naturalmente, la dará un apropiado carácter para adoptarla como á armadura de cubierta.

Generalizando ahora, igual que antes, esta nueva armadura teórica, podremos, si conviene, alterar á voluntad su perfil, sin cambiar las constructibilidades terminales, y de esta manera tendremos infinidad de formas estructurales expuestas todas desde

este momento á esfuerzo tensor normal, además de la flexión. Huelga ya el repetir aquí, la consideración que se hizo antes, relativa á la influencia de las diferencias de peso ocasionadas por las distintas formas ó perfiles de las armaduras adoptadas.

Entre los dos numerosos grupos de formas ortogonales deducidas, es oportuno notar que especialmente en tratándose de construcción de puentes, serán más indicadas las del primer grupo, esto es, las configuradas por arcos descendentes, por cuanto la referida situación descendente de sus formas, facilita notoriamente el montaje de las mismas. En efecto; si se construye la estructura en cuestión, en dos mitades independientes, bastará el hacerlas girar (después de colgadas de sus respectivas articulaciones terminales) valiéndose sencillamente de cabrias y tensores, hasta que lleguen á yuxtaponerse sus extremos de más bajo nivel, en cuyo momento podrán descender los operarios á lo largo de las mismas formas, sin necesidad, por tanto, de puente provisional alguno, y practicar allí el roblonaje necesario para el afianzamiento de las dos partes.

Veamos ahora otros caminos, aunque de más vaga orientación, para ayudarnos á imaginar las formas resistentes de la arquitectura.

Uno de ellos consiste, indudablemente, en el valor del coeficiente estructural elegido. Este coeficiente se recordará que lo hemos deducido por el doble concepto de la calidad del material ó materiales empleados y del género de constructibilidad

adoptado para la estructura, factores evidentemente primordiales en toda construcción. En virtud de la revista que de las construcciones llevamos hecha en los capítulos anteriores, agrupadas todas por coeficientes estructurales, no habremos podido menos de impregnar nuestro espíritu con los perfiles característicos y más perfectos de cada género de construcción, tanto de las pseudoelásticas como de las elásticas y de las unirresistentes; luego, instintivamente, al croquizar una forma bajo la adopción previa de uno de los tres coeficientes estructurales que son propios de las anteriores construcciones, deberemos, en cierto modo, seguir los perfiles y la composición correspondiente, para así obtener la racionalidad de la obra que proyectamos.

El grado de precisión que alcanza la anterior regla, ó consejo, viene perfectamente comprendido, con sólo suponer, por ejemplo, que se trata de componer una estructura estereotómica. Hase visto que en este género de construcción, de coeficiente estructural igual á infinito, domina como soberano el elemento arqueado cuyas reacciones inclinadas exigen contrarresto por tirante ó por contrafuerte, ó, en defecto de ambas disposiciones, por empleo de jambas de apoyo inclinadas para el paso de dichas reacciones; entraña tal observación todo un orden de ideas mecánicas, de una concepción fácil é inmediatamente dependientes del valor del coeficiente estructural prefijado, ideas que de un modo bastante cierto nos inducen, sin divagar, á la configuración racional del sistema de estructura que corresponde.

Nótese, por el anterior ejemplo, cómo un mismo coeficiente estructural puede, sin embargo, inducirnos á la adopción de estructuras diferentes. Realmente; habrása observado cómo acaban de citarse tres sistemas de contrarresto de la forma arqueada, lo que nos ofrece otras tres correspondientes estructuras, las cuales representan respectivamente: 1.^a un arco con tirante; 2.^a un arco con contrafuertes en sus extremos; 3.^a un arco con sus jambas inclinadas á lo largo de la reacción final. Estos tres aspectos de estructura elemental, son, en verdad, completamente distintos; sin embargo, el fondo de la estructura es esencialmente el mismo en los tres casos citados. Por consiguiente, podemos, para mayor adaptación á las exigencias prácticas, emplear para la estructura el contrarresto que más convenga, con lo que variará la configuración aparente de ésta, guiándonos ahora en la configuración definitiva el género de contrarresto adoptado, pero bien entendido que la esencia estructural no cambia, y que su procedimiento verificativo será siempre exactamente igual.

La precedente idea, suficientemente generalizada, nos hará ver en un apoyo vertical, por ejemplo en una columna que reciba en su capitel á los extremos de dos arcos consecutivos, la función de un simple elemento de contrarresto: la reacción vertical resultante de los empujes de los dos arcos. Podemos, pues, substituir á este órgano de contrarresto por un tirante vertical también, con lo que desaparece el obstáculo presentado por la columna, duplicándose así, de momento, la luz libre del paso en cuestión. Hay, sin embargo, necesidad de buscar

algún punto de amarre, para afianzar aquel tirante vertical por el extremo superior ú opuesto al de que pende el capitel de la columna cuyo fuste se ha suprimido, y esta solución la encontramos sencillamente en el empleo de un dintel supletorio ó, si queremos, de un tercer arco cuyos extremos apoyen, en los vértices ó claves de los mismos arcos originales, dintel ó arco en cuyo punto medio podremos ya fijar el tirante de que se ha hablado. Compréndese, ahora, cómo esta disposición especial es susceptible de repetirse convenientemente, con lo que es fácil alcanzar una alineación considerable de arcos sucesivos, por ejemplo: un pórtico, tendido en el vacío, sin columnas ó pilares, y con ausencia, en fin, de todo aparente sostén, engendrándose por tal medio una originalísima estructura cuyo fantástico aspecto es exclusivamente hijo de los principios y de las ideas mecánicas que hemos intentado evocar en el lector.

Pueden, además, las composiciones estructurales obtenerse también siguiendo otro camino, que tiene, sin embargo, alguna menor precisión respecto á los anteriores, y que reclama, por lo tanto, un cierto criterio mecánico-artístico y una completa erudición en lo que atañe al conocimiento de las formas de estructura elementales empleadas. Estrriba, simplemente, el método en la combinación de formas conocidas.

