



FUNDACIÓN
ESTEYCO

LA INGENIERÍA DE LA BICICLETA

PACO NAVARRO • JAVIER RUI-WAMBA • ALEX FERNÁNDEZ CAMPS
ORIOL ALTIENCH • CRISTINA GARCÍA BAÑUELOS
JORDI JULIÀ • MIGUEL ÁNGEL RUI-WAMBA MARTIJA



El mundo de la bicicleta siempre ha atraído a intelectuales, artistas, filósofos y poetas. O mejor aún, hace aflorar las facetas más sensibles de quienes se aproximan decididos a él. Sentir la bicicleta. Un artefacto lleno de racionalidad pero lleno de sutilezas que nos oculta su alma. Su flexibilidad y su robustez son conceptos difíciles de cuantificar y, en todo caso, imposibles de caracterizar en toda su complejidad. ¿Y quién siente la bicicleta? Las sutilezas de la bicicleta se manifiestan en cada uno de sus componentes y en el conjunto de todos ellos.

JAVIER RUI-WAMBA

FOTO PORTADA: Thomas Lukvist. Tour de California, 2009

Para la difusión y el progreso de la Ingeniería y la Arquitectura





En mayo de 1991 se constituyó la Fundación Esteyco
con la finalidad de contribuir al progreso
de la ingeniería y de la arquitectura en nuestro país.

La situación de precariedad e incertidumbre
en que se ha estado desenvolviendo la ingeniería española independiente
ha exigido hasta ahora actitudes básicamente de supervivencia.

El esfuerzo de un creciente colectivo de profesionales
y de órganos de la Administración
ha ido, sin embargo, consolidando un sector cuyos servicios
son considerados indispensables en una sociedad moderna y eficiente.

Es tiempo de pensar en el futuro,
confiando en que no tardará en hacerse presente.

Fomentemos, para ello, un clima propicio para la creatividad,
en el que se exija y se valore el trabajo bien hecho.

Contribuyamos a una sólida formación de los profesionales de la ingeniería,
conscientes de que las organizaciones valen lo que valen sus miembros
y de que en la ingeniería el valor de las personas
se mide por el nivel de sus conocimientos.

Alentemos mejores y más frecuentes colaboraciones interprofesionales,
eliminando fronteras innecesarias.

Reivindiquemos un espacio cualitativamente destacado de la ingeniería en la sociedad
e impulsemos la evolución de la imperante cultura del hacer
hacia la cultura del hacer pensando.

Consideremos las ingenierías como una prolongación de la Universidad,
en la que se consolida la formación de los jóvenes titulados,
en los años que serán decisivos para su futuro.

Sintámonos involucrados con la Universidad y centros de investigación.
Aseguremos la estabilidad y pervivencia de nuestras organizaciones
y establezcamos los medios para que su vitalidad, garantía de futuro,
no se encuentre lastrada.

Valoremos nuestra independencia, no como un arma contra nadie,
sino fundamentalmente como un atributo intelectual
 inherente a quienes tienen por oficio pensar,
 informar y decidir libremente.

Javier Rui-Wamba Martija
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Presidente de la Fundación Esteyco

LA INGENIERÍA DE LA BICICLETA

PACO NAVARRO • JAVIER RUI-WAMBA • ALEX FERNÁNDEZ CAMPS
ORIOL ALTISENCH • CRISTINA GARCÍA BAÑUELOS
JORDI JULIÀ • MIGUEL ÁNGEL RUI-WAMBA MARTIJA

© 2010 Fundación ESTEYCO

© 2010 Textos: Paco Navarro, Javier Rui-Wamba Martija, Alex Fernández Camps, Oriol Altisench, Jordi Julià, Cristina García Bañuelos, Miguel Ángel Rui-Wamba Martija.

© 2010 Fotos: Portada, Anita Ritenour. Los componentes de la bicicleta, Alex Fernández Camps. *Infraestructuras y Paisaje*: pp. 216, 218, 221, Oriol Altisench; pp. 212 b, 214, 219, 223, 224, 225, 227, Adventure Cycling Association; pp. 222, 228, Antxon Epelde; p. 224, Pau Catlla. *La bicicleta como medio de transporte urbano*, Jordi Julià.

© 2010 Dibujos: Andreu Estany, Ana Mª Fernández, Roger Besora, Fundación ESTEYCO.

Diseño Gráfico: Autores del libro y Pilar Carrizosa.

Coordinación Editorial: Pilar Carrizosa.

Fotocomposición, edición y artefinalización: Asociados & Cía

Fotomecánica e Impresión: Artes Gráficas Palermo

Editado por Fundación ESTEYCO. Menéndez Pidal, 17. 28036 Madrid

Impreso en España

ISBN: 978-84- 933553-5-7

D. L.: M-51.995-2010

1ª Edición: diciembre 2010

JAVIER RUI-WAMBA MARTIJA	PRESENTACIÓN	9
PACO NAVARRO	BIOGRAFÍA DE LA BICICLETA	13
JAVIER RUI-WAMBA MARTIJA	LA ESTRUCTURA DE LA BICICLETA	49
ALEX FERNÁNDEZ CAMPS	LOS COMPONENTES DE LA BICICLETA	175
ORIOL ALTISENCH	INFRAESTRUCTURAS Y PAISAJE	209
JORDI JULIÀ	LA BICICLETA COMO MEDIO DE TRANSPORTE URBANO	231
CRISTINA GARCÍA BAÑUELOS	BICIDIVERSIDAD	245
MIGUEL ÁNGEL RUI-WAMBA MARTIJA	UTOPIA MÓVIL. REFLEXIONES DE UN PEATÓN	269
	BREVES APUNTES BIOGRÁFICOS	274
	ÍNDICE GENERAL	277

La semilla de este libro, que tanto tiempo ha tardado en germinar, se sembró hace muchísimos años. En un terreno fértil, desde luego. Gernika, el pueblo en el que tuve el privilegio de nacer, en el que viví 7 años y al que siempre he sentido como mío, tiene, como todo el País Vasco, una especial relación con el ciclismo. En nuestra casa familiar, la bicicleta, siempre tuvo una presencia destacada. Y, ya en Bilbao, las apasionadas discusiones que tenían por protagonistas a Bahamontes y a Loroño, los ídolos de entonces, prolongaban con frecuencia almuerzos que parecían condimentados con la salsa del ciclismo.

Lo cierto es que aquellos entornos debieron contribuir a que teniendo yo, tal vez, quince años, utilizase la bicicleta para hacer el primer viaje de mi vida, desde Bilbao a Madrid. Un mes de julio, en periodo de vacaciones estivales, cinco o seis compañeros del Colegio de los Jesuitas de Indautxu, debidamente tutelados, recorrimos en 2 o 3 semanas más de 2.000 kilómetros por las precarias y poco transitadas carreteras de la época. Fue, también la primera de las innumerables veces que atravesé el desfiladero de Pancorbo. Burgos fue el final de la primera etapa y la segunda nos llevó hasta Valladolid, al día siguiente. En el Colegio en el que los Jesuitas nos dieron pan y cobijo, probé mi primer “gazpacho”, un insustancial caldo coloreado, que no quise volver a probar hasta que al cabo de muchos años me enamoré del auténtico. Desde Madrid bajamos luego hasta Murcia. Subimos después por la costa mediterránea hasta Tarragona, y desde allí, obviando Barcelona, nos dirigimos a Lérida. Camino de Zaragoza, padeciendo el viento tan habitual en el Valle del Ebro y un calor sofocante, cruzamos el triste y yesífero desierto de los Monegros. Días después, ya bastante justos de fuerzas, llegamos a nuestro acogedor Bilbao, concluyendo felizmente la aventura en la que nos habíamos embarcado.

Mi bicicleta de carreras, probablemente una BH, había sido un regalo de mi padre. El mejor que podría haberme hecho como premio por las buenas notas que había obtenido aquel curso, tal vez, el de quinto de bachillerato. Recuerdo muy bien que la elegimos juntos, en Ciclos Langarika, la tienda que tenía, si no recuerdo mal, aquel tenaz y querido corredor, de nombre Dalmacio, frente a la Iglesia de San José en la calle de Iparraguirre. Salí a la calle con la bici en mi mano, tratándola con tanto mimo que nada más montarla tuve que volver a la tienda para decírselas, preocupado, que el cambio de marchas no funcionaba. Supongo que me sonrojé cuando amablemente me explicaron que para conseguirlo tenía que dar vueltas a pedales. Lo que yo no me había atrevido a hacer por temor a estropear aquel objeto tantas veces soñado.

Fueron unos pocos años con muchas salidas en bicicleta por el entorno de Bilbao. Buscando unos días recorridos exigentes, que incluían, en ocasiones, la subida de Santo Domingo y disfrutando otros del plácido itinerario que discurría por la margen derecha de una Ría, abarrotada de industrias variopintas, hasta el punto que la carretera pasaba bajo alguna imponente embarcación que se construía en algún astillero que optimizaba así sus modestas pero eficientes instalaciones de ribera. Participé también en algunas de las competiciones ciclistas que, por las fiestas marianas de mayo, se organizaban en el Colegio por un circuito que daba vueltas alrededor de San Mamés, el campo del Atleti.

Pasamos algunos veranos familiares en Haro y allí gané las primeras cien pesetas de mi vida.

En las fiestas del pueblo, en las que se festejaba la vendimia, se celebraban exigentes competiciones ciclistas. Corré en una de ellas. Fueron más de 70 kilómetros. Y yo, muy probablemente, el más joven de los participantes. Quedé el anteúltimo, pero me concedieron el premio de veinte duros que habían asignado para el primero de los corredores del pueblo. Y a mí me consideraron uno de ellos. He traspapelado una preciosa foto, en blanco y negro, en la que se me veía, entre dos hileras nutridas de gente y la inevitable pareja de la Guardia Civil, soltándome un rastral cuando cruzaba la línea de meta.

Desplazarme a los 17 años a Madrid para estudiar Caminos me hizo renunciar en gran medida a la bicicleta, a la que, sin embargo, nunca le he dado la espalda del todo. Ahora, de vez en cuando, en Formentera, donde me escondo con frecuencia, utilizo la modesta híbrida que poseo para pasear por la isla y, de vez en cuando, demostrar que todavía soy capaz de subir a la Mola. Y en Queralbs, otro de mis refugios, utilizo también una sencilla bicicleta de montaña para “pujar” a Serrat y retornar a casa, con el corazón desbocado y la lengua fuera.

Con tales antecedentes, a nadie extrañará que cuando nos reunimos, con una antelación que nunca es suficiente, para decidir el tema del libro que editaríamos en la Fundación para estas Navidades, la bicicleta y su ingeniería fuese el escogido. Entonces comenzó una nueva época editorial, y ya son 18, para la que nos reunimos veteranos y nuevos protagonistas. Todos amantes de la bicicleta: Paco, Álex, Oriol, Jordi, Cris, y como asesores, Patricia, Pilar, Andreu, Carlos, Miguel Ángel, José, Mario y Jesús. Cuatro arquitectos y siete ingenieros de caminos, entre ellos, muchos de la casa. Todos amigos. Con Álex como relevante descubrimiento. Al final, se nos incorporó también mi hermano Miguel Ángel, “txirrindulari” que antes de hacerse santo y sabio, pecó montando una bicicleta, que quizás compartió conmigo y con la que compitió también en alguna ocasión.

Paco, al que es difícil verle sin su Brompton cerca, ha querido compartir con nosotros lo que sabía y lo que ha aprendido de la rica historia de la bicicleta. Quien no se encuentre con fuerzas para leer lo que yo he escrito podrá limitarse a ojear el texto y a leer el colofón que preludia el siguiente capítulo elaborado por Álex, que sabe de bicicletas, que las siente y que nos descubre la esencia de algunos de sus componentes. Oriol forma parte de la nutrida saga de ingenieros de caminos que adoran la bicicleta. Y que, con frecuencia, se trasladan a los Pirineos, a los Alpes o a los Dolomitas para escalar las montañas míticas del Tour o del Giro captando paisajes que ha querido compartir con nosotros. Jordi es un referente profesional en la ingeniería del transporte y sostiene, como tantos otros, que la bicicleta debería ser, cada vez más, un valioso instrumento al servicio de la movilidad. Cris, tras dar muchas pedaladas a su cerebro, entre tantas cosas que tenía para contarnos, se decidió por seleccionar textos que merecen la pena ser leídos y atractivas imágenes que no dejan indiferentes. Mi hermano Miguel Ángel, adorador de Spinoza y pensador muy viajado que sabe de ciudades, nos ha brindado, inesperadamente, el epílogo de un libro en cuyo formato y contenidos, Andreu, discretamente, como tantas veces, ha sido, como siempre, decisivo. Y que, a mí en concreto, me ha ayudado a pulir y dar coherencia a los croquis que yo había preparado para acompañar mi texto. Y, como siempre, Pilar se ha ocupado de la composición y de la edición de este nuevo libro que siendo de todos, es, como todos los que editamos, muy suyo también.

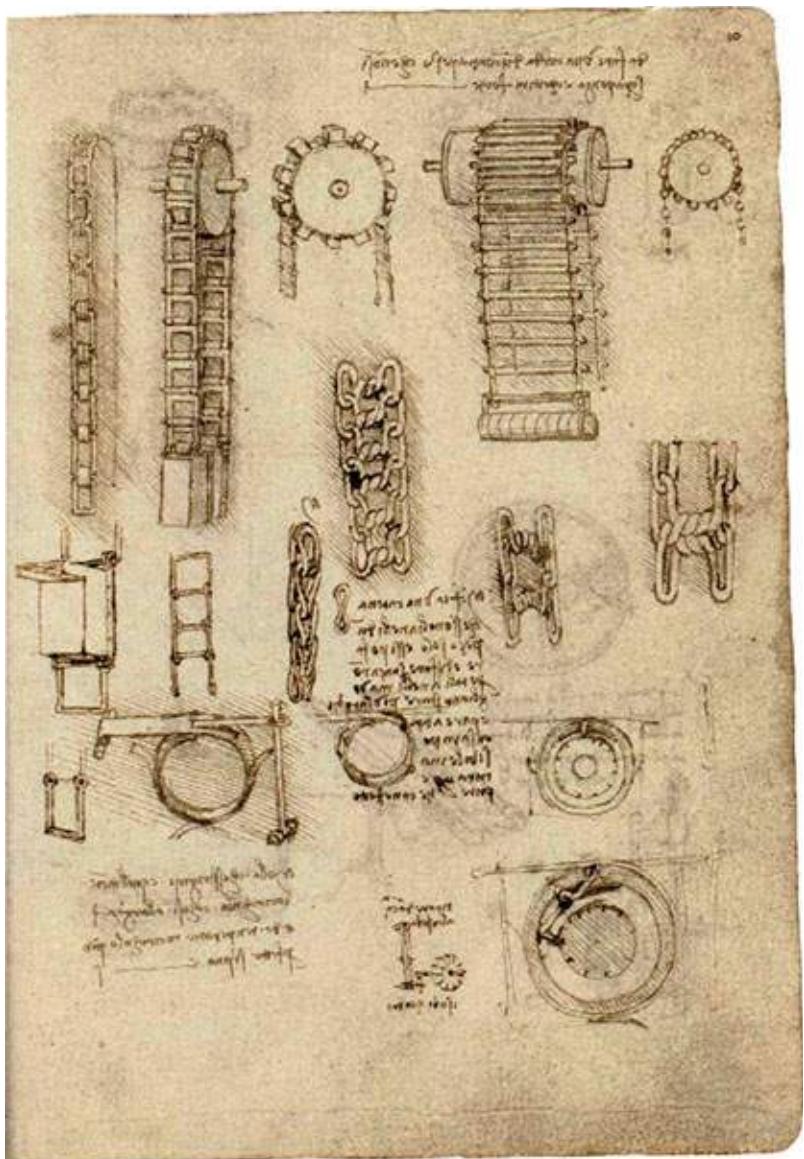
Para todos nosotros, a partir de ahora, este libro forma parte de nuestras biografías. Ninguno podíamos imaginar cómo podría resultar la aventura editorial en la que nos embarcamos, movidos por intuiciones más que por certezas. Lo que ha provocado titubeos inevitables, cambios de rumbo, relevos tan ciclistas y un intenso trabajo en equipo que ha hecho posible que lo hayamos podido publicar, casi milagrosamente, en la fecha que nos habíamos propuesto. Para ninguno de nosotros las bicicletas volverán a ser, a pesar de haber sido tanto, lo que habían sido antes de ahora. Las miraremos con idénticos ojos, pero veremos lo que estando tan a la vista no acabábamos de ver, aunque continuemos sin comprenderla del todo. Porque no hemos sido capaces de descubrir cuál es y dónde se esconde el alma de una bicicleta. Claro que tampoco ella sabe donde ocultamos la nuestra.

Muchos son los agradecimientos debidos. Comenzamos visitando Probike de la mano de su dueño y señor, Pere Cahué, amigo y paisano de Andreu. Nos aseguró que no conocía libro similar al que estábamos esbozando. En diversas ocasiones, algunas clandestinamente, visitamos su espléndida tienda y admiramos los conocimientos de la gente que trabaja junto a él. Fue también él quien nos habló de Álex que, incorporado al equipo, nos puso en contacto con la fábrica de Orbea en Ermua, donde había trabajado durante tres años. Allí, un grupo de nosotros, fuimos cálidamente acogidos por su Director General, Miguel Ocaña, y por Xavier Narvaiza. Hablando con ellos y visitando atentamente sus instalaciones, aprendimos muchas cosas y no solamente de bicicletas.

Más adelante descubrí, inesperadamente, que en el taller de la tienda que Orbea tiene, cerca de mi casa en Barcelona, podía encontrar a Sisquillo, un personaje entrañable y un mito del ciclismo, al que visité algunas veces y que me explicó, mientras trabajaba montando o reparando bicicletas, algunos de los conocimientos que atesoran quienes como él, han dedicado su vida a la bicicleta y han sido la gente de confianza de muchos ciclistas destacados. No le olvidaré, ni olvidaré tampoco al ayudante que trabajando a su lado sabía y se ocupaba de amortiguadores y suspensiones, componentes que suelen necesitar expertos de generaciones más jóvenes. Gracias, también a Diego, que gestiona la tienda y me facilitó estos encuentros. Y mi agradecimiento muy especial para Joaquín Martí, maestro y amigo, un pozo de sabiduría al que hice leer precipitadamente mi manuscrito. Gracias a él y a Jesús Iribarren, otro ingeniero sabio y bueno, el texto editado no tiene más errores que los que la precipitación y mi mala cabeza me han impedido controlar.

Pero si han sido muchas las satisfacciones que todos hemos tenido al preparar este libro, no son pocas las frustraciones que hemos acumulado. Porque no hemos tenido el tiempo necesario para reunirnos con mucha gente que sabe mucho más de lo que sabíamos y sabemos nosotros de bicicletas, ni hemos podido visitar las instalaciones en las que, en un entorno asequible para nosotros, se fabrican algunos de los cuadros y componentes que nos tienen maravillados. Será en la próxima reencarnación. Esta vez no ha sido posible. Habríamos llegado fuera de control al final de un recorrido que no sabíamos cual sería cuando lo iniciamos y que nos ha llevado a una meta que ojalá sea la que los lectores hubieseis deseado que fuera.

JAVIER RUI-WAMBA MARTIJA



I. PRIMEROS ANTECEDENTES HISTÓRICOS HASTA LEONARDO DA VINCI

Bicicleta: “vehículo de dos ruedas alineadas, unidas a una estructura dotada de mecanismos de dirección y de propulsión accionado por las piernas del ciclista”.

QUIÉN Y CUÁNDΟ SE INVENTÓ LA BICICLETA

La historia nos aporta indicios poco fiables sobre esta cuestión, ya que si bien se conoce con precisión y claridad el origen y la evolución de la bicicleta moderna que podríamos situar, como veremos en breve, hacia principios del siglo XIX. La información y estudios disponibles sobre este tema no nos aclararan mucho sobre la existencia de la bicicleta en épocas anteriores. Podemos afirmar que la bicicleta moderna, la ideó, construyó y difundió un alemán, el barón Drais von Sauerbronn y desde ese momento la bicicleta vino para quedarse, ya que desde 1817, año del primer prototipo construido, hasta nuestros días, esa bicicleta primigenia, ha ido evolucionando ininterrumpidamente al compás de los avances tecnológicos y de las necesidades sociales que han demandado su uso.

Para saber si existieron otras bicicletas anteriores a la del Barón o artefactos similares, no queda más remedio que indagar en la historia de las primeras civilizaciones, centrándonos en dos ideas: 1. La cultura tecnológica y 2. Ver si existía interés de auto-propulsarse de forma más rápida y eficiente que caminando.

De la civilización egipcia no se dispone de datos fiables para afirmar o desmentir su existencia. En algunos grabados aparecen figuras humanas al lado de una rueda con una barra como único indicio. Desde el punto de vista tecnológico, los egipcios podían haber construido algún artefacto semejante a una bicicleta, ya que el dominio del uso de la rueda y de algunos metales así como de madera y telas, etc. fue llevado hasta un nivel altísimo. Pensemos que los carros de combate del periodo (1800-1550 a.C.) y en particular los empleados en la conquista de Manetón, estaban construidos con una perfección tecnológica espectacular. Esta fina máquina de guerra, era mucho más que el carro frágil que aparenta ser a primera vista. Según estudios recientes, la relación entre empuje y diámetro de las ruedas es prácticamente igual a los valores que manejan actualmente los ingenieros que diseñan los sulkys de competición. La precisión en los puntos de rozamiento de los cojinetes de los carros egipcios era de 3 g/mm, cifra más que aceptable incluso para estándares mecánicos modernos.

La relación de materiales necesarios para la construcción de los carros –no siempre disponibles en Egipto, era bastante extensa. A modo de ejemplo, el eje del carro y los radios de las ruedas –en general, cuatro, seis u ocho– estaban elaborados de madera de roble, las ruedas de olmo forradas de cuero, cubos de bronce o cobre, vara de olmo, caja de sicomoro o fresno, el piso de tiras de cuero, los tendones de abedul, todo ello correspondía a el modelo “cananeo” tirado por dos caballos y peso aproximada de 35 kg muy liviano. Por tanto, un artilugio de peso, dimensiones y filosofía tecnológica de materiales perfectamente aplicable a lo que pudiera haber sido un primigenio vehículo tipo bicicleta, aunque como hemos dicho, no se tiene ninguna constancia documental de su invención.

Tampoco sabemos nada sobre la segunda idea, es decir sobre la existencia del interés de “auto-transportarse sobre ruedas. Los egipcios heredaron de las últimas culturas asiáticas el arte de domesticar a los caballos y por eso es poco probable que tuvieran una necesidad social que justificase el uso de una máquina impulsada por fuerza muscular, a no ser que fuese una carretilla de transporte impulsada caminando.

De la civilización China, nos llegan de la dinastía Song (1085-1145 a.C.), ilustraciones de una carretilla de una rueda de madera tirada por una persona y con una caja de carga centrada sobre la rueda que era utilizada por un general del ejército imperial chino. Su finalidad consistía en transportar grandes cantidades de pertrechos militares por senderos angostos, y por ello la ideó con una sola y gran rueda de 1,2 m de diámetro y 12 radios para que el centro de gravedad cayera justo sobre el eje y pudiera circular por senderos con notables irregularidades. Al parecer este diseño nació de la evolución de la carretilla de dos ruedas para transportar arroz.

Lo cierto es que se trataba de un diseño muy ingenioso ya que presuponía un gran conocimiento de la rueda de gran diámetro, de su capacidad extra para superar pequeños accidentes, de equilibrio y balanceo por la acción de la fuerza centrífuga, conceptos más cercanos al concepto cinético de bicicleta. También como en el caso de los egipcios, nada o poco sabemos acerca de la necesidad de auto transportarse.

En el Imperio Romano el uso de carros y carretillas tanto para uso militar como civil está más que documentado; sin embargo se incorpora un elemento nuevo del cual no se tiene constancia en civilizaciones pasadas, como es la existencia del juguete con ruedas.

El juguete infantil imita la acción de un adulto. Existían, por tanto, caballitos de juguete que para reproducir el movimiento del caballo se balanceaban o incluso se deslizaban con pequeñas ruedas.

En sarcófago del s. II d.C. conservado en el Museo Nazionale de Roma, se pude ver con claridad a un niño tratando de andar con una especie de patinete. Es decir, que muy posiblemente la primera necesidad social de montarse e impulsarse en un cacharro sobre ruedas, no viene de la búsqueda de mejorar la eficiencia de la acción de andar, sino que vino de la



Carro de combate egipcio tipo cananeo (1800 a.C.-1550 a.C.) tirado por dos caballos. Podía transportar dos arqueros. Construido con maderas diversas, cuero y bronce, tan solo pesaba 35 kg.



Carretilla china dotada de rueda de gran diámetro, para transitar por todo tipo de caminos. La carga se encuentra dispuesta simétricamente a cada lado de la rueda y coincide con el eje, a fin de permitir la necesaria maniobrabilidad.



Sarcófago del siglo II dC. donde aparece un artílugo con ruedas accionado, a modo de andador por un niño. (Museo Nazionale de Roma).

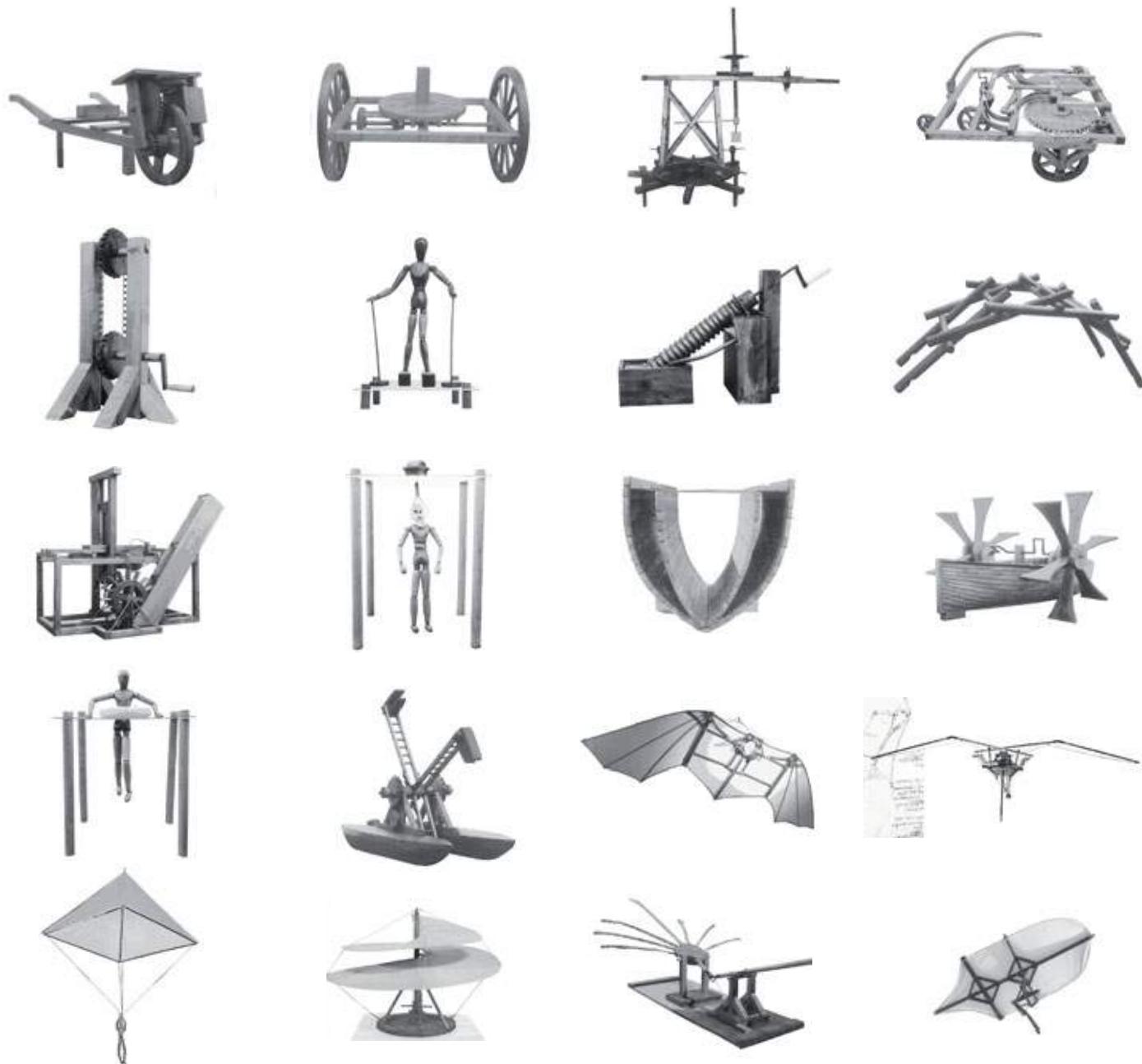
de imitar el movimiento del caballo al galope con una tecnología constructiva más sencilla, la rueda. Por otro lado estos juguetes servían para enseñar a andar y mejorar la motricidad de los pequeños de la casa.

En cualquier caso si existió alguna bicicleta o algo parecido en épocas de los egipcios, chinos o romanos, hoy por hoy, no podemos saberlo. Por otro lado, sí se tiene constancia que algunos inventos, como el carro y la carretilla, surgieron en diferentes momentos y lugares sin ningún tipo de conexión y siguieron evoluciones diferentes. Si bien, al final, el proceso de perfeccionamiento de todo diseño lleva en general a todo el mundo a usar soluciones semejantes para resolver los mismos problemas.

En este breve repaso por la historia, merece la pena hacer una referencia un poco más detallada de un periodo histórico no tan remoto, que es el Renacimiento Italiano, y más concretamente de la figura de Leonardo da Vinci (1452-1519). Ello se justifica por dos motivos: el primero, la enorme contribución ideológica del humanismo personificada en la obra y legado de Leonardo, aspectos como la búsqueda de la educación global del ser humano, la formación simultánea de la mente, las emociones y el cuerpo “mens sana in corpore sano”, valiéndose de la interpretación y relectura del clasicismo, la filosofía, el arte, la ética y el estudio de la naturaleza; el segundo, el gran nivel tecnológico alcanzado en la época en lo que se refiere a la ingeniería de las máquinas.

Leonardo, arquitecto del humanismo, era una persona con un gran sentido del humor y gozaba de una gran sensibilidad para la música: no solo interpretaba, sino que inventaba instrumentos. Sentía pasión por el arte. Su anhelo por aprender no tenía límites, jamás se detuvo ante ningún ámbito del conocimiento, su capacidad de reflexión era realmente sorprendente y su observación de la naturaleza junto con su gran capacidad de invención e ingenio, llegó a tal extremo que fue capaz de idear aparatos que solo se han hecho realidad en el siglo XX. Persona autodidacta y polifacética. Muchas de esas máquinas pretendían el mismo objetivo, multiplicar y mejorar la capacidad del hombre frente a problemas cotidianos, tanto del ámbito civil como militar. De la ingente cantidad de inventos nos interesan los que tienen que ver con la conquista del medio, pues la bicicleta no es más que un artilugio para mejorar la capacidad de moverse del hombre.

Leonardo se puso a inventar máquinas para el vuelo, con la idea de que algún día el hombre podría dominar el aire. Dibujó el planeador, la máquina volante, el paracaídas, el tornillo aéreo, el ala delta y el ala batiente. También se ocupó de un medio tan hostil como el agua. Ideó sistemas para bombar, el tornillo de Arquímedes, la sierra hidráulica, la embarcación de doble casco, el barco de pedales y la draga, manera de caminar por el agua, el buzo y el salvavidas. Y en tierra ideó multitud de maquinaria civil y militar desde puentes desmontables hasta grúas de todo tipo.



No es de extrañar, por tanto, que también Leonardo se preocupara de mejorar las prestaciones del transporte terrestre. Ideó el odómetro, utensilio para medir con precisión la longitud de un itinerario. El dispositivo diferencial de los carros, y como no, un carro autopropulsado por fuerza de ballesta, considerado el antecesor directo del automóvil. Por otro lado, todas estas máquinas estaban resueltas con mecanismos de transmisión más o menos sencillos. Leonardo conocía a la perfección el funcionamiento de la mayoría de ellos, entre los que están la transformación del movimiento alterno en continuo, la prensa, el reloj, el gato de cremallera, el cabestrante, el tornillo, el martillo de leva, los cojinetes y la cadena prácticamente como la conocemos hoy en día. Es la primera vez que se tiene constancia histórica de un ingeniero que suma dos aspectos fundamentales para la conceptualización de la bicicleta. El primero es el interés manifiesto, el anhelo por mejorar la eficiencia en el desplazamiento terrestre del hombre, al igual que hizo con el hombre que andaba sobre el agua; el hombre que caía en paracaídas o el hombre que buceaba bajo el agua, en definitiva la idea de máquina-hombre para dominar el medio. La necesidad estaba creada, el uso estaba inventado y solo faltaba el segundo aspecto: el nivel tecnológico suficiente para idear y construir el vehículo de dos ruedas. El nivel tecnológico demostrado por Leonardo —que le permitió incluso idear un robot mecánico alojado en el interior de un león gigantesco—, evidentemente, tenía que ser suficiente para conceptualizar e incluso construir la bicicleta o un vehículo equivalente.

Sin embargo, en toda la documentación del legado de Leonardo de la que se dispone, básicamente el “Códice Atlántico” custodiado en la Biblioteca Ambrosiana de Milán, en principio no aparece ninguna bicicleta ni nada que se le parezca.

Tuvo que ser en 1966 cuando por azar, unos monjes que estaban llevando a cabo trabajos de rehabilitación del “Códice Atlántico” original, descubrieron con asombro, que dos páginas estaban pegadas para añadir un dibujo. Resulta que al despegar las dos páginas apareció el dibujo de una bicicleta, como se aprecia en la imagen. Se trata de una bicicleta de madera con dos ruedas iguales y tracción por cadena muy similar a las actuales. Han pasado casi cuatro siglos del dibujo, que no tiene el nivel de detalle del resto de propuestas de Leonardo y que según la Tesis de Augusto Marinoni tenía que ser de un discípulo suyo llamado “Salai”; al menos así aparece en el dibujo original.

La transmisión de cadena con ruedas dentadas cúbicas, viene del diseño vinciano del Códice de Madrid LF10. Si comparamos el dibujo de Salai con los de Leonardo, es evidente a primera vista que se trata de un primer encaje. Evidentemente, si existió o no el dibujo definitivo completamente acabado con un nivel de detalle equivalente al de otras propuestas de Leonardo no podemos saberlo; aunque la posibilidad de que así fuera es por lo menos bastante razonable. Entre otras cosas porque se conoce bastante bien el recorrido histórico, de los sucesivos cambios de propietarios del “Códice Atlántico” desde que se escribió hasta nuestros días. Cambios en los que estudiosos de la talla de Carlo Starnazzi han podido probar y documentar la pérdida de parte de legado que nos dejó Leonardo.

(en página anterior, de izquierda a derecha y de arriba abajo)

Odómetro. Artilugio para medir con enorme precisión, longitudes de caminos. Mecanismo diferencial para carros. Grúa giratoria. Vehículo autopropulsado, para uso en representaciones teatrales. Cadena de transmisión. Manera de caminar sobre el agua. Tornillo de Arquímedes, para elevar agua. Puente militar desmontable. Sierra hidráulica. Buzo. Barco de doble casco. Barco propulsado a palas. Salvavidas. Draga. Planeador. Máquina volante. Paracaídas. Tornillo aéreo. Ala batiente. Ala delta.

En cualquier caso ese boceto de bicicleta, que en el primer intento, ya se parecía asombrosamente a las bicicletas modernas, por alguna causa no salió a la luz, o si lo hizo, no tuvo ninguna influencia en la historia y posterior desarrollo de la bicicleta. Aquella valiosa información quedó oculta y, por tanto, nadie pudo aprovecharse de ella. Para redefinir la bicicleta hubo que esperar hasta finales del siglo XVIII, es decir, unos trescientos años, a que otras personas con inquietudes similares y en un contexto favorable se lanzasen a tan apasionante reto.

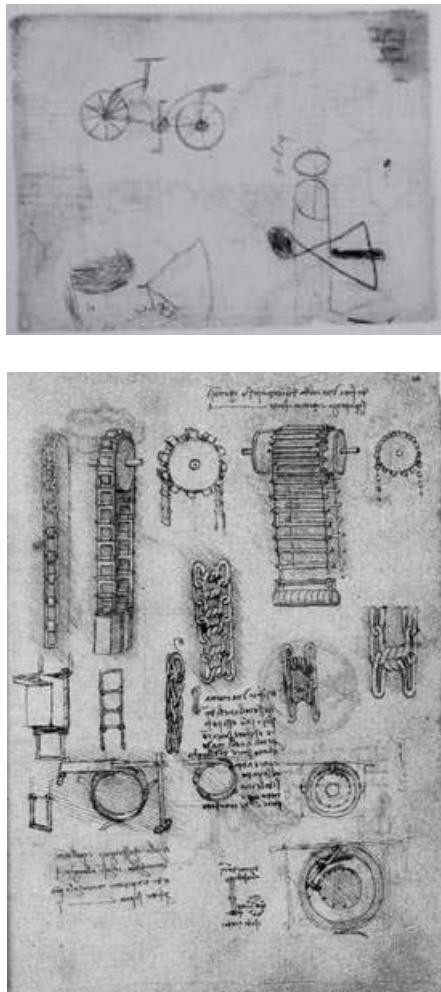
De todos modos, estudios recientes llevados a cabo por una nutrida representación de investigadores especializados en la obra de Leonardo, dudan de la autenticidad del dibujo de la famosa bicicleta. El contenido, y la cronología de dichas investigaciones, sería la siguiente: En 1960 los monjes de la abadía de Grottaferrata en Roma, reciben el encargo del Vaticano de restaurar el *Codice Atlantico*, depositado por Pompeo Leoni a finales del siglo XVI en la Biblioteca Ambrosiana de Milán. El grueso de la restauración se hizo entre 1966 y 1974. Los trabajos estuvieron dirigidos por el historiador Augusto Marinoni, que fue quien difundió, en abril de 1974, desde Vinci, la primicia de que el verdadero inventor de la bicicleta no fue el alemán Karl von Drais, sino Leonardo da Vinci.

Marinoni, sustentó dicha afirmación en el descubrimiento del dibujo de una bicicleta hecho en la parte de atrás de una hoja, que se encontraba pegada a otra y que por tanto había quedado oculta precisamente hasta que los restauradores lo descubrieron.

Efectivamente, en las hojas 132 y 133 del *Codice*, aparecen en el reverso de unos dibujos de fortificaciones militares, y superpuesto a unos grafitis obscenos, lo que sería el boceto de una bicicleta, con ruedas iguales, proporciones muy similares a la bicicleta moderna, impulsada por pedales y dotada de transmisión a cadena, así mismo, en el dibujo se deduce que la dirección no estaba resuelta.

Casualmente en 1967, Jules Piccus, profesor de lenguas romances en Massachusetts, descubre en la Biblioteca Nacional de Madrid dibujos atribuibles a Leonardo, en que con toda claridad, aparecen descripciones muy detalladas de cadenas de transmisión articuladas, que aparecen repetidamente dibujadas formando parte de todo tipo de artíluguos. Sin embargo las primeras sospechas salieron a la luz de la mano de Carlo Pedretti, historiador del arte de UCLA, que en 1961 tuvo acceso al documento original del *Codice Atlantico*, y en un examen exhaustivo no vio ningún dibujo de bicicleta, y en particular en las hojas 132 y 133 al trasluz, solo identificó dos circunferencias y unos trazos inconclusos sobre ellas. Desde aquel momento muchos investigadores se preocuparon por el tema, poniendo en duda la tesis de la autoría de la bicicleta de Leonardo defendida por Augusto Marinoni.

Uno de esos investigadores fue Paolo Galluzzi, director del Museo de la Ciencia de Florencia. Galluzzi, pudo acceder al resultado de una analítica de la tinta utilizada, que concluía que se utilizaron dos tipos, una negra y otra marrón que eran posteriores a 1880 y 1920



Reproducción de f.133v. del “Códice Atlántico”, en la que aparece, junto a dibujos obscenos, el boceto de la bicicleta.

Reproducción de la f.10 r. (detalle) del “Códice de Madrid”, en la que aparece descrita de forma detallada, la cadena de transmisión.

respectivamente. Sin embargo, el informe desapareció misteriosamente y la lámina en cuestión no estuvo disponible para su examen y estudio.

En 1974 el editor Ladislao Reti fue el responsable de la edición del trabajo “El Leonardo desconocido”, pero muere ese mismo año, y el encargado de concluir los trabajos es el mismo Augusto Marinoni, que naturalmente incluye el invento de la bicicleta atribuido a Leonardo, y lo expone en el Apéndice del Volumen 2.

La fecha de la muerte de Reti podría explicar el decalaje de unos cinco años entre el supuesto descubrimiento del dibujo de la bicicleta y su difusión mundial. En principio parece raro ocultar durante esos años un descubrimiento de tanta relevancia.

La hipótesis de que antes de 1961, alguien hiciera el dibujo fraudulentamente es muy poco probable, dado que el documento, tal como se ha dicho, permaneció custodiado en la Biblioteca Ambrosiana sin interrupción, desde que Pompeo Leoni lo entregó a finales del siglo XVI, es decir unos 350 años. La hipótesis más plausible, por tanto, sería que alguien cometiera el fraude en el periodo en el que el documento viajó de Milán a Roma para su restauración, sobre todo después de comprobarse que el documento se envió por partes y en diferentes fechas. Carlo Pedretti, uno de los pocos investigadores testigo de algunas de las fases de restauración, afirmó en su día que la “profesionalidad” de los monjes, en materia de restauración fue muy limitada, ya que se siguieron metodologías y procedimientos a científicos, e incluso se echaron a perder algunos dibujos fruto de errores infantiles en el empleo de reactivos químicos. La posibilidad y la tentación de que alguien “completara” los dos círculos de Leonardo en forma de la consabida bicicleta como mínimo eran considerables.

El escritor Robert Penn, autor del libro “It’s all about the bike”, cuando nos explica su opinión sobre el asunto, relata de una forma novelada una de esas posibilidades.

