

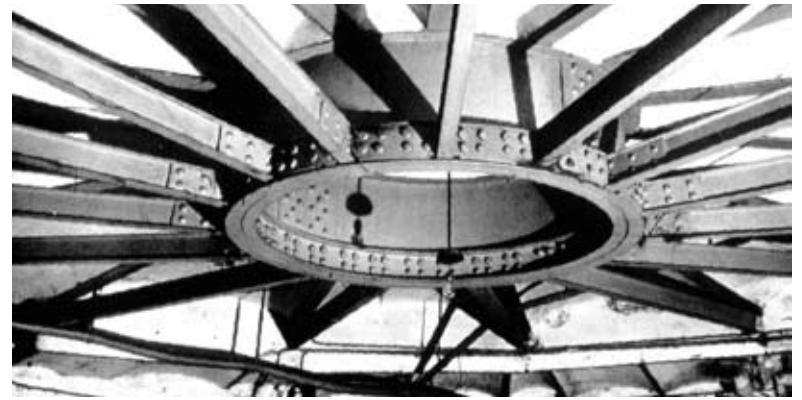
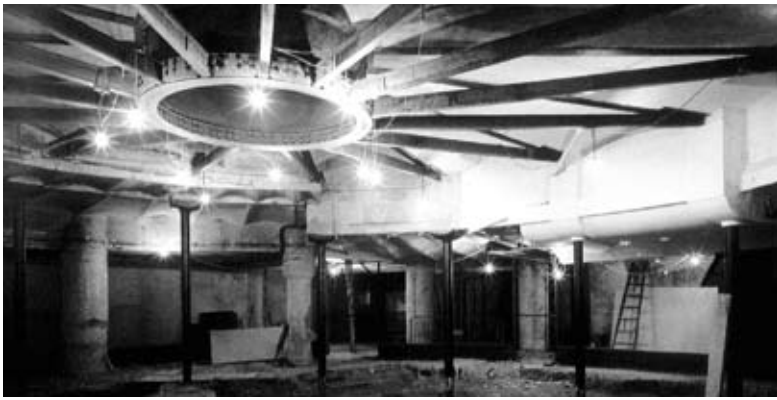
La roda de bicicleta com a model estructural

Robert Brufau



▲
*La roda ajaguda,
una opció
estructural
edificatòria*





■ The bicycle wheel as structural model

Few everyday objects have the same structural interest as the bicycle wheel. It transcends its immediate use to constitute a large-scale architectural model. The various ways in which its geometry can be adapted to different purposes make it singularly versatile, as it can be used for many purposes, with a whole variety of sizes and connecting mechanisms.

To explore this phenomenon step by step, let's start with some history. At the age of 16, James Starley (1830-1881) left home to go and work in a sewing machine factory, the managers of which, when hard times hit, decided to change their production line to the profitable bicycle market. The bicycles manufactured followed the French models, whose wheels had solid wooden or cast metal spokes. Starley quickly realised that they were too heavy and difficult to ride. Responding to the new product as he always did in the face of any technical innovations, he analysed it, identified the main functional elements and improved its construction to create a whole new mechanism.

In 1871 he brought out a "strange" model of bicycle, the "Ariel", with a series of highly innovative technical features: a completely metal frame, hard, solid rubber tyres, a new type of brake and, above all, steel wire spokes in the form of hairpins that were tensioned by turning the central key. This allowed him to produce a very light main wheel, 125 cm in diameter, with a much larger perimeter than that of other bicycles. This meant that a single turn of the pedals propelled the bicycle almost four metres, as opposed to the distance of less than three that characterized the French models—and all this with less weight. Furthermore, tightening the spokes according to the new system made the bicycle more stable. Realising the importance of his design, Starley patented his tensioned tangent spokes in 1874.

Starley's bicycle thereby became a singular item with an ingenious resistant behaviour that could be extrapolated to most subsequent models. Its wheels were a structural model comprising multiple elements subjected to radial traction, with a tension and a compression ring. The spokes were previously tensioned between the central circular hub, which was also tensioned, and the outer circular rim, which was compressed by the spokes pulling inwards. This produced a pretensioned structure with a high level of "captive" tension that remained stable in the face of the forces brought to bear by any type of load, either radial or transverse. Since the circle is a funicular curve subject to compression activated by radial forces, the entire wheel is, ultimately, a pretensioned funicular structure that maintains its spokes tensioned provided the compressive tensions contributed by the weight of the cyclist on the lower verti-

■ La rueda de bicicleta como modelo estructural

Pocos objetos cotidianos tienen el interés estructural de una rueda de bicicleta. Trasciende de su uso inmediato, para convertirse en un modelo arquitectónico a gran escala. Las diferentes opciones de adaptación de su geometría a unas determinadas propuestas de contorno le permiten una singular polivalencia funcional, ya que puede ser utilizada de muchas maneras y con una gran variedad de tamaños y de mecanismos de enlace.

Pero vayamos por partes y empecemos por hacer un poco de historia: con 16 años, el joven James Starley (1830-1881) dejó su hogar para entrar a trabajar en una fábrica de máquinas de coser cuyos directores, con la llegada de tiempos poco propicios, decidieron cambiar la producción y dirigirla al mercado más productivo de las bicicletas. Las unidades a fabricar seguían los modelos franceses, con ruedas de radios macizos de madera o de fundición. Starley se dio cuenta rápidamente de que aquellos modelos eran excesivamente pesados y de difícil manejo, de modo que, reaccionando ante el nuevo producto como siempre lo hacía ante cualquier novedad técnica, lo analizó, constató sus elementos funcionales esenciales, mejoró la construcción y, finalmente, creó un mecanismo totalmente innovador.