Entra en tal procedimiento todo un estudio de composición arquitectural, del que podremos dar idea citando solamente un ejemplo interesante: la es-

estructura del *The Great Hall, Merchant Venturers' School*, de Bristol. El techo de esta construcción está constituido por una combinación feliz de bóvedas cilíndricas, bóvedas en abanico y formas planas ó en plafón, estructuras que nos son todas ya bien conocidas. Las bóvedas cilíndricas forman como una grande arquería en lo alto de los muros, arquería que justifica racionalísimamente su acuerdo ó enlace con las bóvedas de abanico (una de estas bóvedas entre cada dos arquerías). El conjunto de arquería y bóveda forman, naturalmente, como un gran saledizo ó cartela de extraordinario vuelo sobre el paramento del muro; y como esta disposición está reproducida en el muro opuesto del gran *Hall*, resulta en definitiva disminuída, de un modo notabilísimo, la luz entre dichos muros, con lo que un sencillo envigado plano ha bastado ya para cerrar la techumbre de la sala, la cual resulta así configurada por una disposición ingeniosísima, exclusivamente obtenida por la combinación de estructuras elementales.

Existe, finalmente, otro orden especial de argumentación que nos puede, también, conducir al hallazgo de formas estructurales, sin fiar, como en el método anterior, en la propia inventiva, por cuya razón el sistema que vamos á exponer podría rendir grandes ventajas, especialmente en el caso de carecer de una inspiración ó un instinto mecánico de elevada sensibilidad, ya que de no ser así, la concepción de la estructura resistente, viene misteriosa y espontáneamente evocada, sin necesidad de ningún

método, en la imaginación del constructor. La argumentación á que nos referimos consiste en la aplicación de una original ley que podríamos llamar «de la inversión de formas».

Toda forma estructural resistente tiene, como el resto de las figuras geométricas, su correspondiente simétrica respecto á un eje cualquiera de simetría. En los casos usuales más interesantes en que la estructura es en avance horizontal, podemos considerar horizontal también al eje de simetría, y, naturalmente, la construcción simétrica de la dada, será entonces otra igual, pero invertida, la que podrá con frecuencia ser utilizada como estructura nueva. Los puentes colgantes, y en general las estructuras tensadas, pueden considerarse, como ya hicimos notar, como estructuras de arcos y bóvedas invertidas, deducidas, por consiguiente, de aquéllas por la referida ley de inversión de formas.

Es preciso observar que en la aplicación de esta ley cambia, en general, el sentido de reacción de las fuerzas internas de la forma original, de manera que los miembros que estaban comprimidos pasan á ser tensados y viceversa, permaneciendo, en general, flexados los que en un principio lo estaban ya, si bien, empero, con elástica contraria; todas estas circunstancias evidentemente débense tener en cuenta, porque ellas podrán hacer variar no sólo la materia, sino también la constructibilidad adoptada.

Si aplicamos la anterior ley á las figuras en cantilever, resultan unas muy interesantes y recientes formas estructurales, que se emplean actualmente

en Alemania para la construcción de los puentes. Imaginemos, en efecto, un cantilever de perfil superior horizontal, apoyado en una pila colocada en medio de la luz que salva; podemos invertir esta estructura de dos tramos, apoyándola, una vez invertida, en la misma pila primitiva, con lo que resultará un puente colgante de dos tramos, con dos catenarias simétricas respecto al eje vertical de la pila, reunidas ambas en un punto alto de este eje y muriendo los otros dos extremos en cada terminación del tablero; tal es la feliz disposición de los recientes *Dombrücke-Breslau* y *Brücke ueber die Saale*, estructuras ambas cuya creación ha dado grande y justa fama á sus ingenieros, y que, sin embargo, las vemos claramente deducidas, por la sencilla ley que hemos llamado «de la inversión de formas».

Los puentes antiguamente llamados *á lo Verniais*, constituídos por un arco rígido del que por medio de tirantes pende un tablero flexible, ingenioso tipo del que existe un ejemplar en Manila y que tiene cierta analogía con el llamado *tipo alemán*, pueden también, á su vez, por la conveniente aplicación de la referida ley, originar formas nuevas de construcción: al invertir el puente *á lo Verniais*, el arco rígido pasa á representar catenaria inferior, y los tirantes se transforman en piezas comprimidas, sobre las que descansará el tablero, el cual será conveniente, en este caso, disponer con forma de viga rígida. Esta misma estructura que acabamos así de deducir, puede invertirse también, á su vez, con lo que resultará un puente de gran racionalidad constituído por una viga rígida des-

cargada por efecto de un arco superior, solidario con ella, por el intermedio de tirantes.

Volvamos ahora á tomar la estructura que ha dado origen á la últimamente descrita, es decir, la forma constituída por la viga, la catenaria inferior y las piezas comprimidas; y resolvamos esta construcción en el espacio ó con el principio propio de las estereoestructuras. Puédese, efectivamente, lograr tal resolución estérea, con sólo substituir á la catenaria única por otras dos catenarias cuyos extremos estén, como los de la primera, en las terminaciones del tablero, pero cuyos planos no sean verticales, sino que formen una cierta inclinación para con respecto al plano vertical que pasa por el eje del puente; más claro: tracemos un diedro cuya arista sea el eje del puente y cuyo plano bisector sea el plano vertical referido y situemos, en la forma explicada, una catenaria en cada cara del diedro. Cada pieza comprimida que antes teníamos y que enlazaba, como se dijo, el tablero con la catenaria original, se habrá ahora convertido en un par de piezas comprimidas á su vez, puesto que actualmente son también dos las catenarias; al objeto de que dichas catenarias no giren al rededor de su cuerda común (que es el tablero del puente), será necesario el disponer, por ejemplo, piezas horizontales que enlacen, por sus extremos inferiores, á cada uno de los pares de piezas comprimidas antes mentadas. Indudablemente tendremos así una originalísima estructura completamente nueva y de racionalidad indiscutible.