“Un día de 1972 un monje, a solas con el documento, ve al trasluz los dos círculos con unas rayas en la página 132 y 133 del Códice, después de observar detenidamente imagina, que lo que está viendo, es parte de una bicicleta, cuyo cuadro y componentes esenciales no se aprecian por estar el dibujo emborroneado en la parte posterior de la hoja, y superpuesto a otros. Se va pensando: “Oh milagro!, tal vez he hecho un descubrimiento, la bici es de Leonardo”. Rápidamente lo comparte con el Abad. Inmediatamente despegan las dos hojas, y no hay bicicleta ninguna, la decepción es enorme, casi tan grande como que en los tres últimos Giros de Italia ningún italiano los ha ganado, ni el Tour de Francia en siete años. En 1972 los tifosi estaban profundamente deprimidos pues todo lo ganaba Merckx. Nuestro monje abatido piensa en el gran constructor italiano de cuadros de bicicleta Faliero Masi “el sastre”. Y comienza a garabatear. Después se le aparece la cara de Cino Cinelli y dibuja un manillar, es como llenar espacios en blanco. Se autoconvence de que la bicicleta sólo puede ser de Leonardo, añade manivelas pedales cadena. El logotipo de Campagnolo revolotea en su mente.

Que importa, todo el mundo sabe que la bicicleta es italiana, es tan italiana como la cúpula de San Pedro. Suena una campana, es la hora del almuerzo, “¡cuidado! hay que volver a pegar las hojas.”

Hoy sabemos que la bicicleta es uno de los inventos más importantes de la humanidad, como la imprenta, el motor eléctrico, el teléfono y la penicilina. En la última década del siglo XIX, en plena revolución industrial, la bicicleta pasó de ser un pasatiempo para ricos a convertirse en la forma más popular de transporte en el mundo, dinamizó la moral y los modales en la sociedad de manera vertiginosa, tuvo una gran influencia en la emancipación de la mujer, contribuyó a la igualdad de género, y aportó mayores cotas de libertad para todos. Fue considerada el “utilitario del pueblo”; ir a trabajar en bicicleta, salir el fin de semana al campo, fue un catalizador social de primer orden, pues facilitó de gran manera la movilidad en las ciudades posibilitando el asociacionismo de todo tipo, clubes, gimnasios, coros, bibliotecas, y un largo etc.

En 1895, 200 empresas se dedicaban a la fabricación de bicicletas, 3.000 modelos para elegir. En Inglaterra se construyeron 800.000 bicicletas en un año, a un coste del salario de varias semanas. En los EE.UU. se construyeron 1,2 millones de bicicletas en 300 empresas, convirtiéndose en una de las industrias más importantes del país. Victor Hugo dijo de ella:

“Una invasión de un ejército puede ser resistida, pero no una idea cuyo tiempo ha llegado, el evangelio de la rueda, ¿Cómo algo tan simple, había podido quedar oculto tanto tiempo?”

En 1972 en plena crisis del petróleo, la bicicleta recuperó un protagonismo perdido en favor del automóvil, los países más desarrollados empezaron a preocuparse de manera incipiente por los temas medioambientales, el deporte, la salud, y el ocio. Los eventos deportivos como el Tour, el Giro y la Vuelta, copaban, gracias a las retransmisiones de TV, la atención de un gran número de seguidores. Los, Rafa Nadal, Pau Gasol, Iniesta de hoy, eran en la década de los 70, ciclistas. Eddy Merckx, en 1974 consiguió con autoridad vencer en el Tour, en el Giro y en el campeonato del mundo de carretera, algo nunca visto hasta ese momento.

El subconsciente de nuestro monje de Grottaferrata influido por todo esto quizás le llevó a hacer ganador a Leonardo da Vinci en la carrera de la autoría de la bicicleta. Autoría que se reparten alemanes, franceses, e ingleses como más adelante veremos.

En la octava Conferencia Internacional de Historia del Ciclismo de agosto de 1997, Hans-Erhard Lessing, historiador del transporte de la Universidad de Ulm, presenta una ponencia en la que sostiene que el dibujo de la bicicleta de Leonardo es falso, basándose en todos los indicios ya comentados, aunque no facilitó pruebas concluyentes. Augusto Marinoni, supuesto conocedor de la historia real, no confesó nada relevante ni en un sentido ni en otro, y murió ese mismo año.

Marco Taddei es miembro del Centro de Investigación “Leonardo 3” de Milán, institución de reciente creación que se dedica a la investigación y difusión de la obra del genio. En su corto recorrido, pero con la aplicación de las últimas tecnologías en materia de análisis y restauración llevada a cabo por un equipo pluridisciplinar, ha aportado una nueva visión sobre el tema.

Taddei sostiene que muchas de las propuestas de Leonardo están repetidas en otros documentos con diferentes grados de desarrollo, y muchos elementos de un mismo artilugio se repiten en otras propuestas. Ello significa que cada “invento” de Leonardo aparece siempre en varias versiones, algunas de las cuales, no todas, son a su vez copias o están inspiradas en artilugios existentes. Taddei mantiene la teoría de que, en realidad, Leonardo lo que hace es una labor de perfeccionamiento, de descripción minuciosa detallada y analítica de todos los elementos de una máquina desde la disciplina del dibujo. En definitiva es capaz de, en un ejercicio supremo de imaginación, convertir una idea en una máquina, de la cual en teoría, se puede comprender su funcionamiento y entender sus partes. Por ello, algunas de las propuestas han sido construidas en tres dimensiones por los investigadores de “Leonardo 3” y han funcionado; en cambio otras no lo han hecho, y no por falta de solvencia técnica, o falta de descripción, sino por fallos en el dimensionado de las fuerzas necesarias para mover tal maquina, como por ejemplo el hombre volador. Según Taddei, la bicicleta no es de Leonardo, ni siquiera de sus discípulos; en primer lugar, porque no aparece nunca antes ni por separado, ni formando parte de ninguna otra máquina, como ocurre con la mayoría de ellas. El dibujo no es del estilo de Leonardo, que además tenía por costumbre dibujar con una punta de acero sobre el papel a modo de bosquejo invisible, para luego repasar y completar los dibujos. El tipo de tinta bicolor con la que está hecha la bicicleta nunca fue utilizada por Leonardo.

Las técnicas actuales permiten hoy en día visualizar estos dibujos “en blanco”, que hasta ahora han permanecido ocultos, pues toda la información disponible del legado de Leonardo se encontraba en soporte fotográfico. Esta técnica está permitiendo redescubrir el legado del genio. Hasta hoy no hemos sabido que uno de sus proyectos estrella fue un león-robot.

La reinterpretación de los dibujos no ha hecho más que empezar, hoy ya sabemos que algunos de los trabajos atribuidos a Leonardo sin ningún tipo de duda, en realidad no lo son. El dibujo de la bicicleta, en particular, es uno de ellos: no tiene más de 100 años.

II. NACIMIENTO Y DESARROLLO DE LA BICICLETA MODERNA, 1790 - 2010

EL “CELERÍFERO” O CABALLO DE DOS RUEDAS, 1790

El estado de las comunicaciones terrestres en Centro Europa a finales del siglo XVIII y principios del XIX era muy precario a consecuencia del período de declive iniciado tras la Edad Media. La red, muy anticuada y deficiente, estaba constituida por antiguos y tradicionales caminos heredados de un pasado decadente. Muchas de las comunicaciones carecían de cualquier tipo de mantenimiento. Eran caminos enfangados en época de lluvia y polvorrientos en las épocas secas. Esta situación en la red de comunicaciones terrestres tuvo una influencia muy negativa en los sistemas de transporte que se basaban en el caballo -para itinerarios de largo recorrido- o en carros tirados por bueyes -para el corto recorrido-. A su vez, los carros estropeaban aún más los caminos con sus ruedas y pesadas mercancías, ya que la inmensa mayoría de caminos estaban construidos con firmes de tierra.

Las primeras mejoras fueron iniciadas por los monarcas franceses a lo largo del s. XVIII que impulsaron una cierta reforma de las comunicaciones adoquinando algunos caminos principales al objeto de facilitar la movilidad de carros ligeros. La incipiente mejora de las comunicaciones tuvo una tímida influencia positiva en el transporte y se inició una cierta afición a los viajes por parte de una minoría. Las mejoras más significativas vinieron a partir del s. XIX, gracias a Napoleón, que dotó a Europa de una cierta red de caminos para trasladar a sus tropas rápidamente de un punto a otro. De todas formas, salvo cerca de las grandes ciudades, la inmensa mayoría de ellos estaban sin impedir.

Las primeras experiencias relacionadas con el mundo de la bicicleta de que se tiene constancia, aparecieron en Francia en plena Revolución. Algunas personas empezaron a experimentar con una especie de juego consistente en deslizarse por una pendiente sobre dos ruedas: el artefacto se llamó “celerífero”.

El celerífero consistía en un bastidor de madera, en general en forma de cuerpo de caballo u otro animal, en cuyas patas delanteras y traseras giraban dos ruedas de madera de unos 70 cm de diámetro. Se conducía sentado sobre un asiento dispuesto en el bastidor, provisto de dos asideros para las manos. El vehículo era accionado por el apoyo y empuje alternativo de los pies sobre el suelo, y para cambiar de dirección había que parar o golpear violentamente con el puño la cabeza del caballo.

Es el predecesor directo de la bicicleta, pero el celerífero no era una bicicleta puesto que carecía de dirección y de mecanismo de tracción. Era una máquina para realizar pequeños desplazamientos, bajar alguna pendiente o pasear por el parque.

Fue construido por el conde francés Mede de Sivrac en 1790 y fue adoptado por la nobleza y las clases altas como juego. Se trataba de un juguete y una diversión de ricos. Por tanto, el celerífero nació como un modo de transporte en sí, sino como un juguete de mayores. Con



CELERÍFERO

Conde Mede de Sivrac, Francia, 1791.

CONECCIÓN	DOS RUEDAS ALINEADAS UNIDAS A UN BASTIDOR CENTRAL	
USO	Juguete, un juguete para mayores	
MATERIALES	cuadro y ruedas de madera	
DIMENSIONES	total 175 cm, ruedas de 70 cm.	
PESO	40 kg (pesada)	
FABRICACIÓN	artesanal	
	ERGONOMIA/BIOMEÁTRICA (BICICLETA)	DISEÑO INDUSTRIAL (MÁQUINA)
PUESTO DE CONDUCCIÓN	posición erguida apoyo estable caderas y brazos visión alta y frontal	asiento estrecho de madera $h=70$ cm asidero de manos
DIRECCIÓN	a golpes de puño en el extremo del bastidor o parando.	no
PROPULSIÓN	por piernas arrastrando o corriendo	no
FRENO	con los pies	no
AMORTIGUACIÓN	parcial, piernas y brazos	no

● Correcto ● Medio ● Deficiente

anterioridad existían juguetes para niños accionados con ruedas para facilitar el desplazamiento, en realidad representaban animales de madera dotados de movimiento incipiente de imitación. Esta necesidad de movimiento, desde el punto de vista tecnológico, sólo se podía resolver de forma fácil con el concurso de la rueda, por tanto el binomio de artefacto para desplazarse y rueda, empezó a tomar cuerpo, desde aquel momento hasta nuestros días.



LA “DRAISIANA”, “LAUFMASCHINE” O MAQUINA DE CORRER, 1817

Al margen del interés por las maquinas y el dominio del medio –tierra, agua, aire– expresado con toda claridad en los documentos del “Codice Atlantico” de Leonardo da Vinci, no es hasta 1696, año en el que aparece un tratado llamado “Recreaciones Matemáticas y Físicas” del francés Jaques Ozanam, cuando vuelven a aparecer propuestas y diseños concretos de “carros propulsados por tracción muscular”. Es decir, que el incipiente interés por los vehículos de propulsión humana no nace hasta finales del s. XVII. Surgen multitud de diseños de artefactos de cuatro ruedas movidos por tracción humana que no llegan a cuajar, entre otras cosas porque el punto de partida era el carroaje, es decir, un artefacto demasiado pesado y grande como para ser movido eficientemente por las piernas de un hombre.

En 1817, unos 120 años después de la publicación del tratado de Jaques Ozanam, es cuando el barón alemán de Karlsruhe, Drais von Saverbronn, ingeniero agrónomo forestal (1785-1851), después de varios intentos fallidos de vehículos de cuatro ruedas, cambia completamente la filosofía de estos diseños y se pone a trabajar en una idea que a la postre será determinante para la historia de la bicicleta. En lugar de intentar mover con palancas y transmisiones las ruedas de un pesado carro, lo cual no parecía tener muchas ventajas en relación a las prestaciones que ofrecían los caballos, el barón tal vez intuyó que el movimiento más efectivo y práctico que el hombre podía ejercer para auto-transportarse, era hacer el mismo que los caballos; es decir, correr, pero no correr de cualquier manera, sino correr asistido por una máquina con dos ruedas. La idea era mejorar el rendimiento de la zancada



Recreación ambientada en la época, de un soldado uniformado conduciendo una draisiana.

humana con la participación de la rueda que conseguía, por un lado alargar el recorrido del impulso y por otro ofrecer un cómodo punto de apoyo del corredor entre el intervalo de cada zancada. Aplicó el principio de que en el gesto de caminar o correr, se pierde energía subiendo y bajando el centro de gravedad al cuerpo; sin embargo con una máquina de ruedas esto no ocurre ya que el “corredor” va sentado a una altura constante, por lo que el barón intuía que se solucionaba con menor esfuerzo la propulsión, consiguiendo así un movimiento más rápido que corriendo a pie, ejerciendo la misma fuerza. En la práctica el barón vió que cuesta arriba conseguía una velocidad equiparable a la de un hombre caminando a paso ligero. En llano conseguía una velocidad similar a la de un carro y cuesta abajo, ligeramente más rápido que un caballo al galope.

Había inventado la “laufmaschine” –máquina de correr a pie o “draisiana” y dos fueron las ideas clave: la primera, la ocurrencia de poner una rueda delante de la otra unidas por un bastidor a una distancia de una zancada, que obviamente es la distancia para conseguir la estabilidad equivalente a una persona que corre. La segunda, la concepción simétrica del artefacto para que se adaptara a la ergonomía del corredor y al ciclo del movimiento de impulso alternativo con ruedas de 70 cm de diámetro, que es la altura sobre el suelo del corredor sentado. La “draisiana” parada tenía 4 puntos de apoyo: dos pies, dos ruedas. Y, en movimiento 2/3 puntos: dos ruedas y un pie alternativamente. La fase de salto entre zancadas que se da en el corredor, en el caso de esta bicicleta, lo ofrecían las dos ruedas con el avance como respuesta al impulso de la zancada inmediatamente anterior. Durante este recorrido, de varios metros era del todo imprescindible mantener el equilibrio, ese equilibrio solo podía conseguirse variando adecuadamente la dirección de las ruedas para compensar las acciones de fuerzas desequilibrantes.

La necesidad de este mecanismo surge directamente de la experiencia de correr con esta bicicleta, puesto que es imposible progresar montado en ella a no ser que se utilicen las zancadas además de para progresar, para “corregir” los desequilibrios laterales que inevitablemente aparecían. Esta forma de conducción le debió parecer al barón inadmisible puesto que las ventajas iniciales conseguidas por el aumento de la distancia recorrida en cada zancada se perdían de golpe, pues el pie y el cuerpo debían hacer continuos extraños para corregir los desequilibrios permanentes. Por tanto, el mecanismo de dirección nació para poder dar continuidad y fluidez al movimiento generado por las zancadas, convirtiendo la experiencia de desplazarse en la “draisana” en algo efectivo y agradable. Para circular en línea recta bastaba con alternar micro giros de forma adecuada a izquierda y a derecha de naturaleza equilibrante y conseguir un desplazamiento satisfactorio. A su vez, la huella estrechísima de la máquina de correr consecuencia del diseño de dos ruedas alineadas, permitía escoger el mejor trazado de un camino de ancho dimensionado para los carros, lo cual permitía una cierta mejora en el desplazamiento pudiendo esquivar baches y huir de los charcos. Funcionaba bien en los caminos llanos y de firme duro o adoquinado.



DRAISIANA

Barón Drais von Sauerbronn, Francia, 1817

CONECTIVIDAD	DOS RUEDAS ALINEADAS UNIDAS A UN BASTIDOR CENTRAL DOTADA DE DIRECCIÓN
USO	juguete, medio de transporte incipiente.
MATERIALES	cuadro de madera. ruedas de madera con llanta de hierro
DIMENSIONES	total 200 cm, ruedas de 70 cm.
PESO	45 kg (pesada)
CONSTRUCCIÓN	artesanal
<hr/>	
ERGONOMÍA/BIONICABRICA (DRAISIANA)	
PUESTO DE CONDUCCIÓN	posición erguida apoyo estable caderas y brazos visión alta y frontal
DIRECCIÓN	accionada por brazos en desplazamientos laterales
PROPULSIÓN	por piernas andando o corriendo
FRENO	con los pies
AMORTIGUACIÓN	parcial, piernas, brazos y tronco
<hr/>	
DISEÑO INDUSTRIAL (MÁQUINA)	
PUESTO DE CONDUCCIÓN	asiento central estrecho, regulable $h=70$ cm reposabrazos asidero de manos
DIRECCIÓN	horquilla doble dotada de plato de dirección y manillar
PROPULSIÓN	no
FRENO	palanca en rueda trasera
AMORTIGUACIÓN	asiento acolchado

● Correcto ● Medio ● Deficiente

Funcionaba mal en caminos muy pedregosos, blandos, arenosos o de fuertes pendientes. Los objetivos que persiguió el barón con su diseño se cumplieron parcialmente. Conseguir igualar o superar en velocidad a la tracción animal, al menos en llanos, en los que conseguía medias de 12,5 Km/h, frente a los 15 Km/h que alcanzaba el caballo a trote. No depender del animal para el trabajo de propulsión y así superar los inconvenientes de un animal perezoso o enfermo, el suministro de comida, los obligados descansos y en época de guerra, no depender de la escasez de animales y forraje. No obstante, el invento no acabó de cuajar. Era carísimo, en cierto modo peligroso, al alcance de unos pocos privilegiados que la usaban como entretenimiento y no como una verdadera máquina de transporte.

El barón construyó algunos modelos para los nobles europeos. Intentó introducirlo en Inglaterra, donde solicitó ayuda. Para convencerles ideó una carrera de 50 Km entre una “draisiana” y un caballo; la apuesta la ganó el barón. Después se asoció con unos empresarios ingleses, pero no funcionó, en parte por la competencia de las imitaciones. El servicio de correos prohibió su utilización por el excesivo gasto de suelas de zapato de los carteros. En Francia el interés por la maquina decayó.

Desde el punto de vista tecnológico, la “draisiana” estaba construida de madera en su práctica totalidad, con la única excepción de los ejes de hierro de las ruedas, las llantas y alguna otra pieza en la dirección o elementos auxiliares menores; todo ello pesaba más de 45 Kg. Para mitigar los impactos en la columna vertebral consecuencia del inevitable traqueteo consecuencia de la rudimentaria construcción, el barón Karl von Drais colocó un asiento muillido sobre el bastidor, siendo este el primer componente de la bicicleta que ha mantenido más o menos su diseño inicial hasta nuestros días. Para frenar, la “draisiana” tenía un dispositivo de palanca de fricción en la rueda trasera accionada manualmente.



EL “HOBBY-HORSE” O CABALLO ENTRETENIMIENTO, 1819

Este invento en cierto modo poco útil y sin ningún futuro, fue adquirido por un empresario inglés, Denis Johnson, que apostó por él e introdujo una serie de mejoras encaminadas a hacerlo más ligero, rápido y maniobrable, lo llamó “hobby-horse” o “dandy-horse” (caballo entretenimiento), lo dotó de un diseño más efectivo, operó con licencia de Drais y registró la patente.

Tal como se observa en la ilustración el “hobby-horse” es una draisiana mejorada. En la comparación entre ambos, se hace evidente que se ha sometido a la antecesora a un proceso de reajuste y redimensionamiento de todos sus elementos, en aras, como ya se ha comentado, de una mayor eficiencia.

De los aproximadamente 45 kg de la draisiana se pasa a unos 30 kg. Las ruedas de mayor diámetro, de ocho radios a 10 radios más delgados, la horquilla de la dirección metálica y delgada, eliminando el aparatoso plano de giro de la primera draisiana, manillar de madera y hierro, vainas traseras de platabandas de hierro, sillín muy mullido y regulable en altura con dos “espárragos” y palomilla. También construyó un modelo para mujeres. Johnson construyó, más o menos en serie, unas 400 unidades de forma artesanal del “hobby-horse” y consiguió incluso organizar una escuela de conducción y las primeras carreras.

No obstante, el invento no cuajó entre la sociedad y permaneció en el olvido durante unos 50 años. Todos los esfuerzos se volcaron en el desarrollo de diferentes mecanismos de transmisión de fuerzas y en el diseño de diversos vehículos de más ruedas que, con mayor o menor fortuna, incorporaban brazos, palancas, bielas.



HOBBY HORSE / DANDY HORSE

Denis Johnson. Inglaterra, 1819

CONECCIÓN	DOS RUEDAS ALINEADAS UNIDAS A UN BÁSTIDOR CENTRAL DOTADA DE MECANISMO DE DIRECCIÓN DE HORQUILLA	
USO	Ocio, medio de transporte incipiente.	
MATERIALES	cuadro de hierro y madera; ruedas de madera con llanta de hierro	
DIMENSIONES	total 200 cm, rueda de 80 cm.	
PESO	30 kg (semi-pesada)	
CONSTRUCCIÓN	artesanal	
ERGONOMIA/ BIOMEÁTRICA (CICLISTA)		
PUESTO DE CONDUCCIÓN	posición erguida apoyo estable caderas y brazos visión alta y frontal	correcto
DIRECCIÓN	accionada por brazos en acción de giro.	correcto
PROPULSIÓN	por piernas andando o corriendo	deficiente
FRENO	con los pies	deficiente
AMORTIGUACIÓN	parcial, piernas, brazos y tronco	deficiente
DISEÑO INDUSTRIAL (MÁQUINA)		
	asiento central regulable estrecho h= 70 cm reposabrazos asidero de manos	correcto
	horquilla y manillar de hierro	correcto
	palanca rueda trasera	deficiente
	asiento acolchado parcial, horquillas y cuadro	deficiente

● Correcto ● Medio ● Deficiente

PRIMEROS BICICLOS CON MECANISMO DE IMPULSIÓN, 1821

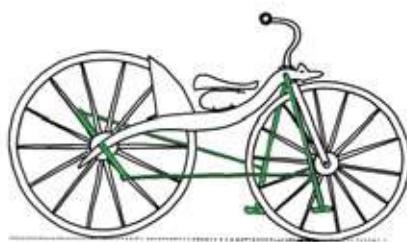
En 1821 un inglés llamado Lewis Compertz dotó a una “draisiana” de tracción delantera; los brazos movían un rueda dentada que a través de un piñón proporcionaba tracción en la rueda delantera.

En 1839 se tiene constancia de un vehículo de dos ruedas accionado por palancas en la rueda trasera. Se trata de una HOBBY-HORSE con un cigüeñal en el eje de la rueda trasera conectado a dos barras horizontales colgadas del bastidor a la altura de las rodillas del ciclista. Este mecanismo permitía, con un sencillo balanceo alternativo de piernas hacia adelante y hacia atrás, la propulsión necesaria para mover el cigüeñal de la rueda trasera, y por tanto impulsar el vehículo hacia adelante, e incluso detenerlo.

El invento se atribuye a Kirpatrick McMillan, herrero escocés, seguramente inspirado en las bielas y en la máquina de vapor de Stephenson, no se preocupó por difundir y comercializar el invento. Simultáneamente, Gavia Dalzells idea un mecanismo similar y Thomas McCall en 1860 construye una verdadera bicicleta que se encuentra en el Museo de la Ciencia de Londres.

La incorporación de cigüeñal accionado por palancas en los pies supuso una auténtica revolución en el diseño de vehículos de dos ruedas, puesto que se ponía fin a una gran limitación del impulso ejercido a zancadas ya que, por una parte, la efectividad de la zancada decrece con la velocidad del vehículo hasta el punto de que es inútil seguir corriendo a partir de cierta velocidad, ya que es imposible biomecánicamente hablando, añadir más impulso. Por otro lado, a partir de cierta velocidad, el impulso por zancada pierde efectividad, pues no es posible conseguir un apoyo firme, y, por tanto transmitir la totalidad de la fuerza ejercida por la pierna, sin hablar de que en caminos con firmes irregulares habría que contar con un considerable porcentaje de zancadas mal ejecutadas.

Todas estas limitaciones desaparecieron con el nuevo invento, ya que el impulso ejercido por las piernas y transmitido a la rueda trasera vía cigüeñal, se aprovechaba íntegramente, y no dependía tan directamente de la velocidad del vehículo, ya que la geometría del cigüeñal, barras, etc., estaba adaptado al ciclo de pedaleo del ciclista, una primera idea de desarrollo. Sin embargo, esta primera bicicleta impulsada con palancas, tenía al menos dos problemas. El primero, que el impulso se conseguía mediante balanceo horizontal de las piernas, gesto ergonómicamente posible; sin embargo biomecánicamente es poco eficiente. El segundo problema, la cierta incompatibilidad entre propulsión y giro. En definitiva, si bien la idea de levantar los pies del suelo, apoyarlos en palancas, constituyó un gran avance en la concepción de la bicicleta, esta solución constructiva en concreto no prosperó por ineficiente, pero sentó las bases de la tracción directa a pedales conectados al eje de la rueda, mecanismo mucho más sencillo y eficiente que su predecesor.



PRIMEROS BICICLOS CON MECANISMO DE IMPULSIÓN

Kirpatrick McMillan, Escocia, 1839

	ERGONOMIA/BIOMECÁNICA (CICLISTA)	DISEÑO INDUSTRIAL (MÁQUINA)
C O N D U C C I Ó N	posición erguida apoyo estable caderas, brazos y pies visión alta y frontal	asiento central regulable estrecho: h=70 cm
D I R E C T I O N	accionada por brazos	reposeabrazos apoyo pies, palancas asidero de manos
P R O P U L S I O N	por piernas, rotación elíptica	horquilla y manillar de fierro, poco giro
F R E N O	con los pies	palancas y cigüeñal
A M O R T U M I C A C I O N	parcial, piernas, brazos y tronco	asiento acolchado parcial, horquilla y cuadro

● Correcto ● Medio ● Deficiente

“MICHAULINA” O BICICLETA CON TRACCION DIRECTA A LA RUEDA, 1861

La evolución de la bicicleta, tras la incorporación de un mecanismo de tracción a base de cigüñal y palancas del 1839 continuó sin cesar unos quince años más en Europa, dando lugar a varios intentos más o menos afortunados de tracción de pedales.

En 1853, Philipp Moritz Fischer, alemán fabricante de instrumentos y padre del fundador de la industria alemana de bolas de acero y cojinetes, acopló unos pedales a la rueda delantera de una bicicleta que utilizaba para visitar a sus clientes. Nunca se interesó por la difusión del invento, quedando ésta bicicleta olvidada sin influir en la futura evolución del sector.

En 1862, Karl Kech, alemán también, acopló unos pedales a la rueda delantera, pero tampoco difundió el invento. En Francia otras personas tienen la misma idea a la vez. En 1861 el carrocero Pierre Michaux de París recibe una “draisiana” para reparar. Una vez lista, su hijo quiso probarla y cuando la observaba, moviéndose con dificultad, pensó que podría acoplar unos pedales de forma similar a los de las máquinas de afilar existentes.

En 1863, el herrero y carrocer Pierre Lallement tuvo la misma ocurrencia que Michaux, acopló unos pedales a una “draisiana” comprada de segunda mano, y se fue a París, al Boulevard Saint-Martin, para mostrar su invento.

Al parecer Michaux y Lallement se conocieron ese año y decidieron colaborar. Un año después Pierre Lallement se asoció con James Carroll para fabricar la bicicleta en América y, en 1866, se le concedió la patente americana, resultando un fracaso. En 1869 Pierre Michaux, construye en París la primera fábrica de biciclos.

En aquel momento en Europa muchos inventores se lanzaron al diseño y consecución de diferentes prototipos de bicicletas, pero sólo Pierre Michaux consiguió el suficiente grado de desarrollo y perfeccionamiento para producir en serie la bicicleta.

“Para inventar algo es necesario poseer una imaginación creativa y algo así como una genialidad sin prejuicios. El llevar a término una idea de manera consciente, corrigiendo el borrador inicial hasta la perfección, impone un pensamiento analítico, una inteligencia práctica y, con frecuencia una tercia perseverancia. Convencer a los demás del resultado del trabajo, a efectos de vender el producto pro-vechosamente, exige habilidad psicológica, rapidez para los negocios, y perspicacia de empresario.”

Historia de la bicicleta. Max J. B. Rauck, Gerd Volke, Felix R. Paturi

La fábrica de Michaux construyó en 1861 dos modelos de prueba; en los tres años siguientes 142 unidades. En 1865 llegó a las 400 unidades. Se vendían bajo pedido a los clientes más importantes: el príncipe Luis Napoleón y el duque de Alba se paseaban con dos “michaullanas”. Se presentó en la Exposición de París de 1867 y todo ello contribuyó a difundir el invento e incrementar las ventas.

El boom de la bicicleta tiene lugar en 1869. Se crean clubs de ciclismo y escuelas de conducción, aparecen revistas y prensa especializadas, tiene lugar la primera carrera multitudinaria



Recreación ambientada en la época de un soldado uniformado junto a una michaulina.



LA MICHAULINA

Pierre Michaux, Francia, 1863

CONCEPCIÓN		DOS RUEDAS ALINEADAS UNIDAS A UN BASTIDOR CENTRAL DOTADA DE MECANISMO DE DIRECCIÓN DE HORQUILLA, MANILLAR Y PROPULSIÓN A PEDALES EN EL EJE DE LA RUEDA DELANTERA
USO		ocio, lúdico, medio de transporte
MATERIALES		cuadro de hierro forjado, ruedas de madera esbelta con llanta de hierro.
DIMENSIONES		total 180 cm, rueda de 80, 90 y 100 cm.
PESO		40 kg (semi-pesada)
CONSTRUCCIÓN		Industrial / artesanal
ERGONOMÍA BIOMEÁTRICA (CIGUETA)		DISEÑO INDUSTRIAL (MÁQUINA)
PUESTO DE CONDUCCIÓN	posición erguida apoyo estable caderas, brazos y pies visión alta y frontal	asiento central regulable estrecho h=70 cm
C D U C I Ó N D U C C I FRENO	acolchonado por brazos en acción de giro. por piernas en rotación circular acolchonamiento manual	pedales pies manillar con asidero de manos horquilla y manillar de hierro
AMORTIGUACIÓN	parcial, piernas, brazos y tronco	pedales cigüeñal en rueda delantera de fricción con palanca en rueda trasera asiento acolchado sobre base de amortiguación parcial, horquillas y cuadro gran diámetro: rueda

● Correcto ● Medio ● Deficiente

de gran distancia: 300 ciclistas corrieron la París- Rouen de 124 Km, en la que se consiguió una media de 12 Km/h.

Los modelos fabricados en la factoría de París estaban construidos de hierro forjado, de cuadro cruzado. Las ruedas de madera, bastante afinadas, con llantas de acero. Se producían tres tamaños de rueda delantera 80, 90 y 100 cm de diámetro, longitud de bielas regulable, pedales con contrapeso, dotados de un ingenioso sistema de auto engrase.

En 1869 Pierre Michaux inaugura la segunda fábrica de bicicletas con 500 trabajadores que montaban 200 bicicletas al año. La bicicleta constaba de cuadro de hierro forjado, ruedas de madera con radios esbeltos, llantas de hierro, asiento de cuero regulable montado sobre un arco de amortiguación, freno de fricción accionado por cable al girar el manillar y tres medidas de rueda delantera. Toda la bicicleta tenía un peso aproximado de unos 40 Kg.

La demanda interna de bicicletas empezó a crecer exponencialmente y Francia no fue capaz de atenderla. Algunos empresarios emprendedores de Inglaterra se aventuraron en el negocio, en particular la "Coventry Sewing Machine Company", fábrica de máquinas de coser que apostó por adaptarse a la construcción de bicicletas. En 1869 logró construir 400 unidades que estaban destinadas al mercado francés, pero aquel año estalló la guerra franco-prusiana bloqueándose las exportaciones, así que a 400 "michaullinas" inglesas se tuvieron que vender en Inglaterra, cosa que fue fácil y así se puso la simiente de lo que sería la nueva industria de bicicletas ahora liderada por Inglaterra.

Los ingleses, inicialmente, no aceptaron de buen grado el invento francés, denominaban a la "michaulliana" como la "french bicycle" o peor aún la "boneshaker" (sacude-huesos) debido a lo incómodo de una conducción sobre firme irregular por falta de amortiguación efectiva. También eran lentas, ya que la tracción directa permitía que por una vuelta de pedal se avanzase solo 3,14 m –pensemos que en las bicis actuales una pedalada equivale a unos 9 m–. También estas bicicletas eran muy peligrosas en las curvas.

W. F. Reynolds y J. A. Mays construyen el modelo "phantom", bicicleta ligera y atractiva. Cuadro de varillas de hierro articulado, llantas de madera con neumáticos de hierro y, por primera vez, unidos al buje con alambre pretensado. La patente inicial, datada en 1862 a cargo de George Frederick Bauer, no encontró aplicación práctica hasta 1869.

En Alemania –también debido a la guerra franco-prusiana– la industria de la bicicleta no pudo desarrollarse. En EE.UU. Pierre Lallement solicitó la patente, que le fue otorgada en 1866, pero fracasó estrepitosamente por la enorme competencia de patentes diversas. En 1870, casi 1.000 modelos distintos trataban de abrirse camino en los EE.UU, entre las cuales destacó la de Thomas R. Pickering construida con tubo de acero muy ligero, asiento con amortiguadores de muelles y de precio inferior a la de Lallament.

Se empezaron a producir bicicletas con ruedas de goma maciza con incipientes frenos de zapata. Se experimentó el mecanismo de rueda libre incorporado al buje de la rueda delantera.

LA “HIGH WHEELER” O BICICLO DE RUEDA DE GRAN DIAMETRO, 1870

En párrafos anteriores, hemos relatado el origen, en cierto modo casual de la industria de la bicicleta en Inglaterra, a partir de la “reconversión” de una fábrica de máquinas de coser, la “Coventry Sewing Machine Company” con las 400 bicis que nunca vieron territorio francés. El posterior desarrollo de la siguiente bicicleta estuvo protagonizado por el inglés James Starley. Nacido en el seno de una familia granjera, pasó los primeros años de su vida trabajando duramente en las labores del campo; sin embargo sus inquietudes se centraban en los inventos. Con una imaginación desbordante y gran creatividad, ideó artilugios mecánicos para mejorar los trabajos del campo, que nunca fueron tenidos en cuenta por su familia. Cansado, se fue de casa y decidió emplearse como jardinero y como reparador de relojes. En el hogar donde trabajaba apareció una cara, moderna y sofisticada máquina de coser para la mujer de la casa, que nunca llegó a funcionar correctamente. Starley con su innata habilidad para entender las máquinas la reparó. Al poco tiempo ya trabajaba como mecánico en la fábrica de máquinas de coser. Su insaciable interés por este artílugo le llevó a mejorar el diseño de éstas incorporando el accionamiento a pedal, eliminando el volante manual que la hacía girar; de esta forma ideó una máquina de coser en la que podían utilizarse las dos manos para manipular la tela.

Sin embargo la fábrica de máquinas de coser sufrió una pérdida de ventas preocupante, de forma que como ya hemos explicado, los responsables de la fábrica decidieron aventurarse en la construcción de bicicletas, a 400 michaulinas. Una de ellas cayó en manos de Starley, que seducido por la nueva máquina, la probó, estudió y diseccionó; al poco tiempo ya tenía un prototipo completamente revolucionario, se centró en quitarle peso, mejorar la conducción, la comodidad y el diseño. De ésta forma surgió el modelo del velocípedo de rueda alta “Ariel”, que en 1871 costaba 8 libras, más o menos 2.000 € actuales.

Constaba de una serie de mejoras importantes como una mejor tracción de la rueda delantera de 128 cm de diámetro, cosa que permitía avanzar a mayor velocidad; una pedalada de 3.93 m frente a los 2,83 m de las bicis anteriores. Para llevar a cabo la construcción de ruedas de gran diámetro con buenas prestaciones y poco peso, fue necesaria la sustitución de los radios de palo de madera de las ruedas por radios de alambre tensado. Fue el inglés Theodore Jones quien en 1826 patentó el invento, pero no fue hasta 1869 cuando se aplicó a la primera bicicleta modelo Phantom.

Una mejora también trascendental fue la incorporación en 1869 de los cojinetes que partir de 1890 se incorporaron a los pedales. Cuadro cruzado de tubo de hierro, neumáticos de goma maciza, llanta de hierro y radios de alambre de acero que se tensaban girando el buje de la rueda y mejoraban el comportamiento de la misma. También perfeccionó un mecanismo de freno de fricción y pedales regulables adaptables a la talla del ciclista.



VELOCÍPEDO DE RUEDA ALTA – HIGH WHEELER

James Starley, Inglaterra, 1870

	CONCEPCIÓN	DOS RUEDAS ALINEADAS DE DISTINTO TAMAÑO UNIDAS A UN BASTIDOR CENTRAL DOTADA DE MECANISMO DE DIRECCIÓN, HORQUILLA, MANILLAR Y PROPULSIÓN A PEDALES EN EL EJE DE LA RUEDA.
	USO	ocio, lúdico, medio de transporte
MATERIALES	cuadro cruzado de tubo de hierro ruedas de madera con llanta de hierro	
DIMENSIONES	total 190 cm, ruedas 125/60 cm	
PESO	21 kg (semi-ligera)	
CONSTRUCCIÓN	industrial	
	ERGONOMÍA/BIOMEÁTRICA (COLETA)	DISEÑO INDUSTRIAL (MÁQUINA)
PUESTO DE CONDUCCIÓN	posición erguida equilibrio precario, caderas, brazos y pies visión muy alta (2 m) y frontal	asiento estrecho sobre rueda distancia h = 140 cm centro de gravedad muy alto pedales ambos pies manillar con asideros de manos
DIRECCIÓN	accionada por brazos en acción de giro	horquilla y manillar tubular de hierro
PROPULSIÓN	por piernas en rotación circular	pedales regulables, cigüeñal rueda delantera
FRENOS	accionamiento manual	de fricción con palanca en rueda delantera
AMORTIGUACIÓN	perdiz, piernas, brazos y tronco	asiento acolchado con amortiguación perdiz, horquilla y cuadro gran diámetro rueda y llantas neumático de goma maciza

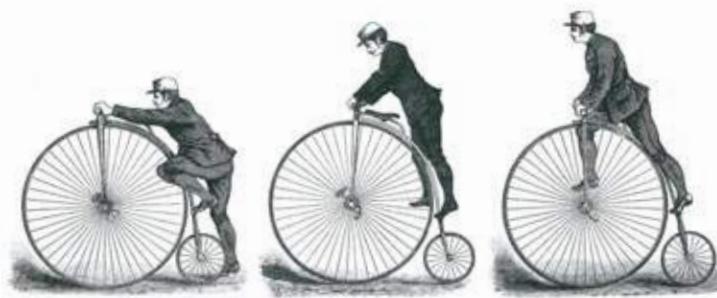
● Correcto ● Medio ● Deficiente

Para desbancar a todas las “michaullanas” del mercado, Starley ofreció un biciclo más rápido, más ligero y más cómodo con un diseño distinguido y refinado. Para ello organizó una carrera de Londres a Coventry, 96 millas que se cubrieron en medio día. Al poco tiempo aparecieron más de 60 fabricantes que ofrecieron 300 modelos diferentes. Sin embargo, no todo eran ventajas. El principal problema eran las caídas, que se ocasionaban por llevar el centro de gravedad muy alto y adelantado; bastaba una pequeña piedra para catapultar al ciclista por delante, causándole daños graves con frecuencia. Esta circunstancia obligó a las autoridades de algunas ciudades a prohibir su circulación.

Fue considerado un vehículo que otorgaba prestigio social, algo similar a nuestros actuales coches deportivos. Eran distinguidos, estaban de moda y eran muy utilizados por los snobs. La conducción sobre-elevada los hacía muy visibles y llamativos, con un gran desarrollo en los detalles con los últimos avances tecnológicos en frenos, asientos de seguridad, bujes con cojinetes de bolas, bocinas, pedales regulables, lámparas nocturnas y un largo etc.

Es la época en que se inician las carreras de largo recorrido, se popularizan en cierto modo las excursiones en biciclo de un día y los viajes largos. Nace el turismo.

Thomas Stevens dio la vuelta al mundo en velocípedo entre el 1884-1886. En 1878 James Starley construyó para la Exposición de París el más grande de los velocípedos, de 2,50 m de diámetro y 70 Kg, el “Xtraordinary,” con la pretensión de demostrar que era posible con la tecnología de los radios de alambre de acero construir ruedas de tamaño extra grande sin comprometer la resistencia de la rueda. Llegó a un callejón sin salida, pues ya no era posible continuar ese diseño por exceso de tamaño, peso y dificultad de conducción, además del bajo nivel de seguridad y alto coste. Había que dirigir los esfuerzos hacia los mecanismos de transmisión.



LA BICICLETA “SEGURA” O BICI DE TRACCION DE CADENA, 1885

El final de la era del biciclo coincidió con la proliferación de todo tipo de modelos de triciclos que tenían la ventaja de una conducción más segura, posibilitaban llevar varios ocupantes y carga. Sin embargo, no acabaron con el biciclo, posiblemente, porque al pesar 50 kg eran más lentos. En 1877 James Starley ideó el engranaje diferencial para triciclos, que más adelante fue adoptado por el automóvil. Asimismo, se conciben artefactos de todo tipo: monociclos de ruedas paralelas, monociclos jaula, bicicleta sobre hielo, sobre agua, etc. Muchos de ellos inventos absurdos que no tuvieron futuro alguno. 1880 fue el año de la hegemonía de los biciclos, el mercado europeo estaba lleno de infinidad de modelos. No obstante unos años después del 1869, Guilmet-Meyer ideó la bicicleta segura que no tuvo ningún éxito.

El mismo Starley ideó un mecanismo de transmisión que permitía doblar el número de vueltas de la rueda por cada pedalada, lo aplicó a un prototipo, pero no tuvo éxito, seguramente por el coste, que aumentaba en un 50%. Lo que estaba claro es que era necesario disminuir el tamaño de la rueda delantera, recuperar una posición más centrada y baja entre ruedas por motivos de seguridad y estabilidad, sin por ello perder eficiencia en la transmisión a pedales.

En 1877, el francés Rousseau en Marsella ideó un biciclo de rueda delantera menor accionada por doble cadena denominado “sur” seguro. La rueda giraba 3 veces por cada 2 pedaladas; no obstante, el invento no prosperó en Francia pero sí lo hizo en Inglaterra, donde se construyó un modelo análogo al de Rousseau.