En 1871 sacó al mercado un "extraño" modelo de bicicleta, llamado "Ariel", con una serie de filigranas técnicas muy innovadoras: chasis completamente metálico, neumáticos sólidos de goma maciza, un nuevo tipo de freno y, por encima de todo, radios de alambre de acero que se tensaban haciendo girar el eje central, lo que le permitía conseguir, con mucha ligereza, una rueda principal de 125 cm de diámetro, con un perímetro mucho mayor que el del resto de bicicletas. Como consecuencia, solamente con una vuelta de la manivela de los pedales, avanzaba cerca de 4 metros, frente a los menos de 3 metros de los modelos franceses. Y todo esto con un peso mucho menor. Por otro lado, con el nuevo modelo, al poder tensar los radios, se conseguía una mayor estabilidad para la bicicleta. Consciente de la importancia de su diseño, Starley patentó los radios tangenciales pretensados, en 1874.

La bicicleta de Starley se convirtió de este modo en una pieza singular, con un comportamiento resistente y ciertamente ingenioso, que podría extrapolarse a la mayoría de modelos posteriores. Sus ruedas son un modelo estructural constituido por múltiples elementos sometidos a tracción radial, por un aro de tracción y por otro de compresión. Los radios se someten previamente a tracción entre el tubo circular central, también traccionado, y la llanta circular exterior, sometida a presión por el efecto de estiramiento hacia el interior que le producen los radios. Se define de este modo una estructura pretensada con elevadas tensiones "cautivas", que se mantendrá estable frente a las acciones aportadas por cualquier tipo de cargas, tanto radiales como transversales. Al ser el círculo la

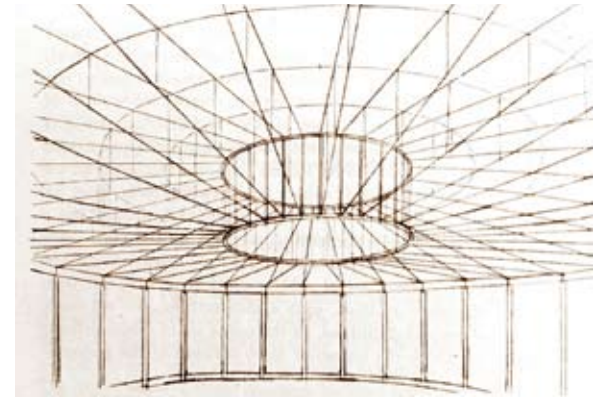
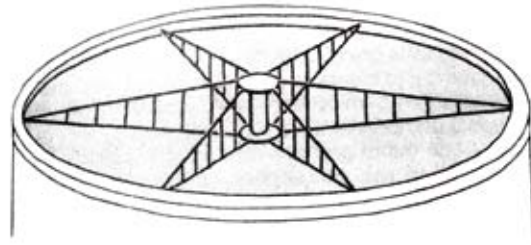
Pocs objectes quotidians tenen l'interès estructural que té una roda de bicicleta. Transcendeix el seu ús immediat per convertir-se en model arquitectònic a gran escala. Les diferents opcions d'adaptació de la seva geometria a unes determinades propostes de contorn li permeten una singular polivalència funcional, que pot ser emprada de moltes formes, i amb una gran varietat de grandàries i de mecanismes d'enllaç.

Però anem per parts i comencem per fer una mica d'història: Amb 16 anys el jove James Starley (1830-1991) va deixar casa seva per entrar a treballar en una fàbrica de màquines de cosir, els rectors de la qual, amb l'arribada de mals temps, decidiren canviar la producció i dirigir-la cap al mercat més productiu de les bicicletes. Les unitats per fabricar seguïen els models francesos, amb rodes de radis massissos de fusta o de fosa. Starley s'adonà ràpidament que aquells models eren excessivament pesats i difícils de manejar i, reaccionant davant del nou producte com ho feia sempre davant de qualsevol novetat tècnica, l'analitzà, en constatà els elements funcionals essencials, en millorà la construcció i, finalment, creà un mecanisme totalment innovador.

L'any 1871 va treure al mercat un «estrany» model de bicicleta, anomenat Ariel, amb una sèrie de filigranes tècniques molt innovadores: xassis completament metàl·lic, pneumàtics sòlids de goma massissa, un nou tipus de fre i, per damunt de tot, radis tensats de filferro d'acer amb forma d'agulles de ganxo. Aquests radis es tensaven fent girar el botó central. Això li permetia aconseguir, amb molta lleugeresa, una roda principal de 125 cm de diàmetre, amb un perímetre molt més gran que el de les altres bicicletes. En conseqüència, només amb una volta de la maneta dels pedals avançava prop de 4 metres, enfront dels menys de 3 metres que caracteritzaven els models francesos. I tot això amb un pes molt menor. D'altra banda, amb el nou sistema, en poder tibar els radis s'aconseguia una estabilitat més gran per a la bicicleta. Conscient de la importància del seu disseny, Starley va patentar els radis tangencials pretensats l'any 1874.

La bicicleta de Starley es va convertir, d'aquesta manera, en una peça singular, amb un comportament resistent certament enginyós, que es podria extrapolar a la majoria de models posteriors. Les seves rodes són un model estructural constituït per múltiples elements sotmesos a tracció radial, per una anella de tracció i per una altra de compressió. El radis són sotmesos prèviament a tracció entre el tub circular central, també traccionat, i la llanta circular exterior, sotmesa a compressió per l'efecte d'estirament cap a l'interior que hi produeixen els radis. Es defineix així una estructura pretensada amb elevades tensions «empresonades» que es mantindrà estable enfront de les accions aportades per qualsevol tipus de càrregues, tant radials com transversals. En ser el cercle la corba fu-

▲ *L'estructura de la base del gran pati de la casa Milà, d'Antoni Gaudí, fou la primera aplicació del principi del postensat de la roda en edificació, l'any 1909*



nicular per un arc de compressió activat per forces radials, tota la roda s'acaba convertint en una estructura funicular pretensada, que mantindrà els radis traccionats en tant les tensions compressives aportades pel pes del ciclista en els radis verticals inferiors —els perpendiculars al terra en cada moment— no siguin superiors a les forces de pretensat previ. El fet que tots els radis acabin treballant a tracció, sigui quina sigui la seva posició i la intensitat de la càrrega aportada pel ciclista, permet, a la fi, mantenir seccions molt ajustades, ja que no estan mai condicionades pels efectes penalitzadors derivats de la possible aparició de fenòmens d'inestabilitat per vinclament. El lector ha d'entendre que, gràcies al pretensat, quan el ciclista transmet el seu pes al terreny ho fa penjant-se de la llanta a través dels dos o tres radis traccionats superiors de la roda, al revés de com passaria si els radis no fossin pretensats, ja que, en aquest cas, la transmissió del pes es faria —d'una manera més convencional— directament cap al terra a través dels radis inferiors comprimits.