Esta estructura podríamos á su vez invertirla, con lo que las dos catenarias pasarán á convertirse en dos correspondientes arcos, que trabajarán á compresión; pero, en estas condiciones, la forma tiene ya un defecto capital que antes no poseía, y es, como se comprende, su poca estabilidad, puesto que estos arcos, por estar situados ahora encima del tablero, habrán elevado el centro de gravedad del sistema total, en términos que éste podría tal vez girar en derredor del eje longitudinal del tablero. Semejante inconveniente puede, con facilidad, hacerse desaparecer, disponiendo dichos arcos no ya con su cuerda común, como antes, sino con su vértice común, de manera que sus cuerdas, líneas geométricas ideales (que no deben tener materialización estructural), resulten ser dos rectas paralelas y equidistantes del eje del puente. Naturalmente, se comprende ahora, que el lugar geométrico de las piezas rectilíneas que unen el tablero del puente con sus arcos de suspensión, no formará, como formaban primitivamente, un sencillo plano, sino una superficie alabeada de la familia de los conoides, con lo que en definitiva hemos llegado á una concepción de estereoestructura enteramente desconocida en la actual Ingeniería; estructura dotada de completa racionalidad; de un gran momento de inercia en su sección central, ó región de flexión máxima; de estática completa, puesto que se apoya en cuatro puntos tan distanciados como queramos (por cuya razón tendrá, además, gran resistencia al viento), y, en fin, que respirará toda ella un sello indiscutible de original fantasía, exclusiva-

mente hija del anterior raciocinio, ó del anterior método, digámoslo así, que vemos claramente nos conduce al descubrimiento de formas estructurales absolutamente nuevas.

La ley de la inversión de formas es, pues, de una fecundidad probada, y puede, además, generalizarse sacando partido de otras mil combinaciones, por su sencilla aplicación á estructuras que ya, desde su origen, están resueltas en el espacio; por ejemplo, las mismas formas cupulares. Al invertir la forma cupular, resulta, como sabemos, la estructura del velamen; sin embargo, invirtiendo no toda la forma cupular, sino solamente un cerchón meridiano, es decir, haciéndole girar de ciento ochenta grados al rededor de su cuerda, tendremos una forma como de catenaria invertida con arranques á desnivel, y esta catenaria, al girar alrededor del eje vertical que pasa por su arranque más alto, nos engendra otros *velariums* distintos de los anteriores, que son sencillamente las «tiendas de campaña» con poste vertical, en su centro. Si ahora invirtiésemos toda esta última forma obtenida, tomando el plano de imposta como plano de simetría, resultaría inmediatamente una construcción anular, directamente indicada, para las formas abovedadas.

Los cascos de buque constituyen racionales estructuras, contra las que reacciona la presión hidrostática, y estas mismas formas navales, invertidas, podrían dar lugar á interesantes formas de cubierta para construcciones de especial tipo y orientación, expuestas á los rigores y violencia de los huraca-

nes. Parece, según Choisy, que, efectivamente, en el África han existido originales tipos de armaduras leñosas, cuya forma recuerda exactamente la de un navío en posición invertida, y en las cuales se ha creído ver, en realidad, como una inspiración de los cascos de buque, en miras á substraer las habitaciones del pernicioso efecto de los vientos del desierto. Esta cita de carácter histórico refleja, de un modo indudable, una suerte de presentimiento antiguo en la ley de la inversión de formas.

Es, sin embargo, dignísimo de notar que en el ejemplo citado existe, efectivamente, una forma igual, ó semejante al menos, á otra de posición invertida, pero con la particularidad de que en ellas el trabajo es esencialmente el mismo, pues si bien es verdad que dichas formas comparativas tienen posición contraria, los esfuerzos que las atacan son contrarios también, de manera que no ha cambiado la posición relativa de estructura y fuerza actuante. Esta sencillísima consideración, entraña ciertamente toda la teoría moderna de las fundaciones de los edificios.

La arquitectura actual es, entre todas las que han existido, la que más importancia ha dado á la subestructura del edificio; el problema subestructural es de un carácter positivamente moderno y utilitario, llegando con frecuencia á alcanzar una importancia y un coste muy superior á la porción de la obra que aflora sobre la rasante del suelo.

La construcción en subsuelo tiene cargas originadas por la reacción del terreno y por la presión hidrostática, si éste es de calidad acuosa. En los

casos de sencilla reacción vertical, esta reacción equivale al peso de toda la obra, al que, naturalmente, en sentido contrario, se opone el terreno para la satisfacción del consiguiente equilibrio. Tenemos, pues, en tales ideas, el medio para averiguar los esfuerzos mecánicos que atentan contra las fundaciones, esfuerzos que, por su número é intensidad, originan variadas é ingeniosísimas estructuras de fundación que trabajan y se calculan exactamente, como el resto de las formas que se han estudiado en el transcurso de este libro, aparentando, sin embargo, formas originales y propias, pero éstas, una vez analizadas, se verá como no discrepan de las que ya conocemos, con la sola diferencia empero de estar en posición invertida, puesto que invertidos son también los esfuerzos que deben de equilibrar.

En una infraestructura de fundaciones, preséntanse exactamente, pues, todos los problemas mecánicos que son peculiares de las estructuras vistas; por consiguiente, en el subsuelo, allí enterrado y enteramente oculto, tienen algunas modernas construcciones todo un sistema estructural invertido, de arcos y contrafuertes, tirantes y abovedados, que retienen al edificio de la misma manera que á un tronco corpulento le aguantan sus raíces.