William Hilmann, colaborador de James Starley conocía las ventajas del nuevo prototipo y pensó que la mejor propaganda para lanzarlo al mercado era demostrar que era más rápido que los biciclos anteriores. Para ello organizó una carrera de 100 millas en Berkshire, Inglaterra; contrató al mejor corredor George Smith y estableció el record mundial de velocidad, 160 km en 7 horas a 22,8 Km/h. Era el año 1884. Al día siguiente se dispararon las ventas de este modelo de biciclo seguro con mecanismo de tracción a cadena: la “kangaroo”. Se produjo un giro definitivo en el mundo de la bicicleta, el interés del mercado se centró en las bicicletas de tracción a cadena.

El diseño de la “kangaroo” como puede verse todavía tenía mucho que ver con el biciclo, en realidad era un biciclo; con una correlación de tamaño de ruedas más parejo, el centro de gravedad del conjunto biciclo-ciclista más bajo y estable superando los inconvenientes de los biciclos convencionales del momento. La tracción a cadena estaba aplicada a la rueda delantera, como no podía ser de otra forma dada la configuración del biciclo; por esta circunstancia era necesario colocar doble cadena, una por cada lado de la rueda con su propio plato y pedal.

La introducción de la cadena constituyó un avance determinante en la industria de la bicicleta del momento, ya que aunque estaba más o menos resuelto el tema de la transmisión



Safer than any Tricycle, faster and easier than any Bicycle ever made.
Fitted with handles to turn for convenience in starting or stopping. Far and
away the best hill climber in the market.

MANUFACTURED BY
STARLEY & SUTTON,
METEOR WORKS, WEST ORCHARD, COVENTRY, ENGLAND.

Price Lists of "Meteor," "Rover," "Drapetech," and "Sprinkle" Bicycles and
Tricycles and the "Centre Chair," Illustrated, free on application.

de la fuerza muscular a la rueda de tracción (cigüeñal-pedal) hasta la aparición de la cadena, no se pudo obtener el máximo rendimiento del gesto rotacional de las dos piernas pedaleando.

Efectivamente, desde la biomecánica moderna se ha llegado a la siguiente conclusión, consecuencia del principio de reflexión biofísica: “un músculo adquiere su máximo grado de fuerza a una velocidad de trabajo muy determinada; si se encoge demasiado rápido se pierde energía de fricción interna de los tejidos. Si se encoge demasiado despacio, hay despilfarro de calor”. Al parecer la velocidad o ritmo óptimo más rentable y eficiente se sitúa en torno al 30% de la velocidad máxima.

Por este principio, la introducción de la cadena y, más concretamente, de la variación de la relación de la transmisión a la bicicleta constituye uno de los avances más notables en la conquista de la eficiencia energética de la misma.

En los biciclos de rueda alta y transmisión directa, el límite de velocidad lo marcaba el máximo ritmo de pedalada aplicable por el ciclista, la cadencia de pedalada, que no puede superar un valor determinado aproximado de 120 pedaladas/minuto por razones biomecánicas. Ese era el límite de velocidad máximo que se podía conseguir en el biciclo, unos 18 Km/h.

En la nueva bicicleta de tracción a cadena se podía cambiar el tamaño del plato y del piñón de la rueda, de forma que con una vuelta de pedal se podrían obtener dos o más vueltas de rueda. Otra condición que deberá darse es que los músculos de las piernas tengan que ser capaces de aplicar la fuerza necesaria para mover esta relación de transmisión actualmente denominada desarrollo. Este último extremo se cumplía sobradamente en llanos y rampas ligeras. Por esto, a partir de la transmisión de cadena con tamaños diferentes de plato y piñón, la bicicleta se convierte en un vehículo muy eficiente y como veremos a continuación, de conducción más segura.

En 1884 John Kemp Starley –sobrino del conocido James Starley– y un compañero suyo, Sutton, intuyeron que con la aparición de la tracción a cadena, tal vez, la bicicleta no estaba ligada al tamaño de la rueda. O dicho de otra forma, que el diseño podría redirigirse a una nueva configuración más parecida a las bicicletas draisianas de principios del s. XIX; es decir, ruedas iguales, puesto de conducción centrado entre ambas, pedales en la vertical del sillín, centro de gravedad más bajo. El resto era ver de qué manera se podría resolver el conjunto con la aplicación de la tracción de cadena. Construyeron un prototipo que probarían –siempre a solas para evitar el espionaje industrial– y una vez experimentado y retocado lo presentaron en el Stanley Show de Londres y lo bautizaron como “La Rover”. Organizaron una nueva carrera con George Smith, pulverizando el record anterior. La carrera tuvo que celebrarse cambiando el recorrido a última hora para burlar a la policía, que en aquella época trataba de impedir a toda costa este tipo de carreras por lo peligroso para la gente y los animales de corral que tenían por costumbre deambular por los caminos.

El éxito de “la Rover” fue tal que coparon el 90% de la cuota de mercado de las bicicletas y tuvieron que ampliar la fábrica en 1888. La Rover III se construía con cuadro de tubo de acero soldado en forma de trapecio arqueado, “SWIFT”, de dos ruedas de igual tamaño, de 32 radios de acero, cojinetes de acero en los ejes, llantas también de acero hueco, recubiertas por goma, guardabarros, manillar hacia adentro para acercarlo a la posición de mando, cómodo sillín de piel graduable en altura y con amortiguación de muelles, cadena tensable aplicada a la rueda de atrás y freno de fricción tipo palanca, sobre la rueda delantera. Los nostálgicos del bici no encajaron bien el nuevo invento, refiriéndose a él como el reptil o escarabajo. En cambio los nuevos adeptos de la bicicleta se refirieron al bici como “penny-farthing”, ruedas de tamaño desigual. Lo cierto es que esta bicicleta, predecesora directa de las actuales, perdió flexibilidad y era, por tanto, de conducción más incomoda que los biciclos de rueda grande. Los diseñadores se centraron en la construcción de cuadros articulados y oscilantes con amortiguación.

En 1890, J. B. Dunlop inventa los neumáticos de aire, y ello favoreció eficazmente la eliminación de las vibraciones que se transmiten desde el firme al ciclista a través de la bicicleta; también se consolidaron los cuadros tipo trapecio. La incorporación de los neumáticos vino también acompañada de otros avances tecnológicos como en los frenos, ya que con las ruedas de goma se mejoraba la adherencia al firme y por tanto los dispositivos para detener la bici ganaron en eficacia. Se pasó de los frenos de palanca-fricción directa a la rueda a freno de tambor, llanta y disco. De todos modos, el freno más extendido y que puede considerarse estándar es el freno de pinza sincrónico (freno de llanta).

A partir de 1896 se disparan las ventas y se extienden los conflictos con los peatones y otros medios de transporte (carruajes y caballos). Esto impulsó la aplicación de todo tipo de normativas y ordenanzas dirigidas a regular la convivencia entre todos. A veces, incluso se prohibía la circulación de bici por determinadas calles, se necesitaba carnet de conducir y la velocidad estaba limitada además de ser obligatorio bajarse de la bici cada vez que cruzaba con un carruaje; tampoco podían transportarse niños.

El estado de la industria de la bicicleta a finales del s. XIX presentaba el siguiente panorama. En EEUU se fabricaban multitud de biciclos, que con la aparición de la bicicleta “Safety” tuvieron que dejarse de fabricar casi de golpe para superar la crisis, reorientando la producción hacia las bicicletas seguras que debían mayoritariamente exportarse a Europa. EE.UU. no permitía las importaciones, y Alemania no contaba con una suficiente protección aduanera. Resultado: una verdadera invasión de bicicletas americanas en Alemania, además a mitad de coste, eso sí, de calidad inferior. El mercado germano no pudo soportar la presión y tuvo que bajar precios y reducir calidad para recuperar las ventas.

Todo ello coincidiendo en el tiempo con una verdadera proliferación de patentes de la inmensa mayoría de componentes de la bicicleta, llevando a la industria a una situación límite. Denuncias continuadas por transgresión de patentes, copias, etc.



LA BICICLETA SEGURA ROVER

John Kemp Starley y William Sutton, Inglaterra, 1884

CONCEPCIÓN	DOS RUEDAS ALINEADAS DEL MISMO TAMAÑO UNIDAS A UN BASTIDOR CENTRAL, DOTADA DE MECANISMO DE DIRECCIÓN, HORQUILLA, MANILLAR, PROPULSIÓN A PEDALES Y TRANSMISIÓN CON CADENA A LA RUEDA TRASERA	
	ERGONOMÍA/ BIOMEJANICA (CICLISTA)	DISEÑO INDUSTRIAL (MÁQUINA)
USO:	táctico, medio de transporte	
MATERIALES:	cuadro trapezoidal de tubo de acero, ruedas con radios de acero, goma maciza y cojinetes de bolas	
DIMENSIONES:	total 170 cm, rueda de 70 cm.	
PESO:	20 kg (semi-ligera)	
CONSTRUCCIÓN:	industrial	
PUESTO DE CONDUCCIÓN:	posición erguida apoyo estable caderas, brazos y pies visión frontal alta (1,50 m)	asiento central centro de gravedad bajo y centrado pedales pies manillar hacia dentro
DIRECCIÓN:	accionada por brazos en acción de giro.	horquilla y manillar de tubo de hierro pedales, transmisión de relación variable a rueda trasera
PROPIULSIÓN:	por piernas en rotación circular	de fricción con palanca en rueda delantera
FRENO:	accionamiento manual	asiento acolchado con amortiguación
AMORTIGUACIÓN:	parcial, piernas, brazos y tronco	parcial, horquillas y cuadro flexibilidad rueda manillar hacia dentro

● Correcto ● Medio ● Deficiente

Las bicicletas del s. XX se construían montando unas 90 piezas. Era del todo irracional que todas las factorías fabricasen más piezas patentadas y ligeramente diferentes de las de la competencia para producir bicicletas esencialmente iguales. Todo ello originó una crisis que duró 10 años, cuando algunos de los fabricantes quebraron y otros se pasaron a la industria de la moto o automóvil, también en alza. Otros, los que se quedaron, siguieron tres caminos. Los grandes fabricantes se concentraron en producir bicis en serie, mediante solo montaje. Se unificaron componentes y su industrialización, naciendo en 1917 las normas DIN encaminadas a garantizar la calidad. Una parte de la producción se dedicó a las bicis “de luxe”, caras. Todas estas reformas tuvieron dos efectos inmediatos, el coste de la bicicleta bajó a niveles más asequibles y las ventas en Alemania se dispararon de las 200.000 bicicletas de 1810 a 500.000 de 1913.

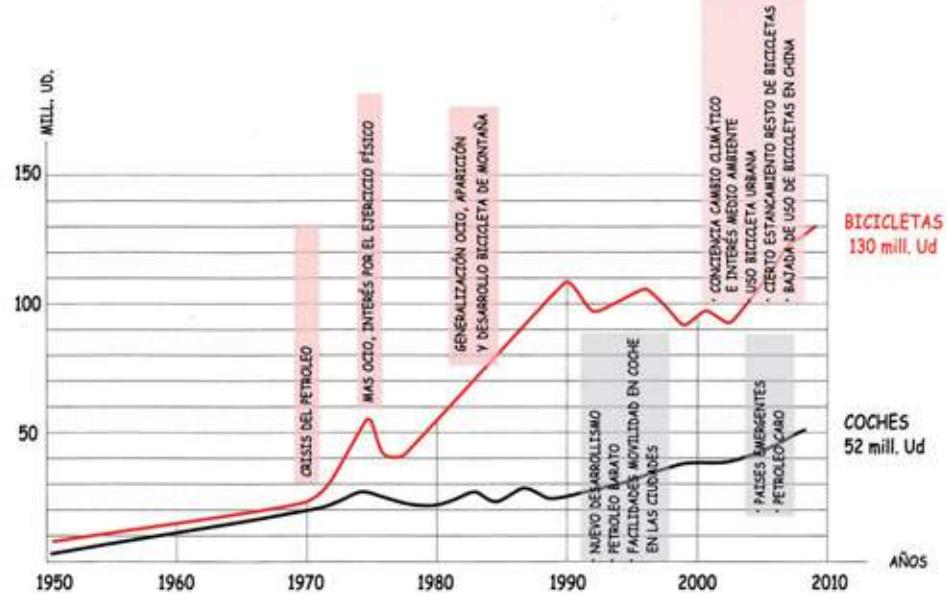
Las dos Guerras Mundiales con sus respectivos períodos de crisis y recuperación marcaron el mercado de la bici. El uso cotidiano de la bicicleta para ir al trabajo, se generalizó en Europa después de la 1^a Guerra Mundial, aunque en EE.UU. se inició un declive motivado por la incipiente irrupción del automóvil.

El uso recreativo de la bicicleta fue ganando adeptos, si bien el precio de las bicis, aunque más asequible, era relativamente caro y solo estaba al alcance de las clases más adineradas. Las carreras se hicieron cada vez más populares, impulsándose el desarrollo tecnológico para conseguir máquinas más rápidas y fiables. Los neumáticos evolucionaron hacia tubulares, cámara y cubiertas cosidas creando un único elemento. En una etapa del Giro de Italia de 1927, en la Dolomitas, el corredor Tullio Campagnolo pinchó y no pudo cambiar la rueda por tener las manos heladas, teniendo que abandonar, pero la experiencia le sirvió para inventar los cierres rápidos, hoy de uso universal. Campagnolo, seis años después creó el cambio de marchas, y en 1938 se inventa la cadena 3/32 que es la que se utiliza actualmente y que permitió introducir nuevas mejoras sucesivas en los cambios de marcha. El uso de la bicicleta alcanzó un máximo en Europa en 1939, justo antes de la 2^a Guerra Mundial.

La industria automovilística en época de crisis supo adaptarse alternando la producción de coches y bicis. Con la hegemonía del coche en 1940, el 50% de la producción de bicicletas eran del tipo plegables para ser transportadas cómodamente en el maletero del coche. Fueron muy populares y asequibles económicamente –menos de 100 marcos– gracias a la estandarización de la producción y la incorporación de la máquina de soldadura de anillo.

Sin embargo, la moda pasó y un gran público se inclinó por la bicicleta clásica tipo “Sleger”, basada en la Rover de John Kemp Starley, posiblemente la bicicleta más representativa del s. XX.

Después de la Segunda Guerra Mundial, Inglaterra reconstruyó sus infraestructuras pensando en el automóvil; en cambio, sobre todo en Alemania, Bélgica y Holanda, lo hicieron pensando en la bicicleta, carriles bici, etc.



En 1960 se retransmite en televisión por primera vez una carrera ciclista, se incrementa el negocio de la publicidad, nace el interés por las carreras y se incrementan las ventas. También 1960 marca la pérdida de popularidad de la bici en EE.UU. y Gran Bretaña, en favor del automóvil. Sin embargo, en 1974, en California, varios ciclistas empezaron a explorar rutas de montaña montados en bicicleta armadas “tuneadas” por ellos mismos y sentaron las bases de una nueva modalidad de bicicleta, la bicicleta de montaña o “mountain bike”; con ello consiguieron conquistar otros territorios vedados hasta el momento, el uso recreativo de la bicicleta en terrenos, a priori, hostiles como caminos, pistas y senderos de montaña. El éxito de esta propuesta fue tal que las ventas de 1975 a 1988 pasaron de 40 a 102 millones de unidades de todo tipo de bicicletas. De hecho, desde 1970 hasta 2007 se cuadriplica el número de bicicletas, 130 millones en 2007.

LA “MOUNTAIN BIKE” O BICICLETA TODO TERRENO



La reciente llegada de la bicicleta de montaña ha permitido la conquista de territorios hasta ahora imposibles. La posibilidad de poder superar pendientes fortísimas, gracias a la mejora de los desarrollos y de disfrutar de descensos técnicos gracias a la introducción de las amortiguadores, mejores y más potentes frenos y neumáticos, así como de una construcción más robusta de la bicicleta.

La bicicleta de montaña, “mountain bike” o BTT (todo terreno) fue creada para circular por terrenos agrestes, caminos embarrados, pistas forestales pedregosas y sendas estrechas. Por ello, la resistencia es el factor más importante a tener en cuenta en su diseño, aunque también lo son la protección frente al barro y lodo de los componentes mecánicos, sobre todo del cambio, la cadena, los pedales y los frenos. Asimismo, la presencia de grandes pendientes –de orden de magnitud del 20%– genera la necesidad de relaciones de transmisión bajas, para que con cadencias de pedaleo normales poder, aunque a muy baja velocidad, superar cuestas que con bicicletas convencionales serían insuperables. Consecuentemente en los descensos, también del 20%, la bicicleta debe comportarse con seguridad y ser capaz de absorber las tremendas aceleraciones –consecuencia de la inercia del movimiento–, debe amortiguar las irregularidades de todo tipo y disponer de capacidad extra de agarre y frenado. Todo ello, a poder ser, resuelto con materiales ligeros.

La bicicleta de montaña, actualmente, es objeto de continuas mejoras encaminadas a dar el máximo de prestaciones con el mínimo peso. Un hito importantísimo en el diseño de estas bicicletas fue la incorporación, en 1987, de la horquilla de suspensión delantera, ya que con ello se mejoró ostensiblemente el control de la bicicleta en descensos, permitiendo más velocidad y comodidad de conducción. En 1990 se aplicó por primera vez la suspensión a la rueda trasera, consiguiendo de esta forma una máquina aún más eficaz, rápida y segura en los descensos. Actualmente uno de los caballos de batalla de los diseñadores es compaginar la amortiguación trasera sin mermar las cualidades de la bici en subida; hoy por hoy, se consigue con amortiguadores inteligentes que se desactivan cuando se pedalea y se activan al dejar de pedalear, eliminando el balanceo indeseado. Hoy en día, sigue siendo un reto de diseño muy importante la resolución de los cuadros, en general articulados, aunque los continuos avances en materiales –de mejor calidad y resistencia con menor peso– están revolucionando este segmento de las dos ruedas.

Si en cualquier bicicleta el cuadro –que actúa como verdadera columna vertebral– es el elemento más importante, en una mountain bike ésta afirmación adquiere, si cabe, aún más relevancia, ya que el cuadro es el soporte de todos los componentes de la bici y la BTT tiene componentes extra. Las características geométricas, gruesos de tubo, materiales de fabricación, tecnología de unión, son aspectos que determinan el uso y la calidad final de la bici. Por ejemplo, la elección de los tubos influye directamente en la estabilidad, el peso y las propiedades de marcha de la bici. La tecnología de unión, influye en la fiabilidad, perdurabilidad y estética de la bici.

El diseño del cuadro está en función directa con el tipo de uso, de la funcionalidad concreta de la bici. La geometría y el tamaño aportan ciertas características técnicas a su uso

predefinido, al tamaño y ergonomía. En general, el cuadro más extendido antes de la incorporación de los elementos de amortiguación es el de diamante o doble triángulo, la mejor solución técnicamente posible para resolver satisfactoriamente las fuerzas de presión, tiro y vibración que se dan en una bicicleta en movimiento y se compone de los siguientes tubos: del sillín, horizontal, oblicuo, de dirección, la caja de pedalear y el tren trasero (vainas y tirantes).

Un cuadro de bicicleta de montaña se diferencia de uno de carretera, esencialmente en que todas sus partes son mucho más resistentes, consecuencia, como hemos dicho, del uso mucho más extremo que deben soportar este tipo de bicis. Hoy en día, en los cuadros de bici de carretera existe la tendencia a hacerlos lo más pequeños y compactos posibles con objeto de aumentar la rigidez lateral de la bici y mejorar la aerodinámica. En cambio, en los cuadros de montaña hay que optar por una solución de compromiso entre rigidez, movilidad y ligereza.

En las modalidades de descenso y enduro, las cargas estáticas y dinámicas, en definitiva, las fuerzas que actúan sobre ellas, son muy importantes y se traducen, como ya hemos dicho, en tensiones de tracción y compresión, y en torsión que aumenta con el peso del ciclista, la velocidad y las irregularidades del terreno. En particular, el tubo oblicuo del cuadro es el más solicitado. Por esta razón, los materiales empleados en la construcción de un cuadro y la tecnología de sus uniones junto con el diseño de tubos, constituyen un factor de gran importancia.

Los criterios de diseño más extendidos serían: en el triángulo principal del cuadro utilizar, en la medida de lo posible, geometrías lo más pequeñas posibles, de forma que los giros de los ángulos en las uniones se minimicen. Elevar la altura del pedal para ganar rigidez en el propio pedaleo y también para permitir el paso de obstáculos; mejorar el diámetro de los tubos de doble conificado "oversize" y el diámetro de la potencia; finales de tubos ovalados, rectangulares, tija de sillín y vainas reforzadas, amortiguación en la horquilla y, si es el caso, en el tren trasero.

En general, con estos criterios se busca ganar rigidez y perder peso. La tecnología de las uniones es también un factor determinante, buscando la necesaria solidez y perdurabilidad. Las hay de diferentes tipos: racores para encolar o soldadura de latón, soldadura de los tubos a tope: sistema MIG, de bandas, y el más utilizado el sistema TIG (Tungsten Inert Gas).



MOUNTAIN BIKE (MTB)

Mike Sinyard. California, EE.UU., 1974

CONECCIÓN	TODOS LOS COMPONENTES, CUADRO, RUEDAS, CAMBIO, ETC. SON MÁS RESISTENTES Y ESTÁ DOTADA DE UN SISTEMA DE AMORTIGUACIÓN.
USO	lúdico (pistas forestales, sendero y trialeras, saltos y pendientes de 20%)
MATERIALES	cuadro de tubo de acero, aluminio o fibra de carbono, ruedas con llanta de aluminio
DIMENSIONES	total 170 cm; ruedas 63 cm.
PESO	10 kg (ligeras)
CONSTRUCCIÓN	Industrial
ERGONOMÍA/BIONÉMICA (DISEÑO)	
PLAZO DE CONDUCCIÓN	posición erguida, apoyo estable, caderas, brazos y pies, visión frontal alta (1,50 m)
DIRECCIÓN	accionada por brazos en acción de giro.
PROPULSIÓN	por piernas en rotación circular, con pedal automático
FRENOS	accionamiento manual
AMORTIGUACIÓN	parcial, piernas, brazos y tronco
DISEÑO INDUSTRIAL (MÁQUINA)	
PLAZO DE CONDUCCIÓN	asiento central de altura regulable, centro de gravedad muy bajo, manillar recto, horquilla y manillar de tubo de aluminio y fibra de carbono
DIRECCIÓN	pedales, transmisión de relación variable a rueda trasera, cassette de 9 velocidades
PROPULSIÓN	de pinza delantera, de disco, asiento multiuso, amortiguadores delanteros y traseros, horquilla y cuadro flexibilidad ruedas
FRENOS	● Correcto ● Medio ● Deficiente

● Correcto ● Medio ● Deficiente

III. EVOLUCIÓN DE COMPONENTES, CUADROS Y NUEVOS MATERIALES

EL NEUMÁTICO Y LA CÁMARA DE AIRE

La experiencia de conducir una bicicleta sería muy diferente sin la aportación de inventos como la cámara de aire y el neumático. La comodidad, en buena parte, reside en la capacidad de micro-amortiguaciones de las vibraciones que se generan en origen entre las imperfecciones del firme y la rueda: se suprime el ruido, se evitan los golpes y sacudidas y se reduce la fuerza de tracción. Sin embargo, hasta 1839 no se dispuso de un material suficientemente elástico para cumplir este requerimiento. La historia fue más o menos así.

El británico Charles Goodyear, personaje inquieto y gran aficionado a los experimentos científicos, llevaba seis años calentando en la cocina de su casa diferentes mezclas de caucho natural con todo tipo de productos. Su mujer harta del mal olor permanente que invadía su hogar, le obligó a abandonar definitivamente esta afición. Sin embargo, Goodyear no cesó en su perseverancia y, haciendo caso omiso a su mujer, continuó con sus experimentos a escondidas. Un día, cuando tenía una masa de caucho natural y azufre preparada, llegó de improviso su mujer y viéndose obligado a deshacerse del delatador pastiche, no se le ocurrió otra cosa que tirarlo a la estufa encendida y hacerse el despistado delante de su mujer. Al poco rato, descubrió una masa hinchada y expandida en el interior; era la goma vulcanizada, material maravilloso, super elástico, resistentes al frío y al calor y a los productos químicos. La perseverancia y el riesgo que asumió fue al final recompensado.

En 1845, el inglés Robert William Thompson, inventa la cámara de aire de goma vulcanizada. En 1869, el francés Trufanet inventa el neumático de goma maciza con diversos perfiles y gruesos. En 1888, Boyd Dunlop de Belfast, reinventa el neumático de aire, a base de una cámara de aire de goma vulcanizada recubierta de tela de vela de barco muy resistente y en años sucesivos se inventa el neumático reforzado con hilo de alambre (Charles Kingston Welch). Un año después el tube-less desmontable. Dover Etienne Michelin y los americanos probaron con éxito los neumáticos reforzados interiormente con pana.

LA CADENA

De una forma, más o menos explícita, en los dibujos del Códice Atlántico de Leonardo da Vinci, se representan máquinas para usos diversos de obra civil, artíluguos militares accionados en alguna parte por cadenas articuladas rudimentarias, pero no fue hasta 1829 cuando el francés André Galle construyó una cadena articulada y dentada llamada cadena “gallica”; no tuvo éxito para usarla en las bici, sin embargo, si prosperó una modificación de ésta, la cadena de rodillo y eslabón corto, más estrecha, que estaba bañada en aceite para minimizar pérdidas de rozamiento.

Del diseño de triciclos, y tras el invento de James Starley del engranaje diferencial, se trabajó en una alternativa a la tracción de cadena, el *cardan* de Samuel Miller (1882). Algunas bicicletas lo montaban, pero lo único que aportaba era robustez y más fiabilidad mecánica a un precio desorbitado y no prosperó.

EL CAMBIO DE MARCHAS

Algunos modelos de bicicletas ya incorporaban cambios de marcha rudimentarios a finales del s. XIX. En 1879, en algunas bicis se podía intercambiar el platón con el piñón de atrás a adelante y viceversa, o desmontando la rueda trasera que iba provista de dos piñones. No fue hasta 1932 cuando empezaron a aparecer soluciones de cambio de marcha “Campagnolo”.

EL BUJE

Hoy en día es una de las piezas más sofisticadas de una bici, forma parte de la transmisión, continua o de rueda libre, y en algunos modelos de freno trasero.

Nació de forma sencilla: un taco de madera atravesado por un eje de hierro. En las Micheaux, el eje se construía en bronce. En 1869, se incorporó en el buje el cojinete de tipo deslizante. Unos años después, en concreto, en 1887, el francés Jules Pierre Surray refinó el invento incorporando bolas lubricadas y consiguió un mecanismo altamente eficiente, ya que la fricción quedó reducida al uno por mil. El invento tuvo una trascendencia enorme aplicándose además de a las bicicletas, a triciclos, carros, automóviles y motos.

La rueda libre es el dispositivo que permite transmitir la tracción del piñón a la rueda, pero que en las bajadas permite dejar de pedalear y que la rueda siga girando. Se inventó en 1867 colocándola en la Micheaux pero de forma externa, a modo de trinquete. En 1869, William Van Anden consigue el mecanismo de rueda libre en el interior del buje. En 1903 se logra poner buje de rueda libre con freno de marcha atrás incorporado. El mismo año se construye un buje de tres marchas, desde entonces este mecanismo, con pequeñas variantes, se ha mantenido más o menos igual hasta nuestros días, con una cifra de fabricación espectacular, en 1927, ocho millones de unidades y en 1975, 250 millones de unidades fabricadas.

EL CUADRO O BASTIDOR

Una bicicleta, en esencia, es tres cosas: un par de ruedas alineadas, una dirección y una propulsión muscular. Para armar las tres cosas es necesario: un soporte material, que es lo que denominamos cuadro o bastidor de la bicicleta, que debe responder a una determinada forma y proporciones ergonómicas además de construirse con un material

resistente y ligero. Desde el punto de vista industrial debe ser fácil de trabajar (corte, soldadura, doblado) y, a poder ser, económico.

La manera más directa y sencilla de unir dos ruedas es a través de una doble barra a los ejes de las dos ruedas; evidentemente, ello no permite girar a la rueda delantera (celerífero), por tanto, esta barra debe colocarse sobre la rueda delantera y encajar en una horquilla. Esta idea es la que se convertirá en el cuadro cruzado, muy utilizado a lo largo de la historia de la bicicleta con pequeñas variantes; será el cuadro de draisianas, hobby-horses, michaulinas y velocípedos.

En el momento en el que se emplea la concepción de dos ruedas iguales y el puesto de conducción centrado de la bicicleta segura, resulta más conveniente el cuadro de diamante, que unido por el centro con una barra vertical se optimiza, aún más en lo que sería el cuadro más extendido entre las bicicletas: el trapezoidal o de doble triángulo.

En 1886, los hermanos alemanes Reinhard y Max Hannesmann inventan el procedimiento industrial del tubo laminar sin soldar, aumentando resistencia, ligereza y economía. El espesor del tubo era de 2,5 mm. En 1980, el tubo estándar era el Reinold 531 de 0,9 mm de peso. Actualmente existen cuadros de carretera con tubo de 0,3 mm.

LOS NUEVOS MATERIALES

Los materiales más utilizados actualmente en la construcción de cuadros de bicicletas y, en orden cronológico son los siguientes:

ALEACIÓN DE ACERO CROMOMOLIGDENO

Muy resistente, fácil de trabajar, robusto, flexible, de buena perdurabilidad y económico: unos 70 euros. Inconveniente: peso excesivo.

ALEACIÓN DE ALUMINIO

En 1986, se construyen los primeros cuadros de aleación de aluminio de la marca Gary Fisher que rebajaron los 15 kg de un cuadro de acero a 7 kg. Se trata del aluminio de tipo 7075 (ergal), de resistencia a tracción de 540 Mpa, límite elástico de 470 Mpa y densidad 2,80 gr/cm³. La mayoría de los cuadros de las bicicletas se construyen con este material, sobre todo por el buen balance entre características mecánicas, ligereza, tecnología de soldadura, manejabilidad y precio. Un cuadro de bicicleta de aluminio tiene un coste de entre 150 a 400 €.

ALEACIÓN DE TITANIO

En 1991 aparecieron los cuadros de titanio de la marca Yeti, material proveniente de la industria aeronáutica. de muy alta resistencia, similar al acero pero un 49% más ligero, 4,43

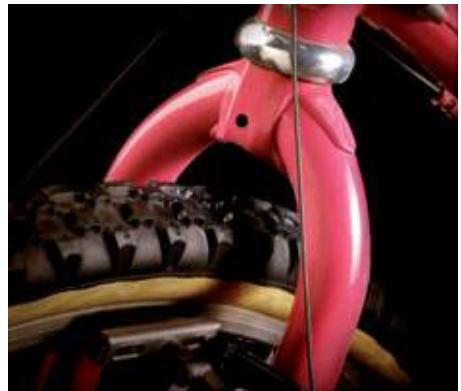
gr/cm³, pero de coste elevado. Hoy en día se utiliza en muchos componentes –incluso tornillería, discos de freno, piezas metálicas diversas– y que pueden mecanizarse como el acero por arranque de viruta. También permite el fresado químico, es maleable, dúctil, duro: 6 en la escala Mohr, muy resistente a tracción, 900 Mpa. También se puede fundir, soldar y moldear; se suministra en aleaciones normalmente gr 5 (6Al, 4V) en forma de láminas delgadas, alambre, barras y tornillería. El precio aproximado es de 2.500 €/kg.

FIBRA DE CARBONO

En 1990, proveniente de otros campos como el aeroespacial, se introducen los materiales compuestos, el composite y la fibra de carbono, que es un material que se obtiene al superponer fibras finísimas y muy resistentes sobre un material matriz, normalmente una resina. El resultado es un compuesto de características mecánicas excepcionales, un 30% más rígido que el acero con solo una quinta parte de su peso, dotado de una rigidez específica muy alta, buena estabilidad dimensional, tolerancia a las altas temperaturas, resistente a la corrosión y a la fatiga; pero con algunos inconvenientes, como problemas de fragilidad a los golpes, dificultad de encolado con otras piezas metálicas y un precio altísimo. Un cuadro de competición pesa aproximadamente unos 950 gr y cuesta alrededor de 2.000 o 3.000 €, debido sobre todo al proceso de fabricación complejo y a el coste de las resinas.

Se empezó a usar, primero, en ruedas de bicicleta de carretera y de competición. Induráin y Rominger consiguieron en 1991 grandes éxitos, sobre todo en pruebas contrarreloj, ya que con este material se pudo construir una rueda con perfil en ala aerodinámico dotado de cuatro radios tipo bastón. No podía utilizarse en etapas de montaña, por la excesiva rigidez del conjunto de la rueda, convirtiendo las bajadas en una experiencia muy peligrosa. Hoy en día se utiliza para la fabricación de cuadros de bicicleta de alta gama, tanto de carretera como de montaña.

La evolución de la bicicleta sigue vigente, hoy en día, siempre encaminada a aligerar su peso, lograr frenos más eficaces, mejor número de marchas y más fáciles de accionar, así como nuevos dispositivos de suspensión para hacer una conducción más confortable al ciclista.



Horquilla de acero cromomolibdeno.

Bicicleta de montaña con cuadro fabricado de aluminio.

Cuadro y componentes de fibra de carbono en bicicleta de carretera.

Detalle de racor de titanio encolado a tubo de fibra de carbono.

Buje de rueda delantera de fibra de carbono.

Diversos manillares de fibra de carbono.



IV. LA BICICLETA PLEGABLE. HISTORIA DE LA “BROMPTON”

La bicicleta plegable fue un invento de los militares, que ya la utilizaron en la Primera Guerra Mundial, como la bicicleta convencional para usos como el correo y las comunicaciones, el transporte médico y las municiones. Permitía cubrir distancias entre las primeras líneas y las posiciones de retaguardia con cierta agilidad, sin depender de combustibles y, en general, de la logística del transporte pesado. El interés por la bicicleta plegable nació de la posibilidad real de que el soldado-ciclista pudiera transportar a cuestas la bicicleta en el campo de batalla, ejerciendo por tanto las mismas funciones de ataque o defensa de un soldado de infantería, pero con la capacidad adicional de poder, en determinados momentos, desplazarse sobre la bicicleta cubriendo distancias mucho mayores que a pie o distancias cortas en mucho menos tiempo. El planteamiento bicicleta transportable a la espalda del soldado, obligó a los creadores a resolver tres retos tecnológicos interesantes. En primer lugar, cómo construir una bicicleta plegable de dimensiones apropiadas para ser colgada de los hombros del soldado dejando libres las manos. En segundo lugar, que el mecanismo de plegado fuese sencillo, rápido yiable. Y por último, que el peso de ésta no superase los 18 kg de peso para no mermar mucho la movilidad del soldado. Se construyó el primer modelo que reunía tales características.

Como en otras ocasiones, el interés militar original dio paso a usos civiles, que vieron en este planteamiento de bicicleta, ventajas como la posibilidad de ser transportada en el maletero de los autos permitiendo al conductor llegar a determinados lugares inaccesibles en coche para disfrutar de paseos de un día o unas horas, abriendo así grandes posibilidades de ocio. El 50% de la producción mundial de bicicletas en los años cincuenta correspondieron a bicicletas plegables, la mayor parte de ellas orientadas al ocio, dándoles un uso ocasional en fines de semana y vacaciones. Además, al plegarse, su reducido tamaño, permitía almacenarla ocupando menos espacio que una bicicleta convencional. El éxito de ventas fue extraordinario, en consecuencia, hubo una bajada en los costes de producción y una reducción del precio de venta, haciéndola más popular y asequible a toda la sociedad. Muchos de nosotros tuvimos una de estas bicis cuando éramos pequeños.

Es cierto que la bicicleta además de ser un vehículo energéticamente muy eficiente, también cuenta con una virtud esencial: en determinadas circunstancias, nosotros la podemos transportar de forma también eficiente. Una cuesta demasiado dura o una dificultad no prevista en el camino del ciclista puede superarse bajando de la bici. El ciclista se convierte en caminante que empuja de forma ergonómica y natural a la bicicleta, y así prosigue. Por lo tanto, el diseño de la bicicleta responde a esa doble condición, puede ser conducida con los pies en los pedales o con los pies en el suelo en situaciones concretas. Muchos vehículos con prestaciones, a priori mejores, no cuentan con esa versatilidad y si no pensemos en lo que supone arrastrar una moto averiada.



Soldados provistos de bicicletas “colgables” durante la Primera Guerra Mundial.

En los países desarrollados, en la década de los años 70, con la crisis del petróleo y el nacimiento y primer desarrollo de la sensibilidad por el medio ambiente en el seno de la sociedad primordialmente urbana, resurgió de manera significativa el uso de la bicicleta en sustitución al coche en los desplazamientos trabajo-hogar dentro de las urbes. Del juguete de los niños, al primer vehículo de los adolescentes, pasando por las excursiones en bici de las vacaciones y fines de semana, la bici recuperó las calles de muchas ciudades. Nació el uso de la bicicleta urbana, que tiene su razón de ser en los desplazamientos cortos y medios sustituyendo al vehículo privado o en parte al transporte público. Las ventajas, en términos de tiempo, son más que evidentes como lo avalan multitud de estudios, añadiendo el coste económico, infinitamente menor en comparación con otros medios de transportes, su bajo coste de mantenimiento, la no producción de contaminación, tanto atmosférica como acústica y el bajísimo nivel de siniestralidad intrínseca.

Evidentemente cuenta con inconvenientes, como son la vulnerabilidad del ciclista cuando circula mezclado con el tráfico urbano, lo que motiva la segregación de carriles bici y los actos vandálicos en bicis aparcadas. En general, si no se dan situaciones de saturación, podríamos hablar de poca conflictividad peatón-ciclista, aunque existe. La configuración orográfica de la ciudad determina la posibilidad de ir o no en bicicleta, así como los niveles de contaminación atmosférica y las condiciones meteorológicas, aunque paradójicamente muchas ciudades de Centro Europa padecen de un clima adverso y ello no es motivo que impida un uso normal y diario de la bici.

En los desplazamientos urbanos de gran distancia (por encima de los 10 km) y en los desplazamientos interurbanos, también se genera el uso de la bicicleta, bien para dar origen o bien en destino, combinado con determinado servicio público. Un caso claro sería el uso de la bici en poblaciones pequeñas y medianas de baja densidad, con estación ferroviaria o metro hacia la ciudad, ya que permite el uso de la bici hasta la estación dotada de aparcamiento gratuito evitando el uso del coche. Casi la única alternativa real de transporte, sería un “park&ride” de bicis, modelo muy extendido en centro Europa.

Un paso más en este segmento de movilidad sería meter la bici en un tren para efectuar un segundo desplazamiento ya en la ciudad. Para ello y, por razones obvias, la bici debería ser plegable, incluso más, debería ser de plegado compacto, como un paquete y llevarse como una maleta. Así, en hora punta, se podría tomar el ferrocarril o el metro sin ocasionar demasiadas molestias al resto del pasaje y a uno mismo.

Esta forma de ir en bicicleta es la que se planteó el inglés Andrew Ritchie, diseñador de la bicicleta Brompton. Andrew Ritchie se graduó como ingeniero en Cambridge en 1968, trabajó en informática, pero decidió dedicarse a la jardinería, ofreciendo a su vez servicio puerta a puerta con su furgoneta. Así conoció a un contable australiano que había fabricado un prototipo de bicicleta plegable llamada “Bickerton”: se trataba de una bicicleta muy ligera pero de aspecto vulnerable y poco resistente.

En 1976, Ritchei decidió mejorar el diseño, y solicitó una ayuda económica a sus amigos para comprar herramientas y material. En su pequeño apartamento de la calle Brompton, acondicionado como taller, se dedicó de forma incansable a construir un prototipo basado en la idea de bascular la rueda trasera hacia delante como primera maniobra de plegado y el manillar en dos partes hacia adelante. Montó ruedas de 16 pulgadas y trabajó para simplificar y aligerar los mecanismos de plegado. Utilizó acero soldado para el cuadro y piezas de plástico macizo trabajadas a mano, así como componentes estándar de bici, como cables, pedales o frenos. Obtuvo una bicicleta realmente ligera, de 14,4 kg, y fue básicamente este diseño el que sirvió para producir industrialmente la brompton. Hoy, después de 30 años de comercialización y de todas las mejoras que se han ido incorporando en materiales y componentes, el modelo más ligero de brompton pesa 9 kg. El doble objetivo del diseño era conseguir una bicicleta portátil, similar a una maleta en tamaño y peso, para facilitar su transporte y almacenamiento.

La brompton se pliega en 10-20 segundos, de manera fácil, precisa y simple; una vez plegada se puede manipular fácilmente, ya que las partes sucias de la bici como cadena, platón y piñones quedan ocultas en la parte interior del paquete, incluso puede alojarse en una bolsa de transporte de 585x565x270 mm para los viajes en avión. Naturalmente, cabe debajo de cualquier mesa, lo que permite ir a comer a cualquier restaurante y no solo a los que están a 5 minutos andando. Cabe holgadamente en el maletero de un coche, taxi, o en el autobús y el Metro al lado del asiento, lo que permite ampliar de manera muy considerable los desplazamientos de forma muy rentable en coste económico, en ahorro de tiempo y en gasto de energía.

Se puede aparcar en cualquier estancia de la casa o de la oficina sin tener que superar una carrera de obstáculos, como en el caso de una bici convencional, que suele comenzar en el balcón atravesando toda la casa y pasando incómodamente para uno y los vecinos por la caja de la escalera del edificio, o peor aún, dentro del ascensor en posiciones inverosímiles). Las dimensiones de la bici son similares a la de una bicicleta convencional, 100 cm de distancia entre ejes, altura, distancia al manillar y posición de los pedales también similar. La diferencia más notable es el tamaño de la rueda de 16" (unos 40 cm) de diámetro. Desarrollos equivalentes a las otras bicicletas gracias a platós de mayor tamaño y piñones pequeños. La dirección es más sensible y viva, motivado por el tamaño de la rueda. Para no perder eficiencia en la rodadura hay que llevar el neumático a una presión altísima, de unos 70 a 100 bares, cosa que va en detrimento de las vibraciones; por ello, Ritchei colocó un pequeño amortiguador de goma en el cuadro de la brompton. La conducción, la estabilidad y la capacidad de frenado, aunque diferentes de una bici convencional, se asumen fácilmente.