L'interès de la roda, entesa com a model resistent, ultrapassa llargament el seu ús com a peça que, en actuar aparellada i en posició vertical, forma part de l'estructura bàsica d'un tipus de vehicle lleuger, accionat per un moviment rotacional introduït per la força que fan els peus del ciclista sobre els pedals. Així, si una estructura amb l'organització pròpia d'una roda es disposa horitzontalment per treballar com a element flexionat, recolzada en tot el seu perímetre mitjançant la presència d'algunes columnes verticals, s'obté una primera varietat tipològica, de la qual es poden esmentar dos exemples:

1. A l'estructura de cobriment del soterrani de La Pedrera (Casa Milà, Barcelona, 1907-1909), la genial obra de Gaudí, es troba tombada una roda de bicicleta disposada en posició horitzontal, cobrint l'espai circular que, amb un diàmetre d'uns 12 m, defineix el gran pati rodó de la cantonada del passeig de Gràcia amb el carrer Provença. Dotze columnes metàl·liques suporten l'anella perimetral de la roda, que està constituïda per dues famílies de radis que pel centre surten d'un tros vertical d'un cilindre central flotant, d'aproximadament 1,20 m d'alçada, i que acaben morint en l'anella exterior.

La singularitat d'aquesta estructura rau principalment en dos aspectes: d'una banda, en la utilització prematura del model, que es va anticipar quasi cinquanta anys als ja més recents exemples de coberta basats en el mateix principi, que s'exposaran posteriorment, i, de l'altra, en la singularíssima solució adoptada per l'arquitecte per pretensar els radis. En efecte, el cilindre central està format per una primera peça interior contínua cilíndrica sobre la qual s'encaixa una segona peça, també cilíndrica però formada per fragments discontinus en què incideixen els radis. Ambdues peces s'uneixen entre si mitjançant cargols perpendiculars a la seva superfície de contacte, però mentre que el cilindre interior complet gairebé no modifica la seva geometria en prémer els cargols, el cilindre exterior, a causa de la seva discontinuïtat, es tanca contra aquell, de manera que redueix el seu diàmetre inicial i

▲
La primera gran roda de bicicleta a la coberta de l'Auditori d'Utica (Zetlin, 1955), 50 anys més tard que la Pedrera.

cal spokes—those perpendicular to the ground at each moment—are not greater than the existing forces of pretensioning. The fact that all the spokes ultimately work under traction, whatever their position and the intensity of the load represented by the cyclist, ultimately means that the sections can be kept small, since they are never compromised by effects deriving from possible instability in the form of buckling. The reader has to understand that, thanks to pretensioned spokes, when the cyclist transfers his weight to the ground, he does so by placing his weight on the rim via the two or three tensioned upper spokes. If the spokes were not pretensioned, the cyclist's weight would be more conventionally transmitted directly to the ground via the compressed lower spokes.

The interest of the wheel as a resistant model goes far beyond its use as an object that, with a paired configuration in a vertical position, forms part of the basic structure of a type of lightweight vehicle, activated by a rotational movement produced by the force exerted on the pedals by the cyclist's feet. Thus when a structure with the organization of a wheel is positioned horizontally to work under flexion, resting on its entire perimeter by means of vertical columns, the first typological variety is produced. The following are two examples.

1. In the structure covering the basement of La Pedrera (Milà House, Barcelona, 1907-1909), the inspired work of Gaudí, we find a bicycle wheel positioned horizontally, covering the circular space which, with its 12-metre diameter, defines the large round courtyard on the corner of Passeig de Gràcia with Carrer Provença. Twelve metal columns support the outer ring of the wheel that comprises two series of spokes which, at the centre, emerge from the vertical part of a central floating cylinder, approximately 1.20 metres high, and extend to the outer ring.

There are two main reasons for the singularity of this structure: the early use of the model, almost 50 years before the more recent examples of roofs based on this principle, presented below, and the extremely singular solution adopted by the architect to pretension the spokes. The central cylinder comprises a continuous cylindrical inner piece onto which is fitted a second piece, also cylindrical but comprised of discontinuous fragments that coincide with the spokes. The two parts are joined by screws perpendicular to their contact surface, but whereas the geometry of the complete inner cylinder remains almost unmodified when the screws are tightened, the outer cylinder, being discontinuous, closes against it, reducing its initial diameter and therefore tensing this set of spokes, at the same time compressing the outer ring.

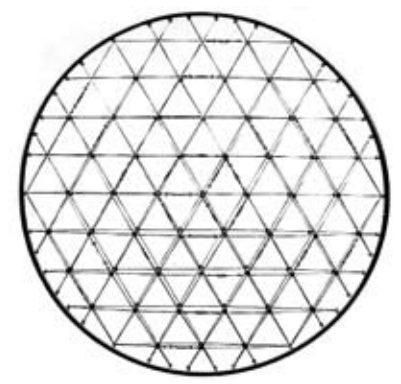
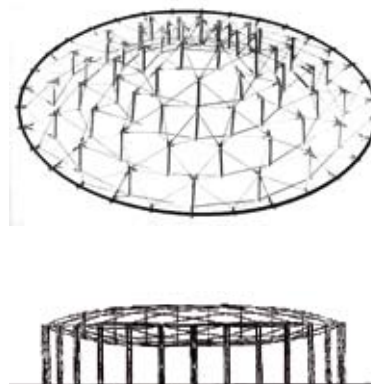
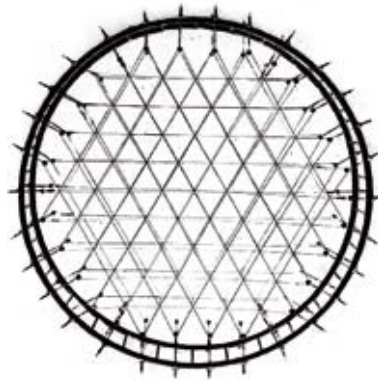
The solution is certainly ingenious and typifies Gaudí's extraordinary structural intuition in identifying favourable aspects of the use of pretensioned spokes. The final solution, however, was not taken to its logical conclusion, since it did not refine