Deseamos haber demostrado, en el transcurso del presente estudio, que el número de formas resistentes de todas las arquitecturas, está destinado á enriquecerse de un modo prodigioso, por solo la conjunción admirable de los más evidentes princi-

pios de la mecánica y de este misterioso sentimiento de estática y resistencia, sobre el que no nos asiste derecho ni motivo alguno para prescindir. Únicamente con tales factores, el hombre de ingenio encontrará siempre en el vasto campo de su imaginación, todas las formas estructurales apremiantemente exigidas por la vida moderna.

SYLLABUS

PARTE I

Fundamentos generales

	<u>Págs.</u>
EL PRINCIPIO ESTRUCTURAL: El principio de estructura revelado por la naturaleza. — La perfección de una obra constructivo-arquitectónica está en razón directa del acuse de sus formas resistentes. — El esqueleto gótico. — El principio de estructura soberano de la construcción actual. — Génesis ó ley de evolución del principio estructural.	15
ORIGEN DE LAS ESTRUCTURAS: La concepción de una estructura como fenómeno de inspiración. — La etnografía y la sensibilidad mecánica. — Apariencia de los problemas de la Ingeniería. — Constante carácter de la facultad creatriz de estructuras. — El ingeniero, refractario á la inspiración, descubrirá un método deductivo de las formas estructurales	18
LA AGRUPACIÓN: Transcendencia de una clasificación de estructuras. — Análisis de los conceptos distintivos que pueden servir de base á dicha clasificación. — El punto de partida clasificativo debe consistir en la aptitud de la estructura para reaccionar contra las fuerzas externas. — Dos característicos grupos de formas estructurales. —	

Análisis de los grupos sucesivos que naturalmente se desprenden.— Existencia de una filiación ó genealogía racional de estructuras.— El cuadro sinóptico de la agrupación encontrada.— «Coficiente estructural», su importancia y utilidad.— Fondo mecánico de la clasificación deducida	22
LÍNEA POTENCIAL DE ACCIÓN EXTERNA: Equilibrio de un sistema mecánico.— Acción y reacción en un sistema estático; análisis de la ley de equilibrio en una forma estructural; plano analizador.— Caso general.— Ejes centrales de momentos.— Aparición de la línea potencial de acción externa.— Visión de todo un nuevo mundo de estructuras en el que nuestra arquitectura significa tan sólo un pobre caso particular.— Caso de anulación de los pares finales de fuerza.— Estructura alabeada trabajando sin flexión ni torsión.— Sistemas coplanos.— Línea de presiones como caso particular de la potencial de acción externa.— Líneas potenciales parciales; resultante de ellas	31
LOS DOS GRANDES EMPIRISMOS: Evidencia de la reacción de la estructura contra su línea potencial de acción externa.— Sencillez y claridad del único problema mecánico que rige á toda la arquitectura.— Plasticismo de este problema y su independencia de toda matemática.— Paso al empirismo.— Confusión y multiplicación con que se presentan los métodos de cálculo de las construcciones.— Grandiosidad que alcanzaría el cálculo de las estructuras si conociésemos la ley general del reparto de las reacciones moleculares.— Concentración de todos los métodos de cálculo de nuestras estructuras planas á dos únicos principios.— La flexión plana.— La obligada descomposición de las fuerzas externas	37

PARTE II

Síntesis del cálculo de las estructuras planas
con cargas en su plano medio

	Págs.
<p>TRAZADO DE LA LÍNEA POTENCIAL: Todo cálculo ó verificación de estructuras parte de la línea potencial de acción externa. Naturalezas de esta línea en la arquitectura actual. Su método constructivo general.—Línea potencial en las estructuras de reacciones verticales.—El polígono funicular como uno de las infinitas imágenes convencionales de la verdadera línea potencial.—Únicos caminos para averiguar las reacciones finales.—Horror al empotramiento.—Estado de la ciencia de la construcción.—Intervención del instinto mecánico en la determinación de las reacciones finales.—¿Por qué no se establecen principios intuitivos?</p>	43
<p>DOS ÚNICOS MÉTODOS VERIFICATIVOS: Por cada explicación de la reacción de la materia corresponde un método de cálculo.—Una forma no es calculable desde el momento en que dejamos de explicarnos su manera de reaccionar.—Los dos grandes empirismos engendran los dos únicos métodos verificativos.—La variedad de métodos de cálculo existentes constituye tan sólo un aparente artificio.</p>	49
<p>LA LEY TRAPECIAL: Generalidad y convencionalismo de la misma.—Origen del par flector, compresión y esfuerzo cortante en las estructuras de nuestra arquitectura.—Reacciones elásticas correspondientes.—Ley trapecial.—Artificioso origen de la hermosa teoría del núcleo central.—La ley del trapecio universalmente aplicable en nuestra vulgar arquitectura.—Sencillez y</p>	

- grafía de esta ley. — Ejemplos para diferentes estructuras elementales. — Descomposición de estructuras complejas en otras elementales, para la aplicación de la ley. 51
- LEY DE ARTICULACIÓN: Explicación del modo como reaccionan prácticamente las formas articuladas. — Obligada descomposición de la fuerza externa. — Unidad de los métodos que conducen á esta descomposición. — Superioridad de la ley de articulación respecto á la trapezoidal. — Manera empírica de subsanar las limitaciones que presenta la ley de articulación. — Radio de acción de la ley. 64
- BIOLOGÍA ESTRUCTURAL: El examen de resistencia de una forma estructural puede asimilarse á un estudio biológico de anatomía y fisiología. — La anatomía ó textura de la forma indica su funcionamiento y por consiguiente cuál de las dos leyes estudiadas la rige. — La aplicación de la ley correspondiente nos acusa el grado resistente de la estructura 72

PARTE III

Estructuras birresistentes pseudoelásticas

- MONOLITISMO MEGALÍTICO: Carácter del monolitismo megalítico. — La construcción monolítica con transporte, como germen de la ciencia estructural. — La verdadera construcción se entiende ser una adjunción de elementos. — Análisis de la birresistencia en el monolitismo megalítico. 75
- PRINCIPIO ORGÁNICO DE AGREGACIÓN: Dictado natural de este principio. — Significación orgánica y birresistencia de las mamposterías. — *Desiderátum* del principio