Después de 5 años de prototipos y a pesar de las ventajas incontestables del producto, Andrew Ritchei no consiguió convencer a la industria británica de la bici, que le pedían sobre todo garantías de fiabilidad. Viendo que todo su proyecto se iba al garete, optó por una so-



Una Brompton plegada.

lución imaginativa, que fue convencer a 30 amigos para que le adelantasen el coste de la bici. En una empresa de ingeniería y diseño, Ritchie pudo construir, en 1981, estas 30 primeras bicicletas para sus amigos. La consecuencia inmediata fue el encargo de 20 bicis más, que dieron los beneficios para comprar las herramientas. Cinco años después, produjo lotes de 50 bicis, que después de un primer éxito de ventas, pasó a una línea de producción de 400 unidades. Se vendía al doble del precio que una plegable normal, unas 200 libras. El punto débil era el peso de la bici, muy por encima de sus competidoras. La única forma de bajar notablemente el peso era construyendo ruedas de aluminio, pero no existía ningún fabricante que hiciera ruedas de 16" y lo peor es que ninguno apostaba por esta solución.

Ritchie se vió obligado a suspender la producción y dedicarse a otras actividades, pero cinco años después, un encuentro fortuito de una amiga con un constructor de Yates inglés llamado Julien Vereker, le dio un nuevo impulso. Vereker al ver una Brompton plegada se entusiasmó y la introdujo en el mundo de los barcos de recreo, donde por razones obvias, ya se venían utilizando bicicletas plegables.

En 1986, con su nuevo socio y después de algunas mejoras, se reinició la producción de las bicicletas. En 1987, se les concedió el premio internacional al mejor producto en la feria de Cyclex. Después de mucha controversia entre los miembros del jurado optaron por la Brompton, por ser un producto nuevo y original. En aquel momento el ritmo de producción era de 60 bicis al mes, con tres empleados. Empezaron a acumular lista de espera, se fueron incorporando mejoras como el nuevo buje Sturmey-Archer de 5 velocidades, un kit de iluminación, porta paquetes delantero y pedal plegable.

En 1988, se producían 90 bicis al mes, pedidos imposibles de satisfacer y exportaciones a Alemania, Holanda, Austria, Francia y Bélgica. En 1992, la compañía taiwanesa Euro-Tai pidió licencia para producir y distribuir en el área del Pacífico, pero no acabó de funcionar por las diferencias de precios con otros modelos. En 1993, Brompton se muda a una fábrica mayor y consigue establecer un ritmo de producción de 100 bicis semanales, lo que supuso eliminar en un año la lista de espera. En 1995, Brompton gana el Queen's Award y en 1996 es declarada bici del año por la Asociación Alemana ADFC; las ventas se dispararon. En 1997, la lista de espera se situó en 6 meses. Una nueva mudanza, en 1998, con 30 empleados y una producción de 200 bicis por semana pudo atender la demanda. En 2002, Brompton produce 500 bicis semanales, tres modelos diferentes y listas de espera de un mes con 90 empleados. Actualmente cuenta con un equipo de diseñadores e ingenieros dedicados a mejorar la bicicleta.



1. PREÁMBULO

Un puente, un edificio, un depósito de agua, una conducción de gas, toda construcción tiene su estructura. Pero no todo es estructura en el objeto construido porque la función para la que fue construida, su razón de ser, nunca es puramente estructural.

Un barco tiene una estructura que le permite flotar y deslizarse sobre el agua. Y a los submarinos bajo el mar. La estructura de un avión le permite despegar primero, volar después, y aterrizar finalmente.

Estamos familiarizados con el chasis, la estructura de camiones a los que con frecuencia se les puede observar casi desnudos. La de los coches queda más oculta a la mirada. Como el de las motos que alojan, entre el sofisticado entramado estructural que une las ruedas al motor, al depósito de combustible y a los componentes mecánicos que les permiten desplazarse, lenta o velozmente, y con indinaciones inverosímiles en las de alta competición.

Los trenes se sostienen sobre estructuras que con el tiempo han evolucionado significativamente, pero cuyos rasgos esenciales provienen de la época en que se gestó el ferrocarril —en la victoriana Inglaterra del siglo XIX— y del concepto que lo alumbró: máquina de vapor montada sobre una plataforma con ruedas de hierro primero y de acero después que circulaban por “carriles de hierro”, ferrocarriles en castellano y “ferrocarrils” en catalán (la línea Barcelona-Mataró, fue la primera construida en la Península), o por “caminos de hierro”: los “railways” del lenguaje anglosajón y los “chemins de fer” en el francés.

La rueda de goma, estructura neumática con el aire a presión como amortiguador, no había sido inventada todavía. Llegaron tarde a los trenes y, para mostrar sus excepcionales cualidades, tendrían que esperar a que los coches, que vieron por primera vez la luz en maternidades americanas, se convirtiesen, hace más de un siglo, en el vehículo por excelencia de una Sociedad occidental que, en lo económico, estaba empezando a marchar también sobre ruedas.

Trenes, coches y motos cuyo objetivo funcional era la movilidad de personas y mercancías, nacieron con elementales ballestas y muelles que se hicieron luego suspensiones y amortiguadores, crecientemente sofisticados, para favorecer el adecuado comportamiento de sus componentes estructurales y mejorar el confort de quienes los utilizaban.

Un árbol también tiene su estructura que se muestra con nitidez cuando el otoño desnuda de hojas caducas las ramas que brotan de un tronco cimentado en sus raíces. Una planta y si alquier ser vivo la tienen también. El ser humano, tras un larguísimo proceso evolutivo,

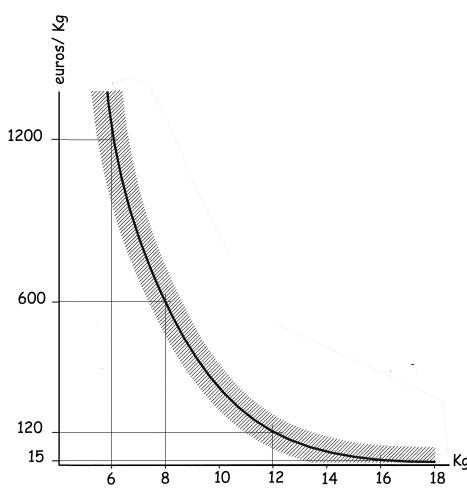
se sostiene erguido y se mueve gracias a su estructura de huesos, articulaciones, ligamentos, músculos y tendones que trabajando en sintonía, y al tiempo que sostiene sus órganos vitales, dotan a su cuerpo de un gran potencial de movilidad y nos permiten correr, levantarnos, sentarnos, tumbarnos, saltar, tomar cosas con las manos, pedalear, meter goles, danzar, sentir, amar, y tantas cosas más.

La estructura de la bicicleta siempre ha estado a la vista. Y aunque con el paso del tiempo sus funciones se han diversificado, su estructura no ha dejado de tener el protagonismo de su imagen. Adaptándose a sus modernos y variados cometidos, adecuándose al progreso de los materiales con los que se construyen, pero sin ocultarse jamás. Y con componentes centenarios que continúan siendo sus señas de identidad visual. Ruedas con sus neumáticos, llantas y radios. Cuadros en celosía que se sustentan en los bujes de las ruedas. Horquillas delanteras. Manillares y potencias más o menos sofisticados dentro de su sencillez conceptual. Sillines que coronan la parte posterior del cuadro. Los pedales con sus bielas y los mecanismos de transmisión con sus desviadores y cadenas, los esenciales frenos y poco más. La bicicleta muestra con orgullo su belleza externa. Aunque esconde su secreto porque no nos dice donde oculta su alma.

Con el paso del tiempo, la bicicleta se ha sofisticado. Sobre todo, debido a su utilización para el deporte y a la posibilidad de hacerla circular por caminos no asfaltados y por cualquier sendero de montaña. Y en su evolución ha tomado de sus hermanos mayores – las motos principalmente, que, a su vez, han aprovechado de la experiencia adquirida en la fabricación de coches– elementos como amortiguadores, suspensiones, frenos de discos, rodamientos y materiales como el aluminio, que ha ido dejando atrás, por ahora, al tradicional acero. Y, de un tiempo a esta parte, utilizan también a las jóvenes, costosas y un tanto misteriosas fibras de carbono impregnadas en resina que tienen, superados sus titubeantes inicios, una presencia relevante en las bicicletas de alta gama. Sin olvidar la más infrecuente pero no menos distinguida presencia del elitista titanio en cuadros y en algunos delicados componentes. Induso del bambú, de la madera y del magnesio.



2. ESTRUCTURAS DE LA INGENIERÍA CIVIL Y DE LA BICICLETA: SIMILITUDES Y DIFERENCIAS



¿En qué se asemejan las estructuras de la ingeniería civil a la estructura de una bicicleta? Aparentemente, en poco. Pero, en lo esencial, son muchas las similitudes.

En el diseño de una bicicleta se pretende, a veces como objetivo prioritario, reducir su peso propio, que puede variar entre los menos de 8 kilos de una bicicleta sofisticada de competición a los, tal vez, 16 kilos, de una bici de paseo construida de acero. Mientras que quienes la utilizan pesan mucho más, aunque, rara vez, superen el centenar de kilos, porque la bicicleta está reñida con la obesidad.

En cambio, en las estructuras de la ingeniería civil el peso propio suele superar ampliamente las sobrecargas de uso establecidas en las reglamentaciones correspondientes.

El precio de una bicicleta tiende a ser, por otra parte, inversamente proporcional a su peso. Las de alta gama puede superar los 1.000 euros el kilogramo, mientras que el de una bici de paseo puede reducirse a 10 €/kg.

Como contraste, el coste por kilogramo de los coches se sitúa entre los 30 €/kg –los más sencillos– a los 300 €/kg, los más sofisticados. Un Rolls Royce por ejemplo puede pesar unos 2.500 kg y su coste puede alcanzar y superar los 300.000 euros. Mientras que el afrodisíaco Ferrari Testarrosa, que pesa mil kilos menos, tiene un precio similar.

Un paso superior sobre una Autopista puede costar del orden de 0,1 €/kg y al mítico Puente del Golden Gate en la Bahía de San Francisco, se le podría asignar un precio de unos 6 €/kg.

El coste de un kilogramo de hormigón, colocado en obra, no suele superar los 0,20 €. El acero de las barras corrugadas que utilizamos en el hormigón armado, induyendo su colocación, no alcanza 1,0 €/kg. Y los eficientísimos aceros para pretensar, con límites elásticos que alcanzan los 1.600 megapascles, no suelen superar, en general, los 4 €/kg. Precio similar al del acero laminado que utilizamos en la construcción de puentes metálicos complejos.

Rara vez en puentes y otras estructuras tradicionales de la ingeniería civil se utilizan otros materiales que no sean el hormigón y el acero. Porque cuando se plantea el uso de aceros inoxidables, de aluminios aleados, o de materiales compuestos, no suelen salir las cuentas. En la ingeniería civil hay poco espacio para la sofisticación y por ello, la creatividad de los ingenieros se ha de manifestar en la mejora de la eficiencia de los procesos constructivos –en términos de rapidez y de seguridad en la ejecución de la obra– en la búsqueda de estructuras que requieran pocos gastos de mantenimiento y sean perdurables, en la integración paisajista y quizás, sobre todo, en acertar con soluciones creativas a problemas nuevos.

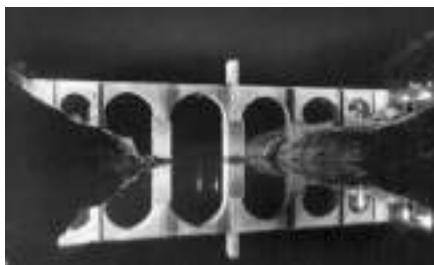
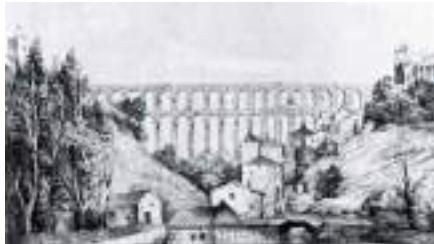
Por otra parte, las estructuras de la ingeniería civil se conciben para que tengan vidas útiles que alcancen los 100 años y, si son bien mantenidas, pueden llegar a ser eternas, aunque haya cambiado, una y más veces, la función para la que originalmente habían sido construidas.

Por contraste, las bicicletas más ligeras y sofisticadas mueren jóvenes y eso aunque cada poco tiempo se las someta a cuidadosos trabajos de mantenimiento y se sustituyan, frecuentemente, algunos de sus componentes más delicados. Las otras, más tradicionales y robustas, con menos y más sencillos componentes, pueden durar algunas decenas de años, si, también, se las mantiene con mimo y se las trata con esmero.

Pero la diferencia sustantiva con la estructura de la bicicleta es que las de la ingeniería civil, en su gran generalidad, son prácticamente estáticas y las acciones que actúan sobre ellas inducen esas aceleraciones que no generan fuerzas significativas de inercia. En general nuestras estructuras se mueven poco y lo hacen lentamente. Por eso, en su dimensionamiento no se suelen considerar, explícitamente, los efectos dinámicos. Excepto, en el caso de las acciones sísmicas, o de puentes muy esbeltos a los que pueden afectar las ráfagas de viento, o en el de chimeneas industriales o en las torres para aerogeneradores, y en algunas estructuras marinas sometidas a oleajes aleatorios.

La bicicleta, por otra parte, es el paradigma de la movilidad y la movilidad, siempre asociada a aceleraciones, vibraciones e impactos, es el dominio de la dinámica estructural. Porque, la bicicleta sólo es estática cuando no es utilizada. Entonces es solamente un objeto. Pero, cuando se encuentra en movimiento, montada e impulsada por el ciclista, se convierte en una estructura esencialmente dinámica en la que las aceleraciones, verticales y horizontales, longitudinales y transversales, que se generan durante el movimiento, se añaden a la prácticamente invariable aceleración vertical de la gravedad, determinando su comportamiento. La gravedad pierde el monopolio que posee en el dominio de la estática. De la simbiosis entre la ligera bicicleta y su montura, nace un centauro sobre ruedas. La bicicleta es uno de los últimos ejemplos de vehículo de tracción animal. El ciclista es el motor que inyecta la energía imprescindible para el movimiento, pero es, además y sobre todo, el cerebro que toma las decisiones que la obediente bicicleta debe aceptar sin rechistar, aun cuando, algunas, puedan estar equivocadas.

La bicicleta, su proliferación, la diversidad de sus aplicaciones, su dinamismo en suma, es manifestación, también que, como en tantos ámbitos de la vida, lo que es útil se convierte en necesario. Y nuestra querida bicicleta, aún siendo más que centenaria, continúa llena de futuro.



El Acueducto romano de Segovia, España. El Puente de Alcántara, España. Santa Sofía, Estambul. Puente de Brooklyn, Nueva York.

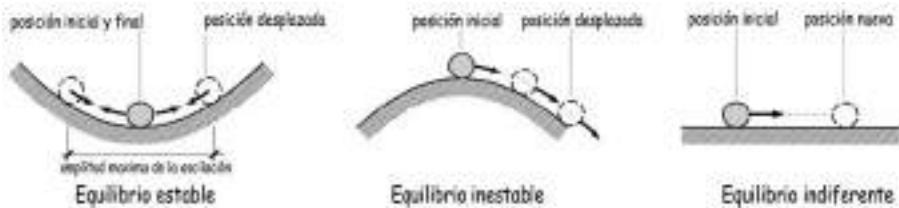
3. EQUILIBRIO ESTÁTICO Y EQUILIBRIO DINÁMICO

A pesar de tan sustantivas diferencias existen pautas de comportamiento que son comunes a todas las estructuras. Así ocurre con el universal criterio de equilibrio: la estructura globalmente y todas y cada una de las partes que virtualmente podemos aislar del conjunto, deben cumplir tan ineludible condición.

A los más privilegiados de mi generación nos explicaron en alguna fase de física de un bachillerato ya remoto, cuando éramos más o menos quinceañeros, que existían tres fases de equilibrio: el estable, el inestable y el indiferente.

Es probable que, para inculcarnos estos conceptos, el paciente profesor nos dibujase en una de aquellas enlutadas pizarras que por entonces presidían nuestras aulas, una bola situada en el punto más bajo de una superficie cóncava que tras ser ligeramente desplazada de su posición inicial de equilibrio, tras oscilar un cuantas veces con amplitudes progresivamente decrecientes, volvía a su posición inicial. Era una imagen característica del equilibrio estable.

Si la hipotética bola se situaba después en la cumbre de una superficie convexa sobre la que podía mantenerse “milagrosamente” quieto, cualquier desplazamiento, por mínimo que fuese, provocaba su movimiento irreversible y la bola no podía volver a su posición inicial. Elemental representación del equilibrio inestable. Si la misma bola se desplazaba sobre un plano perfectamente horizontal quedaba inmóvil en la nueva posición, lo que expresaba gráficamente el equilibrio indiferente.



Tuvieron que pasar muchos años para que quien esto escribe comprendiera mejor el significado de aquellos símbolos que habían quedado tranquilamente posados, y casi olvidados, en su memoria, y se atreviese a reelaborar los conceptos que, imprecisamente le había explicado aquel buen profesor de física que contribuyó a despertar mi perdurable interés por la disciplina que enseñaba.

La resultante de las acciones que actúan sobre un cuerpo o sobre una parte de él, debe ser igual y contraria a la resultante de las reacciones asociadas. Cuando las acciones, y consiguientemente las reacciones, varían con el tiempo, al equilibrio que debe existir entre

unas y otras, y que irá cambiando a cada instante, se le puede considerar como dinámico. Y, por simplicidad, se puede aplicar también dicha denominación al equilibrio de todos los cuerpos en movimiento, aún cuando sean uniformes y no generen aceleraciones ni fuerzas de inercia. Por el contrario cuando un cuerpo no se mueve y las acciones y reacciones que actúan sobre él no varían con el tiempo, podemos considerar que estamos en un caso de “equilibrio estático”.

En consecuencia, al equilibrio estable, con toda su aureola de prestigio, se le podría asociar con lo estático, con lo inmóvil, con la ausencia de vida. Por el contrario, al desasosegante equilibrio inestable, que provoca un rechazo social generalizado como todo cuanto es inestable e incierto, se le puede relacionar con lo dinámico, con el movimiento que es manifestación de vida. La posición, por ejemplo, de los brazos de una bailarina que gira como una peonza, asegura su equilibrio dinámico, siempre inestable, porque cambia a cada instante.

Y continuando con esta poco rigurosa pero expresiva analogía, nos queda, finalmente, el equilibrio indiferente que no es manifestación de vida ni expresión de su ausencia. Es la nada, lo que se denomina “pasotismo” en el lenguaje coloquial de hoy.

El mundo de la bicicleta, con el tiempo, ha ido acuñando expresiones que, a modo de proverbios, describen con precisión no exenta de encanto este dinamismo esencial. Así algunos atribuyen a Einstein aquel que asegura que la vida es como la bicicleta: si dejas de pedalear te caes. O aquel otro, tal vez de cosecha propia, que dice que cuando vas en bicicleta y parece que no sopla el viento es que sopla a favor. Y cuando sopla en contra hay que remar. Los pedales son los remos de la bicicleta.



Einstein montando en bicicleta.

4. FUERZAS Y REACCIONES. ENERGÍA DEL MOVIMIENTO.

4.1. INTRODUCCIÓN

El equilibrio global de la bicicleta exige que las acciones que actúan sobre ella se equilibren con las reacciones, de signo contrario, que se sitúan en el contacto de las ruedas con el pavimento sobre el que se desplazan. Dicha condición suele permitir estimar los valores de las reacciones de apoyo de cualquier estructura, la bicicleta en nuestro caso. Y conocer dichas reacciones de apoyo ayuda a comprender y evaluar el comportamiento de la estructura en su conjunto y de cada una de sus partes. Es algo que todo ingeniero debería hacer instintivamente. En este texto se dedica especial atención, por ello, a determinar las reacciones de apoyo que provocan las diferentes acciones que pueden actuar sobre la bicicleta, lo que contribuye a plantear con claridad los esenciales conceptos de energía y potencia asociados al movimiento del ciclista y su bicicleta.

El comportamiento de todas las estructuras –tanto las creadas espontáneamente por la naturaleza o las que, con la ingeniería como comadrona, han nacido para dar respuesta a necesidades de los seres humanos– está gobernado por las tres sencillas y esenciales leyes descubiertas por Newton y expuestas en su libro *'Principios matemáticos de la filosofía natural'*, inicialmente escrito en latín y publicado en Londres el año 1687. Recordarlas bien merece la pena. La primera nos dice que un cuerpo permanece en reposo o se desplaza a velocidad constante, si no existe fuerza externa que se ejerza sobre él. La segunda, aunque expresada por el sabio universal en términos de constancia de la cantidad de movimiento, ($mv = \text{Cte}$) nos dice que una fuerza externa, F , provoca en un cuerpo de masa, m , una aceleración, a , tal que $F = m \cdot a$. Y la tercera y última, expone que toda acción sobre un cuerpo es contrarrestada por una reacción igual pero de sentido contrario. Concepto que, de otra manera, ya había sido expuesto por Arquímedes muchos siglos antes y que, en definitiva, recuerda la exigencia del equilibrio, estático o dinámico, del conjunto de las fuerzas, acciones o reacciones, que actúan sobre un cuerpo o sobre cualquier parte que, virtualmente, podamos aislar de él.

La física newtoniana nos define, también, la energía que se necesita para poner en movimiento un cuerpo o para mantenerlo en movimiento, es decir, para asegurar su equilibrio dinámico. La energía es la fuerza por el espacio recorrido en la dirección de la fuerza. La potencia define la energía por unidad de tiempo. En un intervalo infinitesimal de tiempo, dt , el ciclista montado en su bicicleta, se habrá desplazado una distancia, dx , y su velocidad, será

$$v = \frac{dx}{dt} .$$

Por tanto, las siguientes expresiones definen la energía, dE , y la potencia, P , en ese instante determinado:

$$dE = F \cdot dx$$

$$P = F \cdot \frac{dx}{dt} = F \cdot v$$

La potencia será, por tanto, la fuerza por la velocidad. Cuando el ciclista pone la bicicleta en marcha genera una fuerza de inercia, $F = m \cdot a$, e inocula la energía necesaria para que inicie el movimiento. De ello se trata en el apartado 10: "La energía del ciclista". No siendo su cuerpo una máquina perfecta, solamente aprovechará una parte de dicha energía para desplazarse. Habrá unas pérdidas de eficiencia debidas a las deformaciones elásticas de los componentes de la bicicleta (ruedas, manillar, cuadro,...), a los rozamientos internos de los mecanismos móviles (transmisión, bujes, dirección, pedales...) así como a las fuerzas de rozamiento entre los neumáticos de las ruedas y el pavimento por el que ruedan. Todo este conjunto de pérdidas se puede considerar equivalente a una fuerza global, a la que en bicicletas de alta gama, bien mantenidas, se le suele asignar un valor de 3 ó 4 newtons, según sea la velocidad.

La energía necesaria para el movimiento es, asimismo, la que requiere el equilibrio dinámico del ciclista y su bicicleta, cuando acelera, o decelera, o mantiene su velocidad. Por eso, en lo que sigue, al identificar las fuerzas que actúan sobre una bicicleta se hace referencia a la energía y potencia asociadas al movimiento, en un diálogo que ayuda a cuantificarlas, y a comprenderlas, por tanto, mejor.

En adelante utilizaremos, naturalmente, el sistema internacional de unidades en el que se miden la masa en kilogramos (kg) y la fuerza en newtons (N). Cuando afirmamos que una persona pesa 80 kg, en realidad nos estamos refiriendo a su masa. Su peso, W , sería el resultado de multiplicar su masa por la aceleración de la gravedad $g \approx 9,8 \text{ m/s}^2$ a la que, a efectos prácticos, consideraremos igual a 10 m/s^2 : $W = 80 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2 = 800 \text{ N}$.

4.2. LAS FUERZAS GRAVITATORIAS

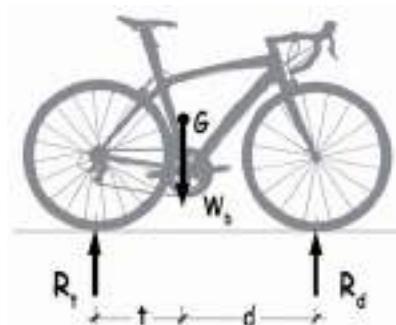
Analicemos en primer lugar, el equilibrio de la bicicleta, sola e inevitablemente estática, antes que el ciclista, montado sobre ella, la ponga en movimiento sobre una superficie, que supondremos horizontal.

CONDICIONES DE EQUILIBRIO:

a) Igualdad de cargas verticales: $W_b = R_t + R_d$

W_b : peso propio de la bicicleta, aplicada en su centro de gravedad, G_b
 R_t : reacción rueda trasera
 R_d : reacción rueda delantera

b) Igualdad de momentos: $R_t \cdot t = R_d \cdot d$



Condiciones de equilibrio:

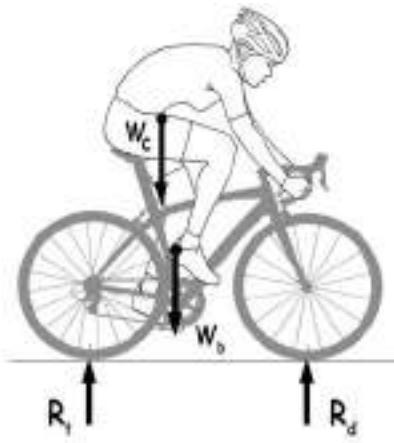
a) Igualdad de cargas verticales

$$W_b = R_t + R_d$$

W_b : peso propio de la bicicleta
 R_t : reacción rueda trasera
 R_d : reacción rueda delantera

b) Igualdad de momentos

$$R_t \cdot t = R_d \cdot d$$



Sobre la bicicleta, actuarán su peso propio $W_b = M_b \cdot g$, que se puede suponer está concentrado en su centro de gravedad, G_b , y las reacciones R_t y R_d que se localizan en el contacto de las cubiertas de las ruedas con el pavimento y cuya suma igualará a W_b .

De la exigencia de igualdad de momentos de las acciones y reacciones en relación con el centro de gravedad, G_b , se deduce la segunda ecuación de equilibrio. Tendremos, por tanto, dos incógnitas, las reacciones de apoyo, R_t y R_d , y dos ecuaciones que nos permiten su deducción. La reacción R_t en la rueda trasera suele ser mayor por estar más próxima a la vertical del centro de gravedad. En una bici de 120 N de peso, por ejemplo, las reacciones de apoyo pueden ser del orden de 75 N en la rueda trasera y 45 N en la delantera.

Cuando el ciclista se coloca sobre la bicicleta, antes de ponerla en movimiento, las fuerzas del equilibrio, que continuarán siendo estático, habrán cambiado. Al peso propio de la bicicleta se añadirá el del ciclista, que podría ser como seis veces mayor. El centro de gravedad de su masa corporal dependerá de la geometría que adopte sobre la máquina, pero se situará normalmente en el entorno del borde del sillín más próximo al manillar y por encima de éste.

Las ecuaciones de equilibrio serán análogas al caso anterior, pero las reacciones en las ruedas traseras y delanteras habrán variado en proporción. Suponiendo que el peso conjunto de la bici (120 N) y del ciclista (680 N) alcanza los 800 N, podríamos tener, como órdenes de magnitud:

$$R_t \approx 75 + 500 = 575 \text{ N}$$

$$R_d \approx 45 + 180 = 225 \text{ N}$$

$$R_t + R_d = 800 \text{ N}$$

La rueda trasera soportará del orden del 70 al 75% del peso conjunto del ciclista y de la bicicleta y la delantera el 25 al 30% restante.

4.3. FUERZAS DE INERCIA LONGITUDINALES

Cuando el ciclista pone su bicicleta en movimiento, se produce una aceleración a la que va asociada una fuerza de inercia, de sentido contrario al del movimiento, producto de la masa del conjunto ciclista-bicicleta por la aceleración en cada instante, aplicada en el centro de gravedad de la masa conjunta. Cuando se alcanza una velocidad uniforme, se anula la aceleración y, con ella, la fuerza de inercia.

Unas curvas posibles de desplazamientos-tiempo ($x-t$), velocidades-tiempo ($v-t$), y aceleraciones-tiempo ($a-t$), tendrían la apariencia de las representadas:

El periodo de aceleración duraría un tiempo, t_r , y, por consiguiente, la curva correspondiente se iniciaría con una aceleración, a_0 , que se reduciría progresivamente

hasta anularse en $t = t_r$, haciéndose la curva tangente a la abcisa de tiempos. La parábola de ecuación

$$a = a_0 \left[1 - \left(\frac{t}{t_r} \right)^2 \right]^2$$

sería una curva posible puesto que cumpliría las condiciones de contorno:

$$t = 0 \quad , \quad a = a_0$$

$$t = t_r \quad , \quad a = 0$$

$$\frac{da}{dt} = 0$$

Como $a = \frac{dv}{dt}$ y, en consecuencia, $v = \int_0^t a dt$,

la curva velocidad-tiempo será una ecuación de 3^{er} grado con una pendiente en el origen que coincidirá con la aceleración inicial, a_0 , y con una tangente horizontal de ordenada $v = v_r$, velocidad estabilizada a partir de $t = t_r$.

Como el valor de v_r debe coincidir con el área encerrada bajo la curva parabólica $a - t$, tendremos

$$v_r = \frac{1}{3} a_0 \cdot t_r$$

Análogamente, como

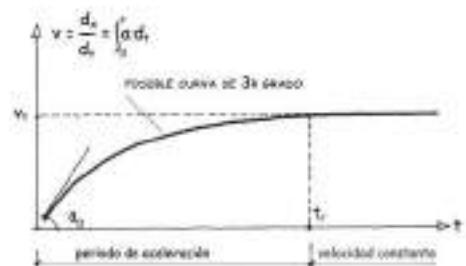
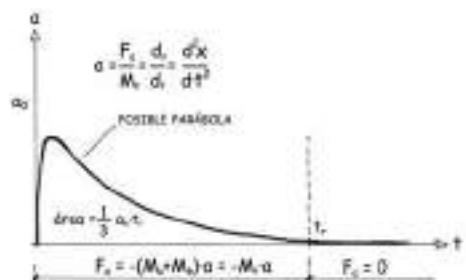
$$v = \frac{dx}{dt} \quad y \quad x = \int_0^t v dt,$$

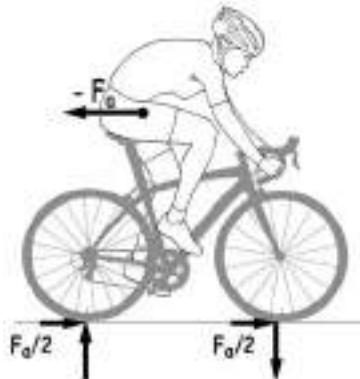
la curva de $x-t$, sería de 4º grado, con tangente nula en el origen y con tangente constante $v = v_r$, a partir de $t = t_r$.

Los gráficos anteriores no son adecuados para explicar lo que sucede en los momentos iniciales del movimiento. La aceleración no puede pasar instantáneamente de cero a un valor a_0 . Habrá un periodo de adaptación, el requerido para que los músculos del ciclista reciban instrucciones de su cerebro y transforme la energía química almacenada en su organismo en la energía mecánica que necesita el movimiento.

En el apartado 10, "La energía del ciclista" se trata con algún detalle de esta compleja cuestión. Aquí nos limitaremos a plantear la influencia que tienen las aceleraciones en las reacciones de apoyo de la bicicleta, y pondremos ejemplos que nos permitan disponer de algunos órdenes de magnitud que nos ayuden a comprender mejor las fuerzas de inercia. Pero, antes de ello, conviene observar, también, que la aceleración máxima que puede impulsar la bicicleta nunca podrá superar la que, por insuficiencia de rozamiento estático, hiciese patinar la rueda trasera sobre el pavimento.

El equilibrio dinámico del ciclista y la bicicleta, supuesta su masa conjunta ($M_T = M_c + M_b$) concentrada en un punto, G, sería la representada en el esquema.





La fuerza de inercia, F_a , genera en el contacto de las ruedas delantera y trasera, las dos fuerzas $F_a/2$ de sentido contrario que la equilibran. La distancia, h , entre el centro de gravedad de la masa conjunta y el pavimento genera un momento $F_a \cdot h$ que se equilibra con un par de fuerzas verticales, iguales y contrarias, en las ruedas delantera y trasera. La aceleración provoca, por tanto, un aumento de la reacción de apoyo en la rueda trasera y una disminución en la rueda delantera, en proporciones que van cambiando a cada instante hasta que se estabiliza la velocidad, se anula la aceleración y la consiguiente fuerza de inercia.

Las ecuaciones de equilibrio serán, por tanto

$$R_{a,d} = -R_{a,t}$$

$$F_a \cdot h = R_{ad} \cdot (t+d)$$

Para tener órdenes de magnitud, de estos conceptos, podemos imaginar la salida de una etapa individual de contrarreloj del Tour de Francia. Nuestro ciclista con sus 800 N de peso, incluido el de su ligera bicicleta (que no será la de menor peso entre todas las posibles porque el reglamento del Tour exige un peso mínimo y de ahí, el curioso ritual del pesaje de cada bicicleta, como si fuera un jamón, antes que el ciclista se coloque en la posición de salida) tardará unos 20 segundos en alcanzar su velocidad de crucero de unos 14 m/s, equivalentes a 50 km/h. La aceleración máxima podría ser –unas dos veces la aceleración media– del orden de $1,4 \text{ m/s}^2$, $0,14 \text{ g}$ aproximadamente.

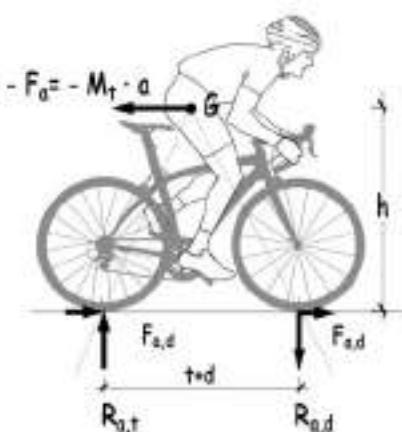
La fuerza de inercia valdría, en consecuencia,

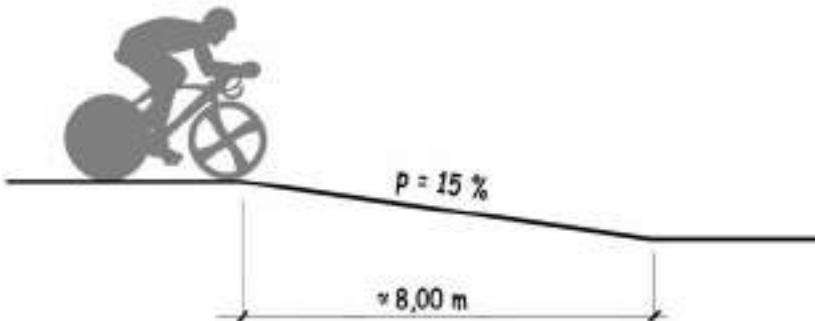
$$F_a = \frac{800 \text{ N}}{g} \cdot 0,14g = 112 \text{ N}$$

Si suponemos que la velocidad media en el periodo de aceleración es de 10 m/s, el ciclista necesitaría unos $10 \text{ m/s} \cdot 20 \text{ s} = 200$ metros de recorrido para alcanzar la velocidad estabilizada de 14 m/s.

La potencia que necesitaría nuestro ciclista hasta alcanzar la velocidad de crucero de 14 m/s en los 20 segundos iniciales de la contrarreloj, crecería desde 0, hasta una potencia de alrededor de 400 vatios que es la que puede producir un ciclista profesional en excelente estado de forma durante una hora, el tiempo necesario para recorrer los 50 km de una etapa. Aunque, inicialmente, la potencia requerida habrá sido mayor.

Pero, además, en este tipo de competiciones, el corredor suele partir de una plataforma situada, tal vez, a 1,20 m de altura con una rampa de lanzamiento que podría tener una pendiente del 15% y una longitud de 8 m.





RAMPA DE SALIDA EN UNA ETAPA CONTRARELOJ

Debido al desnivel de 1,20 m de la rampa de salida, el ciclista y su bicicleta dispondrán de una energía potencial

$$E_p = m \cdot g \cdot h = 800 \text{ N} \cdot 1,20 \text{ m} = 960 \text{ julios}$$

Si los 8 metros de rampa se recorren en 1 segundo los vatios aportados serían

$$P = \frac{960 \text{ julios}}{1 \text{ s}} = 960 \text{ vatios}$$

De manera que la curva de aportación de energía en función del tiempo del recorrido podría ser aproximadamente la representada en el gráfico adjunto.

Por otra parte, como se expondrá más adelante con más detalle, la pendiente de la rampa del 15% provoca una fuerza impulsiva paralela a ella, de

$$F = 0,15 \cdot 800 \text{ N} = 120 \text{ N}$$

Si, al cabo de un segundo, al final de la rampa, la velocidad del ciclista alcanzan los 8,0 m/s, la potencia asociada sería

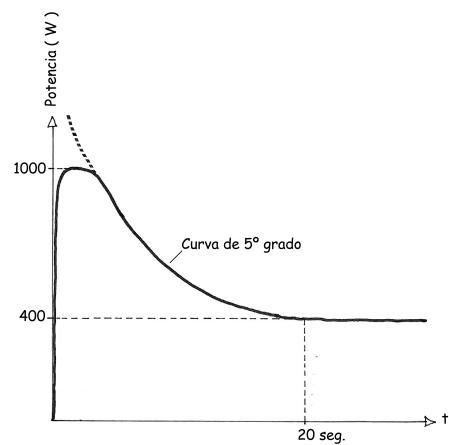
$$W = F \cdot v = 120 \text{ N} \cdot 8 \text{ m/s} = 960 \text{ W}$$

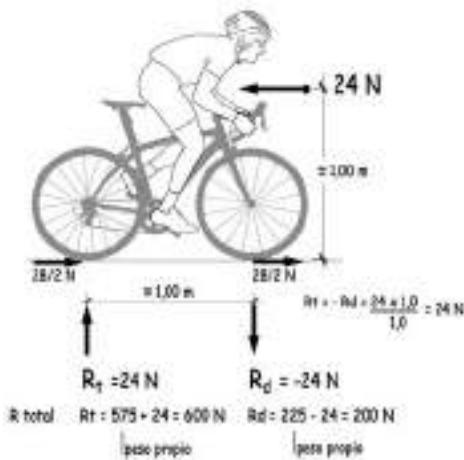
lo que confirma el aspecto de la curva dibujada para la relación Potencia-tiempo de recorrido, que partirá lógicamente del origen de ordenadas, se elevará muy rápidamente hasta alcanzar un valor máximo próximo a los 1.000 W al cabo de un segundo y comenzará a descender por una curva que podría ser de 5º grado, hasta alcanzar al cabo de los 20 s, la potencia estabilizada a de 400 W.

A partir de este momento la fuerza impulsiva debido al pedaleo del ciclista será

$$F_i = \frac{400 \text{ W}}{14 \text{ m/s}} = 28 \text{ N}$$

De esta fuerza, una parte que se suele estimar en 4 N en la bicicleta bien mantenida de un profesional, permite compensar los rozamientos mecánicos y los debidos al contacto de las ruedas con el pavimento. Los 24 N restantes equilibrarían las fuerzas aerodinámicas





generadas por el movimiento del ciclista y su bicicleta, a las que nos referiremos en el apartado siguiente. Pero, antes, evaluemos los cambios que se producen en las reacciones de apoyo de la bicicleta como consecuencia del movimiento. El equilibrio, a la velocidad estabilizada de 14 m/s sería el representado en la figura.

Las variaciones de las reacciones de apoyo de las ruedas traseras (+24 N) y delanteras (-24 N) no son relevantes. En el arranque, con la fuerza de inercia de 112 N (correspondiente a 0,14 g), dichas variaciones serían de ±112 N. Recordando que habíamos estimado 225 N como reacción de la rueda delantera antes del inicio del movimiento, aún quedará margen para incrementar la aceleración.

4.4. FUERZAS AERODINÁMICAS

El ciclista y su bicicleta, al desplazarse, deben penetrar en un espacio ocupado por el aire que, aún estando quieto, se opone a la penetración. O, visto de otra manera, sucede como si sobre el ciclista inmóvil, incidiese un viento –el aire en movimiento– con la velocidad de su desplazamiento.

El flujo distorsionado del aire que alcanza al ciclista y su montura ejerce, por una parte, presiones perpendiculares a las superficies de contacto y, por otra, tensiones de rozamiento paralelas a dichas superficies. La resultante del conjunto de las presiones perpendiculares y de las tensiones tangenciales, es la fuerza aerodinámica –la “drag force” del lenguaje anglosajón– que se opone al movimiento y que determina el esfuerzo que ha de realizar el ciclista.

Ya en el siglo XVIII la física clásica, con los Bernouilli y otros sabios a la cabeza, estableció las bases de la mecánica de fluidos. Mucho más recientemente, con la invención de la aviación, se tuvo el estímulo decisivo para comprender y caracterizar la complejidad del viento y evaluar las fuerzas aerodinámicas que se generan en las superficies de objetos en movimiento o de aquellos fijos situados en una corriente de aire.

El viento actuando sobre el conjunto del ciclista y de la bicicleta provoca una fuerza aerodinámica, F_D , que tiene por expresión.

$$F_D = \frac{1}{2} C_v \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$$

C_v es un coeficiente adimensional que depende de la geometría del obstáculo; ρ es la densidad del aire que se puede, en general, tomar como $\rho = 1,3 \text{ kg/m}^3$, aunque varía entre otros factores con la altitud del lugar y con la temperatura; A es el área de la sombra proyectada por el cuerpo del ciclista y de la bicicleta sobre un plano perpendicular a la dirección del movimiento y v es la velocidad relativa del aire, que, en caso de ausencia de viento meteorológico, coincide con la del ciclista.