curva funicular para un arco de compresión activado por fuerzas radiales, la rueda entera acaba convirtiéndose en una estructura funicular pretensada, que mantendrá sus radios traccionados, en tanto que las tensiones compressivas aportadas por el peso del ciclista en los radios verticales inferiores —los perpendiculars al suelo en cada momento— no sean superiores a las fuerzas de pretensado previo. El hecho de que todos los radios acaben trabajando a tracción, sea cual sea su posición y la intensidad de la carga aportada por el ciclista, permite, finalmente, mantener secciones muy ajustadas, pues nunca están condicionadas por los efectos penalizadores derivados de la posible aparición de fenómenos de inestabilidad por pandeo. El lector debe entender que, gracias al pretensado, cuando el ciclista transmite su peso al terreno, lo hace colgándose de la llanta a través de los dos o tres radios traccionados superiores de la rueda, al revés de lo que ocurriría si los radios no estuviesen pretensados, ya que, en tal caso, la transmisión de su peso se haría —de manera más convencional— directamente hacia el suelo a través de los radios inferiores comprimidos.

El interés de la rueda, entendida como modelo resistente, va mucho más allá de su uso como pieza que, al actuar aparejada y en posición vertical, forma parte de la estructura básica de un tipo de vehículo ligero, accionado por un movimiento rotacional introducido por la fuerza que ejercen los pies del ciclista sobre los pedales. Así, cuando una estructura con la organización propia de una rueda se dispone horizontalmente para trabajar como elemento flexionado, apoyada en todo su perímetro mediante la presencia de algunas columnas verticales, se obtiene una primera variedad tipológica, de la que pueden mencionarse dos ejemplos:

1. En la estructura de cubrimiento del sótano de La Pedrera (Casa Milà, Barcelona, 1907-1909), la genial obra de Gaudí, se encuentra acostada una rueda de bicicleta que cubre el espacio circular, de un diámetro de unos 12 metros, definidor del gran patio redondo de la esquina de Passeig de Gràcia con la calle de Provença. Doce columnas metálicas aguantan el aro perimetral de la rueda, constituída por dos familias de radios que, por el centro, salen de la pared vertical de un cilindro central flotante, de aproximadamente 1,20 metros de altura, y que acaban muriendo en el aro exterior.

La singularidad de esta estructura reside principalmente en dos aspectos: por un lado, en la prematura utilización del modelo, que se anticipó en casi cincuenta años a los ejemplos ya más recientes de cubierta basados en el mismo principio, que se expondrán posteriormente; y, por otro, en la singularísima solución adoptada por el arquitecto para pretensar los radios. En efecto, el cilindro central está formado por una primera pieza interior continua y cilíndrica, sobre la que se encaja una segunda pieza, también cilíndrica pero formada por fragmentos discontinuos en los que inciden los radios. Ambas piezas se unen entre ellas mediante tornillos perpendiculares a su superficie de contacto, pero, mientras el



tracciona, en conseqüència, el conjunt de radis solidaris, a la vegada que es comprimeix l'anella exterior.

La solució és certament enginyosa i posa de manifest l'extraordinària intuïció estructural de Gaudí a l'hora d'identificar alguns aspectes favorables derivats del pretensat dels radis. La solució final, però, es va quedar a mig camí, ja que no va portar al límit la finesa de la secció d'aquests radis, que foren construïts amb perfils metàl·lics normalitzats del tipus «doble T d'ala estreta». La recent rehabilitació de l'edifici (1994-1997) duta a terme pels propietaris actuals ha tret a la llum aquesta peça tan singular.

2. El sostre de l'Auditori d'Utica (Nova York), dissenyat per Zetlin l'any 1955, es basa també en el principi de la roda de bicicleta recolzada al seu perímetre. Dues sèries de cables connecten l'anella de compressió exterior als voravius superior i inferior del tub central. Aquest, al seu torn, consta de dues anelles de tracció connectades entre si mitjançant un sistema d'armadures. Les dues famílies de cables es mantenen separades i en tracció per mitjà de barres de compressió verticals de longitud ajustable. Cada parella de cables es pot sotmetre a la tracció adequada, que s'aconsegueix fent girar els torniquets que allarguen les barres verticals. En estar cobert per una sèrie de xapes metàl·liques estandarditzades, el sostre resulta pràcticament lliure de qualsevol oscil·lació, ja que l'elevada tracció dels cables els fa més rígids que si pengessin lliurement.

Foren molt interessants les recerques experimentals que l'arquitecte francès Robert le Ricolais (1894-1977) va dur a terme amb models estructurals ultralleugers. La seva filosofia es pot concretar en la frase: «Si penseu en els buits en lloc de treballar amb els elements sòlids, és quan us apareixerà la veritat estructural.» No és estrany que, amb aquesta reflexió, Le Ricolais es preocupés de les múltiples possibilitats estructurals derivades del principi resistent de la roda de bicicleta. Algunes de les seves maquetes a petita escala ens ho recorden.