- orgánico. — Ventaja que ya en la actualidad acusa sobre el principio de dovelaje. — El porvenir del principio de agregación 78
- EL CONCRETO Y SUS ESTRUCTURAS: Albores de la concreción. — Implantación europea del sistema concrecionado. — El antiguo ambiente político-social como causa favorable á la construcción concrecionada. — Á qué es debida la fama de los morteros romanos. — La civilización romana desconocedora del hormigón propiamente dicho. — Aparición de la elasticidad en las concreciones romanas. — Intuición de la ciencia de Estática. — Crítica de la contextura de los hormigones y papel que les está reservado.. . . . 80
- LA CONSTRUCCIÓN COHESIVA: Contextura celular del sistema cohesivo. — Nacimiento y evolución de las escuelas cohesivas. — Los portentos estructurales de la Edad Media no bastan á desterrar el sistema cohesivo. — En el siglo XV se demuestra definitivamente la potencia de la construcción cohesiva. — Poderosa influencia de los cementos modernos en dicha construcción. — Armazones cohesivos. — Histogénesis estructural. — Punto á que se dirige la construcción cohesiva 84
- ESTRUCTURAS TABICADAS: Definición orgánica de estas estructuras. — Su verificación es exactamente igual á las de hierro laminado. — Causas de su elasticidad. — Estructuras tabicadas de igual resistencia. — Aparición casual en Roma de la bóveda tabicada. — Su propagación por la costa latina. — Fama mundial de la bóveda catalana. — Necesidad del empuje. — El sistema de contrarresto no modifica la esencia estructural. — Fantasía que permiten y universal arquitectura de las estructuras tabicadas. —

Principio de moderación que asegura la inmunidad de la estructura tabicada. — Paradojas demostrativas de su elasticidad 90

ESTRUCTURAS TENDINOSAS: En la arquitectura no se llegan á alcanzar las estructuras racionales de la naturaleza más que á fuerza de lentos ensayos y seculares experiencias. — Origen del tendón estructural. — Razón de su desarrollo en Oriente. — La decrepitud del tendón engendra la combinación cupular. — Definición del preciso período de actividad del tendón leñoso. — La arquitectura italiana de frecuente tirante metálico no constituye estructura tendinosa. — El tendón de hierro en las estructuras despiezadas del Renacimiento. — Universalidad de estructuras que ofrece la construcción cohesiva auxiliada por tendones. — La Mole Antonelliana. — Llamada sobre las causas que desarrollan los métodos estructurales y aplicación á los Estados Unidos. — Período de gestación de la estructura americana. — El *skeleton* americano según las ordenanzas de Chicago. — Análisis de los dos tipos estructurales de la América. — La vibración de los *sky scrapers*. — La solución perfecta de la estructura tendinosa está en un sistema intermedio entre el oriental y el americano. — El tendón aparente y el tendón por ligamento 100

EL TENDÓN ADHERIDO: Grandiosidad del problema constructivo que representa el principio de adherir el tendón, en toda su longitud, al macizo de fábrica. — Germen pompeyano del tendón adherido; reaparición moderna con el cemento armado. — Forma y evolución de los tendones en el interior de la ganga. — Extraordinario empirismo de la ciencia verificativa en las obras de hormigón armado. — Análisis de las hipótesis fundamentales de

que se parte en el cálculo de dichas obras. — Mecanismo del cálculo verificativo. — Real garantía de estabilidad de las estructuras de cemento armado. — La autosugestión mecánica como guía más seguro para señalar la posición del sistema tendinoso. — Osaturas típicas. — Reflexiones sobre las propiedades de que gozan las estructuras de hormigón armado. — Arquitectonografía de las obras en dicho sistema. — Generalización del principio del tendón adherido; el vidrio armado. — Emancipación del moldeo en el sistema; el tendón adherido en la estructura tabicada. — Feliz transgresión del sistema. . . 114

APÉNDICE: Estructuras birresistentes pseudoelásticas tratadas por el hierro y el acero fundido. — Origen y arquitectonografía de estas estructuras. — Las de hierro fundido abren la puerta á la construcción metálica completamente elástica. — La rótula en las estructuras de fundición 131

PARTE IV

Estructuras birresistentes elásticas

PRESENTACIÓN DE LAS FORMAS ELÁSTICAS: Flexibilidad, abundancia y expresión de estas estructuras. — La intensidad de su trabajo es reflejo del actual ambiente. — Simbolización perfecta del principio estructural; constructibilidad. — Su sentimiento artístico. — Libertad característica de composición estructural. — Causas de la relativa garantía de sus métodos verificativos. — El acero. — Efectos dinámicos. — Reciente progreso de la ciencia verificativa. — Prodigioso horizonte que la grafostática permite vislumbrar. — Corta vida de las estructuras elásticas. — Necesidad de desentrañar las leyes generales que indudablemente deben regir la composición de estas estructuras. — Dificultad que ello significa. 135

EL «EMPILAGE»: La configuración de las estructuras depende del «coeficiente estructural» y de la materia empleada. — Superioridad de la disposición general de las estructuras elásticas. — Principio estructural más rudimentario. — Edificaciones elementales resueltas por *empilage*. — Explotación de la elasticidad en los *empilages*; ejemplos. — El más racional *empilage* se encuentra en la carpintería del siglo XVI. — El *empilage* en nuestras estructuras metálicas. — Momento en que cesa la racionalidad de los *empilages*. — Interesantes ejemplos históricos. 143