Unos valores característicos para un cicloturista circulando en posición erguida, en una bicicleta de paseo, a una velocidad de 5 m/s (18 km/h) pueden ser $C_D = 0,90$,

$A = 0,45 \text{ m}^2$. Por lo tanto, la fuerza aerodinámica provocada por el viento y opuesta al movimiento será:

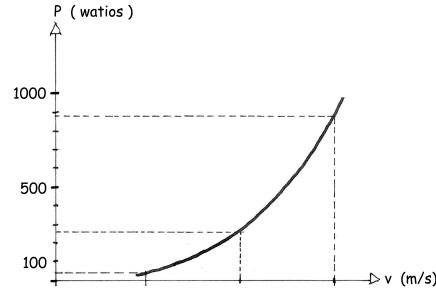
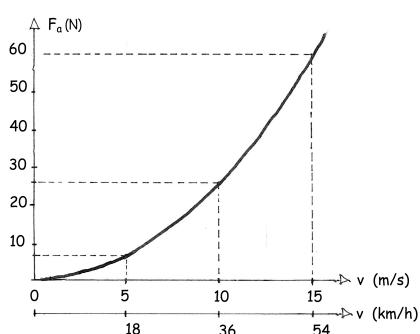
$$F_a = \frac{1}{2} 0,90 \cdot 1,3 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,45 \text{ m}^2 \cdot (5)^2 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 \cong 6,6 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 6,6 \text{ N}$$

El valor de esta fuerza depende de la velocidad al cuadrado, y aumenta rápidamente cuando se incrementa dicha velocidad. Pero aún más significativo y relevante (aunque son conceptos íntimamente ligados) es que la potencia asociada al viento, varía con el cubo de la velocidad, puesto que

$$P = F_D \cdot v = \frac{1}{2} c_D \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

Para los valores considerados de $c_D (0,90)$, $\rho (1,3 \text{ kg/m}^3)$ y $A (0,45 \text{ m}^2)$ tendríamos,

para diferentes velocidades, las siguientes fuerzas aerodinámicas opuestas al movimiento y las potencias asociadas los siguientes valores que aparecen en la Tabla adjunta. Y los gráficos correspondientes F_D - v y P - v son los siguientes:



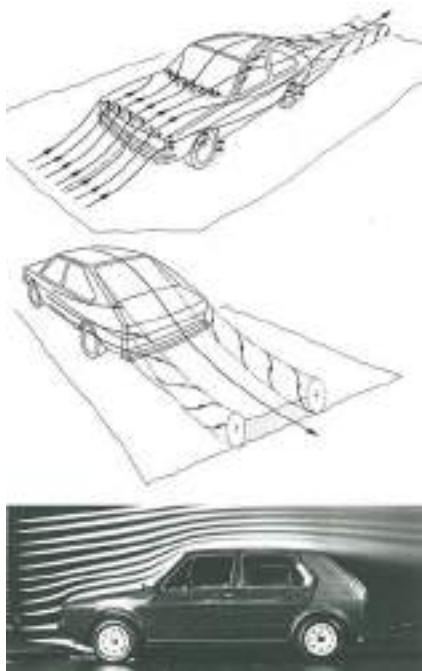
	v (m/s)	F _D (N)	P = F _D ·v (W)
	5,0	18,0	33
	7,5	27,0	111
	10,0	36,0	263
	12,5	45,0	513
	15,0	54,0	891

En la situación descrita, el cicloturista, con el torso erguido, difícilmente podría alcanzar velocidades de 10 m/s que requerirían potencias de 263 W disponibles, en todo caso, en períodos muy cortos de tiempo.

Se puede mejorar esta situación reduciendo el coeficiente C_D y minimizando, también, la superficie A , expuesta al viento. Una postura más aerodinámica del ciclista sobre la bicicleta reduce, simultáneamente, ambos factores.

Las características geométricas de la bicicleta influyen en mucha menor medida. En general su contribución a la fuerza aerodinámica opuesta al movimiento supone menos del 20% de la fuerza total, aunque, en todo caso puede marcar unas diferencias significativas, cuando se trata de la alta competición.

El coeficiente C_D , que en el ejemplo anterior se ha tomado igual a 0,90, puede reducirse considerablemente. En algunas bicicletas carenadas, pseudo-bicicletas, se han conseguido valores de 0,1. La superficie expuesta al viento varía también según la posición del ciclista,



entre un valor mínimo de $0,30 \text{ m}^2$ (posición de contrarreloj, con el manillar de triatlón, los brazos recogidos sobre el cuerpo); $0,40 \text{ m}^2$ para un ciclista con bici de carretera y las manos apoyadas en la parte inferior del manillar; y hasta $0,60 \text{ m}^2$ y aún más para un cicloturista corpulento, erguido, en una bicicleta de paseo y con un equipamiento inadecuado.

Para el ciclista que disputaba, párrafos atrás, la etapa contrarreloj del Tour a una velocidad de 14 m/s , con su vestimenta, casco y ropaje aerodinámicos, su posición tumbada, brazos recogidos apoyados en un manillar de triatlón, rueda lenticular trasera y con pocos y aerodinámicos radios en la rueda delantera, podríamos tener un coeficiente de arrastre $C_D = 0,65$ y un área expuesta de $0,30 \text{ m}^2$ de manera que la fuerza aerodinámica que habría de vencer sería

$$F_A = \frac{1}{2} 0,65 \cdot 1,3 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,30 \text{ m}^2 \cdot (14 \text{ m/s})^2 = 25 \text{ Newtons}$$

a lo que corresponde una potencia

$$P = F_A \cdot v = 25 \cdot 14 \simeq 350 \text{ vatios}$$

Añadiendo las debidas a las fuerzas de rozamientos internos y con el pavimento, estimados en 4 N , esto es

$$\Delta P = 4 \text{ N} \cdot 14 \text{ m/s} = 56 \text{ vatios}$$

tendríamos,

$$P_{\text{TOTAL}} = 350 + 56 = 404 \text{ vatios}$$

cifra que coincide aproximadamente con la considerada en el ejemplo.

El coeficiente de arrastre C_D , fundamental para determinar la fuerza aerodinámica F_D , que se opone al movimiento, suele ser de incerta definición si no se disponen de resultados de ensayos en túneles de viento. De hecho, cada vez es más frecuente que los fabricantes de bicicletas y componentes y los equipos profesionales con más recursos realicen ensayos en centros especializados, en los que se evalúan la influencia de la geometría de la bicicleta, del casco aerodinámico que suele portar el ciclista y de la posición del corredor sobre la bicicleta, en el coeficiente de arrastre C_D , y en el área expuesta. Valores que, en todo caso, son una aproximación a la realidad más compleja de la competición, en la que influyen obviamente otros factores que difícilmente pueden ser ensayados. Aunque, el gran ensayo es el que proporciona los datos de la realidad, en una determinada carrera, que se pueden monitorizar con aparatos incorporados al cuerpo del atleta y a la bicicleta, y permiten conocer la potencia utilizada y la energía consumida en cada instante, la velocidad y las pulsaciones corporales entre otras informaciones. Se logra así dibujar un panorama preciso del rendimiento del atleta, compararlo con las expectativas y sacar las oportunas consecuencias de todo ello. Sabiendo, por otro lado, que no hay dos carreras iguales, aunque muchas puedan ser parecidas.

El término de velocidad (v^2 , para la estimación de la fuerza aerodinámica y v^3 para la potencia) se refiere a la velocidad relativa. Cuando el viento meteorológico sopla en contra, su velocidad se añadirá a la del ciclista. Y se restará en caso contrario, de manera

que cuando sople a favor con suficiente fuerza el ciclista podría desplazarse sin pedalear. Cuando el viento meteorológico sea nulo, la velocidad a introducir en las fórmulas coincidirá con la del movimiento.

En los comentarios anteriores se ha supuesto que la huella imperceptible dejada por las ruedas en su recorrido es una recta perfecta y que el cuerpo del atleta se mantiene en un inalterable plano vertical. Pero ni siquiera en el caso de un trazado recto ideal será así, lo que influye en las fuerzas aerodinámicas que realmente se generan y que siempre tendrán componentes transversales, más aún en trazados con curvas, en los que además el ciclista se inclina e inclina la bicicleta para asegurar su estabilidad transversal.

La importancia práctica de las fuerzas aerodinámicas se manifiesta con toda claridad en el lugar en el que se ubican los ciclistas cuando se desplazan en grupo. El que se sitúa inmediatamente a rueda de quien lo lidera necesitará una potencia del orden del 30% inferior, reducción que puede alcanzar el 60% para los que discurren, protegidos, en el centro de un pelotón bien poblado.

Son numerosos, por otra parte, los estudios que se han hecho para evaluar la influencia que pueden tener la ropa del ciclista y la forma, más o menos ceñida, de portarla, la utilización de casco aerodinámico, el tipo de zapatillas utilizadas, la posición del cuerpo, la geometría del cuadro y de los tubos que lo conforman. La piel sin afeitar, por ejemplo, puede incrementar un 2% la fuerza aerodinámica.

Hay que recordar que como $P = F \cdot v$, si se reduce la fuerza F , reduciendo su componente aerodinámica que a velocidades elevadas es, con mucho, la más significativa, para la misma potencia, se incrementará la velocidad del movimiento. Así, una reducción del 1% supondrá un aumento de la velocidad y una reducción del tiempo en la contrarreloj de 50 km de 36 segundos (1% de una hora). Lo que separó a Contador de Andy Schleck en el Tour del 2010.

El ciclismo está lleno de sutilezas. Las ruedas de las bicicletas, por ejemplo, han evolucionado desde las que se configuraban con 36 radios cilíndricos, hacia otras con menor número de radios, de geometrías ovaladas más aerodinámicas, hasta llegar a las lenticulares, más pesadas, pero que oponen menos resistencia al viento longitudinal. Aunque, como importantísima contrapartida, al no ser permeables, son mucho más sensibles a la componente transversal de los vientos meteorológicos o a la originada por las curvas en los desplazamientos de la bicicleta.

Los numerosos estudios y ensayos realizados para evaluar y optimizar la tipología de las ruedas delanteras y traseras han puesto de manifiesto que si la bicicleta contribuye con un 20% como orden de magnitud, a la generación del total de las fuerzas aerodinámicas del conjunto ciclista-bicicleta, las dos ruedas son responsables, a su vez, hasta el 15% de dicha proporción, es decir hasta un 3% de la fuerza aerodinámica total. De ellos, el 65% corresponden a la rueda delantera. La trasera, que contribuye con el 35% restante, está protegida por el tubo vertical del cuadro, cuyos diseños más modernos y elaborados, aproximándose y adaptándose a la geometría de la rueda posterior pretenden subrayar este aspecto. A costa de modificar sustancialmente la tradicional y sencilla geometría tubular característica de los cuadros



tradicionales por otras con secciones ovaladas y marcadamente variables. Para ruedas con 36 radios cilíndricos se han medido coeficientes de arrastre, C_D , de 0,060 que se reducen a 0,025 para ruedas con 16 radios elípticos o de 12 radios aplazados que pueden tener hasta 6,4 mm de anchura y 0,6 mm de espesor. En una rueda lenticular C_D se reduce hasta 0,018.

Cuando el viento incide sobre las ruedas lenticulares con una inclinación superior, digamos, a los 5° a 10° respecto al plano de la bicicleta, la fuerza longitudinal de arrastre puede aumentar un 18%, incremento al que una rueda lenticular delantera contribuiría el doble que una trasera. Lo que justifica la tendencia a disponer solamente ruedas lenticulares traseras. El ciclismo está lleno de sutilezas, porque cualquier mejora puede limar segundos preciosos.

El viento, fundamental en el rendimiento de un ciclista y en el comportamiento del conjunto que forma con su pareja la bicicleta –un matrimonio que no puede ser sólo de convivencia– tiene un carácter aleatorio y no determinista, y sólo se puede caracterizar con suficiente rigor recurriendo a los instrumentos que para ello pone a nuestra disposición la estadística. Es un dominio altamente especializado, aunque no se debería hacer inaccesible para nadie. Entre otras cosas porque el especialista puede comprender pero sólo el ciclista puede sentir y, además, si tiene quien se lo explique bien, podría llegar a comprender en sus rasgos generales lo que llega a sentir.

La mecánica de fluidos, con Bernoulli, Euler, Stokes, Navier y tantos otros ha estudiado lo que ocurre cuando un objeto se sitúa en el flujo de un fluido, aire por ejemplo. En el entorno del obstáculo el flujo distorsionado puede ser laminar o, a determinadas velocidades y en determinadas condiciones que dependen también de su geometría y de la rugosidad de sus superficies, se puede hacer turbulento, formándose, aguas abajo del obstáculo, remolinos característicos, con el fluido girando a gran velocidad.

La frontera entre el flujo laminar y el turbulento depende esencialmente del adimensional número de Reynolds. Para un cilindro de radio r , colocado con el eje perpendicular a la línea de corriente, tiene por expresión

$$N_R = \frac{2rv}{\eta}$$

siendo v , la velocidad del aire; ρ , su densidad ($\approx 1,3 \text{ kg/m}^3$) y η su viscosidad, que con el aire a una temperatura de 20°C tiene por valor $1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (Pascales por segundo o $\text{N/m}^2\cdot\text{s}$).

En el caso de la bicicleta esta transición se produce cuando su velocidad es del orden de 5 m/s, si la superficie de contacto es muy lisa. A velocidades más elevadas el flujo del aire que envuelve al ciclista y su montura se hace turbulento.

El número de Reynolds que señala la transición entre el régimen laminar y turbulento será, para $v \approx 5 \text{ m/s}$, y suponiendo que el ciclista y su bicicleta se puede representar por un cilindro de altura indefinida y de 0,60 m de diámetro

$$N_R = \frac{2 \cdot 0,60 \text{ m} \cdot 1,3 \text{ kg/m}^3 \cdot 5 \text{ m/s}}{1,8 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2 \cdot \text{s}} = 4,3 \cdot 10^5$$

Para alejarnos de estos escenarios, de fronteras inciertas y poco deseables, en las que se producen las vibraciones que perciben en ocasiones los ciclistas, cuando se desplazan a velocidades moderadas equipados con ropas de superficies muy lisas, se puede aumentar la rugosidad superficial de su vestimenta. Es lo que se pretende y se consigue, por ejemplo, con los hoyuelos característicos de las modernas pelotas de golf que incrementan su rugosidad superficial y aseguran el régimen turbulento del fluido que las envuelve, consiguiendo reducir significativamente las fuerzas aerodinámicas que se oponen a su movimiento.

4.5. FUERZAS EN RECORRIDOS CON PENDIENTE

Hasta ahora hemos supuesto que la bicicleta se desplazaba sobre una superficie perfectamente horizontal y hemos deducido las reacciones de apoyo, en posición estática y con el ciclista en movimiento. Las fuerzas que transmitiría un ciclista, hipotéticamente parado, en una rampa con una pendiente del $p\%$ se modifican en relación con las que se producen en un plano horizontal.

En el lenguaje cotidiano, la inclinación de carreteras, caminos o senderos se define por la pendiente, que es la tangente del ángulo que forma la rasante con la horizontal. La pendiente p , expresa, por tanto, la altura que se asciende o desciende por cada metro en planta recorrido. En una pendiente en subida del 10% se ascienden 10 cm por cada metro y en un kilómetro, 100 m.

Como consecuencia de la pendiente $p = \tan \alpha$, el punto de encuentro, C, del vector que representa el peso del ciclista y su bicicleta, Mg , con la superficie de rodamiento horizontal se desplaza hacia la rueda trasera la magnitud

$$x = h \cdot \tan \alpha = p \cdot h$$

Si, sobre un plano horizontal, la distancia t_0 , del punto de encuentro C a la rueda trasera fuera de 40 cm, de 60 cm a la delantera y el centro de gravedad estuviese a un metro de altura, estos valores, en el caso del plano con 10% de pendiente, se convertirían en

$$t_\alpha = 40 - \frac{10}{100} \cdot 100 = 40 - 10 = 30 \text{ cm} \quad \text{y} \quad d_\alpha = 60 + 10 = 70 \text{ cm}$$

con lo que variaría significativamente el reparto de peso entre las ruedas delanteras y traseras. Sobre una superficie horizontal las reacciones serían:

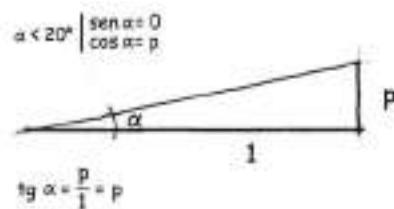
$$R_t = Mg \cdot \frac{d}{t+d} = \frac{60}{40+60} \cdot Mg = 0,60 \text{ Mg}$$

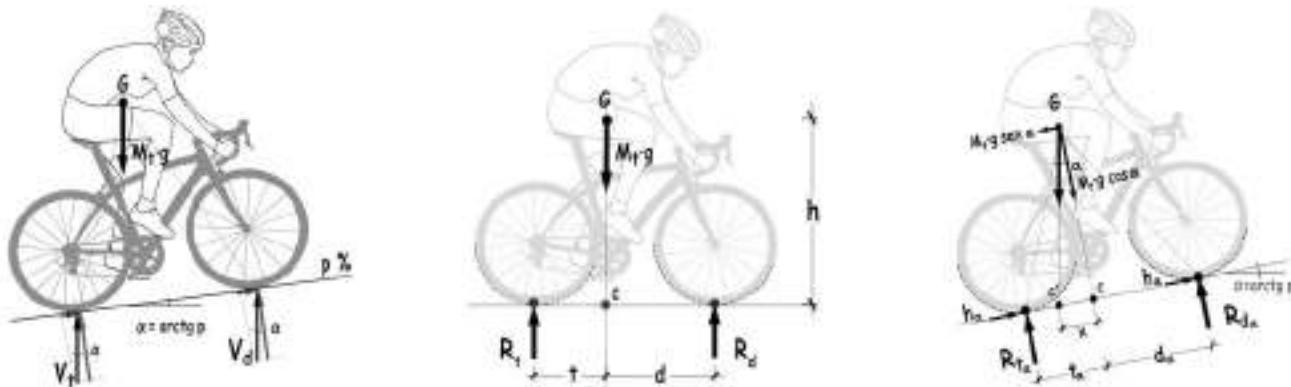
$$R_d = 0,40 \text{ Mg}$$

mientras que en el caso de la pendiente p , pasarían a ser ($\sin \alpha \approx p$ y $\cos \alpha \approx 1$)

$$R_{t\alpha} = Mg \cdot \cos \alpha \cdot \frac{d_\alpha + x}{t+d} \approx Mg \cdot \frac{70}{40+60} = 0,70 \text{ Mg}$$

$$R_{d\alpha} = 0,30 \text{ Mg}$$





Además en el contacto de las ruedas con el pavimento se producirían unas fuerzas paralelas a la rasante de valor

$$H_{ta} = R_{ta} \cdot \operatorname{tg}\alpha = p \cdot R_{ta}$$

$$H_{da} = R_{da} \cdot \operatorname{tg}\alpha = p \cdot R_{da}$$

uya suma coincide, lógicamente, con el valor de $p \cdot Mg$. Estas fuerzas, en subida, se oponen al movimiento y por lo tanto se añaden a las fuerzas motrices que necesita la bicicleta para desplazarse por carreteras llanas.

Para comprender bien la importancia de estas fuerzas, consideraremos un ciclista, que con su bicicleta pesa 800 N, tiene que subir una cuesta del 10% de diez kilómetros de longitud y, por tanto, salva un desnivel de 1.000 metros. Supongamos que la velocidad de desplazamiento en toda la ascensión sea de 4 m/s (14,4 km/h), y que, por consiguiente, necesitase

$$\frac{10.000 \text{ m}}{4 \text{ m/s}} = 2.500 \text{ s} (0,694 \text{ horas})$$

para completar la ascensión. Las fuerzas, paralelas a la pendiente, que intervienen en el movimiento, tendrán tres componentes:

- Fuerza equivalente a los rozamientos mecánicos y de los neumáticos con el pavimento, que a la moderada pero meritaria velocidad de 4 m/s, puede suponer 3 N.
- Fuerza aerodinámica, que suponiendo que no existe viento meteorológico, y considerando $C_D = 0,90$ y $A = 0,45 \text{ m}^2$, valdría

$$F_D = \frac{1}{2} 0,90 \cdot 1,3 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,45 \text{ m}^2 (4 \text{ m/s})^2 = 4,2 \text{ N}$$

- Fuerza debida a la pendiente de la subida

$$F_p = 0,10 \cdot 800 = 80 \text{ N}$$

En total,

$$F_T = 3 + 4,2 + 80 = 87,2 \text{ N}$$

Como sabe perfectamente cualquier ciclista, de las tres componentes, la debida a la pendiente es, con mucho, la más importante. Del orden del 92% del total en el ejemplo considerado. El ciclista con su pedaleo debe generar una fuerza de 87,2 N que iguale las anteriores y permita la velocidad constante de subida, de 4 m/s, que hemos supuesto. La potencia requerida para ello sería $P = 87,2 \text{ N} \cdot 4 \text{ m/s} = 348,8 \text{ W}$, a mantener durante los 2.500 segundos de duración de la ascensión; lo que solamente está al alcance de ciclistas profesionales en excelente estado de forma.

La energía restante, la que es necesaria para vencer los rozamientos y las fuerzas aerodinámicas, y que no se convierten en la energía potencial de la que el ciclista dispondrá para el descenso, se habrá perdido en forma de calor.

$$E_{calor} = (3 + 4,2) \text{ N} \times 4 \text{ m/s} \times 2.500 \text{ s} = 72.000 \text{ julios}$$

Si suponemos, ahora, que se trata de descender por la misma carretera de montaña de diez kilómetros de longitud y con 10% de pendiente continuada, en un trazado sin curvas, tendríamos que la inclinación produciría una fuerza favorable de 80 N (10% s/800 N) de las que habría que descontar 4 N debidos aproximadamente a los rozamientos, así como, las fuerzas aerodinámicas que se opondrían al movimiento y que crecerían con el cuadrado de la velocidad que fuese adquiriendo el ciclista en el descenso. El ciclista, tumbado sobre su bicicleta para reducir la superficie de exposición al viento y mejorar su coeficiente aerodinámico, aumentará progresivamente la velocidad, sin necesidad de pedalear, hasta alcanzar un valor tal que la fuerza aerodinámica se iguale con la debida a la pendiente (80 N) menos la estimada para los rozamientos (4 N), es decir 76 N. Suponiendo que, por la posición tumbada que adopten los ciclistas en estos descensos, el valor de C_D se reduzca de 0,90 a 0,80 y la superficie expuesta de 0,45 m² a 0,35 m², tendríamos que la velocidad estable que alcanaría el ciclista en el descenso sería tal que

$$\frac{1}{2} 0,80 \cdot 1,3 \cdot 0,35 \cdot v^2 = 76 \text{ N}$$

$$\text{y, en consecuencia, } v = \sqrt{\frac{76}{\frac{1}{2} 0,8 \cdot 1,3 \cdot 0,35}} = \sqrt{\frac{76}{0,182}} = 20,4 \text{ m/s (73 km/h)}$$

El descenso habría durado aproximadamente cinco veces menos que el ascenso y, teóricamente el ciclista, no habría necesitado aportar energía alguna. Metáfora de la vida.

Inicialmente, partiendo del reposo, la aceleración del ciclista sería

$$a = \frac{F}{m} = \frac{76 \text{ N}}{800 \text{ N/g}} = 0,096 \text{ g} = 0,96 \text{ m/s}^2$$

un poco inferior al porcentaje de la pendiente, debido a los rozamientos. Progresivamente la aceleración se iría reduciendo hasta anularse, una vez alcanzada la velocidad de 20,4 m/s. El tiempo que tardaría en hacerlo sería inferior al minuto y la longitud recorrida no superaría los 500 m.

4.6. FUERZAS DE FRENADO



El frenado puede cambiar sustancialmente las fuerzas, tanto verticales como horizontales, que actúan sobre el tandem que forman la bicicleta y el ciclista. Provoca una deceleración en el movimiento y genera, por tanto, unas fuerzas de inercia que reducen su velocidad o pueden acabar anulándola. Por otra parte, un frenado brusco, puede hacer que deslicen las ruedas de las bicicletas, dejando de rodar, desequilibrando al ciclista. Por ello, para favorecer su equilibrio conviene activar prioritariamente el frenado de la rueda trasera, motivo por el que el freno correspondiente se suele situar a la derecha del manillar puesto que los usuarios diestros son mayoría. Los ciclistas zurdos suelen cambiar la posición de los frenos en el manillar.

Supongamos, a modo de referencia, que un ciclista circula a 10 m/s (36 km/h) y frena bruscamente, de manera que la bici se pare en 2 segundos. La deceleración media consiguiente sería

$$a = \frac{10 \text{ m/s}}{2 \text{ s}} = 5 \text{ m/s}^2 \cong 0,5 \text{ g}.$$

Las fuerzas, en equilibrio, tendrán una resultante cuya línea de acción no debería sobrepasar el punto de contacto con el pavimento de la rueda delantera, para evitar el vuelco. De no ser así, la rueda trasera se levantaría, y todo el peso de la bicicleta y del ciclista se concentraría, como reacción de apoyo R_d , en la rueda delantera. Si suponemos que el centro de gravedad del conjunto de la bicicleta se sitúa a 1,20 m del nivel del suelo y su distancia horizontal al eje de la rueda delantera es de 0,80 m tendríamos el esquema aproximado de equilibrio representado en el gráfico adjunto.

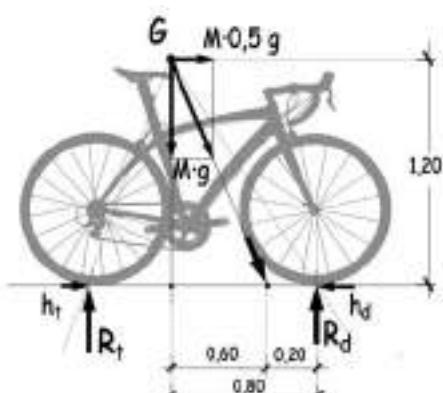
No hemos considerado en este ejercicio elemental la fuerza aerodinámica que también interviene en el equilibrio durante el frenado. Como ya hemos visto, su valor para la velocidad supuesta de 10 m/s a la que se aplica el freno, es de unos 26,3 N, mientras que la fuerza de deceleración sería del orden de

$$\frac{800 \text{ N}}{\text{g}} \cdot 0,5 \text{ g} = 400 \text{ N},$$

muy superior. En términos cuantitativos, por tanto, no es relevante tomar aquella en consideración.

El elemental ejercicio, tal como se ha planteado, no es muy realista. Es probable que el rozamiento de las ruedas, que habrán dejado de girar con la aplicación brusca del freno, sea inferior al que necesitaría para producirse la fuerza teórica de deceleración de 400 N. No se produciría, por consiguiente, el vuelco por giro alrededor del punto de contacto de la rueda delantera con el pavimento.

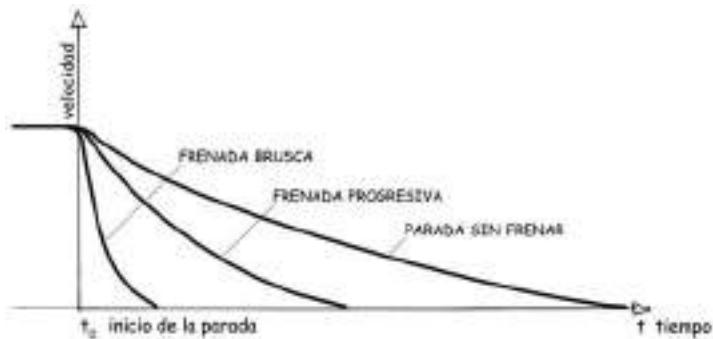
Los vuelcos suelen ser consecuencia de impactos de la bicicleta con un obstáculo en la carretera, con el consiguiente destrozo en la rueda delantera debido al choque, que produciéndose en escasos instantes (el que tarda la rueda en destrozarse), habrá generado



deceleraciones varias veces superiores a g , aceleración de la gravedad. En general, el frenado brusco de la bicicleta especialmente cuando se utiliza el freno delantero, provocaría el inmediato desplazamiento transversal de la rueda posterior y la caída del ciclista que en el golpe con el suelo y en su característico deslizamiento absorberá dolorosamente, la energía que hacía moverse a la bicicleta antes del frenado o del accidente. En las competiciones de motociclistas se aprecian con frecuencia este tipo de situaciones: vuelos cuando se produce un choque y caídas, con aparatosos deslizamientos, debido a la incapacidad de las ruedas para generar los rozamientos necesarios para el equilibrio.

Simultáneamente a la aplicación de los frenos, el ciclista deja de pedalear y al hacerlo anula la fuerza motriz que provocaba el movimiento. Es evidente que, una bicicleta sobre una superficie de rodamiento horizontal puede llegar tranquilamente a pararse, sin aplicar los frenos a las ruedas, cuando el ciclista cesa el pedaleo. En estas circunstancias, las fuerzas horizontales que se opondrán al movimiento serían las equivalentes al conjunto de rozamientos de unos 3 o 4 newtons según la velocidad en cada instante, y la aerodinámica que iría rápidamente reduciéndose al disminuir la velocidad.

Los diagramas velocidad-tiempo de una bicicleta, que varía desplazándose a una velocidad constante, hasta su completa parada será la representada en el diagrama, para los dos casos extremos de aplicación brusca de los frenos o de ausencia de pedaleo.



El frenado brusco puede durar pocos segundos. Pero la aplicación progresiva de los frenos puede permitir que la rueda continúe girando y no se produzca el indeseable deslizamiento de las ruedas con el pavimento, preludio de inestabilidades y caídas laterales. Si se frena con suavidad aumentará el tiempo de parada, tal vez a unos 10 segundos, dependiendo de la velocidad inicial, mientras que la parada completa de una bicicleta sin utilización de frenos puede durar de 20 a 30 segundos, con un recorrido de unos 100 o 150 metros; cifras que serán tanto menores cuando más elevados sean los rozamientos internos y de las ruedas con el pavimento.

Para disponer de algunos órdenes de magnitud en relación con los conceptos asociados al frenado, supondremos una bicicleta de frenos tradicionales con los que se aplica la fuerza de frenado en la superficie lateral de las llantas. Supongamos que el ciclista circula a la velocidad constante de 10 m/s: la fuerza aerodinámica, considerando $A = 0,45 \text{ m}^2$, será

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot 0,90 \cdot 1,3 \cdot 0,45 \cdot 10^2 = 26 \text{ N}$$

Añadiendo 4 N por rozamientos equivalentes, tendremos que la fuerza motriz de

$$H_m = 26 \text{ N} + 4 \text{ N} = 30 \text{ N}$$

que estaría igualmente distribuida entre las dos ruedas.

Para que se inicie la deceleración por frenado, la fuerza inicial aplicada por las pastillas de los frenos a la llanta de las ruedas debería ser superior a los 15 N por rueda, y tanto mayor cuanto más brusca sea la frenada y menor el tiempo requerido para parar la bicicleta.

A medida que la bici reduzca su velocidad, la fuerza aerodinámica disminuirá rápidamente, al variar con v^2 . De manera que si se mantiene la fuerza de frenado la deceleración se irá haciendo mayor, o se mantendrá igual si se reduce progresivamente. Si aplicamos brusca y simultáneamente en las dos ruedas, una fuerza de frenado de 130 N, por ejemplo, tendríamos que, inicialmente la deceleración, a_d , sería

$$130 \text{ N} - 30 \text{ N} = \frac{800}{g} \cdot a_d$$

130 N, fuerza frenado
30 N, fuerza motriz (para $v = 10 \text{ m/s}$)
 $800/g$, masa del ciclista y el de la bicicleta
 a_d , deceleración

esto es

$$a_d = \frac{100}{800} g = 0,125 g = 1,25 \text{ m/s}^2$$

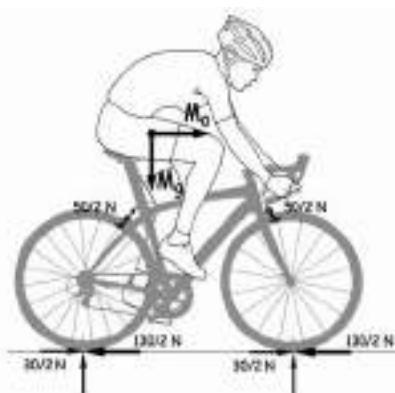
Suponiendo que se mantuviese esta deceleración inicial, porque la fuerza de frenada se fuese paulatinamente reduciendo, la bicicleta tardaría en pararse

$$t = \frac{10 \text{ m/s}}{1,25 \text{ m/s}^2} = 8 \text{ s}$$

En este caso, el equilibrio de fuerzas de la rueda delantera, por ejemplo, será la representada en el esquema de la página siguiente.

Las zapatas del freno provocarán unas compresiones transversales en la llanta, y consiguientemente, producirán las fuerzas de rozamiento necesarias para la frenada. Suponiendo un coeficiente de rozamiento de 0,50 con llantas secas, las fuerzas transversales de compresión serían, en el caso considerado, de $260 \text{ N} = 130 \text{ N}/0,5$.

La transferencia de las fuerzas de frenado hasta el punto de contacto de la rueda con el pavimento provocará la deformación de la llanta y de los radios de la bicicleta. Los más



próximos a la horizontal, en la parte posterior del eje, serán los que se activarán prioritariamente para que se produzca dicha transferencia.

Si suponemos ahora que el frenado se realiza bruscamente, para que la bicicleta se pare, por ejemplo, en un solo segundo, la deceleración sería

$$a = \frac{10 \text{ m/s}}{1 \text{ s}} = 10 \text{ m/s}^2 \approx g$$

La longitud de frenado consiguiente valdría,

$$L_f \cong \frac{\frac{1}{2} 10 \text{ m/s}}{1 \text{ s}} = 5 \text{ m}$$

y la fuerza de frenado tendría que valer 830 N para que se cumpla la igualdad

$$830 \text{ N} = \frac{800}{g} \cdot a_d$$

Por tanto, a_d sería igual a g .

Se trata de una fuerza considerable que provocaría la deformación de las ruedas y el teórico vuelco de la bicicleta, puesto que la resultante de fuerzas interseccaría al pavimento por delante de su punto de contacto con la rueda delantera.

En vista de ello, resulta que el tiempo mínimo de frenado para que la deceleración no sobrepasase el valor de

$$\frac{0,65}{1,20} g = 0,54 g$$

tendría que ser de

$$t_f = \frac{1}{1 - 0,54} = 2,17 \text{ s}$$

y la longitud consiguiente de parada

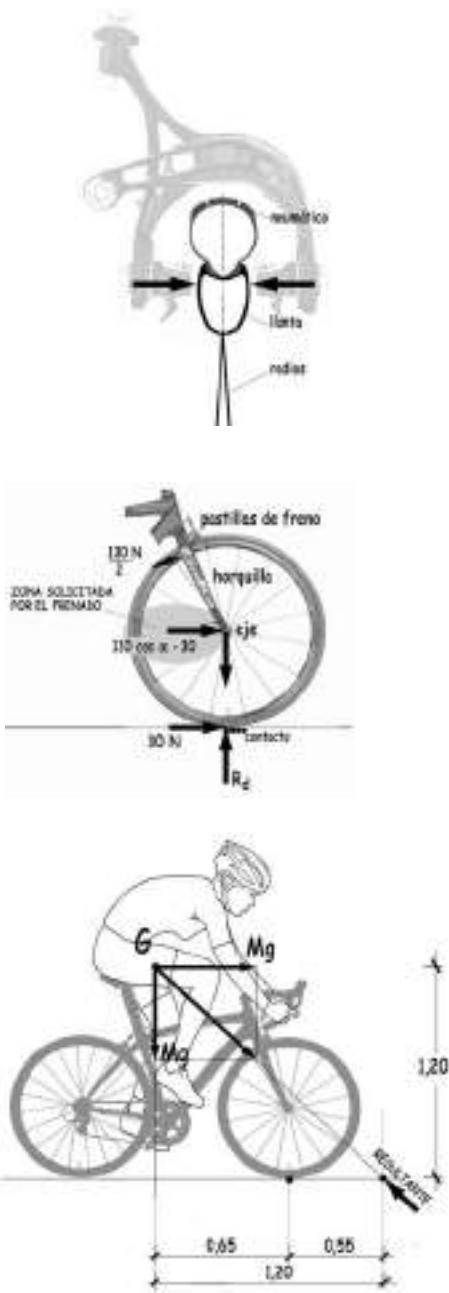
$$L_f = \frac{1}{2} 10 \text{ m/s} \cdot 2,17 \text{ s} = 10,85 \text{ m}$$

En estas circunstancias, instintivamente, el ciclista se acomodará a la bici para bajar el centro de gravedad y desplazarlo hacia atrás. Además como la fuerza aerodinámica se reducirá notablemente al descender la velocidad, las fuerzas de frenado también podrán reducirse, lo que mejoraría la situación. Por otra parte, hay que recalcar que la fuerza horizontal nunca podrá superar a la del rozamiento por deslizamiento de la rueda, que habrá dejado de girar. De no ser así la bici deslizaría y el modelo de comportamiento del ciclista y de la bicicleta se haría más complejo. La situación será todavía más exigente y determinante, en el caso del frenado, en un sprint por ejemplo, a velocidades que pueden逼近arse a los 20 m/s.

Por otra parte, durante el hipotético frenado que estamos considerando ($v = 10 \text{ m/s}$, $t = 1 \text{ s}$), la potencia de frenado consiguiente sería de

$$P = 830 \text{ N} \cdot \frac{1}{2} 10 \text{ m/s} = 4.150 \text{ W}$$

y la energía absorbida por la bicicleta sería $E = 4.150 \text{ W} \cdot 1\text{s} = 4.150 \text{ julios}$



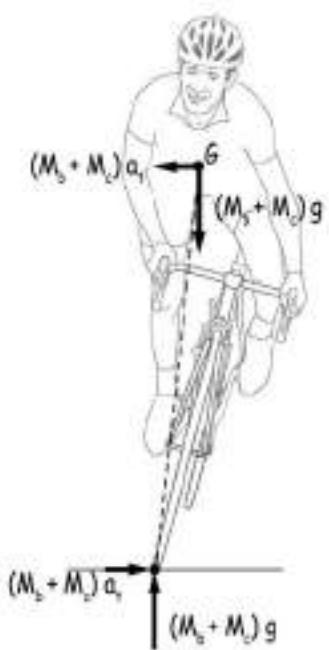
Es evidente que el frenado es uno de los escenarios en que los esfuerzos pueden ser los más importantes y que pueden determinar el dimensionamiento de la estructura de la bicicleta. Es una situación, por otra parte, en la que entra en juego el rozamiento estático de la rueda con el pavimento. En el cuadro siguiente en la primera columna se incluyen algunos valores de los coeficientes de rozamiento estático que suelen considerarse en las evaluaciones para diferentes superficies de rodadura y, en la segunda, los coeficientes de rozamiento por rodadura considerablemente más bajos.

Superficie de rodadura	Coeficiente de rozamiento estático	Coeficiente de rozamiento a la rodadura
Hormigón o asfalto en seco	0,8-0,9	0,014
Hormigón o asfalto, húmedos	0,4-0,7	0,014
Grava	0,6-0,7	0,02
Arena	0,3-0,4	0,14-0,3
Hielo	0,1-0,2	0,014

4.7. FUERZAS TRANSVERSALES. RECORRIDOS EN CURVA

La bicicleta y el ciclista nunca permanecen en un plano perfectamente vertical, tal como se ha considerado hasta ahora. Aun cuando el trazado de la carretera sea perfectamente rectilíneo, y quiera serlo también el de la bicicleta, el ciclista se moverá transversalmente. Casi imperceptiblemente, en general. Pero a un observador atento no le pasa desapercibido el desplazamiento lateral, a derecha y a izquierda, del cuerpo del ciclista, al ritmo que marca su pedaleo. Aún cuando, visto de lado, su cuerpo, inclinado sobre el manillar, parece transversalmente inmóvil. Es, también, frecuente ver al ciclista de pie y balancándose sobre los pedales, moviendo ostensiblemente su cuerpo y su bicicleta, como sucede entre quienes compiten en una llegada al “sprint”, o al cambiar de ritmo para iniciar una escapada, o al ascender un repecho o incluso para relajar los músculos.

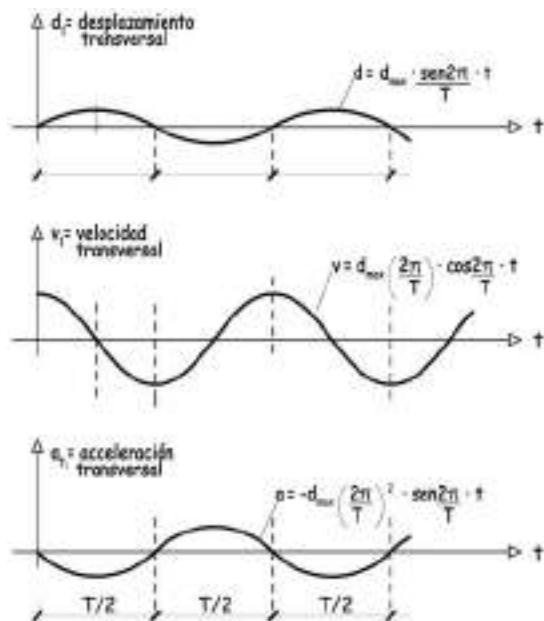
El esquema adjunto nos muestra una imagen muy característica. El ciclista, levantado del sillín, cargando sobre uno de los pedales, para impulsar su bicicleta. Se inclina primero hacia un lado y luego, al cargar sobre el otro pedal, se mueve hacia el otro. En este ritmico proceso, que se repite con la frecuencia del pedaleo, se generan fuerzas de inercia consecuencia de la aceleración transversal del ciclista y de la bicicleta. Y el conjunto de dichas fuerzas transversales y verticales deberá, también, estar, como siempre, en equilibrio con las reacciones de apoyo, que nacerán, como consecuencia de estos movimientos, en el contacto de las ruedas con el pavimento. La resultante de las fuerzas verticales debidas a la aceleración de la gravedad y a la del movimiento vertical, a_v , $M \cdot (g + a_v)$, y de las transversales $M \cdot a_t$ se equilibrarán con las reacciones de apoyo en el



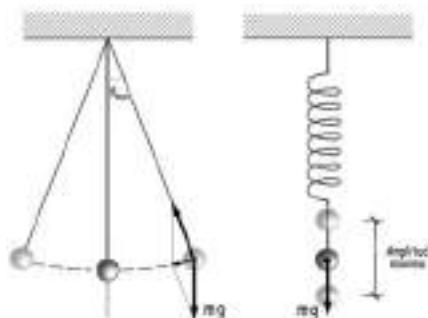
contacto de las ruedas con la carretera. Por simplicidad, no estamos considerando las fuerzas, de inercia o aerodinámicas, longitudinales.

El desplazamiento transversal del centro de gravedad del ciclista y su montura tendrá un valor máximo, en el que la velocidad transversal se anulará y cambiará de signo, cuando el movimiento del ciclista modifique su sentido.