La relació que les anomenades cobertes de tensegritat (*tensegrity*) puguin tenir amb la roda de bicicleta cal buscar-la, bàsicament, en els sistemes d'activació de forces de pretensat en els seus elements resistents. Les estructures autotensades estan formades per xarxes de barres pretensades internament, autoportants i articulades, en què els cables (o barres d'acer) de pretensat es tensen contra les barres comprimides del sistema. Els acers de pretensat no poden estar treballant més que a tracció. Formen una xarxa contínua, mentre que el sistema de barres comprimides és discontinu. La paraula anglesa *tensegrity* ('tensegritat'), que serveix per designar aquest tipus d'estructura, ha estat introduïda per Richard Buckminster Fuller com a contracció de *tensile integrity* ('integritat tensional'). Fuller la va descriure l'any 1951 de la manera següent: «[...] Hi ha un sistema autotensat quan un conjunt d'elements discontinus treballen a compressió, interaccionant amb un sistema d'elements continus que treballen a tracció, tot definint un volum estable a l'espai [...]». Sembla, però, que aquest sistema fou utilitzat per primera vegada per

▲
Les experiències
teòriques de Robert
Le Ricolais sobre
models basats
en l'aplicació del
"tensegrity" amb
planta circular.

the section of the radiuses, which were built using standardized metal bars of the narrow-flanged T-bar type. The recent rehabilitation of the building (1994-1997) carried out by its current owners brought this remarkable feature to light.

2. The roof of Utica Auditorium (New York), designed by Zetlin in 1955, is also based on the principle of the bicycle wheel, resting on its perimeter. Two layers of cables connect the outer compression ring to the upper and lower edges of the central tube. In turn, the tube comprises two tension rings that are interconnected by a system of struts. The two sets of cables are kept tensed and separate by vertical separation struts of adjustable length. Each set of cables can be given the appropriate tension by turning the screws used to lengthen the vertical struts. Since it is clad with standardized metal sheet pieces, the roof is practically free of oscillation, as the high tension of the cables makes them more rigid than if they hung freely.

The experimental research with ultra-light structural models carried out by the French architect Robert le Ricolais (1894-1977) was particularly interesting. His philosophy can be summed up by the phrase "It is by focusing on the empty spaces instead of working with the solid elements that the structural truth is revealed". With this philosophy, it is no surprise that Le Ricolais concerned himself with the multiple structural possibilities presented by the principle of resistance of the bicycle wheel, demonstrated by some of his small-scale models.

The relation of so-called tensegrity structures with the bicycle wheel lies, basically, in the systems to activate pretensioned forces in resistant elements. Tensegrity structures are made up of meshes of internally pretensioned, self-supporting, articulated struts, in which the pretensioned cables (or steel struts) are tightened against the system's compressed struts. Pretensioned steels only work under traction. They form a continuous mesh, whereas the system of compressed struts is discontinuous. The word "tensegrity" (a contraction of "tensile integrity") used to denote this type of structure was introduced by Richard Buckminster Fuller. Fuller described it in 1951 in the following way: "A tensegrity system comprises a series of discontinuous elements working under compression, interacting with a system of continuous elements working under tension, thereby defining a stable volume in space." It seems, however, that this system was used for the first time by the sculptor Kenneth Snelson, though Fuller took a very early interest in the possibility of extrapolating the idea to the world of construction, producing his tensegrity domes.

Fuller's studies provided the inspiration for David Geiger, who designed a model of extremely economical domes that in recent years have been used to roof large arenas, like the Gymnastics Pavilion at the Seoul Olympic Games (120 metres in diam-

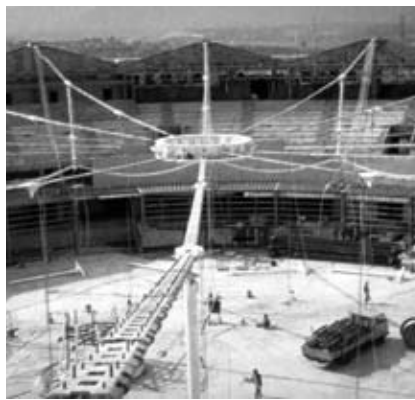
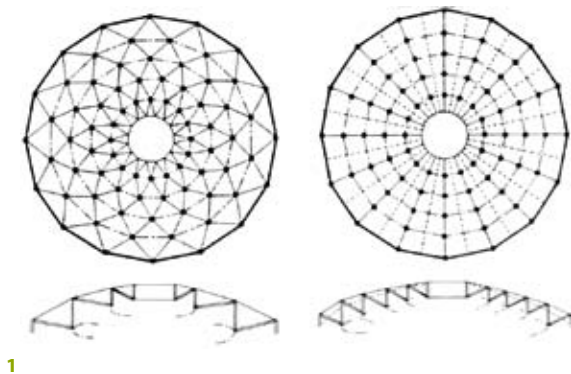
cilindro interior completo casi no modifica su geometría al presionar los tornillos, el cilindro exterior, a causa de su discontinuidad, se cierra contra aquél, reduciendo su diámetro inicial y traccionando, en consecuencia, el conjunto de radios solitarios, al tiempo que se comprime el aro exterior.

La solució és certament enginyosa i posa de manifest la extraordinària intuïció estructural de Gaudí, al identificar alguns aspectes favorables derivats del pretensat dels radis. La solució final, de tots dos modes, se quedà a mig camí, ja que no llevà al límit la finesa de la secció de estos radis, que se construyeron con perfils metàl·lics normalitzats, del tipus "doble T de ala estreta". La reciente rehabilitació del edifici (1994-1997), llevada a cabo por los actuales propietarios, sacó a la luz esta pieza tan singular.

2. El techo del Auditorio de Utica (Nueva York), diseñado por Zetlin en 1955, se basa también en el principio de la rueda de bicicleta apoyada en su perímetro. Dos series de cables conectan el aro de compresión exterior con los bordes superior e inferior del tubo central. Éste, a su vez, consta de dos aros de tracción conectados entre ellos mediante un sistema de armazones. Las dos familias de cables se mantienen separadas y en tracción, por medio de barras de compresión verticales de longitud ajustable. Cada pareja de cables puede someterse a la tracción adecuada, que se consigue haciendo girar los torniquetes que alargan las barras verticales. Al estar cubierto por una serie de chapas metálicas estandarizadas, el techo queda prácticamente liberado de cualquier oscilación, porque la elevada tracción de los cables los hace más rígidos que si colgasen libremente.