EL «CANEVÁS» TRIANGULAR: Experimento vivo de la descomposición de esfuerzos. — El triángulo como célula indeformable y reproductora de las estructuras elásticas. — Gérmenes y manifestaciones sucesivas del principio de la triangulación en las arquitecturas paganas. — El tirante romano. — La retícula cuadrada precede a la triangular. — La época gótica siente el principio general de triangulación tensada. — En los albores de la arquitectura metálica retrocede este principio. — Arraigo actual y definitivo de la triangulación tensada. — Posibilidad de que no hayamos aún alcanzado plenamente la posesión del principio. 148

EL EMPOTRAMIENTO Y LA RÓTULA: Modernismo del empotramiento. — Razón de la superioridad de este dispositivo. — Desconocimiento racional del empotramiento. — Causas de su poco frecuente aplicación. — Filosofía de la rótula. — Aplicaciones célebres de la triple articulación. — Indignidad de la rótula en las estructuras de coeficiente estructural igual a la unidad. — Única función que a la rótula debe asignarse en las formas de metal. — Beneficios del empotramiento en las estructuras de avance

- vertical y de avance horizontal. — El cantilever; origen asirio de esta portentosa y moderna estructura. — Ventajitas del cantilever. — Las grandes aplicaciones del cantilever y apología de sus puentes. 156
- LA «ESPIÑA DORSAL»: El principio de igual resistencia en el esqueleto de los seres naturales. — Configuración estructural de las primeras armaduras metálicas. — Videncias de Polonceau. — Primeras tentativas para dotar de espina dorsal á las piezas flexadas. — La primera barra laminada en T. — La calderería moderna. — Racionalidad de sus estructuras. — La instintiva disposición de espina dorsal presidiendo á todas las composiciones. — Ejemplos notables. — Racionalidad y estética del principio de igual resistencia. 164
- LA REPULSIÓN DEL TIRANTE: Indiferencia que se siente ante la grandeza de algunos problemas de la ciencia de la construcción. — Constante preocupación de los artistas de esta ciencia. — Los dos conceptos creatrices de la forma de cubierta. — La cubierta, primordial problema de la construcción. — El empuje y el tirante. — El vulgar tirante combatido en la Edad Media. — Origen de la armadura de de l'Orme. — Artificio de la anulación del empuje en las formas italianas y francesas de aquel tipo. — Perfeccionamiento del tipo. — Esterilidad de la Escuela de Paxton en la construcción metálica. — Transcendencia extraordinaria que implica la tendencia á elevar el tirante en las armaduras. — Construcciones precursoras de la armadura Ardan. — Los cuchillos Moller. — ¿Por qué en el Norte se inicia la elevación del tirante? — Herencia de los principios leñosos en la construcción metálica. — Los cuchillos falciformes. — Grandiosa creación de los arcos ingleses. — Arquitectonografía demostrativa. — Explica-

ción mecánica de la melancolía que respiran las naves británicas. — Reparación del tirante por efecto del ambiente y del carácter francés. — Estratagema de los ingenieros franceses para la ocultación del tirante. — «Cuchillo tijera». — Razonamiento que inducen los cuchillos de la Exposición de París del año 1867. — Comprobación por el *Palmen Garten*. — *Tour de force* de la forma Dión. — Simultáneo florecimiento del principio de Dión en la Inglaterra, Alemania y Francia. — Motivo de la racionalidad de tal principio. — Causa de su aparente retroceso. — Formas complejas de ocho, tres y dos rótulas. — Reflexiones. — Reivindicación del Dión. — La estación de Madrid (Atocha). — Reflejo del principio Dión en otros tipos de armadura 170

ESTEREOESTRUCTURAS: La arquitectura metálica actual, está solamente resuelta en el plano; su composición estérea es casi desconocida. — Comparación con las estereoestructuras de la arquitectura monumental. — Las propiedades del metal parecen invitar á la solución general de las formas del espacio. — El tetraedro como célula estructural de la construcción metálica resuelta en el espacio. — Visión mecánica de las formas de esta general arquitectura. — La evolución de la construcción metálica tiende, sin embargo, á la estereocomposición. — Las planofomas elásticas romanas. — Las cubiertas leñosas góticas contienen claramente el germen de las estereoestructuras; demostración. — Estereocomposiciones por revolución completa é incompleta de formas planas; su aplicación á recintos curvos y rectangulares. — Arquitectonografía de las estereoestructuras de metal. — La acción del viento originaría de las estereocomposiciones de puentes y viaductos. — Originalidad propia de las estereoestructuras de metal 187

ESTRUCTURAS MÓVILES: Nuevo rasgo de vida que llevan algunas estructuras arquitecturales de la actual Ingeniería. — Inferioridad de las estructuras fijas. — Origen y complicación del principio de las estructuras móviles. — El ingeniero como arquitecto de una arquitectura dinámica superior. — Coeficiente estructural de las estructuras móviles. — Agrupación por oficios de las armaduras dotadas de movimiento. — Origen babilónico de los puentes móviles. — Principio mecánico de los puentes levadizos; dificultad que encierra. — Adopción del eje vertical para la revolución de los puentes. — Sistema ascensional. — Principio mecánico fundamental de todos los puentes móviles; su aplicación á los *falding bridges* americanos. — Simultaneidad de tráfico por reducción de la estructura móvil; transbordadores. — El renacimiento del puente levadizo. — Ejemplos notables. — La presión del viento. — Los puentes flotantes y volantes. — La movilidad en las estructuras de cubierta. — La cúpula del Observatorio de Niza. — Los *hangars* para dirigibles. — La dinámica en las construcciones auxiliares. — Inmutable ley de los procedimientos de construcción. — Aparición de los grandes andamiajes móviles. — Desarrollo y carácter moderno. — Estructuras de las grúas rodantes y polares; instalación eléctrica del puerto de Venecia. — Probable porvenir de una arquitectura animada 196

PARTE V

Estructuras unirresistentes

FONDO Y FORMA DE LAS ESTRUCTURAS UNIRRESISTENTES: Definición de estas estructuras. — Medios de realización de las mismas. — Extensión del tratamiento estereotómico. — Ley de equilibrio de las estructuras unirresistentes. — Líneas de presión y de tensión.