Suponiendo que las huellas de las ruedas de la bicicleta dibujasen una línea recta (de ello se trata con más detalle en el apartado 7.2 “La geometría del desplazamiento”), los desplazamientos, velocidades y aceleraciones transversales del centro de gravedad del conjunto podrían representarse con curvas de geometría senoidal, que cortarían al eje del trazado en puntos definidos por el ritmo del pedaleo. Para cadencias de 90 pedaladas por minuto –periodo $T = 60/90 = 0,66$ – los nodos de las curvas se producirán cada $T/2 = 0,33$ segundos.



Las expresiones supuestas para las curvas de desplazamientos, velocidades y aceleraciones transversales en función del tiempo coinciden con las de los movimientos vibratorios armónicos de un péndulo, o de una masa suspendida de un muelle a la que se ha desplazado de su posición original.



La fuerza de inercia asociada a la aceleración transversal, a_t , puede interpretarse como la correspondiente a la fuerza centrífuga generada en un movimiento curvilíneo

$$F_c = m \cdot a_t = m \cdot \frac{v^2}{R}$$

siendo R el radio de curvatura del movimiento transversal del centro de gravedad del conjunto bicicleta-ciclista y, v, la velocidad de desplazamiento longitudinal.

En un recorrido por una carretera sin curvas, la aceleración transversal máxima sería muy reducida, y la inclinación correspondiente del ciclista que asegura el equilibrio transversal, también. Si suponemos, a modo de ejemplo, que la velocidad longitudinal del ciclista es de 12 m/s (42,4 km/h), su cadencia de 90 pedaladas por minuto y su desplazamiento transversal máximo de 2 cm la aceleración transversal máxima sería (para $t = T/4$)

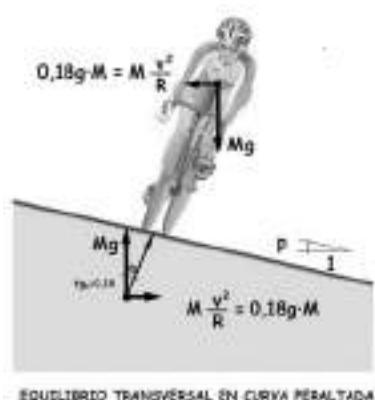
$$a_{t,\max} = -d_{\max} \cdot \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 \cdot \sin \frac{2\pi}{T} \cdot t = -2 \text{ cm} \cdot \left(\frac{2\pi}{0,66} \right)^2 \cdot \sin \frac{\pi}{2} = -180 \text{ cm/s}^2 = 0,18 \text{ g}$$

El cuerpo del ciclista se inclinaría para contribuir al equilibrio de esta fuerza centrífuga.

Hay que tener en cuenta, además, que en descensos con curvas en herradura de radios muy pequeños, el ciclista casi llega a parar la bicicleta, se inclina considerablemente e incluso suele extender hacia fuera la rodilla próxima al interior de la curva para generar una fuerza de inercia hacia adentro que le ayude a encontrar el equilibrio dinámico. En estas situaciones el valor del peralte de la curva determina la velocidad máxima a la que se puede trazar la curva. Lo que depende asimismo del coeficiente de rozamiento entre la rueda que tiende a desplazarse transversalmente y el pavimento. Si éste está mojado o cubierto de gravilla, el rozamiento disminuye significativamente y el riesgo de caídas se incrementa a pesar de que el ciclista reduzca su velocidad. Si, por ejemplo, el ciclista y su bicicleta tuvieran que tomar una curva de 5 m de radio a una velocidad de 3 m/s (10,8 km/h), la fuerza centrífuga sería

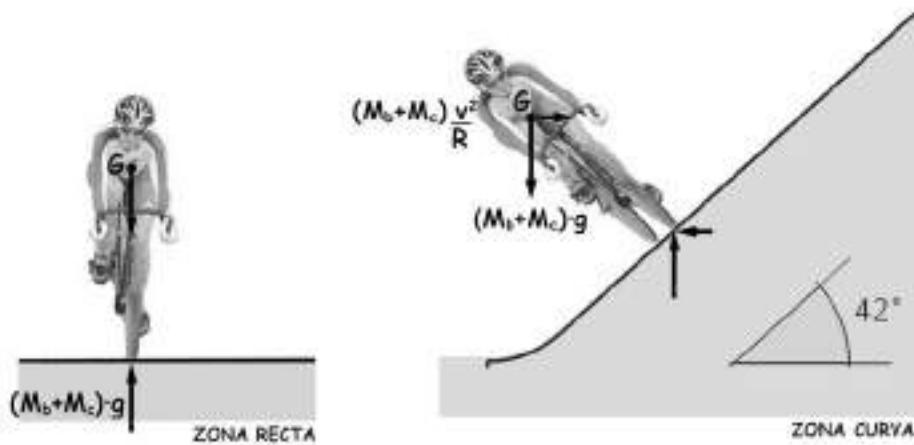
$$F_c = M \cdot \frac{v^2}{R} = M \cdot \frac{(3 \text{ m/s})^2}{5 \text{ m}} = M \cdot \frac{(3)^2}{5} = M \cdot 1,8 \text{ m/s}^2 = M \cdot 0,18 \text{ g}$$

El equilibrio dinámico transversal en este caso estaría reflejado en el esquema.



Si la carretera estuviese peraltada con una pendiente transversal del 18%, la resultante del peso y de la fuerza centrífuga, serían perpendiculares al pavimento y no aparecerían fuerzas transversales a contrarrestar por el rozamiento entre las ruedas y el suelo. Cuando el peralte es inferior a la inclinación de la resultante de las dos fuerzas, el equilibrio transversal exigiría la contribución del rozamiento, y la velocidad del ciclista al tomar esta curva estaría determinada por la condición de que la fuerza transversal correspondiente no superase la realmente disponible.

En el caso del ciclismo en pista, la superficie del pavimento suele ser muy lisa para reducir al máximo el rozamiento a la rodadura, lo que exige peraltes muy pronunciados en las zonas curvas de manera que la inclinación de la bicicleta hace posible el equilibrio de fuerzas, sin necesidad de recurrir al rozamiento. En cambio, cuando un ciclista pedalea levantado y se mueve haciendo vaivenes sobre una superficie sin peralte, es imprescindible que exista rozamiento suficiente entre la rueda de la bicicleta y el pavimento para que se pueda generar la reacción horizontal de apoyo. Cuando no sucede así la bicicleta derrapará y el ciclista caerá lateralmente.



5. LA ESTRUCTURA DE LA BICICLETA

5.1. INTRODUCCIÓN



Como ya se ha comentado en apartados precedentes, la consideración del equilibrio de la bicicleta permite identificar con sencillez y razonable precisión las reacciones de apoyo, longitudinales y transversales, que se producen en el contacto entre las cubiertas de las ruedas y el pavimento sobre el que circula. Y como en cualquier estructura, si se conocen las reacciones provocadas por las acciones que actúan sobre una bicicleta, se dispone de la información esencial para evaluar su comportamiento y confirmar el acierto de las geometrías y de los materiales utilizados en su fabricación.

Para establecer las fuerzas que intervienen en el equilibrio, hemos supuesto, hasta ahora, que las masas de la bicicleta y del ciclista estaban concentradas en sus centros respectivos de gravedad. Y hemos admitido también que la superficie de rodadura era suficientemente lisa, sin baches o resaltos de una u otra naturaleza. No se producirían, por tanto, impactos asociados a bruscas aceleraciones que influirían notablemente en el valor de las acciones, incrementarían las reacciones máximas, reducirían las mínimas, y modificarían así mismo el reparto de cargas entre las dos ruedas. Al contrario de lo que sucede cuando se circula por caminos o senderos de montaña, lo que explica la sofisticación de las "mountain-bike", con sus suspensiones delanteras, y sus eventuales amortiguadores traseros,

integrados en dobles cuadros, articulados entre sí. En este apartado 5, nos referiremos exclusivamente a las bicicletas de carretera dejando el 8 para bicicletas de montaña.

Es evidente que la masa de la bicicleta y del ciclista no está concentrada en sus respectivos centros de gravedad. Ésta suposición es solamente una simplificación muy útil que permite localizar y cuantificar las reacciones de apoyo. Porque, realmente, la estructura de la bicicleta, en toda su sencillez conceptual y su complejidad tecnológica, se puede entender y describir como un entramado de elementos estructurales que relacionan las acciones o fuerzas actuantes con las reacciones de apoyo. Dichas fuerzas fluyen desde el cuerpo del ciclista por los distintos componentes de la bicicleta hasta alcanzar el suelo. En cada punto infinitesimal de este conjunto se producen tensiones y deformaciones unitarias, relacionadas entre ellas por los módulos de elasticidad longitudinal, y transversal que caracterizan el material estructural. Tensiones y deformaciones fluyen inseparables a través del material que van encontrando en su camino, cambiando a cada instante, dado el dinamismo del conjunto, pero preservando siempre la insoslayable exigencia de equilibrio. La similitud hidráulica salta a la vista. Los puntos de contacto con el suelo, en los que se concentran las reacciones de apoyo, son como los sumideros hacia los que afluyen los caudales que se han ido generando en cada minúsculo trozo de materia del cuerpo del ciclista y de su bicicleta. Cada caudal infinitesimal que brota de cada punto material se suma a otros caudales que circulan por los cauces, que definen la geometría estructural. Y la armonía de los itinerarios por los que discurren los caudales acumulados es una manifestación de la eficacia de la geometría estructural. Como en el caso de una canalización de agua, los recodos, las pendientes excesivas, los estrechamientos bruscos, limitan la capacidad de transferencia de los caudales tensionales y deformacionales, provocando, también, flujos irregulares y turbulencias indeseables. A través de la bicicleta y del cuerpo del ciclista fluyen tensiones y deformaciones, y la ausencia de zonas singulares en las que se amplifican unas y otras es manifestación de armonía y de eficiencia en la concepción estructural. O, de otra manera, como en las estructuras de la ingeniería civil, las zonas singulares de la bicicleta –y del ciclista– que son muchas, son las estructuralmente críticas, las que definen los límites de las cargas que se pueden transferir, como las zonas singulares de una conducción determinan los caudales máximos del fluido que puede transportar.

Iniciaremos ahora un viaje virtual acompañando a las fuerzas en su recorrido a través de la estructura de la bicicleta y a través del cuerpo del ciclista.

El primer tramo del recorrido, se inicia en el punto de contacto de la rueda delantera (la trasera no es idéntica) con el pavimento y concluye en el buje que la permite girar. El itinerario de fuerzas, tensiones y deformaciones recorre la cubierta, utiliza el aire a presión para alcanzar la llanta, fluye después por los esbeltos y tensos radios, hasta llegar al buje, meta de esta primera etapa.

La siguiente se inicia donde acaba la primera y discurre por la subestructura que forman el conjunto de la horquilla y la potencia, y concluye en el contacto de las manos del ciclista



con el manillar y en la bifurcación señalada por los rodamientos de la barra de dirección que conducen parte de las fuerzas hacia la estructura del cuadro.

El cuadro de la bicicleta, la siguiente subestructura, se apoya en la barra de dirección y en el buje de la rueda trasera. Recibe al sillín, en la tija prolongación de la barra vertical que en su encuentro con la diagonal y la desdoblada vaina del cuadro, deja el hueco por el que penetra el eje de los pedales y de los platos del sistema de transmisión de la bicicleta. El desdoblamiento de las vainas y tirantes que confluyen en el buje de la rueda trasera procura el espacio para acomodarla. La particular geometría del cuadro de la bicicleta con numerosas singularidades es manifestación de un itinerario, más justificado por su función que por su eficiencia estructural.

La última etapa de este recorrido virtual por la estructura de la bicicleta que nos prestamos a realizar incluye el conjunto del mecanismo de transmisión –pedales, platos, cadena y piñones– que permiten insuflar energía a la bicicleta, asegurando su movilidad.

Pero, además, tenemos el flujo itinerante de las fuerzas que nacen en el cuerpo del ciclista, con tres posibles zonas de contactos con la bicicleta: manillar, sillín y pedales. El cuerpo del ciclista es también una estructura, ciertamente muy especial y evidentemente esencial a la que en una primerísima aproximación, podría describirse como una celosía, con elementos comprimidos, los huesos, y elementos traccionados que serían los músculos. Los huesos estarían articulados para permitir su movimiento relativo, provocado por la tracción de músculos, ligamentos y tendones que se activan por el sistema nervioso gestionado por un cerebro que gobierna la transformación de la energía química en la energía mecánica que hace posible la asombrosa movilidad del cuerpo del ser humano, distinguidísimo miembro de la especie animal.

El conjunto ciclista-bicicleta se puede considerar, por tanto, como un ensamblado de subestructuras cada una de las cuales tiene que estar en cada instante en equilibrio dinámico.

5.2. LAS RUEDAS DE LA BICICLETA

La rueda ha sido una de las invenciones más importantes en la historia de la humanidad y de las que más trascendencia han tenido. Su utilización por el hombre primitivo le permitió mejorar su movilidad; lo que fue esencial en su desarrollo individual y social. Los animales nunca utilizaron la rueda. Lo que probablemente explique, también, su retraso.

Pero tal vez no sea la rueda una invención trascendente del ser humano. En todo caso, hubiese sido un descubrimiento, porque la posibilidad de desplazarse rodando está muy presente en la naturaleza: en las piedras que se encuentran en los cauces de algunos ríos, en los troncos de árboles sin ramas, o en las vueltas que da un niño en su cuna mientras duerme. Porque lo que verdaderamente transformó el mundo fue el eje, sin el cual la rueda hubiera tenido muy limitadas aplicaciones. La invención, en el Renacimiento, del reloj moderno facilitó la medición sencilla y sistemática del tiempo, y contribuyó a una

profunda transformación del orden de valores en los que se asentaban las Sociedades medievales. Su desarrollo estuvo íntimamente ligado a la utilización de mecanismos de pequeñas ruedas dentadas que giran alrededor de minúsculos ejes.

El nacimiento y evolución de la bicicleta fue también posible por el progreso de la rueda, su componente quizás más tecnológico. Y, tal vez, el más sutil siendo, de hecho, una maravilla estructural, ejemplo de estructura pretensada en que los esbeltos radios, fuertemente traccionados, enlazan el colchón toroidal de aire presurizado, que conforman cubierta y llanta con el eje, al que transfieren las reacciones de apoyo localizadas en el contacto del neumático con el pavimento.

Aislamos la rueda delantera de la bicicleta —la posterior posee algunos rasgos específicos— y analicemos el equilibrio entre la reacción de apoyo y la fuerza, igual y contraria, que se localiza en el eje alrededor del cual rota. En el plano de la rueda, la reacción de apoyo tendrá una componente vertical R_v , y otra horizontal R_h , en general, significativamente menor aunque sea la responsable de la movilidad de la bicicleta. La indinación de la resultante de ambas fuerzas en relación con la vertical será tal que

$$\tan \alpha = \frac{R_h}{R_v}$$

Para que dicha resultante pase por el eje de la rueda, el contacto entre el neumático y el pavimento estará desplazado en el sentido contrario al movimiento, una distancia

$$s = r \alpha, \quad \text{siendo } r \text{ el radio de la bicicleta.}$$

Si, a modo de ejemplo, suponemos que $R_v = 200 \text{ N}$ y $R_h = 10 \text{ N}$, la indinación de la resultante sería del 5%, y en una rueda de 350 mm de radio el desplazamiento del punto de contacto sería aproximadamente

$$s \approx \frac{5}{100} \cdot 350 \text{ mm} = 17,5 \text{ mm}$$

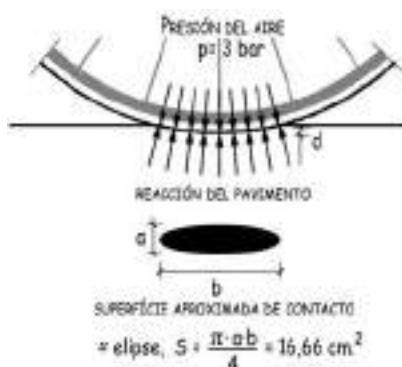
La magnitud de la superficie de contacto entre la rueda y el pavimento dependerá fundamentalmente del valor de la reacción vertical R_v , de la presión P , del neumático y de la rigidez del pavimento. En el caso de una carretera bien asfaltada o con firme rígido de hormigón, la deformabilidad del pavimento será insignificante. Por tanto, la cubierta adoptará la geometría del pavimento, y la superficie de contacto valdrá

$$S = \frac{R_v}{P}$$

En una bicicleta de carretera de competición, la presión de hinchado suele alcanzar los 9 bares, ($1 \text{ bar} \approx 10 \text{ N/cm}^2$). Para una reacción vertical de 200 N la superficie de contacto sería:

$$S = \frac{200 \text{ N}}{90 \text{ N/cm}^2} = 2,2 \text{ cm}^2$$

Tendría el aspecto de una elipse, inscrita, tal vez, en un rectángulo de $2,4 \times 1,2 \text{ cm}$.



Si, como ocurre con frecuencia en los caminos de rodadura utilizados por las bicicletas de montaña, el terreno es muy deformable y su “tensión admisible” muy inferior a la de la presión de hinchado de las ruedas, que en este tipo de bicicletas no suele exceder de los 3 bares, será el terreno el que se adapte a la forma circular de la rueda que, al avanzar, irá abriendo surco, siendo la superficie de contacto en un instante determinado de

$$S = \frac{200 \text{ N}}{30 \text{ N/cm}^2} = 6.66 \text{ cm}^2$$

Si la deformabilidad del terreno, caracterizada por un coeficiente de balasto, o coeficiente de reacción del terreno (relación entre la presión y el desplazamiento, esto es $k = P/d$) fuese, pongamos por caso, de 10 N/cm^3 la profundidad de la huella sería

$$d = \frac{P}{k} = \frac{30 \text{ N/cm}^2}{10 \text{ N/cm}^3} = 3 \text{ cm}$$

El comportamiento real será, en general, intermedio entre los dos anteriores y de análisis, desde luego, mucho más complejo. Localmente, en la zona de contacto con el pavimento, la cubierta de la rueda estará sometida a la presión externa de contacto y a la presión interna de hinchado, que no serán idénticas. Para acomodar estas diferencias de presión, la cámara se habrá de deformar tanto en sentido longitudinal como transversal y su compleja estructura de capas hará posible la adecuada respuesta a los esfuerzos consiguientes.

La industria que concibe y fabrica las cubiertas de las ruedas de la bicicleta (y de las motos y coches, sus hermanos mayores) es un sector altamente especializado que ha evolucionado extraordinariamente, desde que Dunlop, un veterinario de Belfast, primero, y Pirelli, poco después, establecieron sus fundamentos, hace más de 120 años.

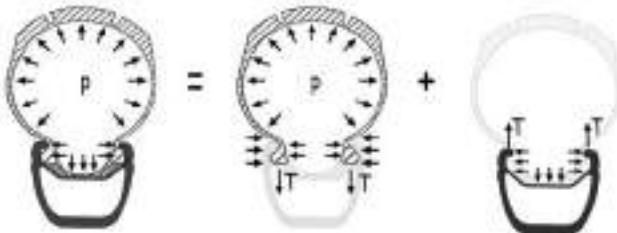
Las ruedas de las bicicletas de carretera más habituales tienen un diámetro nominal de 700 mm (28 pulgadas), aunque últimamente parece que se extiende el uso de las de 29", las “twenty nine”. Tradicionalmente sus llantas estaban construidas con aceros inoxidables y en la actualidad lo están con perfiles de aluminio aleados fabricados por extrusión. Y más recientes, con materiales compuestos por fibras de carbono con una matriz de resina epoxi. Existen, también, llantas fabricadas por combinación de estos dos últimos materiales.

Su sección transversal suelen tener una anchura, b , del orden de 20 mm y alturas, h , de unos 20 mm también en las de perfil bajo, que puede llegar a 50 mm en los de perfil alto. La cubierta neumática forma con la llanta un conjunto inseparable. En la figura adjunta se muestra la composición de uno de los modelos que comercializa un prestigioso fabricante.

En las bicicletas de los ciclistas profesionales las cubiertas “tubeless”, sin cámara, han desplazado totalmente a las tradicionales, en las que un pinchazo era reparado por el propio ciclista que portaba, para ello, su cámara de repuesto. Las cubiertas sin cámara



deben ir muy bien ajustadas a las alas interiores de las llantas para asegurar una impermeabilidad, que, antes, proporcionaban las cámaras de goma.



En los croquis adjuntos se muestra el equilibrio de la cubierta y de la llanta. Como orden de magnitud, las fuerzas de tracción T que se transfieren entre ambos componentes, supuesta la presión de 9 bares y la anchura de la llanta de 20 mm será

$$T \approx 90 \text{ N/cm}^2 \cdot \frac{2 \text{ cm}}{2} = 90 \text{ N/cm}$$

Suponiendo, también, que el espesor del aluminio de la llanta, en la zona de transferencia de T , fuera de 1 mm, la tensión correspondiente sería del orden de

$$\sigma = \frac{90 \text{ N/cm}}{0,1 \text{ cm}} = 900 \text{ N/cm}^2$$

valor muy reducido, de dirección radial, y que poca influencia tendrá en el comportamiento de la estructura de la llanta.

Las tensiones más importantes serán las circunferenciales y tendrán por causa principal la tracción de los radios, que inducirán compresiones circunferenciales considerables. Suponiendo que se trate de una rueda de 32 radios, separados en el perímetro de la llanta unos 6,5 cm y solicitados cada uno de ellos por una tracción de 1.000 N, la presión inducida que supondremos uniformemente repartida, valdría:

$$P \cong \frac{1.000 \text{ N}}{6,5 \text{ cm}} = 150 \text{ N/cm}$$

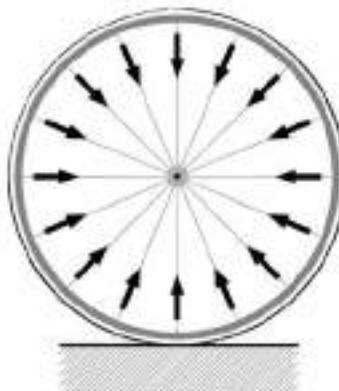
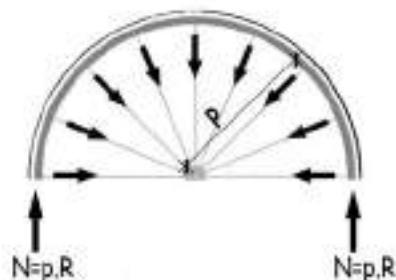
Esta presión induce a su vez una compresión en la llanta que valdrá

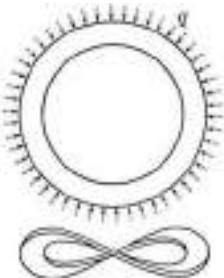
$$N = p \cdot R = 150 \text{ N/cm} \cdot \frac{70}{2} \text{ cm} = 5.250 \text{ N}$$

La sección de una llanta de aluminio, de 430 gramos de masa, debe situarse en el entorno de $0,8 \text{ cm}^2$ ($0,8 \text{ cm}^2 \cdot 200 \text{ cm} \cdot 2,7 \text{ g/cm}^3 \simeq 430 \text{ g}$).

La tensión de compresión circunferencial en la llanta, consecuencia de las presiones radiales provocadas por los radios, valdrá

$$\sigma = \frac{5.250 \text{ N}}{0,8 \text{ cm}^2} = 6.562 \text{ N/cm}^2$$





Dicho valor es muy inferior al que admiten los aluminios aleados que se utilizan en la fabricación de las llantas. La máxima tensión admisible estará limitada por el riesgo de padeo que existe siempre en un anillo estructural solicitado por tensiones radiales contenidas en su plano. La carga crítica de padeo, cuya deducción se encuentra en publicaciones especializadas, tiene por expresión:

$$P_{cr} = \alpha \frac{EI_y}{r^3}$$

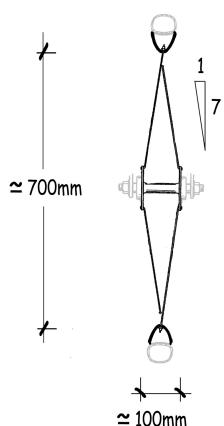
siendo E , el módulo de elasticidad del material, I_y la inercia de la sección de la llanta o anillo, en relación con un eje perpendicular a su plano, r el radio del centro de gravedad de dicha sección y α un coeficiente que, principalmente, depende de la relación entre las rigideces a flexión y torsión de la sección de la llanta y el anillo, cuyo modo de padeo adoptará la forma de ocho esquematizada.

En realidad la situación es más favorable. La mitad de los radios de una rueda tienen una indinación en un sentido y la otra mitad en el otro (ver figura adjunta), lo que hace que en la deformación transversal de la llanta, su tendencia al alabeo, esté coaccionada. Es como si se encontrase envuelta en un medio elástico, con virtuales muelles que pueden generar fuerzas transversales estabilizadoras en todo el perímetro de la rueda, que serán del orden de

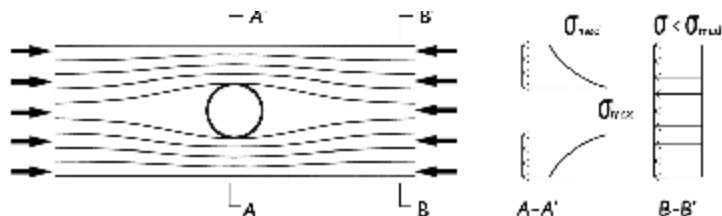
$$\frac{1}{8} 150 \text{ N/cm} \cong 19 \text{ N/cm},$$

lo que incrementará sensiblemente la capacidad del padeo lateral, por flexión y torsión.

Estos valores recuerdan, por otra parte, la importancia de que los radios estén uniformemente tensionados y la rueda perfectamente alineada. Cualquier imprecisión al respecto afecta sensiblemente al comportamiento de la rueda, por la aparición de fuerzas transversales consecuencia de los desequilibrios asociados a las variaciones de tensión entre radios.



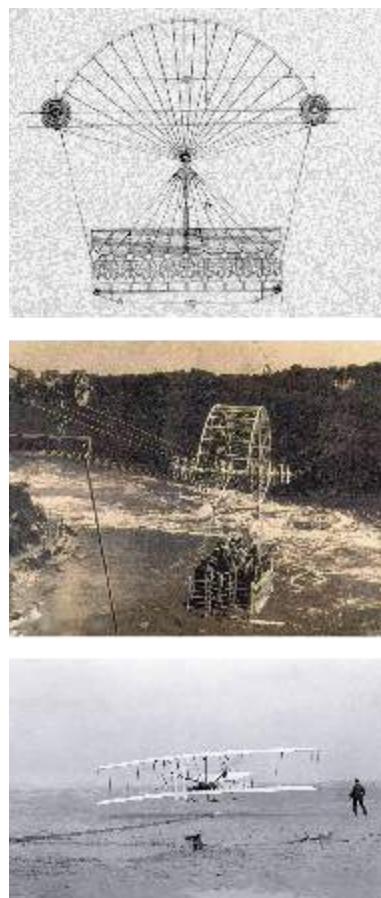
Entre las zonas críticas de la llanta, se encuentran las del entorno de las perforaciones, del orden de 2,5 mm, asociadas al dispositivo de andaje rosado de los radios y sobre todo la de unos 6,5 mm que exige la presencia de la válvula de hinchado de las ruedas. Dichas perforaciones provocan por una parte, una reducción muy significativa, que puede llegar al 50%, del área del ala interna del perfil de la llanta y, además, una distorsión del flujo tensional que puede provocar puntas de tensiones 2 y 3 veces superiores al de su valor medio. Lo que explica la necesidad de sobredimensionar el perfil de la llanta, reforzando los entornos de las perforaciones.



Los radios de las ruedas (“spokes” en la terminología anglosajona) son elementos esenciales para configurar la delicada y eficiente estructura de las ruedas. Aunque conceptualmente son similares a las que ya utilizaron las primeras bicicletas fabricadas hace más de 100 años, se han producido mejoras sustanciales debido a los progresos en los materiales utilizados, en los procesos de fabricación y en los procedimientos de tensado y control.

Antaño, todos los radios de las bicicletas eran, como muchos de los actuales, cilindros macizos de acero de gran esbeltez que se tensaban anclándolos por un extremo al perfil de llanta y por el otro a las alas del buje. En realidad se comportaban como cables tensos, que no tenían práctica capacidad para soportar esfuerzos de compresión, pues, dada su esbeltez, pandeaban. La rueda, ocupa, por ello un destacado lugar entre las estructuras constituidas por cables traccionados y barras comprimidas, de las que existen notables realizaciones en la ingeniería civil y en la arquitectura. Los primigenios aviones en que los dos planos de las alas se unían por una estructura de cables tensos son también ejemplo paradigmático de este tipo de estructuras y no es casualidad que sus inventores, los hermanos Wright, fuesen mecánicos de bicicletas.

La rueda, conceptualmente, forma parte de la prestigiosa familia de las estructuras pretensadas y postensadas que, en la actualidad, dominan el panorama de las construcciones de hormigón a gran escala. El notable ingeniero francés Eugène Freyssinet (1879-1962) afirmó con indiscutible fundamento y autoridad, que la invención del hormigón pretensado, debida en buena medida a su inteligencia y tenacidad, supuso una auténtica revolución en el arte de construir. Una gran parte de las grandes estructuras de hormigón que se han construido en los últimos cincuenta o sesenta años son pretensadas: puentes de muy diferentes tipologías, reántos para centrales nucleares, depósitos para materiales granulares, líquidos y gases. Es una eficientísima tecnología que con el paso del tiempo no ha perdido un ápice de interés. Sin haber cambiado nada en lo esencial, ha ido progresivamente mejorando los materiales utilizados, así como los dispositivos de tensado y andaje de los cables de acero fuertemente tensionados contra el hormigón que comprimen, y al que dotan, así, con una capacidad para aceptar esfuerzos de tracción de la que carece el hormigón, como piedra artificial que realmente es. Y que, además, contribuye a evitar fisuras para las cargas de servicio o, en todo caso, permite controlar su



El transbordador del Niágara de Leonardo Torres Quevedo.

Imagen del primer avión de los hermanos Wright.

apertura y mantenerla dentro de unos límites que se establecen por razones de perdurabilidad, permeabilidad, o incluso aspecto estético.

En la rueda –espléndido ejemplo de estructura pretensada– los radios traccionados equivalen a los cables del hormigón pretensado, la llanta al hormigón que se comprime, y la rosca en un extremo y la sujeción con el ala de los bujes en el otro, corresponden a los dispositivos de andaje.



Estructura de cubierta con membrana textil en Kufstein, Alemania.



Los radios más convencionales están constituidos por cilindros de unos 2 mm de diámetro

$$\left(A = \pi \frac{\phi^2}{4} = 3,14 \text{ mm}^2 \right)$$

y unos 300 mm de longitud. Se tensan con fuerzas que pueden alcanzar y aun superar los 1.000 N. La tensión de tracción correspondiente será

$$\sigma_t = \frac{1.000 \text{ N}}{3,14 \text{ mm}^2} = 318 \text{ N/mm}^2$$

Es una cifra considerable que explica la utilización de materiales, aceros inoxidables o aluminios aleados, de alto límite elástico, aun cuando con ello se reduzca el escalón de fluencia, y por consiguiente, su alargamiento en rotura, es decir su ductilidad.

El alargamiento del radio de 300 mm de longitud, supuesto de acero, ($E_a \approx 210.000 \text{ N/mm}^2$) será del orden de

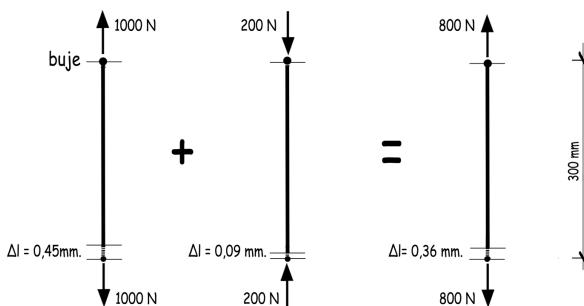
$$AL = \varepsilon \cdot L = \frac{318}{210.000} \cdot 300 = 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 300 \text{ mm} = 0,45 \text{ mm}$$



Con radios de aluminio, cuyo módulo de elasticidad es del orden de la tercera parte del que caracteriza al acero, el alargamiento del radio sería aproximadamente tres veces mayor: $\approx 3 \cdot 0,45 = 1,35 \text{ mm}$.

Reflexionemos ahora sobre el comportamiento estructural de una rueda considerando, solamente, como reacciones de apoyo, las fuerzas vertical y la longitudinal contenidas en su plano, cuya resultante, como ya hemos visto, se encuentra ligeramente retrasada en relación con la vertical del eje.

Aunque la rueda es una estructura altamente hiperestática y son muchos los caminos que tiene la reacción de apoyo para alcanzar el buje donde le espera la fuerza que la contrarresta, los que se activan en primer lugar serán los radios que estén más próximos al punto de contacto en el que se localiza la reacción en un instante dado. Como consecuencia del giro de la rueda, cada uno de sus radios irá coincidiendo, sucesivamente, con la línea de acción que une el contacto con el pavimento y el buje. Dicho radio podría recibir, hipotéticamente, la totalidad de la fuerza de reacción de apoyo. Pero al hacerlo se reduciría la tensión a la que estaba, previamente, sometido. Se acortaría, y al hacerlo, provocaría una ligérissima deformación en la llanta, suficiente para transferir a los radios contiguos una parte de la carga del radio más solicitado, en una proporción, de incerta determinación, que dependerá en gran medida de la rigidez flexional de la llanta. Supongamos, en todo caso, que un único radio, de acero, tensado inicialmente a 1.000 N recibe, en efecto, la totalidad de los 200 N de la reacción de apoyo.



$$\epsilon_t = \frac{0,45}{300} = 1,5 \% \quad \epsilon_c = \frac{200}{1000} \cdot 1,5 \% = 0,3 \% \quad \epsilon_f = 1,5 \% - 0,3 \% = 1,20 \%$$

TENSION INICIAL + REACCIÓN FINAL = ESTADO FINAL

En su "estado final" el radio que transfiere la reacción de apoyo al eje de la rueda continuarán tensionado, aunque se haya reducido la tracción a 800 N y disminuido simultáneamente su alargamiento, para lo que se habrá tenido que producir una flexión localizada de la llanta.

Si imaginamos un ensayo de laboratorio, en el que aumentemos progresivamente el valor de la reacción R, llegaría un momento en que uno de los radios, el más cargado, recibiría una compresión de 1.000 N anulándose su tracción. A partir de ese momento, para aumentar la carga de transferencia, el radio debería comprimirse, pero su gran esbeltez le impediría hacerlo.

En efecto, la carga crítica de pandeo deducida en el siglo XVIII por el gran matemático alemán Leonard Euler (que está enterrado en el cementerio de San Petersburgo cerca de otro extraordinario personaje, Agustín de Betancourt, fundador hacia 1802 de la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y luego Puertos de Madrid, y que acabó siendo, el equivalente a Ministro de Fomento en la ilustrada corte del zar Alejandro II) responde a la bien conocida expresión

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

que en términos de tensión se puede escribir como

$$\sigma_E = \frac{N_E}{A} = \frac{\pi^2 EI}{L^2 A} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2}$$

siendo, λ , la esbeltez del radio, de longitud L

$$\lambda = \frac{L}{i}$$

El radio de giro, i, de una sección de inercia I y área A tiene por expresión:

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

y en una sección circular con $I = \pi \frac{d^4}{64}$ y $A = \pi \frac{d^2}{4}$, tendremos

$$i = \frac{d}{4}$$

La esbeltez, por tanto, del radio de longitud 300 mm y diámetro 2 mm, al que estamos suponiendo articulado en los dos extremos, será

$$\lambda = \frac{300 \text{ mm}}{0,5 \text{ mm}} = 600$$

esbeltez propia de cables y no de elementos comprimidos. En ingeniería civil es poco habitual que dicha esbeltez supere el valor de 100.

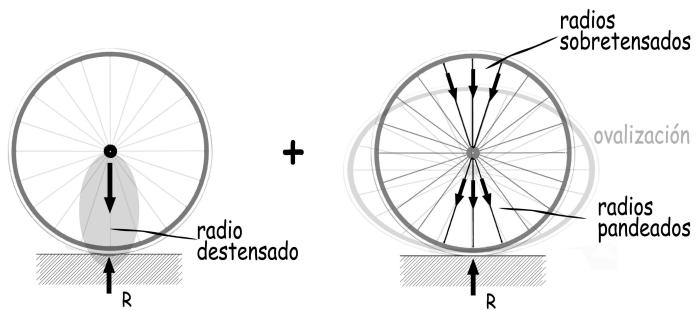
La tensión crítica del pandeo de Euler, en el caso del radio de acero, sería

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot 210.000 \text{ N/mm}^2}{600^2} \approx 5,7 \text{ N/mm}^2, \text{ cifra prácticamente irrelevante.}$$

El radio, por tanto, es prácticamente incapaz de trabajar a compresión. Al comenzar a hacerlo “pandearía”, esto es se desplazaría transversalmente, acortándose longitudinalmente con la consiguiente deformación adicional de la llanta que trataría de transmitir la reacción de apoyo a los radios contiguos que mantuviesen todavía un cierto nivel de tracción.

Incrementos sucesivos de la reacción de apoyos, o de la carga en el buje, provocarían el pandeo de los radios en el entorno del punto de contacto, lo que llevaría consigo un cambio radical, aunque progresivo, en el mecanismo de transferencia.

La rueda se comportaría como si los radios destensados, del entorno del punto de contacto, no existiesen. En el hipotético ensayo de laboratorio que estamos realizando, con la rueda inmóvil, la carga del ensayo, aplicada en su eje, se transferiría a la parte alta de la llanta sobretensionando para ello los radios correspondientes, más verticales. La ovalización de la llanta provocaría la sobretensión, también, de los radios más horizontales de la rueda. Finalmente, por caminos heterodoxos poco deseables, la carga aplicada al eje de la rueda llegaría a su punto de contacto con el pavimento, lo que provocaría una deformación significativa del tramo de la llanta que no podría contar con la ayuda de los radios destensados. La geometría final de la rueda conllevaría un rodar irregular y no sería apta para ser utilizada.



Todo ello pone de manifiesto la necesidad de que los radios dispongan de una importante reserva de seguridad para evitar que se destensen, como consecuencia del proceso de transferencia de la reacción de apoyo con el buje. Y como para moverse la bicicleta las ruedas deben girar, cada uno de sus radios se encontrará sucesivamente con la necesidad de transmitir una buena proporción de las reacciones de apoyo. Por consiguiente, todos los radios deben estar con análoga tensión y con margen de seguridad suficiente para evitar que sean destensados. Y, por otra parte, las dimensiones de la llanta deberían ser suficientes para permitir que la distensión de un radio o su rotura por las causas que sean, deje a la rueda fuera de servicio. Las diferencias de tensión entre unos radios y otros deberán ser suficientemente pequeñas para evitar ovalizaciones significativas de la rueda en su plano y también desplazamientos fuera del mismo.

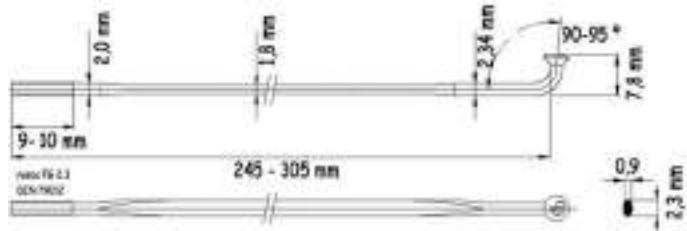
El conjunto de la rueda de la bicicleta es una estructura sutil, altamente hiperestática. La gestión de las incertidumbres asociadas a su comportamiento es un ingrediente del arte de “afinar” una rueda de bicicleta, que recuerda también al arte del afinador de pianos, cuyo cometido es suma de ciencia y sensibilidad de quien manipula artesanalmente la rueda, o de quienes codifican y programan los modernos aparatos que permiten el montaje y control más industrializado de muchas de las ruedas del presente.

En el comportamiento real de un radio juegan, por otra parte, un papel determinante los dispositivos de conexión con el ala del buje por un extremo y con la llanta, por el otro, por medio de un sistema de roscado que permite, además, su puesta en tensión.

Estas esenciales conexiones de los radios plantean análogos problemas a los que nos enfrentamos con los andajes de los tirantes que utilizamos en las estructuras de la ingeniería civil. Las soluciones que han prevalecido para los radios de las bicicletas estén basadas en experiencias acumuladas durante muchísimos años. Si cada año se venden, según parece, 50 millones de bicicletas en el mundo (4 millones en Alemania, 2 en Francia, 0,8 en España) tal vez en la historia de la humanidad se hayan construido más de 1.000 millones de ruedas con el objetivo de que sean al tiempo flexibles, resistentes y fáciles de sustituir. Y, para ello, la solución de las conexiones de los radios con las llantas y los bujes son fundamentales.

A la mirada de un ingeniero de caminos, familiarizado con las estructuras de la gran escala, le llama la atención, muy positivamente, la solución que se adopta en la actualidad para las zonas rosadas de radios cilíndricos, al menos por las marcas más prestigiosas. La rosca se mecaniza en un cabezal cilíndrico de mayor diámetro que el del resto del radio. De esta manera, el inicio de la rosca deja de ser el punto crítico en el que se alcanzaría la tensión máxima que limitaría la capacidad resistente y deformacional del radio. Toda la longitud del radio, entre las dos zonas singulares extremas podrá plastificarse, de manera que su alargamiento potencial será considerable por estar asociado a deformaciones plásticas generalizadas. Lo que en definitiva significa que el comportamiento de este tipo de radios es dúctil, que se ha resuelto el problema de la fragilidad de los radios, eliminando las roturas inesperadas por las rosas y haciéndolos más tolerantes a las imperfecciones inevitables y mal conocidas con las que los radios, también, han de convivir.

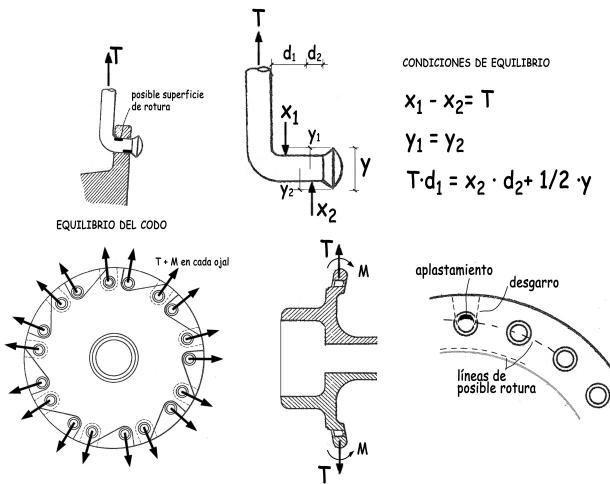
En su otra extremidad, los radios tradicionales para unirse al ala del buje suelen formar un brusco codo aproximadamente perpendicular al eje que acaba en un cabezal. La geometría de un radio correspondiente al catálogo de la prestigiosa firma DTswiss, es el representado en el esquema.