Fueron muy interesantes las investigaciones experimentales que el arquitecto francés Robert Le Ricolais (1884-1977) llevó a cabo con modelos estructurales ultraligeros. Su filosofía se puede concretar en la frase: "Si pensáis en los vacíos, en lugar de trabajar con los elementos sólidos, se os aparecerá la verdad estructural". No resulta extraño que, con esta reflexión, Le Ricolais se preocupase por las múltiples posibilidades estructurales derivadas del principio resistente de la rueda de bicicleta. Algunas de sus maquetas a pequeña escala nos lo recuerdan.

La relació que les denominades cobertes "tensegrity" puguin tenir amb la roda de bicicleta cal buscar-la, bàsicament, en els sistemes d'activació de forces de pretensat en els elements resistents. Les estructures autotensades estan formades per xarxes de barres pretensades internament, autoportants i articulades, en les que els cables (o barres d'acer) de pretensat es tensen contra les barres comprimides del sistema. Els acers de pretensat no poden estar treballant més que a tracció. Formen una red contínua, mientras que el sistema de barres comprimidas es discontinuo. La palabra "tensegrity", que sirve para designar este tipo de estructura, fue introducida por Richard Buckminster Fuller, como contracción de "tensile integrity". Fuller lo describió



l'escultor Keneth Snelson, i que Fuller va ser el que es va interessar molt aviat per la possibilitat d'extrapolar la idea al món edificatori i va proposar les cúpules autotensades.

En els estudis de Fuller es va inspirar David Geiger, que va concebre un model de cúpules extremadament econòmiques que al llarg dels darrers anys s'han anat utilitzant per cobrir grans estadis, com ara el Pavelló de Gimnàstica dels Jocs Olímpics de Seül (120 m de diàmetre) i el d'Esgrima (90 m de diàmetre). Geiger va dissenyar diverses cúpules de tensegritat; la primera, a Sant Petersburg (Florida), ja cobria un estadi circular amb una capacitat per a 43.000 persones assegudes. La seva estructura té armadures radials, amb diagonals i cables d'acer, pretensades contra tubs verticals d'acer i que s'estenen entre una anella d'acer de tracció interior i una anella de compressió exterior de formigó reforçat. Els tubs verticals que cobreixen els cables estan sostinguts per les diagonals de tracció i es mantenen verticals per les anelles concèntriques d'acer connectades per la seva part inferior, i pels suports inclinats, connectats per la seva part superior a les anelles d'acer concèntriques. Els cables traccionats radials que s'estenen entre les anelles de compressió i tracció al llarg dels tubs verticals constitueixen els cordons inferiors de l'armadura. De la mateixa manera, els cables radials que s'estenen al cim constitueixen els cordons superiors de l'armadura. El pretensat dels cables radials augmenta la tracció dels cordons inferiors deguda a les càrregues del sostre, que és prou alta per distribuir la compressió en els cordons superior deguda a aquestes càrregues. Com que l'anella de tracció es troba en un nivell més alt que la de compressió, aquests sostres serien «cúpules de tracció superficial» molt similars, conceptualment, als sostres de «roda de bicicleta».

Una nova utilització del principi de la roda de bicicleta el trobem a les grans sínies giratòries que es construïren a Europa a finals del segle XIX. La més coneguda és la gran roda vertical del Prater de Viena, que fou construïda l'any 1897. L'enginyer G.W.G. Ferris va construir el 1893 la primera roda d'aquest tipus per a l'Exposició Internacional de Chicago. Va tenir grans dificultats per convèncer els organitzadors de la validesa del projecte, ja que ningú no creia que uns simples radis de bicicleta, per molt pretensats que estiguessin, poguessin suportar el pes d'una llanta de 76 m de diàmetre plena de cabines, i dubtaven fins i tot que la roda pogués girar. L'aspecte més delicat era el muntatge, ja que fou necessari construir dos elevadors de 70 m i posar-los a cada costat de la roda perquè, amb l'ajut d'unes grues molt potents, poguessin aixecar a 42 m d'altura l'eix de la roda, que tenia un pes de 70 t.

Bristol i Londres tingueren també la seva roda, però només les de París (que va estar en peu des de 1898 fins a 1921) i la de Viena es mantingueren després del seu període expositiu inicial. La roda del Prater fou construïda pels enginyers Walter B. Basset i Harry Hitchins i finançada per un propietari d'atraccions de fira. A pesar de les experiències anteriors, els constructors britànics tingueren les mateixes dificultats per posar l'eix al seu lloc. La roda

1
Estructures
"tensegrity" de
Fuller i Geiger

2 i 3
Aplicacions
de l'estructura
"tensegrity" a Seül

4
Les espectaculars
nòries de finals del
segle XIX: un bon
exemple de rodes
postensades de
gran dimensió.

eter) and the Fencing Dome (90 metres in diameter). Geiger designed several tensegrity domes, the first, in Saint Petersburg (Florida), covering a circular stadium with seating for 43,000 persons. Its structure comprises radial posts, with steel diagonals and cables, pretensioned against vertical steel tubes, extending between a steel tensed inner ring and an outer compression ring of reinforced concrete. The vertical tubes covering the cables are supported by the tensioned diagonals and kept vertical by the concentric steel rings connected at the lower part, and by sloping supports connected at the top to the concentric steel rings. The tensioned radial cables extending between the compression and tension rings along the vertical tubes constitute the valley cables of the structure. Likewise, the radial cables running to the top are formed by the ridge cables. The pretensioning of the radial cables increases the tension of the valley cables caused by the roof loads, which is sufficiently high to distribute the compression in the ridge cables caused by these loads. Since the tension ring is located at a higher level than the compression ring, these roofs might be considered "surface tension domes", very similar, in conceptual terms, to "bicycle wheel" roofs.