—Ley de conjugación.— Demostración intuitiva de dicha ley.— Perfiles racionales de las construcciones despiezadas.— Deducción experimental de dichos perfiles.— Originalidad de las estructuras resultantes.— Exigencias arquitecturales y constructivas; consecuencia que originan.— Sencillez y dificultad, simultáneas, de las estructuras despiezadas.— Las construcciones elásticas son más estudiadas y mejor conocidas que las estereotómicas. . . . 211

LA MECÁNICA ESTEREOTÓMICA: Equilibrio por gravedad de los *empilages* de sillería.— La estructura elástica y la estereotómica; respectivos principios de actividad y pasividad.— Ley compensatriz.— El despiezo como única garantía de equilibrio.— El progreso de la construcción elástica y el atraso de la estereotómica.— Los tres principios mecánicos del despiezo.— Vaguedad del empotramiento y la rótula en los despiezos.— La dislocación de los mismos.— Las juntas de máxima sensibilidad articulatriz como único medio de precisar la curva potencial de acción externa.— Determinación de esta curva por la Estática; convencionalismo de su posición.— Los ingenieros alemanes y sus obras de cantería aparejada.— Definición constructiva de la rótula estereotómica alemana; aplicaciones de la misma.— Los esfuerzos cortantes en la estereotomía.— Descomposición de los vectores actuantes contra las dovelas por efecto del despiezo.— Filón á seguir para el descubrimiento del aparejo mecánico.— Lamentable confusión de la Estereotomía con la Estereografía.— Juicio crítico de la ley de Monge.— El puente en esviaje como revelador de una estereotomía mecánica; estudios provocados.— Las trompas del puente de Tours y los estereotomistas franceses.— El aparejo por curvaturas como caso particular del aparejo mecánico universal.— El

ancrage en los despieces. — Los puentes en pendiente como casos de generalidad superior á los de en esviaje. — Reglas de Jean Resal. — Estructuras doveladas de los puentes en esviaje y pendiente simultáneos. — Albores de una estereotomía mecánica por descubrir. 219

EVOLUCIÓN DE LAS FORMAS APAREJADAS. La línea potencial de las estructuras clásicas. — Nacimiento por flexión de las estructuras comprimidas. — La forma contrapesada de reacción vertical. — Causa de la perduración alcanzada por los monumentos clásicos. — Capacidad mecánica de los persas y etruscos revelada por el manejo de la reacción inclinada. — Formas de empuje repartido. — La localización del empuje como causa definitiva del principio estructural. — Gestación secular de este principio. — Formas sirias, armenias y romanas. — La composición por crucería admirablemente sintetizada en la bóveda de arista. — El contrafuerte interno. — La mentalidad de los aparejadores romanos y bizantinos. — Probable causa originaria de la estructura nervada. — Planteo de su principio. — Plementería. — La escuela de Anjou y su exportación inglesa. — «Sencilla complicación» de las bóvedas británicas. — Reincorporación de la nervatura á la masa abovedada. — Conservación del principio de los empujes localizados. — Las *fan vaulten roof* de la Catedral de Gloucester. — Aplicaciones. — El techo de la Catedral de Oxford. — El contrafuerte exterior como petrificación de la línea potencial de acción externa. — Mecánica comparada del puente y del arbortante; lógica de las articulaciones. — Armonía estético-mecánica de las estructuras góticas. — Posibilidad de una ideal estructura de los medioevales. — Decaimiento de la técnica estereotómica en el siglo XV. — Resurgimiento y causas de perfección de los aparejos bizanti-

nos. — Característica de la evolución estructural en la construcción civil desde fines del siglo XVIII. — Perro-net y la «regla del $\frac{1}{6}$ ». — Visión de Perronet. — Revista de estructuras aligeradas. — Los modernos tallistas técnicos del Imperio alemán. — La estereotomía de la penetración en las actuales bóvedas alemanas. 237

ESTRUCTURAS TENSADAS: Constructibilidad de estas formas. — *Self-adaptación* que tienen á la línea potencial. — Enemigo principal de estas estructuras. — Mecánica de las mismas. — Estructuras tensadas de varios tramos. — Los *haubans* y los contrafuertes góticos. — Estructuras tensadas de empuje repartido y de empuje localizado. — Horizonte de una arquitectura general de formas tensadas. — Los andes americanos originarios del puente colgante. — Primer puente colgante de metal. — Introducción en Inglaterra y Francia del puente colgante. — ¿Por qué no hay puentes colgantes en París? — Tipo arquitectural de los puentes suspendidos franceses. — El puente del Gotteron. — Período de temor inspirado por el puente colgante. — Novedad introducida por el puente del Niágara. — Teoría de Levy. — Influencia del paso de trenes y del paso de caballos en relación con la luz de los puentes. — Reivindicación del puente colgante ocasionada por la rigidez del tablero. — Dotación de rigidez al sistema sustentante; ejemplos. — Prevalencia del sistema rígido en su parte sustentada. — Los gigantes puentes colgantes modernos de Nueva York. — El *Bridge Commissioners* y su reciente proyecto. — Favorable ambiente actual que en Alemania reina hacia los puentes colgantes. — Gisclard sintetizador de las experiencias sobre las estructuras suspendidas. — El viaducto de la Cassagne. — Los «cables Ordish». — Montaje del puente Gisclard 252

PARTE VI

Complemento

Págs.