En la actualidad se utilizan también espectaculares radios planos, más aerodinámicos, en los que su parte central adopta formas rectangulares de ángulos redondeados y anchuras que pueden superar los 5 mm.

La solución del codo de unión con el buje de la rueda que proviene de los orígenes de la bicicleta ya ha demostrado, por tanto, su eficacia práctica, sorprende, sin embargo, vista desde la ortodoxia estructural.

Al conformar el codo, con un radio de doblado muy pequeño, se habrán producido en dicha zona plastificaciones del material. Serán necesarias deformaciones unitarias muy superiores a las correspondientes a su límite elástico lo que determina las características del material con el que se fabrican los radios y que se obtienen, mejorando el material específico de base, por procesos de transformación mecánicos y térmicos que les dotan de la dureza superficial, de la capacidad resistente y de la deformabilidad adecuada para absorber las tensiones y deformaciones que se concentrarán en el codo.



EQUILIBRIO DEL ALA DEL BUJE

Para tener unos órdenes de magnitud de lo que ocurre en el entorno del radio en su encuentro con el ala del buje, consideraremos un radio tensado a 1.000 N, siendo las distancias d_1 y d_2 de 4 mm, (espesor del ala del buje de 6 mm). Tomando momentos respecto a la posición de la reacción X_1 tendremos

$$X_2 = \frac{1000 \text{ N} \cdot 2 \text{ mm}}{4 \text{ mm}} = 500 \text{ N}$$

y el valor de X_1 sería

$$X_1 = T + X_2 = 1000 + 500 = 1500 \text{ N}$$

Como la superficie de contacto del codo del radio con el ala del buje puede ser de unos 3 mm^2 , la tensión de contacto sería

$$\sigma = \frac{1500 \text{ N}}{3} = 500 \text{ N/mm}^2$$

cifra considerable que requiere unas características específicas de dureza superficial tanto en el material del codo como en el del ala del buje. Por otra parte, una superficie probable de rotura del radio será la perpendicular inmediatamente próxima al ala del buje. La tensión tangencial media, que se acumula a las tensiones normales provocadas en dicha sección por la flexión localizada, supuesto que el área transversal del codo es de 4 mm^2 , será del orden de

$$\tau \approx \frac{1000 \text{ N}}{4 \text{ mm}^2} \approx 250 \text{ N/mm}^2$$

cifra también muy significativa.

La tensión media de comparación de Von Mises sería, en consecuencia,

$$\sigma_{co} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \sqrt{500^2 + 3 \cdot 250^2} \approx 660 \text{ N/mm}^2$$

lo que confirma la exigencia de disponer de características mecánicas del material del radio muy elevadas y explica que, esta zona, junto con la rosca en el otro extremo, sean las más críticas de un radio y donde de hecho se suelen producir la mayor parte de sus roturas.

La tradicional solución del codo, como dispositivo de andaje, no es, por tanto, muy eficiente estructuralmente. Su heterodoxia está justificada por la facilidad del montaje y desmontaje de los radios y por la posibilidad de hacer ajustes en las tensiones para lograr equilibrarlas. Ya existen, en otras estructuras de la ingeniería, uniones entre elementos que se resuelven con disimetrías y para las que se aceptan concentraciones de tensiones que pueden ser soportadas con geometrías y materiales cuidadosamente escogidos.

Así ocurre, por ejemplo, con las juntas horizontales de las torres metálicas de hasta 80 m de altura utilizadas para soportar aerogeneradores de energía eólica.

La excentricidad de la unión genera sobreesfuerzos en los pernos pretensados y obligan a sobrespesores de las chapas de contacto y a alejar las soldaduras de la zona más solicitada de la unión. Pero, con todo, es una solución aceptada y ampliamente utilizada por sus ventajas funcionales. Las alas de los bujes son anillos con una geometría adecuada a la inclinación transversal de los radios, que brotan de su potente cuerpo central que alberga en su interior los diferentes componentes que lo constituyen: rodamientos, eje tubular, barra de cierre rápido. Están sujetadas por las fuerzas que le transmiten los radios y por los momentos provocados por la excentricidad de dichas fuerzas, que actúan a lo largo de la circunferencia definida por las perforaciones en las que se alojan los codos de los radios. La geometría de las alas y las características mecánicas del material utilizado en su fabricación deberán permitir la transferencia de dichas fuerzas desde las alas hacia el cuerpo del buje. Como ocurre cuando se utilizan los tornillos sin pretensar como medio de unión en las estructuras metálicas de edificación, las alas de los bujes podrían quedar fuera de uso por el aplastamiento del ojal circular en el contacto con el radio; o por el rasgado por desgarradura de las dos superficies radiales tangentes al ojal; o por rotura del anillo externo de las alas o de la superficie de encuentro entre el ala y el cuerpo central del buje debido a la acción simultánea de las fuerzas radiales de tracción y de los momentos transversales concomitantes.

La rigidez de una llanta moderna de aluminio de unos 80 mm^2 de sección unicelular, a la que nos hemos referido anteriormente, y que podría responder a una geometría como la representada en el esquema adjunto, podría tener una rigidez de 50 ó 100 veces superior a la de un radio que hemos estimado en unos 660 N/mm . Tendría, por tanto, una gran capacidad para repartir la reacción puntual del apoyo de la rueda entre 3, 4 ó 5 radios, lo que es manifestación también de la reserva de seguridad que atesora una rueda bien concebida y con los radios bien tensados. Y explica, también, la posibilidad de reducir el número de radios en ruedas con llantas de hasta 50 mm de altura y secciones aerodinámicas.

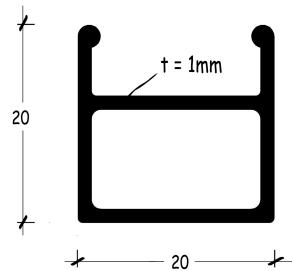
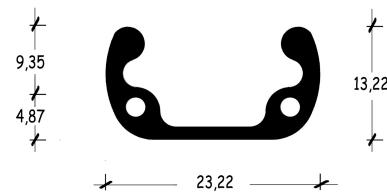
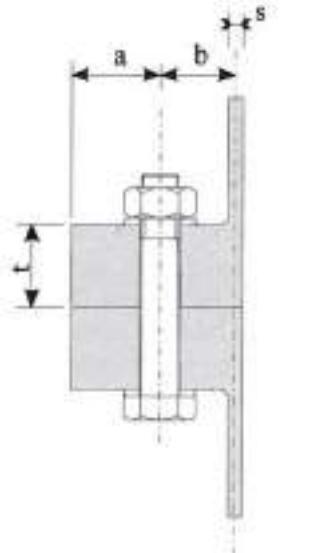
Las modernas tecnologías que se han ido incorporando a la fabricación de llantas nos permite disponer, en la actualidad, de secciones cerradas, mucho más eficientes que las abiertas que se utilizaban hace veinte años de las llantas de acero, y que como la esquematizada, fue objeto de algún trabajo de investigación.

Tenía unos 140 mm^2 de sección y pesaba unas 5 veces más que una llanta moderna de aluminio. A pesar de ello, su inercia no superaría los 1.500 mm^4 y el rendimiento

$$\rho = \frac{I}{Avv'},$$

sería del orden de 0,24, confirmando la ineeficiencia de las secciones abiertas para trabajar a flexión y, aún más, en torsión.

La sección de una llanta moderna tendría una inercia de unos 4.000 mm^4 , casi tres veces mayor y el rendimiento ρ podría superar 0,50.



Por cierto que, desde un punto de vista estructural, no parece que disponer un tabique intermedio, como se hace en algunos casos, sea una iniciativa con futuro. El rendimiento de la sección a flexión disminuiría, sin que la rigidez torsional fuese a aumentar.

Las ruedas tradicionales, y todavía algunas de las que se utilizan en las “bicicletas de montaña” que deben soportar situaciones muy exigentes, solían estar dotadas de 36 radios. Dividían, por tanto, la rueda en sectores con ángulos de diez grados sexagesimales. En la actualidad la oferta de ruedas es amplísima y los catálogos de los fabricantes inducen desde las que disponen de 32 radios hasta las que se reducen a 16. Los aluminios y aceros, aleados y mejorados superficialmente, son los materiales más empleados en la actualidad. Existen propuestas, también, de radios tubulares fabricados con fibra de carbono, capaces de resistir compresiones y que se enfrentan al delicado problema de su andaje en las dos extremidades. Lo que por otra parte, si se llega a resolver eficientemente, podría servir de referencia e inspiración para los andajes de tirantes con fibra de carbono que se podrían desarrollar, asimismo, para su uso en las estructuras de la ingeniería civil y de la edificación.

Las ruedas modernas más avanzadas, con llantas, radios y bujes integrados y suministrados por un único fabricante, van eliminando el heterodoxo codo del sistema de andaje de los radios con las alas de los bujes. La posición de sus radios ya no apunta exclusivamente hacia el eje. Son frecuentes, también, las configuraciones con radios tangentes a un círculo concéntrico con el buje, lo que obliga a entrecruzar dos, tres y cuatro veces los radios en las proximidades de las alas de andaje. Si en los puntos de cruce se sujetan los radios entre sí, la rigidez de la rueda en su conjunto puede incrementarse significativamente al reducirse la longitud de pandeo, mejorando su comportamiento en caso de sobreesfuerzos.

La rigidez de las llantas que se fabrican en la actualidad permite asimismo agrupar radios y aumentar notablemente la longitud de los tramos libres entre radios, lo que conlleva esfuerzos de flexión en la llanta muy superiores a los de las ruedas tradicionales.

Como ya se ha comentado en el apartado 4.4 las ruedas con gran número de radios, 32 ó 36, tienen coeficientes aerodinámicos de arrastre, C_D , significativamente más elevados que las ruedas con un número reducido, según se ha demostrado en ensayos en túnel aerodinámico. Cuando además, se aplanan los radios, se reduce, aún más, su oposición al viento. Desde el punto de vista puramente aerodinámico, las más eficientes pueden ser, en determinadas condiciones, las modernas ruedas lenticulares de fibra de carbono que cubren la totalidad de su superficie y que se utilizan preferentemente como rueda trasera en las pruebas contrarreloj de las competiciones entre profesionales, cuando los recorridos son predominantemente llanos, de trazados amables y sin viento meteorológico significativo. Los inconvenientes de su mayor peso, y coste, quedan así compensados. También son habituales, con esta finalidad, y para ser utilizadas como ruedas delanteras, las de 3 ó 4 parejas de amplias láminas, también de fibra de carbono.



En estos casos las reacciones de apoyo se transmiten al buje de la rueda por compresión de las láminas. Las tensiones localizadas en su encuentro con el buje y con la llanta, la flexión de ésta, y el riesgo de pandeo por flexión de las láminas, condicionan el dimensionamiento de este tipo de ruedas, conceptualmente muy diferente de las tradicionales.

Existen, por tanto, en la actualidad, una amplia gama de ruedas caracterizadas por los materiales que se emplean en la fabricación de llantas y radios, por el trenzado de éstos, por los ingeniosos sistemas que permiten su unión con el buje, y por la sofisticación de las lenticulares o las que utilizan láminas de fibra de carbono. Configuran un panorama muy variado y atractivo.

En otro orden de cosas, es imprescindible constatar que las reacciones de apoyo, en el contacto de los neumáticos con el terreno, tienen también una componente transversal, que será suma de las fuerzas centrifugas no compensadas por la inclinación del ciclista, las debidas al viento, y las que puedan ser consecuencia del giro que impone el ciclista al manillar para cambiar la dirección del movimiento. Y, de cuando en cuando, las que se producen como consecuencia del impacto de la rueda con algún inesperado obstáculo que se encuentra en su camino.

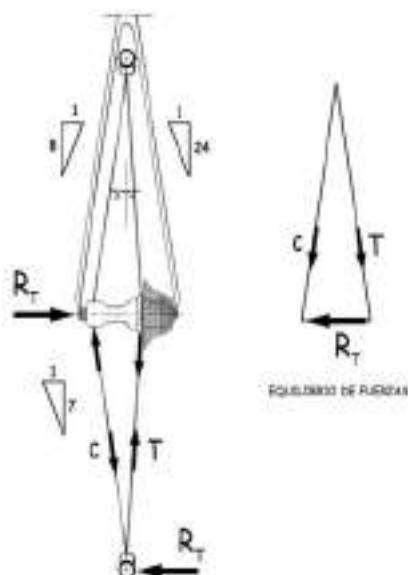
De manera que la estructura de la rueda debe tener capacidad para transferir estas reacciones transversales a los bujes, desde donde se dirigirán hacia el cuadro de la bicicleta. El esquema estructural de la rueda solicitada por esta reacción transversal será el representado en el esquema. Algunos de los radios, entre los más próximos al punto de aplicación de la carga R_T , se comprimirán y los inclinados en sentido opuesto, se traccionarán. El equilibrio de fuerzas, suponiendo que la inclinación de los radios esté en la proporción 1:8, exige que

$$C = -T = \frac{R_T}{2} \cdot 8 = 4 R_T$$

A estas fuerzas, C y T , que debido a la rigidez transversal de la llanta y la cubierta, se repartirán entre algunos radios, se añadirán las provocadas por las componentes verticales y longitudinales de las reacciones de apoyo y las tracciones previas inducidas por el pretensado.

Como veremos en el apartado 6, en el ensayo normalizado para una rueda trasera se impone una fuerza transversal de 370 N aplicada en la llanta. Si suponemos que una fuerza análoga se aplica también en la llanta de una rueda delantera y aceptamos que en su transferencia al buje se activan 4 radios, dos inclinados en un sentido y los otros dos en el opuesto, tendríamos un sobreesfuerzo, por radio, de:

$$C_r = -T_r = \frac{4 \cdot 370}{2} = 740 \text{ N}$$



valores considerables que reducirían la tensión en algunos radios de los 1.000 N iniciales a los $1.000 - 740 = 260$ N y que incrementarían sustancialmente, los esfuerzos de otros radios, hasta cifras de 1.740 N de tracción. En la práctica es muy improbable que se lleguen a alcanzar los valores de los ensayos normalizados si no fuese como consecuencia de algún choque o impacto de la rueda con algún obstáculo inesperado.

Conviene también observar, que la posición de la fuerza transversal se sitúa en la superficie de contacto de la cubierta con el terreno. Por consiguiente, dicha fuerza debe ser transferida, en primer lugar, desde la cubierta hasta la llanta para luego proseguir su peregrinaje a través de los radios hacia el buje de la rueda. La capacidad de la cubierta para transferir estas fuerzas transversales, es limitada, probablemente significativamente inferior a la capacidad que tiene la estructura constituida por la llanta, los radios y el buje. En todo caso, dicha transferencia produciría desplazamientos transversales de la cubierta y podría llegar a provocar el brusco deshinchado de la rueda con todas sus indeseables secuelas. Lo que, en definitiva, confirma que como bien sabe todo aficionado que se preocupe, la cubierta es un componente, muy sensible y esencial en el comportamiento de la bicicleta. Por lo que se ha de coger y cuidar con esmero.

El buje es el último componente que nos queda por analizar de una rueda delantera. Hasta él, llegan las fuerzas que generan o canalizan los radios, y él los transfiere a las patillas de las horquillas del sistema de dirección. Está constituido por un cuerpo externo hueco de acero o aluminio aleado, fabricado por moldeado, del que forman parte las dos alas a las que se anclan los radios. El eje del buje suele ser un tubo hueco de unos 12 mm de diámetro, y algún milímetro de pared, en el que se introduce la barra cilíndrica que en sus extremos dispone de los dispositivos de cierre rápido que permiten la fijación de las patillas de la horquilla de dirección al eje del buje. Entre el eje interior y el cuerpo externo del buje se disponen, en la proximidad de las alas del buje, los rodamientos de bola que hacen posible la rotación de la rueda y transfieren las fuerzas provenientes de los radios a las patillas de la horquilla de dirección.

Los esenciales rodamientos de bolas equivalen en cierto modo a los estáticos aparatos de apoyo (de neopreno zunchedo o teflón, por ejemplo) que utilizamos en las estructuras de la ingeniería civil. Están constituidos por dos anillos concéntricos, el externo unido al cuerpo del buje y el interno incorporado a su eje. Y entre ellos, un rosario de bolas que aseguran la rotación relativa de los dos conjuntos y la transferencia de fuerzas entre ellos.

Los dos modelos de rodamientos más utilizados en las bicicletas son los de bolas de contacto –los de más sencilla colocación y más incierto comportamiento– y los rígidos de bolas, que suelen estar premontados, se lubrican con grasas de larga duración y van sellados. Una bicicleta cuenta con numerosos rodamientos de bolas: en los bujes delantero y trasero, en la barra de dirección, en el eje del pedalier, en los pedales. Los rodamientos

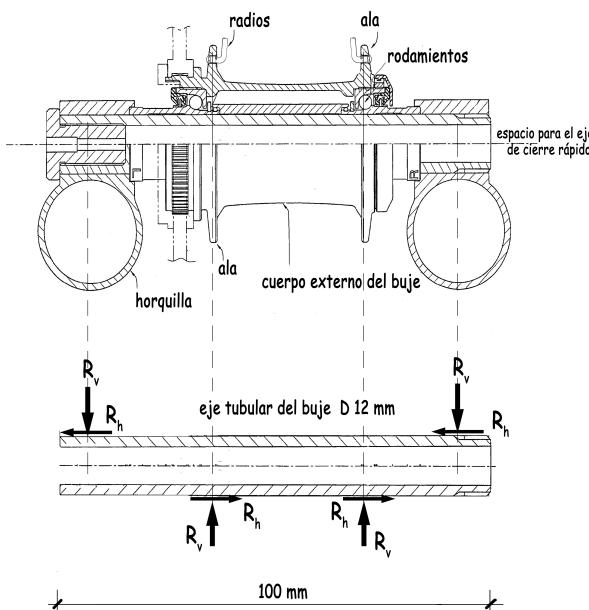


son, por consiguiente, componentes fundamentales de la bicicleta y entre los que más han contribuido a su progreso. Están, también, entre los más delicados, y los que, con mayor frecuencia, se han de sustituir.

Sus dimensiones externas, que dependen lógicamente de su función, suelen ser de pocos centímetros y el diámetro de las bolas suele ser de milímetros. Las tolerancias de fabricación garantizadas se especifican en micras.

Las puntas de tensiones en el contacto de las bolas con los anillos de rodamiento pueden alcanzar valores elevadísimos, del orden de 3.500 N/mm^2 . Por ello en su fabricación se utilizan los aceros, aleados y tratados para aumentar su dureza superficial. En algunos modelos avanzados se emplean también materiales cerámicos. Los rodamientos son un prodigo tecnológico que a quienes provenimos de campos ajenos a la mecánica nos asombra por su esencialidad, por su sencillez conceptual, por el ingenio, y la belleza indujo, de los procesos de fabricación y montaje, por las características de los materiales empleados, por su universalidad e indujo por los moderados costes con los que se fabrican industrialmente. Probablemente, el coste del conjunto de rodamientos de acero de una bicicleta rondará los 30 euros.

Nos referiremos ahora a la estructura que posee el buje de una rueda delantera, como el sintetizado en el esquema.



Las reacciones de apoyo, verticales y transversales que nacen en el contacto de la cubierta con el terreno, llegan tras su viaje a través de la estructura de la rueda hasta las alas del buje. De éstas pasan por los rodamientos hasta su eje tubular que, a su vez, por flexión y cortante, las transfiere a las patillas de las horquillas de la bicicleta, desde donde continúan el peregrinaje que las conducirá hasta el cuadro de la bicicleta y su manillar.

El buje de las ruedas traseras, tiene, además, otras funciones que determinan su geometría. En el lado derecho de la bicicleta, vista desde su parte posterior, se instalan el paquete con los piñones del sistema de transmisión, que incorpora también el dispositivo de “rueda libre” que permite a los pedales y a la cadena rotar libremente en sentido opuesto al que provoca el movimiento hacia adelante de la bicicleta. Por ello, la separación entre horquillas suele ser superior al de los 100 mm de las ruedas delanteras. Y el cuerpo externo y el eje tubular del buje trasero deben tener la capacidad para transferir las fuerzas originadas por el sistema de transmisión de las bicicletas, además de las que le llegan por la estructura de la rueda.

Para dejar espacio a los piñones y para transmitir más eficientemente las fuerzas que introducen al sistema, el ala derecha del buje se desplaza transversalmente. La distancia entre alas, que en la rueda delantera era de unos 60 mm, se reduce a 40 mm aproximadamente; la derecha se aproxima a 10 mm del eje de la rueda trasera, mientras que el ala izquierda mantiene la distancia de 30 mm, como en la rueda delantera.

Consecuentemente la inclinación de los radios ($\frac{30}{240} = \frac{1}{8}$, suponiéndolos de 240 mm de longitud) próximos a los piñones pasarían a ser del orden de $\frac{1}{24}$ en los radios opuestos.

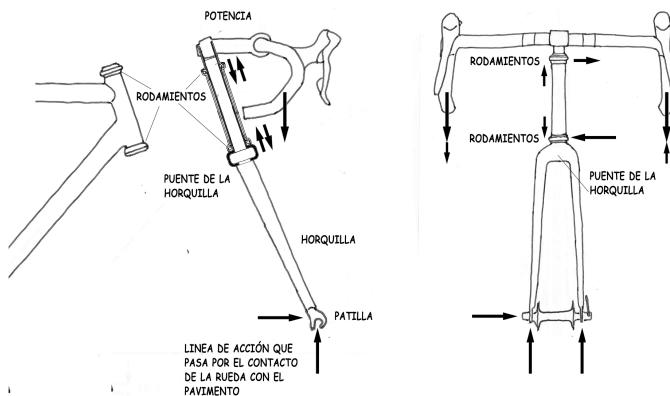
Los radios del lado derecho, próximo a los piñones, reciben, por tanto, más carga que los radios dispuestos en la parte opuesta y, llama la atención, que, a pesar de ello, en algunas ruedas traseras actuales con tecnologías avanzadas el número de radios sea la mitad, por ejemplo, que los del lado opuesto en ruedas traseras de 24 radios.

Los bujes de las ruedas delantera y trasera pueden acomodar también las piezas de los frenos de disco que en algunas bicicletas de montaña en general, se instalan como alternativa a los frenos tradicionales de zapatas. Consecuentemente, la estructura del buje debe tener capacidad también para transferir los esfuerzos que se producen cuando se activan dichos frenos, que, lógicamente difieren en magnitud y posición de las fuerzas que se generan en las superficies laterales de las llantas de las ruedas con frenos tradicionales.

5.3. HORQUILLA, POTENCIA Y MANILLAR

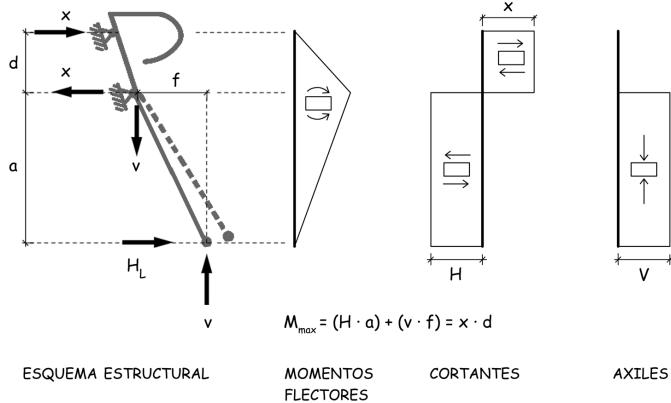
El conjunto de la horquilla, de la potencia del manillar y del propio manillar constituye una subestructura que se mada con el tubo de dirección del cuadro de la bicicleta y permite el intercambio de las fuerzas que provienen de las patillas de las horquilla y del manillar con las del conjunto del cuadro. Aislaremos virtualmente la subestructura en cuestión, porque nos ayudará a comprender los itinerarios que recorren las fuerzas en dicho intercambio y a formular las condiciones del equilibrio, estático o dinámico, que gobernarán su relación.

En las punteras de la horquilla actuarán, básicamente, las fuerzas equivalentes a las reacciones de apoyo, que provienen del área de contacto de la cubierta de la rueda delantera con el pavimento.



La barra vertical, que arranca del puente con el que se unen las dos patas de la horquilla, penetra en el tubo de dirección del cuadro. Los dos rodamientos de bolas, que se disponen entre la barra y los bordes del tubo de dirección, permiten la rotación relativa de la subestructura de la dirección y, por ende, de la rueda delantera, en relación con el cuadro de la bicicleta. Además, los rodamientos deben transferir o canalizar –misión también esencial– las fuerzas entre la subestructura de dirección y el cuadro. Todos los rodamientos que se disponen en una bicicleta, reiterémoslo, equivalen a los aparatos de apoyo que utilizamos en las estructuras de la ingeniería civil y la edificación, para transferir fuerzas entre diferentes componentes estructurales; por ejemplo, entre el tablero y las pilas de un puente de carretera o ferrocarril.

Por ello, los rodamientos pueden representarse con el símbolo clásico que se utiliza para representar las articulaciones fijas que permiten giros pero no desplazamientos. De manera que, esquemáticamente, el conjunto de la subestructura de la horquilla, barra de dirección, potencia y manillar, será el siguiente:



Las fuerzas externas, que actúan sobre esta subestructura serían las que se localizan en las punteras de la horquilla provenientes del contacto de la rueda con el pavimento y aquellas provocadas por las manos del ciclista que se apoyan en el manillar. En los esquemas se ha supuesto que, transversalmente, las fuerzas se reparten por igual entre las dos barras de las horquillas y los dos laterales del manillar, lo que, en la realidad no será siempre así. Porque, por ejemplo, para girar la bicicleta el ciclista aplicará fuerzas diferentes, de escasa magnitud en general, en uno y otro brazo del manillar.

Evaluemos, en primer lugar, los esfuerzos correspondientes a las componentes vertical, V , y longitudinal H_L , de la fuerza aplicada en las punteras. Las leyes de momentos flectores, esfuerzos cortantes y axiles serían los representados en el esquema

La componente vertical, V , ascenderá por las barras de las horquillas, flexionándolas debido a la excentricidad asociada a su geometría ligeramente curvada. Continuará, después, por la barra de dirección hasta alcanzar el rodamiento superior en el que concluirá su peregrinaje estructural. La excentricidad, f , de dicha componente vertical, generará un momento $V \cdot f$, al que se añadirá el debido a la fuerza longitudinal que valdrá $H \cdot a$, siendo la distancia vertical al rodamiento inferior.

Para equilibrar la suma de estos dos momentos $V \cdot f + H \cdot a$, aparecerán, en los rodamientos inferior y superior que están separados una distancia vertical, d , dos reacciones de apoyo, X , iguales y contrarias, de valor

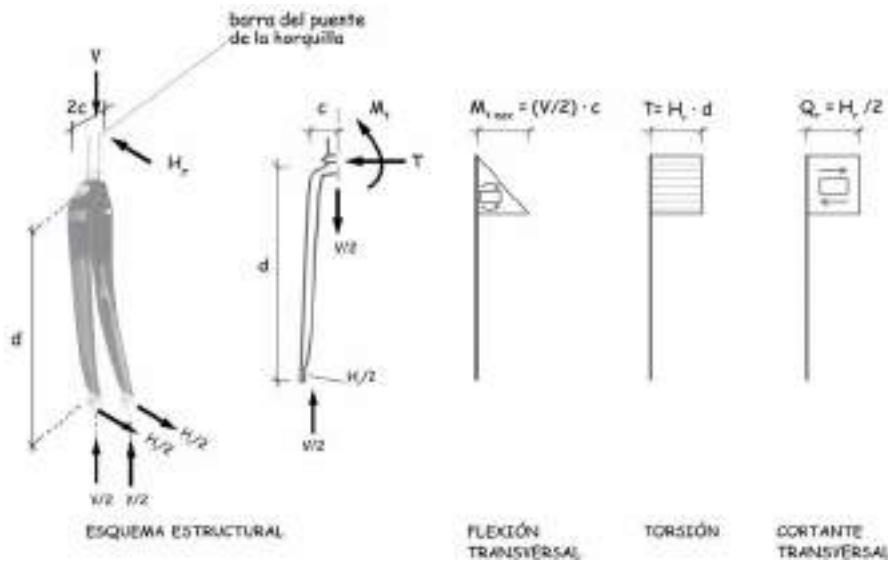
$$X = \pm \frac{H \cdot a + V \cdot f}{d}$$

La ley de momentos flectores, del conjunto de las dos barras de la horquilla crecerá linealmente hasta alcanzar, junto al rodamiento inferior, el valor máximo

$$M_{\max} = V \cdot f + H \cdot a = X \cdot d$$

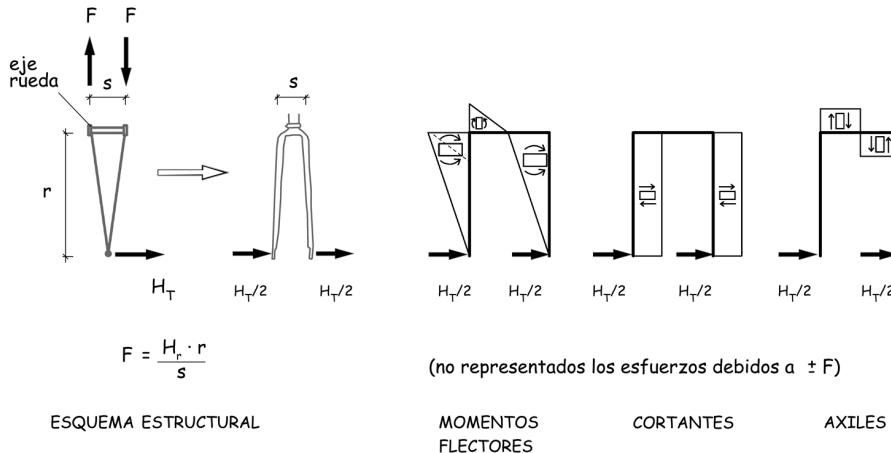
El esfuerzo cortante tendrá por valor H en el tramo de la horquilla y X entre los dos rodamientos.

En la barra-puente horizontal que conecta las dos patas de la horquilla y de la que arranca la vertical de dirección, el recorrido de fuerzas, y de los esfuerzos asociados, cambiará bruscamente de dirección y volverá a hacerlo al encontrarse con la barra vertical. Estos cambios bruscos, indispensables funcionalmente, alertan de la complejidad de análisis de esta barra esencial. La flexión de las dos barras laterales de la horquilla se hará aquí torsión antes de volver a hacerse flexión en la barra vertical de dirección. Los esquemas de esfuerzos debidos a las fuerzas V y H_L son los siguientes:



Además, la barra a la que nos estamos refiriendo sirve de dintel al pórtico, que es también la horquilla y permite la transferencia hacia los rodamientos de la reacción de apoyo transversal. Los radios indinados a un lado y otro del plano de la rueda, provocarán en las punteras de la horquilla un par de fuerzas verticales iguales y contrarias que equilibrarán el momento $H_t \cdot r$ (siendo r , el radio de la rueda) y se sumarán o restarán a los valores de V . Se generarán, además, esfuerzos adicionales en el plano transversal del pórtico, como los esquematizados en el croquis adjunto.

Consideremos ahora los esfuerzos que se producen como consecuencia de las fuerzas que introduce un ciclista que aferra con sus manos la parte inferior del manillar de competición de una bicicleta de carretera.



Las fuerzas provocadas por cada mano, que supondremos iguales, tendrán una componente vertical V_m , hacia abajo, y otra horizontal, H_m , hacia afuera. La condición de equilibrio exige que en los rodamientos aparezcan unas “reacciones de apoyo” que neutralicen las fuerzas aplicadas. Como los rodamientos, equivalen a articulaciones fijas, toda la carga vertical, V_m , estará equilibrada por la reacción del más próximo a la potencia del manillar. La carga vertical, V_m , no habrá pasado el filtro del primer rodamiento que encuentra tras haber recorrido toda la geometría del manillar y de la barra de potencia. Ambos rodamientos, como consecuencia de las fuerzas H_m y V_m provocadas por la presión de las manos sobre el manillar tendrán que transmitir, además, las reacciones horizontales $X_{m,s}$ en el superior y $X_{m,i}$, en el inferior, que asegurarán el cumplimiento de las condiciones de equilibrio.

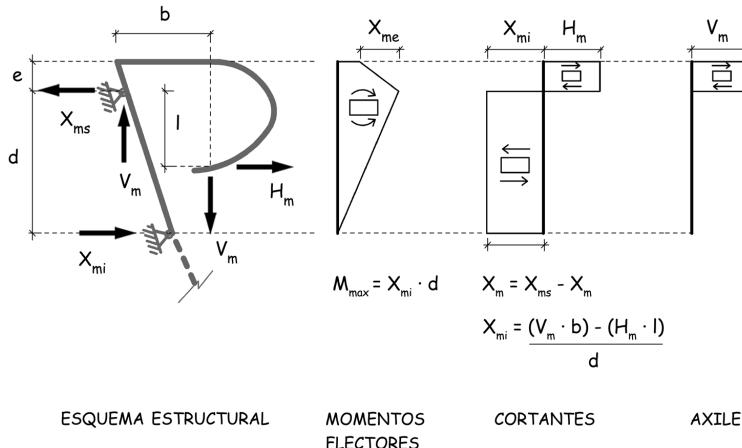
$$Y_{m,s} = V_m; Y_{m,i} = 0$$

$$X_{m-d} = V_{m-b} - H_{m-l}$$

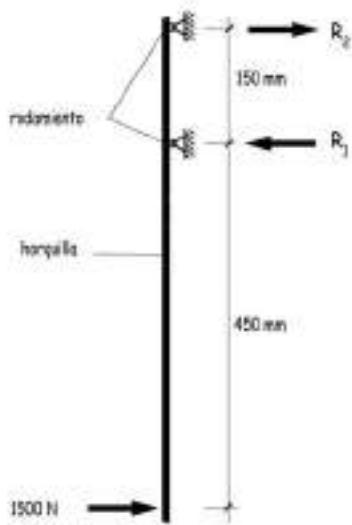
$$X_{m,i} + H_m = X_{m-s}$$

En consecuencia, los esquemas de los esfuerzos en el tubo de dirección son los representados en el esquema de la página siguiente.

Las reacciones totales que deben soportar los dos rodamientos de la dirección, serán la suma de los provocados por las fuerzas aplicadas en las punteras de las horquillas en contacto con el eje y por las introducidas por el ciclista al apoyarse sobre el manillar de su bici, que, lógicamente desaparecerán cuando suelte las manos del manillar. Conociendo, por lo tanto, las reacciones de apoyo en el contacto de la rueda con el terreno por el que circula la bicicleta y las fuerzas que introducen las manos del ciclista en el manillar, se podrían determinar esfuerzos, y también deformaciones, de la subestructura constituida por la horquilla, la barra de dirección, la potencia y el manillar, así como establecer el



valor de las fuerzas que llegan a los dos rodamientos de dirección y que se difunden desde allí, a la estructura del cuadro de la bicicleta. Pero la determinación teórica de las reacciones máximas de apoyo que se pueden producir en una bicicleta es, realmente, imposible. A ello se hace referencia en el apartado 6, en el que, además, de algunas reflexiones sobre métodos de cálculo y criterios de seguridad estructural, se describen, en síntesis, algunos de los ensayos establecidos en las Normas, con las cargas, en diferentes escenarios estáticos y dinámicos, que debe soportar la estructura de la bicicleta.



En el ensayo normalizado de flexión estática se aplica una carga transversal de 1.500 N en las punteras de la horquilla. Suponiendo que la distancia de la carga al primer rodamiento sea de 450 mm y la separación entre ellos de 150 mm, el esquema estructural correspondiente al ensayo será el representado en la figura adjunta.

Las reacciones en los rodamientos de la barra de dirección serán

$$R_i = 1500 \text{ N} \cdot \frac{450 + 150}{150} = 6.000 \text{ N}$$

$$R_s = -6.000 + 1.500 = -4.500 \text{ N}$$

Y el momento máximo, en la sección próxima a la posición del rodamiento inferior, será:

$$M_{\max} = 1.500 \text{ N} \cdot 0,45 \text{ m} = 675 \text{ Nm}$$

Estos valores son relevantes. La fuerza de 1.500 N utilizada en el ensayo incorpora, sin duda, importantes coeficientes de seguridad, por cuanto el valor de la máxima reacción horizontal de apoyo que se produce en el contacto de la cubierta de la rueda delantera con el pavimento suele ser de algunas decenas de newton solamente. De manera que el ensayo corresponde a un estado límite último, que busca verificar la capacidad máxima de la horquilla, de su puente y de la barra de dirección y de los rodamientos que redibe la carga.

y le transfieren al cuadro. Solo en caso de impactos considerables podrán alcanzarse valores próximos a los 1.500 N del ensayo.

En todo caso, para que la horquilla en su conjunto supere el ensayo estático de flexión, la barra de dirección deberá estar dimensionada para recibir un momento flector de 675 Nm y un esfuerzo cortante de 4.500 N. Si suponemos que la barra de dirección tiene un diámetro de 30 mm y sus paredes son de 2 mm de espesor, sus características mecánicas serían:

$$A = \pi \cdot 30 \cdot 2 = 188 \text{ mm}^2$$

$$I \simeq \rho A v v' \simeq 0,50 \cdot 188 \cdot \left(\frac{30}{2} \right)^2 = 21.150 \text{ mm}^4$$

$$W = \frac{I}{v} = \frac{21.150}{15} = 1.410 \text{ mm}^3$$

La tensión máxima debida a la flexión elástica sería

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W} = \frac{675.000 \text{ Nmm}}{1.410 \text{ mm}^3} = 478 \text{ N/mm}^2$$

Y la tensión tangencial debida al cortante

$$\tau \simeq 1,5 \frac{Q}{A} = 1,5 \cdot \frac{4.500 \text{ N}}{188 \text{ mm}^2} \simeq 36 \text{ N/mm}^2$$

Este último valor es prácticamente despreciable, pero para que la tensión máxima de flexión, 478 N/mm², sea aceptable, el tubo en cuestión debería ser fabricado con aluminios aleados de altos límites elásticos o doblar el espesor de sus paredes considerado en este ejemplo.

Es interesante evaluar, también, la flecha máxima de la horquilla ensayada, bajo la carga de 1.500 N aplicada. Considerando un voladizo empotrado de 450 mm, tendremos

$$f_{\max} = \frac{PL^3}{3EI} = \frac{1.500 \text{ N} \cdot (450)^3 \text{ mm}^3}{3 \cdot 70.000 \text{ N/mm}^2 \cdot 21.150 \text{ mm}^4} \simeq 30 \text{ mm}$$

cifra considerable, que equivale a L/15, y que realmente será aún mayor porque la estructura de la horquilla, junto al primer rodamiento probablemente habrá iniciado su plastificación. De hecho la norma acepta el ensayo si la deformación remanente, tras eliminar la carga, no supera los 5 mm, mientras que en el ensayo correspondiente de impacto, la flecha admisible podría alcanzar los 45 mm, lo que sorprende un tanto.

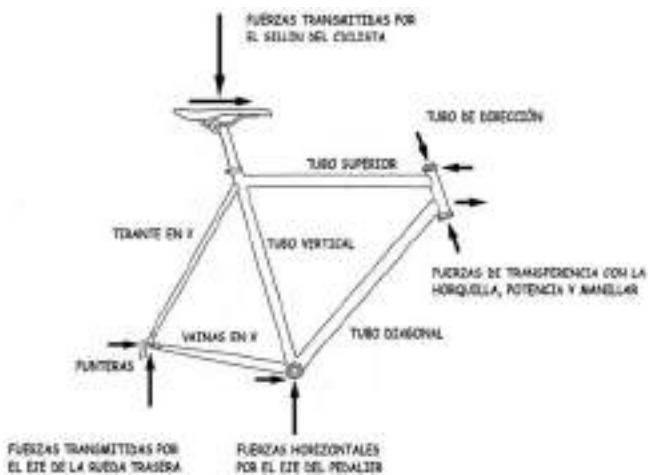
El somerísimo análisis realizado pone de manifiesto también que el rodamiento inferior es el más solicitado en el ensayo, como también lo es en la práctica. De hecho, suele ser el que padece más patologías y el que debe ser sustituido con mayor frecuencia. Lo que explica, por otra parte, la tendencia a coníferar el tubo de dirección del cuadro, con un diámetro en la parte superior de 1 1/8 pulgadas (28,6 mm) y de 1 1/4 pulgadas (31,7 mm) en su nivel inferior para así poder disponer de un rodamiento más capaz abajo que arriba.

5.4. EL CUADRO

Si aislamos el cuadro de una bicicleta de carretera nos encontraremos con una geometría que se suele denominar de doble diamante. El triángulo principal, cuyo vértice delantero se ha truncado con el tubo de dirección, está constituido por el tubo superior, el vertical y el diagonal. Las barras de los tirantes y vainas –desdobladitas para habilitar espacio para la rueda trasera y los mecanismos de transmisión– completan la estructura del cuadro.

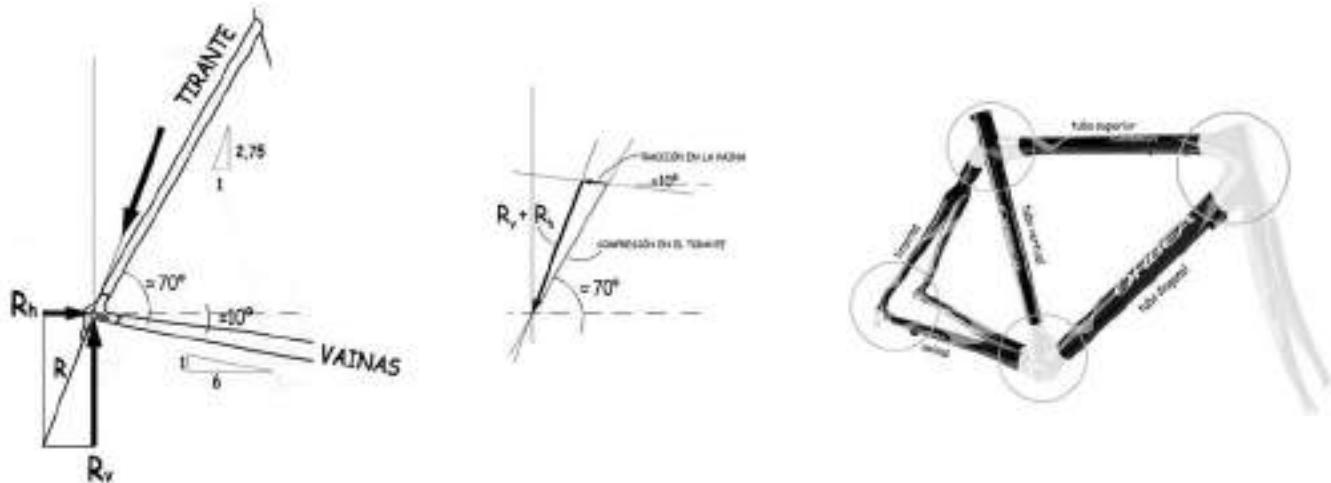
Las fuerzas que actúan en el plano del cuadro –no se han representado las transversales– serían las siguientes:

- las aplicadas por el ciclista en el sillín y a través de los pedales, en el eje del pedalier.
- Las transferidas por la rueda trasera a las punteras posteriores del cuadro
- Las transmitidas por los dos rodamientos a la barra de dirección, originadas por la reacción de apoyo de la rueda delantera y por las fuerzas aplicadas en el manillar.