We find a new use of the bicycle wheel principle in the great Ferris wheels that were built in Europe in the late 19th century. The best known was the Prater big wheel in Vienna, built in 1897. In 1893, the engineer G.W.G. Ferris built the first wheel of this kind for that year's Chicago World Fair. He had a great deal of difficulty persuading the organizers of the project's validity, since no one believed that simple bicycle spokes, however tensioned, could bear the weight of a 76-metre rim complete with gondolas, or that the wheel would be able to turn at all. The most delicate aspect was the assembly process, since it was necessary to construct a 70-metre lift on either side of the wheel, which, with the assistance of powerful cranes, lifted the axis of the wheel, weighing 70 tonnes, to a height of 42 metres.

Bristol and London also had their own wheels, but only those in Paris (which stood from 1898 to 1921) and Vienna remained after the Fair closed. Prater's wheel was built by the engineers Walter B. Basset and Harry Hitchins, and financed by a fairground owner. Despite these earlier experiences, British constructors had the same problems when it came to positioning the axis. The wheel had a vertical diameter of 61 metres and weighed 430 tonnes. At the height of its popularity, it was ridden by 16,000 people a day. What makes it a noteworthy structural model is the fact that there were no rigid struts connecting the central horizontal axis to the outer circumference of the rim around which the gondolas were hung. This sensation of weightlessness made Prater's Wheel seem quite magical, understandable given the obstinate defiance of gravity perceived when the wheel is turning.

en 1951 de la manera siguiente: "Se tiene un sistema autotensado cuando un conjunto de elementos discontinuos trabaja a compresión, en interacción con un sistema de elementos continuos que trabajan a tracción y definiendo un volumen estable en el espacio...". Parecer, sin embargo, que este sistema lo utilizó por primera vez el escultor Kenneth Snelson, y que Fuller fue quien muy pronto se interesó por la posibilidad de extrapolar la idea al mundo edificatorio, proponiendo sus cúpulas autotensadas.

En los estudios de Fuller se inspiró David Geiger, que concibió un modelo de cúpulas extremadamente económicas que, a lo largo de los últimos años, se han ido utilizando para cubrir grandes estadios, como el pabellón de gimnasia de los Juegos olímpicos de Seül (120 metros de diámetro) y el de esgrima (90 metros de diámetro). Geiger diseñó varias cúpulas "tensegrity", la primera de ellas, en Saint Petersburg (Florida), ya cubría un estadio circular con una capacidad para 43.000 personas sentadas. La estructura dispone de armazones radiales, con diagonales y cables de acero, pretensados contra tubos verticales de acero, extendiéndose entre un aro de acero de tracción interior y un aro de compresión exterior de hormigón reforzado. Los tubos verticales que cubren los cables están sostenidos por las diagonales de tracción y se mantienen verticales mediante los aros concéntricos de acero conectados por su parte inferior, y por los soportes inclinados, conectados por su parte superior a los aros de acero concéntricos. Los cables traccionados radiales que se extienden entre los aros de compresión y tracción a lo largo de los tubos verticales constituyen los cordones inferiores del armazón. El pretensado de los cables radiales aumenta la tracción de los cordones inferiores debida a las cargas del techo, y es lo bastante alta como para distribuir la compresión en los cordones superiores debida a estas cargas. Como el aro de tracción se encuentra en un nivel más alto que el de compresión, estos techos serían "cúpulas de tracción superficial", muy similares, conceptualmente, a los techos de "rueda de bicicleta".

Una nueva utilización del principio de la rueda de bicicleta lo encontramos en las grandes norias giratorias que se construyeron en Europa a finales del siglo XIX. La más conocida de ellas es la gran noria vertical del Prater de Viena, que se construyó en 1897. El ingeniero G.W.G. Ferris construyó en 1893 la primera noria de este tipo, para la Exposición Internacional de Chicago celebrada ese mismo año. Tuvo grandes dificultades para convencer a los organizadores de la validez del proyecto, ya que nadie creía que unos simples radios de bicicleta, por muy pretensados que estuvieran, pudiesen soportar el peso de una llanta de 76 metros de diámetro repleta de cabines, y hasta se permitieron dudar que la rueda pudiese girar. El aspecto más delicado era el montaje, ya que se hizo necesario construir dos elevadores de 70 metros y colocarlos a cada lado de la rueda, para que, con la ayuda de potentes grúas, permitiesen levantar a 42 metros de altura el eje de la rueda, que tenía un peso de 70 toneladas.

Bristol y Londres también tuvieron su noria, pero sólo las de París (que estuvo en pie



5

tenia un diàmetre vertical de 61 m i el seu pes total fos de 430 t. La van arribar a utilitzar 16.000 persones diàriament. Es tracta d'un model estructural de notable interès pel fet que no hi ha cap barra rígida que connecti l'eix central horitzontal amb la circumferència exterior de la llanta on s'emplacen les cabines. Aquesta sensació d'ingravidesa confereix a la roda del Prater un aspecte certament màgic, comprensible a partir de l'obstinat desafiament de la gravetat que es percep quan la sinia està girant.

Una variant conceptual de les anteriors la trobem quan l'element sustentant de la roda horitzontal és, precisament, el cilindre vertical. La roda queda alliberada de suports en el perímetre exterior i surt en voladís des d'un pal central, al qual es pot fixar rigidament o amb mecanismes lliscants. És el cas d'algunes torres giratòries de complexos lúdics o expositius, com ara la del mirador que s'aixeca a Futuroscope (Poitiers, França). En aquest cas, la família dels radis superiors està traccionada, mentre que la dels radis inferiors està comprimida. Aquests models, però, rarament pretraccionen els cordons que en entrar en servei ordinari estarien comprimits.