LA ESTRUCTURACIÓN COMPUESTA: Combinación de los principios que rigen las estructuras simples. — La estructura compuesta originase por el empleo simultáneo de materiales diferentes. — Las cubiertas románicas como definidoras de la estructura compuesta. — Primeras estructuras compuestas por hierro y por fundición. — Principio de la división del trabajo en las formas resistentes. — Estructuración racional de las formas compuestas; base de economía y de arte que entraña su ley. — Adjudicación de la bóveda tabicada con las vigas de hierro. — Reunión de la sillería y del hormigón armado. — El Perronet de nuestros días. — La estructura compuesta en la construcción monumental; iglesias de París. — Vasto campo que á la fantasía ofrece la estructuración compuesta. — Ejemplos interesantes. 269

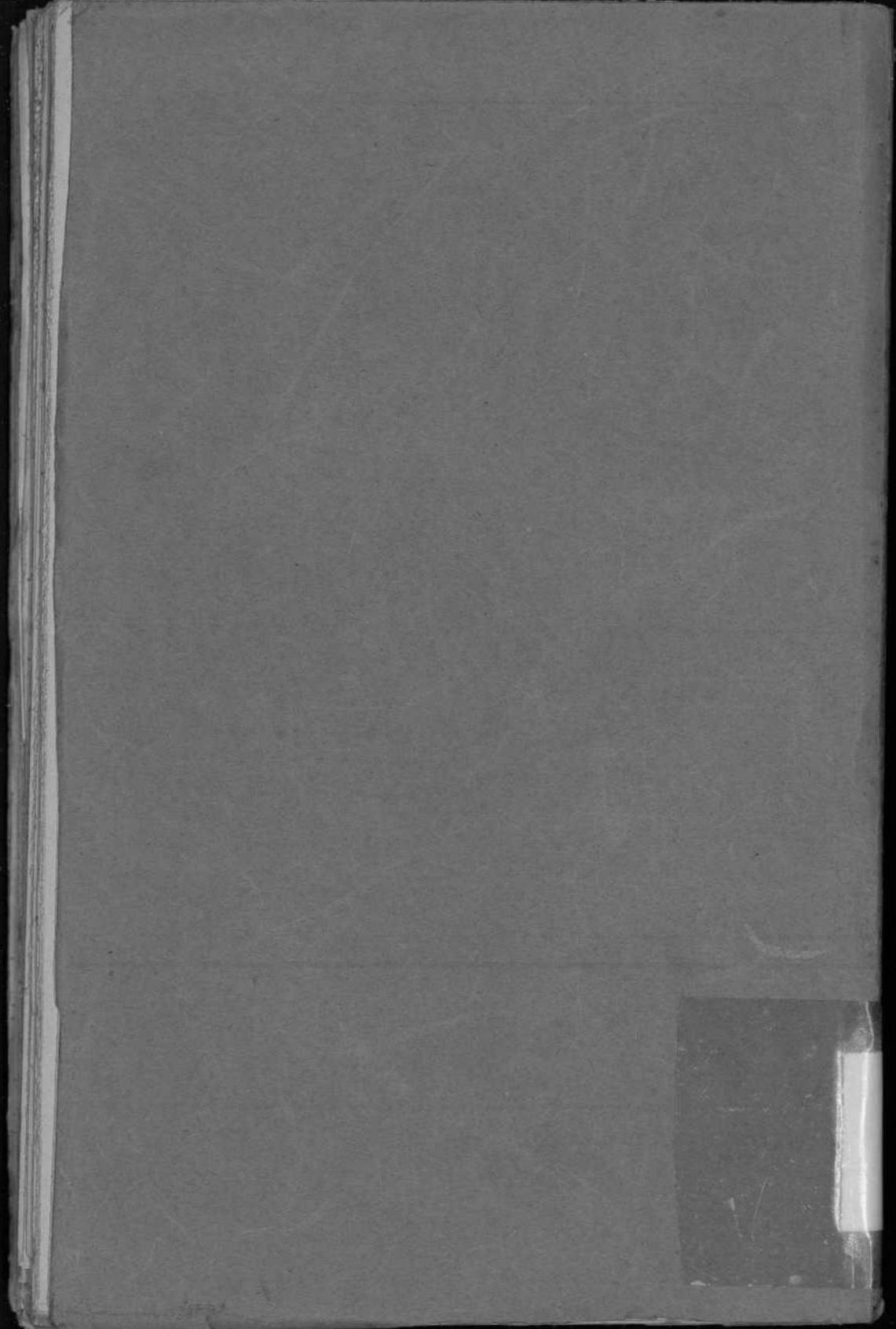
IMAGINATIVA ESTRUCTURAL: Las reacciones de una estructura son función de la constructibilidad de ésta. El interés de una forma constructiva se ciñe principalmente á sus reacciones terminales. — El número de estructuras que equilibran á un mismo sistema de fuerzas se eleva á un infinito de orden superior. — Estructuras sin flexión. — Superficie de los ejes centrales. — La ecuación del eje neutro de una estructura general. — Situación previa de las reacciones terminales; constructibilidad que lo permite y original conclusión que se deduce. — El arco sin compresiones. — Familia de «estructuras ortogonales». — La viga recta como caso particular de estructura ortogonal. — Influencia del peso propio de la estructura. — Puente de arcos descendentes originado por la estructura

ortogonal.—Aplicación de la teoría ortogonal á los cables colgantes; armaduras propias para cubierta que se deducen de aquella teoría. — Facilidad de montura de las primeras formas ortogonales. — Otros caminos para iluminar la imaginación en el encuentro de estructuras. — El valor del coeficiente estructural adoptado dicta espontáneamente la configuración constructiva.—Filosofía de los contrarrestos; consecuencia: tramada de arcos ó pórtico sin columnas. — La composición estructural por combinación de formas elementales conocidas. — La «ley de inversión de formas»; su presencia en los puentes alemanes. — Su aplicación á las formas *á lo Vergniais*; originalísima estructura que se deduce. — Aplicación de la ley de inversión de formas á las estructuras cupulares. — Antiguo presentimiento de dicha ley. — Inversión de formas é inversión de esfuerzos externos. — El problema subestructural en los edificios modernos. — Última observación. 276

B.P. de Soria



61179959
DR 6882



Cardellach

FILLOSOFÍA DE LAS ESTUCURAS

DR
6882