Per lògica, la utilització de la roda de bicicleta com a element horitzontal recolzat perimetralment condueix cap al cobriment de grans espais circulars, i, per intuïció, la seva materialització ens porta gairebé sempre cap a l'ús de lleugeres estructures metàl·liques, amb radis de poca secció i amb un treball dominant a esforços de tracció. Això no impedeix, però, que en determinades situacions la roda pugui ser plantejada amb criteris en la direcció contrària. Aquest és el cas pròxim d'un dels blocs que formen el conjunt de Badalona Activa, projectat per J. Moliner i A. Poch cap a l'any 1992, on es necessitava estructurar una planta circular d'uns 20 m de diàmetre, prevista per a sobrecàrregues d'una certa intensitat en tractar-se d'un sostre intermedi amb ús públic a la planta superior. L'interès dels arquitectes per il·luminar l'espai inferior zenitalment i amb una llanterna circular centrada ens va dur a proposar la geometria bàsica de la roda de bicicleta horitzontal, però aquesta vegada, i per tenir una protecció al foc adequada i un bon aïllament acústic, vam acordar fer-la amb formigó armat, entenent que la singularitat de la seva forma i la qualitat visual i espacial que generaria bé mereixien un tractament amb formigó vist. La roda treballaria ara a flexió, mobilitzant tensions horitzontals de compressió a la part superior —unificant les dues famílies de radis en una única família de jàsseres de cantell variable que incidirien en un cilindre vertical central—, en tant que la meitat inferior d'aquestes jàsseres i del cilindre treballarien a tracció. ♦

Robert Brufau

5
La roda trepadora de Futuroscope a Poitiers: l'element treballant en voladís des d'un eix central.

6
Un exemple de roda executada amb formigó armat. Tot i que per la seva grandària no fou necessari postensar-la, es podrien aconseguir diàmetres molt superiors amb aquesta tècnica.



6

We find a conceptual variation of the above when the element supporting the horizontal wheel is, in fact, the vertical cylinder. The wheel is freed of supports in its outer perimeter and projects from a central mast, to which it can be fixed rigidly or with sliding mechanisms. This is the case of some gyrotowers at theme parks and fairgrounds, like the panoramic tower built at Futuroscope (Poitiers, France). Here, the upper set of spokes is tensioned, while the lower spokes are compressed. These models, however, rarely involve pretension of the diagonals which, when at work, are compressed.

Logically, the use of the bicycle wheel as a horizontal element resting on its perimeter lends itself to the roofing of large circular spaces, and, by intuition, its materialization almost always leads to the use of lightweight metal structures with small-sectioned spokes and a predominance of tension. However, in certain situations this does not prevent a contrary approach being taken. This is the case of one of the blocks in the Badalona Activa complex, designed by J. Moliner and A. Poch in around 1992. This block required a circular floor plan with a 20-metre diameter, planned to bear considerable surface loads, since it was an intermediate ceiling with public use of the upper floor. The architects' interest in giving the space overhead lighting via a central circular skylight suggested the use of the basic geometry of the horizontal bicycle wheel. In this case, however, in order to ensure adequate fire protection and good soundproofing, we agreed to use reinforced concrete, understanding that the singularity of its form and the visual and spatial quality it would generate called for a bare concrete treatment. The wheel is now subject to flexion, mobilizing horizontal compression tensions in the upper part, unifying the two sets of radiuses in a single set of girders of variable section that come together at a central vertical cylinder, while the lower set of girders and the cylinder work under traction. ♦

Robert Brufau
Translated by Elaine Fradley

desde 1898 a 1921) y la de Viena se mantuvieron después del período expositivo inicial. La rueda del Prater la construyeron los ingenieros Walter B. Basset y Harry Hitchins y la financió un empresario de atracciones de feria. A pesar de las experiencias anteriores, los constructores británicos tuvieron las mismas dificultades para colocar el eje en su sitio. La rueda tiene un diámetro vertical de 61 metros, y su peso total es de 430 toneladas. Llegaron a utilizarla 16.000 persona diariamente. Se trata de un modelo estructural de notable interès, puesto que ninguna barra rígida conecta el eje central horizontal con la circunferencia exterior de la llanta, en donde se emplazan las cabines. Esta sensación de ingravidez confiere a la noria del Prater un aspecto ciertamente mágico, comprensible a partir del obstinado desafío a la gravedad que se percibe cuando la noria está girando.

Una variante conceptual de las anteriores la encontramos cuando el elemento sustentado de la rueda horizontal es, precisamente, el cilindro vertical. La rueda queda liberada de soportes en su perímetro exterior, saliendo en voladizo desde un mástil central, al que puede fijarse rigidamente o con mecanismos deslizantes. Es el caso de algunas torres giratorias de complejos lúdicos o expositivos, como la del mirador que se levanta en Futuroscope (Poitiers, Francia). En este caso, la familia de los radios superiores queda traccionada, mientras que la de los radios inferiores está comprimida. De todos modos, estos modelos raramente pretraccionan los cordones que, al entrar en servicio ordinario, estarían comprimidos.

Por lógica, la utilización de la rueda de bicicleta como elemento horizontal apoyado perimetralmente conduce hacia el cubrimiento de grandes espacios circulares y, por intuición, su materialización nos lleva casi siempre al uso de ligeras estructures metálicas, con radios de poca secció y con un trabajo dominante a esfuerzos de tracció. Esto no impide que en determinadas situaciones, la rueda pueda ser planteada con criterios opuestos. Tal es el caso pròxim de uno de los bloques que forman el conjunto de Badalona Activa, proyectado por J. Molinar i A. Poch hacia 1992, en donde resultaba necesario estructurar una planta circular de unos 20 metros de diámetro, prevista para sobrecargas de una cierta intensidad, al tratarse de un techo intermedio con uso público en la planta superior. El interés de los arquitectos en iluminar el espacio inferior cenitalmente y con una linterna circular centrada nos llevó a proponer la geometría básica de la rueda de bicicleta horitzontal, pero, esta vez, y para disponer de una adecuada protecció contra el fuego y un buen aislamiento acústico, acordamos hacerla con hormigón armado, entendiendo que la singularidad de su forma y la calidad visual y espacial que generaría merecían un tratamiento con hormigón visto. La rueda trabajaría en este caso a flexió, movilizand tensions de compresió en la parte superior —y unificand en este caso las dos familias de radios en una única familia de jàsseres de canto variable, que incidirían en un cilindro vertical central—, en tanto que la mitad inferior de estas jàsseres y del cilindro trabajarían a tracció. ♦

Robert Brufau
Traducido por Kico Reyes