Sorprende que a las barras en V que nacen en el eje de la rueda trasera y apuntan hacia arriba, con un ángulo de unos 70° , se las denomine tirantes, porque, prácticamente, siempre estarán trabajando en compresión, con un valor ligeramente inferior al de la reacción de apoyo de la rueda trasera. Por el contrario, las barras en V que configuran la vaina que une el buje trasero con el eje del pedalier –y que se inclinan unos 10° hacia abajo en relación con la horizontal– estarán siempre ligeramente traccionadas porque, en otro caso, en el esquema de equilibrio, la componente horizontal R_H , de la reacción tendría que superar el valor de

$$0,36 R_v \left(\simeq \frac{R_v}{\operatorname{tg} 70^\circ} \right) \text{ lo que sólo se producirá en circunstancias excepcionales.}$$



El cuadro de una bicicleta está constituido por un conjunto de tubos, generalmente cilíndricos, unidos entre sí, que están solicitados por cargas que se introducen, en general, en sus dos nudos extremos. Con excepción de las que son debidas a su peso propio, muy poco relevantes, y las que pueden ser consecuencia de algún impacto o de la colocación de un peso: el de una persona sentada en su barra superior, por ejemplo.

El esquema de las barras aisladas que constituyen el esqueleto de una bicicleta convencional es el de la figura superior de la derecha.

En general, los tubos del cuadro de una bicicleta suelen tener diámetros que varían entre 15 y 45 mm, con espesores de pared entre 0,5 y 2,0 mm.

La masa de un cuadro desnudo, sin horquilla, fabricado con aluminio de densidad 2,70 kg/dm³, puede ser del orden de 1,35 kg y el volumen del material necesario será de $1,35/2,70=0,500 \text{ dm}^3$, es decir medio litro.

Para estimar algunos órdenes de magnitud dimensionales, consideraremos que las dos vainas equivalen a una única barra y otro tanto supondremos para los dos tirantes. El cuadro estará conformado por cinco barras que en conjunto tendrán una longitud de unos 2,50 metros. Para que el volumen del material necesario para construir el cuadro fuese, como hemos estimado, de 500 cm³, la sección del tubo característico tendría que ser de 2,0 cm² ($250 \text{ cm} \cdot 2 \text{ cm}^2 = 500 \text{ cm}^3$), lo que correspondería, por ejemplo, a un tubo de 40 mm de diámetro y 1,6 mm de pared constante. Sus características mecánicas serían:



$$A = 2,0 \text{ cm}^2$$

$$I \approx \rho A v v' = 0,50 \cdot 2,0 \left(\frac{4,0}{2} \right)^2 = 4,0 \text{ cm}^4$$

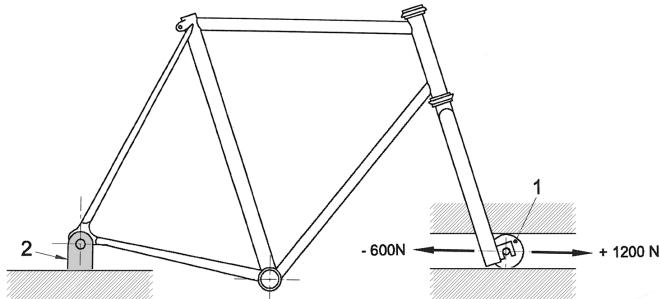
$$W = \frac{I}{v} = \frac{4,00}{2,00} = 2,00 \text{ cm}^3$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{4}{2}} = 1,41 \text{ cm} (\approx 0,35 \cdot 4,0)$$

Si consideramos que el límite elástico del aluminio empleado es de 255 N/mm², las capacidades resistentes de referencia para la sección del tubo característico ($\phi 40, t = 1,6$) serían

- Tracción o compresión: $255 \text{ N/mm}^2 \cdot 200 \text{ mm}^2 = 51.000 \text{ N}$
- Momento flector elástico: $255 \text{ N/mm}^2 \cdot 2.000 \text{ mm}^3 \cdot 10^{-3} \text{ m/mm} = 0,51 \text{ Nm.}$

Para disponer, asimismo, de órdenes de magnitud de los esfuerzos máximos que podrían solicitar a los tubos del cuadro, tomaremos como referentes las cargas de uno de los ensayos que se describen en el apartado 6. Las máximas aplicadas en las punteras de la horquilla son de +1.200 N, hacia afuera, y de -600, hacia adentro.



En el eje fijo del ensayo, en el que confluyen vainas y tirantes, las reacciones máximas de sentido opuesto al de las cargas aplicadas serán -1.200 N y + 600 N. En consecuencia, las vainas estarían solicitadas por una tracción aproximada de 1.200 N, muy inferior a la capacidad resistente de referencia de 51.000 N. Por otra parte, la compresión de 600 N tendería a pandear las barras que constituyen las vainas. Y, a este respecto, tendríamos que considerar el comportamiento individualizado de una de las dos barras. Suponiendo, en coherencia con lo expuesto anteriormente, que cada una de ellas tiene un diámetro de 20 mm, un área de 1 cm², y una longitud de 400 mm, que aceptamos coincide con la longitud de pandeo, la esbeltez, λ , de la barra sería

$$\lambda = \frac{l_p}{i} \simeq \frac{400 \text{ mm}}{0,35 \cdot 20} = 57$$

La tensión crítica de pandeo de Euler, σ_E , será (para el aluminio $E = 70.000 \text{ N/mm}^2$)

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} = \frac{\pi^2 \cdot 70.000}{57^2} \simeq 210 \text{ N/mm}^2$$

Considerando un coeficiente de reducción de 0,50 para tener en cuenta las imperfecciones inevitables de la barra, tendremos una capacidad a compresión de la vaina compuesta por 2 barras de

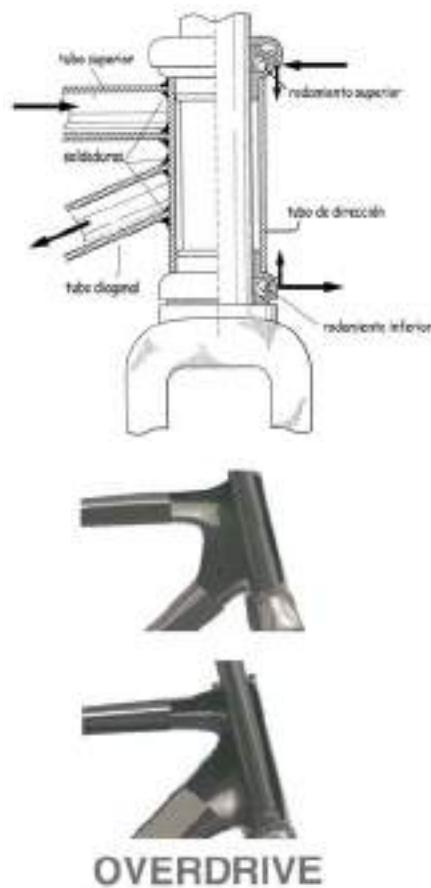
$$N = 2 \text{ barras} \cdot 0,50 \cdot 210 \text{ N/mm}^2 \cdot 100 \text{ mm}^2 = 21.000 \text{ N}$$

muy superior, también a la solicitud de 600 N.

Estos valores y los que se han deducido anteriormente al tratar de la horquilla, ponen de manifiesto que ni las barras de los cuadros ni las del sistema de dirección están fuertemente solidadas axialmente. No son ni los esfuerzos de compresión ni los de tracción lo que condicionan su dimensionamiento. Más determinantes son los de flexión, aunque su influencia declina rápidamente a medida que nos alejamos de los nudos. Porque, obviamente son estas zonas, en las que se reúnen las barras individuales, las más críticas de la estructura del cuadro de una bicicleta. Y las de más inderto análisis. En ellas, los flujos tensionales y deformacionales discurren por caminos torturados, con quiebros bruscos, en los que se amplifican notablemente tensiones y deformaciones, y, en cuyos entornos, se inician con más probabilidad fisuras o plastificaciones localizadas que preludian el colapso estructural. Y de los cuatro nudos de un cuadro, los más problemáticos son los del tubo de dirección y el que aloja el eje del pedalier, y cuyas superficies más delicadas son las de contacto de los rodamientos con los tubos que configuran los nudos.

En el nudo del sistema de dirección, las fuerzas del tubo interno se transfieren a los rodamientos, y de éstos a la barra externa del cuadro que los difunde a los tubos diagonal y superior a través de los cordones de soldadura que han permitido su conexión y que como toda soldadura de fuerza, puede ser una zona especialmente crítica, porque su comportamiento es muy dependiente de la calidad de la ejecución: pueden existir "entallas geométricas", que amplifican tensiones y deformaciones y "entallas metalúrgicas", en la zona térmicamente afectada, en las que se pueden producir pequeñas fisuras difíciles de detectar, que se propagan hasta provocar la rotura frágil de la unión.

En algunos cuadros de fibra de carbono la concepción del nudo de dirección muestra con especial claridad que la transferencia de la fuerza del rodamiento inferior tiene lugar preferentemente en la parte más baja del tubo diagonal y la del otro en la parte alta del tubo superior. Por ello los extremos de los tubos superior y diagonal se configuran para

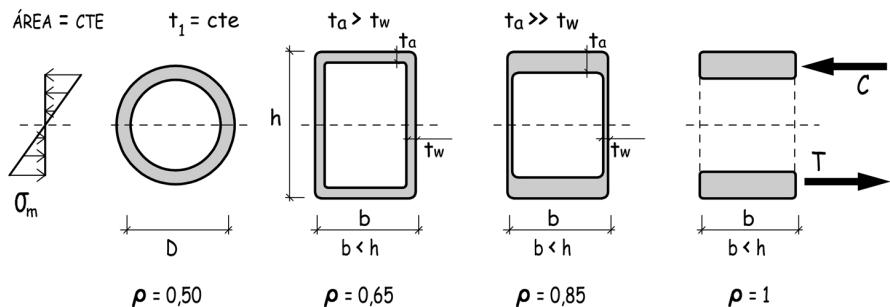


que el flujo de fuerzas se produzca lo más directamente posible mientras que la parte baja del tubo superior y la alta del diagonal no llegan al tubo de dirección y se unen en una pronunciada curva, como se puede observar en la imagen adjunta.

Las secciones circulares huecas son muy adecuadas para transmitir esfuerzos centrados de compresión o tracción. No ocurre lo mismo, cuando los esfuerzos determinantes que actúan sobre una sección son los de flexión. En este caso, como una buena parte de su área se concentra en torno a la fibra neutra, en donde las tensiones debidas a la flexión se anulan, el rendimiento

$$\left(\rho = \frac{I}{Avv'} \right)$$

de una sección tubular, índice de su eficacia para trabajar en la flexión, se reduce a 0,50.



Por contraste en una sección rectangular hueca, de más altura que anchura, y espesores mayores en las alas que en las almas, dicho rendimiento podría ser un 30% superior ($\rho = 0,65$). Y, en el hipotético caso, de una sección desalmada (que carece de almas), el rendimiento alcanzaría la unidad y se aproximaría a este valor ideal cuando las almas tienen espesores muy pequeños: tal como se muestra en el croquis adjunto, en el que todas las secciones tienen igual área

5.5. LOS MATERIALES

Y si las cosas son tal como han sido expuestas, ¿por qué han tenido tanto protagonismo y aún lo tienen los tubos cilíndricos de sección constante en la construcción de cuadros de bicicletas? Probablemente, porque la industria metalúrgica desarrolló en su momento tecnologías muy eficientes para fabricar tubos de acero y poder atender la enorme demanda de un producto que tenía infinitud de aplicaciones prácticas. Y, por ello, los primeros fabricantes de bicicletas, y cuantos les siguieron después, tuvieron a su disposición, a precios muy asequibles, tubos de acero que, tras cortarlos a la medida adecuada, se acabaron convirtiendo en cuadros de bicicletas.

En tiempos mucho más cercanos, el progreso en la metalurgia impulsó la utilización generalizada del aluminio. Su obtención, a partir de un mineral muy abundante, la bauxita, requería un consumo energético considerable –hasta 30 kWh eran necesarios para producir 1 kg de material–, lo que conllevaba un precio elevado y poco competitivo en relación con el del acero. Con el paso del tiempo la industria del aluminio fue optimizando sus procesos de producción. La energía necesaria para fabricar un kilogramo de este metal se redujo hasta menos de 14 kWh, con la consiguiente reducción de precios. Las posibilidades que ofrecían las aleaciones de aluminio, contribuyeron también a ampliar la gama de productos y sus aplicaciones. La bicicleta acabó por beneficiarse, también, de estos progresos, hasta el punto que, en la actualidad, para la fabricación de cuadros y otros componentes, los aluminios aleados se han hecho los principales protagonistas desplazando al acero. Sus 2,7 kg/dm³ de densidad es del orden de la tercera parte de la que caracteriza a los aceros (7,85 kg/dm³). Como contrapartida, otra característica fundamental, como es su módulo elástico E, se reduce también a un tercio y los aproximadamente 210.000 N/mm² del acero pasan a ser 70.000 N/mm² en los aluminios, aleados o no. En consecuencia, la deformabilidad del material es sensiblemente mayor, y la rigidez de los tubos fabricados con este material se reducen considerablemente, salvo que se aumenten, como suele hacerse, sus diámetros. Por ello, las esbelteces de los tubos de aluminio suelen ser apreciablemente menores y su aspecto más robusto que en los tradicionales tubos de acero.

Los aluminios débilmente aleados tienen capacidades resistentes muy reducidas, con límites elásticos en el entorno de los 30 N/mm², aunque como contrapartida, son muy deformables (con un ϵ_u de hasta el 35%), lo que explica que sea un material tan útil para fabricar, por extrusión, piezas de geometrías muy variadas, con escasas exigencias resistentes.

Existen, por otra parte, una amplísima gama de aluminios aleados con características mecánicas equiparables y aún superiores a las que tienen los aceros al carbono. En la fabricación de cuadros de bicicletas se suelen emplear, los de la serie 6.000, según la terminología internacional, con aleaciones de sílice y magnesio, que con tratamientos térmicos específicos, permiten alcanzar límites elásticos de 250 N/mm² y de rotura de 290 N/mm² con



deformaciones unitarias del 8% o 10%. Son aleaciones resistentes a la corrosión. También se utilizan aluminios aleados con zinc, a los que se les identifica por la denominación 7.000, que tratados térmicamente pueden alcanzar, como en el 7004T6, límites elásticos de 360 N/mm² (valor correspondiente a una deformación unitaria del 0,2%) y tensiones de rotura superiores a los 400 N/mm² con deformaciones unitarias límites que alcanzan también el 10%. Con este tipo de aleación, que no es resistente a la corrosión, es más problemático conseguir unas buenas uniones soldadas.

Existen, en definitiva, una gran diversidad de aleaciones con cualidades específicas que se utilizan en la fabricación de cuadros de las bicicletas y otros componentes. Además, al progreso en los materiales se han unido los avances tecnológicos que permiten transformar los tubos, por hidroformado, prensado o forjado u otros procedimientos y configurar sorprendentes cuadros con tubos de muy variadas geometrías con paredes conificadas de espesor variable, que permiten optimizar su comportamiento aerodinámico y su capacidad resistente.

No conviene olvidar, sin embargo, que la gran mayoría de los campeones que ganaron un Tour de Francia, lo hicieron sobre bicicletas con cuadros de acero. Los últimos, probablemente, fabricados con los míticos tubos Reynolds. Los que lo han logrado más recientemente –y en los últimos años prácticamente todos los componentes del pelotón– recurren a los materiales compuestos con fibras de carbono. Y antes que ellos, entre unos y otros, hubo otro puñado de vencedores que debieron emplear cuadros de aluminio. La historia del Tour, y la del ciclismo en general, puede narrarse también desde la perspectiva de los materiales utilizados en la fabricación de las bicicletas. Y en muchas de estas historias del pasado el acero sería protagonista. Y, tal vez, volverá a serlo, porque la industria siderúrgica, la que se ocupa del acero, ha hecho progresar este material extraordinariamente. El acero no es un material del pasado y acabará renaciendo, genéticamente modificado, con otros elementos que con su presencia discretísima, en muy pequeñas proporciones, pueden mejorar extraordinariamente las características de los aceros tradicionales al carbono, que son también una aleación de hierro con porcentajes de carbono inferiores al 0,4%, y que aportan la ductilidad indispensable para ser utilizado en tantísimas aplicaciones. La densidad del acero, 7,8 kg/dm³, es casi tres veces superior al del aluminio y éste es su gran inconveniente. Pero su capacidad resistente es muy superior. Los modernos aceros aleados con cromo y molibdeno, por ejemplo, pueden alcanzar tensiones límites de 1.000 N/mm² y aún existen otras aleaciones, más modernas, que pueden llegar a los 1.400 N/mm², cifras cuatro o cinco veces superiores a las que consiguen los más avanzados aluminios aleados. Los aceros para pretensar que utilizamos en las estructuras de la ingeniería civil, en forma de hilos obtenidos por estiramiento, o de cables construidos entrelazando hilos individuales, pueden superar los 1.600 N/mm². El acero volverá y, tal vez, lo haga para fabricar, por moldeo, los nudos más delicados de los

cuadros, a los que se soldarán los tubos que armarán un cuadro. La gran capacidad resistente de algunos aceros microaleados, permitirán secciones más esbeltas, con espesores más reducidos que los que necesitan los tubos de aluminio, con lo que los pesos de los cuadros de ambos materiales tenderán a aproximarse aportando los de acero su mayor rigidez, una cualidad que ha de ser muy valorada.

Y ahora, sobre todo para quienes puedan pagarla, la fibra de carbono –como imprecisamente se la conoce– ha adquirido un protagonismo destacado. Los materiales compuestos por fibras de carbono envueltos en una matriz de resina epoxi se han convertido en los más valorados y se utilizan crecientemente en la fabricación de cuadros, llantas, manillares y otros componentes de las bicicletas más avanzadas. Todas las grandes marcas tienen sus modelos más prestigiosos fabricados con “fibras de carbono” como simplificadamente se conoce a un material complejo de elaborar y cuyas características mecánicas no son fáciles de establecer. Lo cierto es que, tras unos titubeantes comienzos, con frecuentes problemas que pusieron en tela de juicio su adecuación como material para las bicicletas, las mejoras introducidas en los procesos de producción, en los controles consiguientes y en el conocimiento de sus características mecánicas, explica su presencia tan extendida, el prestigio de que gozan en la actualidad y el precio tan elevado que se suele pagar por su utilización.

Se trata de un material sumamente especializado que se elabora tras laboriosos procesos, que demandan, paradójicamente, mucha mano de obra artesanal. Y por ello, la mayoría de los cuadros con fibra de carbono, que suelen estar concebidos y dimensionados por los departamentos de ingeniería de las grandes marcas; se fabrican, por encargo, en unas pocas industrias de las que algunas de las más importantes están ubicadas en China y Taiwán. Un mundo, de geometrías, que pueden ser sorprendentes, bellas y eficientes y que está, por otro lado, atiborrado de patentes y “secretos de fabricación”, que filtra escasa información técnica y fiable y se adorna con un lenguaje digno del que utilizan, en sus descripciones, los más refinados catadores de vino.

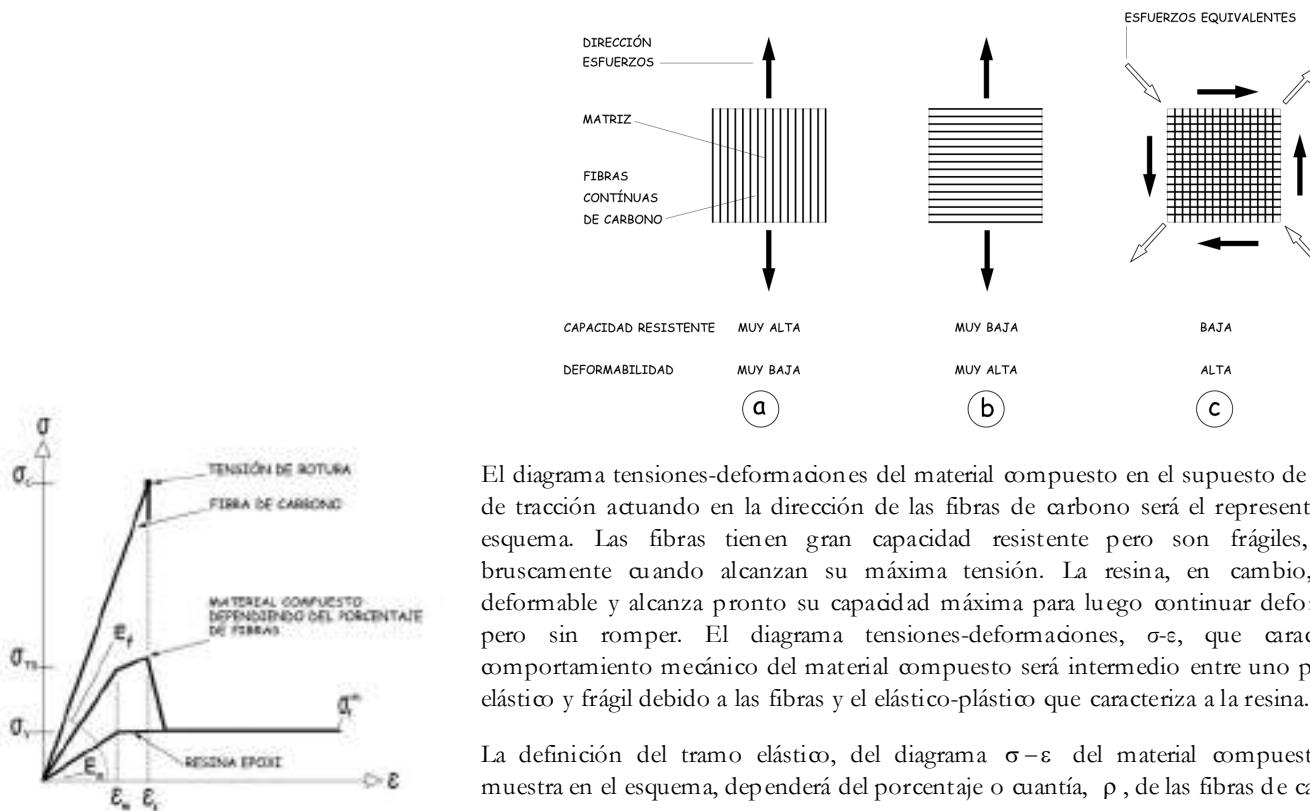
En rasgos generales, el material al que nos estamos refiriendo está compuesto por delgadísimas fibras de carbono dispuestas paralelamente e integradas en una matriz de resina epoxi. Las fibras de carbono, son hilos o filamentos con densidades en el entorno de $1,80 \text{ kg/dm}^3$, $4,3$ veces inferior a la del acero ($7,80 \text{ kg/dm}^3$) e inferior también a la del aluminio ($2,70 \text{ kg/dm}^3$). Su módulo de elasticidad puede variar entre 250.000 y 390.000 MPa , superior al del acero (210.000 MPa) y al del aluminio (70.000 MPa) y su capacidad resistente puede alcanzar los 2.500 MPa , superando incluso al de los aceros de pretensado (1.600 MPa).

El polímero, resina epoxi, que se suele utilizar como matriz, tiene aún menor densidad ($1,2$ a $1,4 \text{ kg/dm}^3$), es muy deformable y poco resistente. Su módulo de elasticidad puede variar entre los 2.100 y 5.500 MPa –unas 100 veces inferior al de las fibras de carbono– y

la tensión máxima que puede resistir se sitúa entre los 40 y 80 MPa, 50 ó 60 veces inferior al de las fibras.

El comportamiento mecánico del material compuesto dependerá por una parte de la orientación de las fibras de carbono, y, por otra, de su proporción en la masa de la matriz polimérica.

En cierto modo, el concepto es similar al del hormigón armado: las barras de acero proporcionan la capacidad resistente en tracción de la que carece la matriz del hormigón en la que aquéllas están embebidas. El comportamiento de un tirante de hormigón depende, lógicamente, de la cuantía de las armaduras y de su orientación, que debe aproximarse a la dirección de la carga aplicada. Análogamente una capa de material compuesto tendrá un comportamiento muy diferente cuando el esfuerzo se aplique en la dirección en que se han dispuesto las fibras de carbono o en una dirección perpendicular. Es, por tanto, un material marcadamente anisótropo.



El diagrama tensiones-deformaciones del material compuesto en el supuesto de esfuerzos de tracción actuando en la dirección de las fibras de carbono será el representado en el esquema. Las fibras tienen gran capacidad resistente pero son frágiles, rompen bruscamente cuando alcanzan su máxima tensión. La resina, en cambio, es muy deformable y alcanza pronto su capacidad máxima para luego continuar deformándose pero sin romper. El diagrama tensiones-deformaciones, $\sigma-\epsilon$, que caracteriza el comportamiento mecánico del material compuesto será intermedio entre uno puramente elástico y frágil debido a las fibras y el elástico-plástico que caracteriza a la resina.

La definición del tramo elástico, del diagrama $\sigma-\epsilon$ del material compuesto que se muestra en el esquema, dependerá del porcentaje o cuantía, ρ , de las fibras de carbono.

Si consideramos una sección, de área total A_T , en la que A_f será la parte correspondiente a las fibras y A_r , la de la resina, tendremos

$$A_T = A_f + A_r$$

$$1 = \frac{A_f}{A_T} + \frac{A_r}{A_T} = \rho + (1 - \rho)$$

siendo $\rho = \frac{A_f}{A_T}$

La resistencia máxima de la sección para esfuerzos de tracción paralelos a las fibras (siendo σ_f la tensión máxima de las fibras, σ_r , la de la resina y σ_T la del material compuesto) será

$$T_{\max} = \sigma_T \cdot A_T = \sigma_f \cdot A_f + \sigma_r \cdot A_r$$

Por lo tanto,

$$\sigma_T = \sigma_f \cdot \rho + \sigma_r (1 - \rho)$$

Por otra parte, las deformaciones unitarias del material compuesto, ε_T coincidirán, - admitiendo que existe una adherencia perfecta-, con las de las fibras, ε_f , y con las de la resina, ε_r . Y, en consecuencia tendremos

$$\varepsilon_T = \varepsilon_f = \varepsilon_r$$

es decir

$$\frac{\sigma_T}{\varepsilon_T} = \frac{\sigma_f}{\varepsilon_f} = \frac{\sigma_r}{\varepsilon_r}$$

En definitiva, podemos escribir la expresión de σ_T como

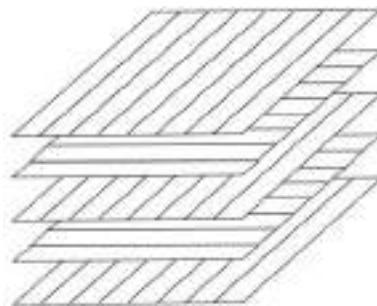
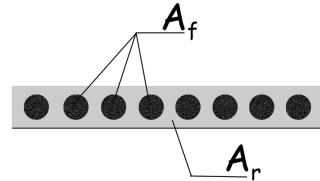
$$\sigma_T = \frac{\sigma_f}{\varepsilon_T} \cdot [\varepsilon_f \cdot \rho + \varepsilon_r (1 - \rho)]$$

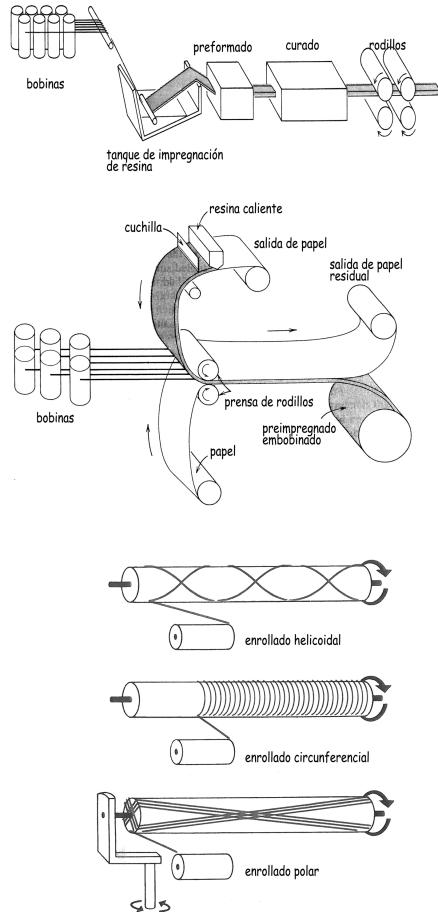
Cuando se haya alcanzado la tensión máxima de la fibra de carbono, para la deformación unitaria, ε_f , se producirá un escalón brusco en el diagrama $\sigma_T - \varepsilon_T$ y la tensión residual descienderá hasta el valor proporcionado por la resina:

$$\sigma_T = \sigma_r (1 - \rho), \text{ para } \varepsilon_T > \varepsilon_f.$$

Cuando los esfuerzos se aplican perpendicularmente a la orientación de las fibras de carbono (esquema "b"), la capacidad resistente del material resistente será la debida exclusivamente a la resina (40 a 80 MPa) aplicada al área que ocupa este material en la sección, es decir, el valor de σ_T será el que se deduce la expresión anterior porque la resina es isotrópica y su resistencia a compresión coincide con la de tracción.

Los esfuerzos cortantes y de torsión provocan tensiones tangenciales que equivalen (esquema "c") a la combinación de tracciones inclinadas a 45° y de compresiones perpendiculares a ellas. Por tanto, en estas situaciones el material compuesto tiene también muy reducida capacidad resistente, cualquiera que sea la orientación de las fibras de carbono.





Un material compuesto, con un porcentaje, que puede ser habitual, del 58% de fibra de carbono, tendrá una densidad de $1,5 \text{ kg/dm}^3$, muy inferior a la del acero ($7,8 \text{ kg/dm}^3$). La resistencia a tracción en la dirección de las fibras, estará en el entorno de los 1.000 MPa (70 MPa en el aluminio) y su módulo de elasticidad será ligeramente inferior, 190.000 N/mm^2 , al del acero.

En vista de ello, la estrategia que se sigue para aprovechar las extraordinarias cualidades mecánicas de los materiales compuestos con fibras de carbono (peso muy reducido, alta capacidad resistente, elevada rigidez en la dirección de las fibras) y paliar sus inconvenientes, consiste en superponer capas con espesores de pocas décimas de milímetro del material compuesto, cada una de ellas con orientaciones de las fibras de carbono alternadas, perpendiculares o cruzadas, para adecuar el material resultante multicapa a los esfuerzos que previsiblemente pueden solicitarlo. Y disponiendo suficiente número de capas para alcanzar un espesor suficiente para transferir las tensiones de compresión que inevitablemente siempre existirán.

Para la producción de las capas de material compuesto se han desarrollado diferentes sistemas. En el procedimiento denominado “poltrusion” en la terminología anglosajona, las fibras de carbono que provienen de un conjunto de bobinas de eje vertical, pasan por un baño y después por unas cámaras de preformado y curado. En el procedimiento “prepreg” las fibras de carbono se incorporan a bandas de papel que se impregnan de resina tras pasar por rodillos calientes. Para la fabricación de tubos se utiliza el sistema denominado “filament winding”, que permite el enrollado de las fibras de carbono con varias geometrías.

La evolución en los materiales empleados en la fabricación de bicicletas, cuadros y componentes, no concluirá jamás. Entre los que se han incorporado, en los últimos años, se encuentran el titanio, un metal descubierto hace más de 200 años que empezó a ser utilizado cuando, hacia 1936, se desabrió el procedimiento para producirlo industrialmente a partir de minerales como el rutilo (TiO_2) o la ilmenita (FeO TiO_2).

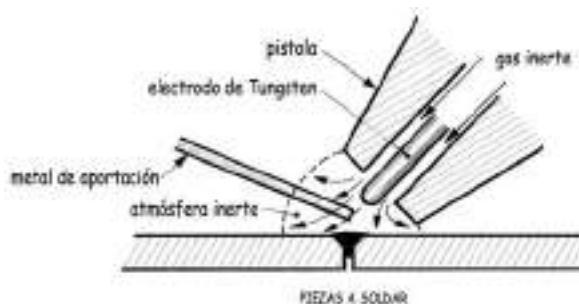
El titanio tiene una densidad de $4,5 \text{ kg/dm}^3$ y en estado puro posee características mecánicas similares a las del acero, que pesa un 73% más. Atesora una gran ductilidad $\epsilon_{ult}=35\%$. Es muy resistente a la corrosión y mantiene sus cualidades a temperaturas elevadas. Aleado, por ejemplo, con un 6% de aluminio y un 4% de vanadio, alcanza tensiones límites de 1.000 N/mm^2 (ω_{un} , $\sigma_{0,2}=900 \text{ N/mm}^2$), con alargamientos en rotura aún considerables ($\epsilon_u=15\%$).

Se ha convertido en un material indispensable en las industrias aeronáutica y aeroespacial. Por ser biológicamente compatible con los tejidos óseos del cuerpo humano, es material también de referencia en la preparación de prótesis dentales y óseas.

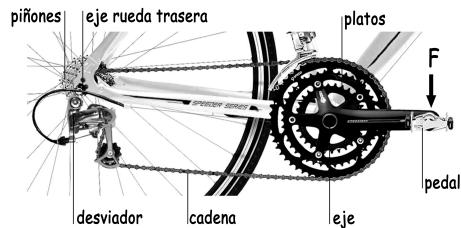
Ya existen aplicaciones generalizadas del titanio en componentes de bicicletas, como en piñones del cambio de marchas y en tornillería diversa. Existen también algunas realizaciones de cuadros construidos con titanio aleado. Como el del precioso modelo Lollobrigida, fabricado por una innovadora firma italiana.



En el futuro, parece previsible una creciente cooperación entre materiales para crear cuadros más eficientes. Ya se recurre a esta cooperación para reforzar las barras de dirección en las zonas de contacto con los rodamientos o en la fabricación de nudos a los que confluyen barras de otros materiales. El mestizaje estructural tendrá, probablemente, una presencia creciente en el futuro de la bicicleta.



Para la unión de los tubos que configuran el cuadro de una bicicleta, se utiliza la soldadura, técnica que ha experimentado también en las últimas décadas unos progresos extraordinarios. El más utilizado, tanto para unir tubos de acero, de aluminio o de titanio, es el procedimiento TIG, (Tungsten Inert Gas). Para producir la fusión de las piezas a unir y del metal de aportación, se utiliza como electrodo un hilo de tungsteno que no funde. El baño de fusión se protege mediante un gas inerte, como el argón, que fluye a baja presión por el conductor tubular de la extremidad de la pistola de soldadura.



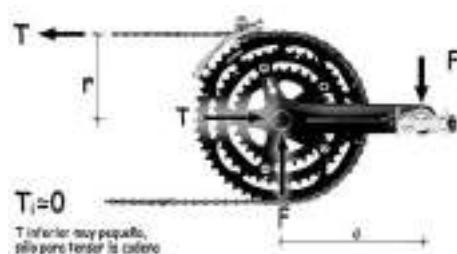
5.6. LA TRANSMISIÓN

El pedal, la biela, los platos grandes, la cadena y los piñones traseros, son los componentes del sistema de transmisión de la bicicleta y hacen posible su desplazamiento. Desde una perspectiva estructural interesa evaluar la magnitud de las fuerzas que ponen en movimiento la bicicleta y el itinerario que recorren desde que nacen en los pedales hasta que alcanzan el contacto del neumático de la rueda trasera con el pavimento.

Si aislamos el subconjunto formado por pedal-biela-plato grande-cadena y el eje que lo conecta con el cuadro, observaremos que la fuerza F aplicada en el pedal, y que supondremos perpendicular a la biela situada horizontalmente, induce en la parte superior de la cadena una tracción T que la equilibra.

Si la fuerza F introducida por el pedaleo del ciclista fuera de 1.000 N (en el ensayo normalizado de fatiga de la biela, que se describe en el apartado 6, este valor es de 1.800 N aunque aplicado con la biela a 45°), la distancia, d , entre el pedal y el eje fuera de 17,5 cm, y el diámetro del plato de 20 cm, la tracción T en la cadena sería

$$T = \frac{1.000 \text{ N} \cdot 17,5 \text{ cm}}{10 \text{ cm}} = 1.750 \text{ N}$$



Si los extremos de los cinco brazos que unen, en el esquema representado, la biela con el plato, y que se encuentran en el itinerario que recorre la fuerza F hasta hacerse tracción T en la cadena estuviesen situados en una circunferencia de 11 cm de diámetro, el esfuerzo cortante o de desgarramiento que deberían transmitir cada uno de los cinco tornillos de sujeción sería

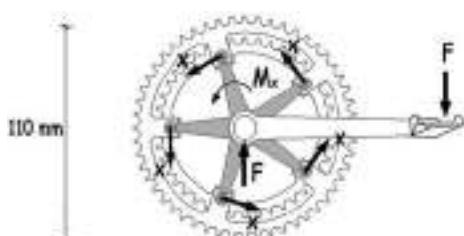
$$X = \frac{1.000 \text{ N} \cdot 17,5 \text{ cm}}{5 \text{ torn} \cdot \frac{11}{2} \text{ cm}} \approx 630 \text{ N/tornillo}$$

y el correspondiente momento flector en el encuentro de cada una de las cinco barras radiales, con el eje del pedalier, valdría

$$M_x \approx 630 \text{ N} \cdot \frac{11}{2} = 3.465 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

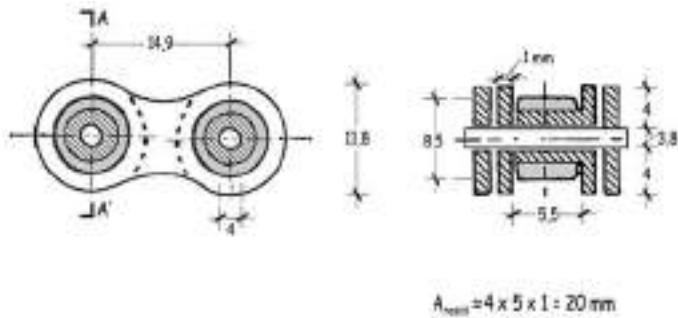
En realidad los esfuerzos para los que habría que dimensionar tornillos y brazos radiales podría ser significativamente más elevado. La hipótesis de idéntica distribución de fuerzas circunferenciales entre los cinco tornillos radiales que unen cada uno de los cinco brazos de la "araña" con los platos (uno, dos o tres) del sistema motriz de la bicicleta, presupone una rigidez infinita del conjunto que no corresponde a la realidad. Y, de hecho, la distribución de fuerzas que equilibran el "par motor", $F \cdot d$, no será uniforme.

Algo similar se pone también de manifiesto cuando se enfoca la atención a la transferencia de fuerzas que se producen entre los eslabones de la cadena y los dientes del



plato en el que se engranan. Solamente unos pocos entre ellos estarán en contacto, en la parte superior del plato y, por consiguiente, la transmisión de la fuerza aplicada por el ciclista a los pedales no estará uniformemente distribuida en todo el perímetro del plato, sino que se concentrará en una zona muy localizada que irá variando a cada instante. Por eso, el anillo externo del plato actuará también como estructura de reparto de las fuerzas de contacto de sus dientes y los eslabones de la cadena con los tornillos de la araña de sujeción de la biela, siendo lógicamente los más solicitados los que se encuentren más próximos a la zona de contacto de la cadena y el plato.

La cadena, obviamente, es un componente esencial del sistema de transmisión. Las que se utilizan en las bicicletas, de características normalizadas, suelen tener 114 eslabones, con un paso o distancia entre ejes de 12,70 mm. Con el progresivo aumento del número de piñones, su anchura se ha ido reduciendo. La que requieren los ultramodernos de 11 piñones tienen anchuras de 5,5 mm. En el esquema adjunto figuran las dimensiones aproximadas de un módulo.



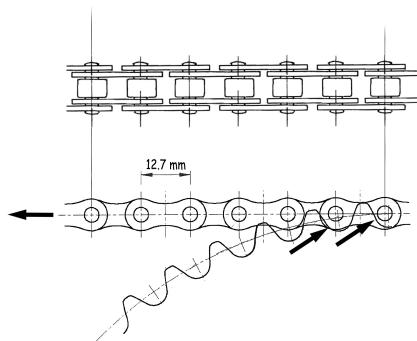
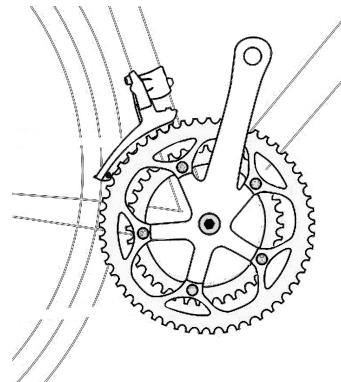
La capacidad resistente de la cadena será la correspondiente a su sección más reducida, que se sitúa en el plano del eje de cualquiera de los eslabones que configuran la cadena.

Si la carga de rotura, establecida en la normativa es de 17.850 N, la tensión media de tracción sería del orden de

$$\sigma \simeq \frac{17.850 \text{ N}}{20 \text{ mm}^2} \simeq 900 \text{ N/mm}^2$$

lo que exige aceros aleados muy resistentes y con tratamientos para mejorar la dureza superficial, por cuanto las tensiones de contacto entre eslabones de la cadena y dientes del plato serán aún más elevadas. El eje de los eslabones a través de los que se transfieren, por simple arrastre, los esfuerzos de tracción de la cadena, es también un elemento crítico con tensiones tangenciales muy elevadas.

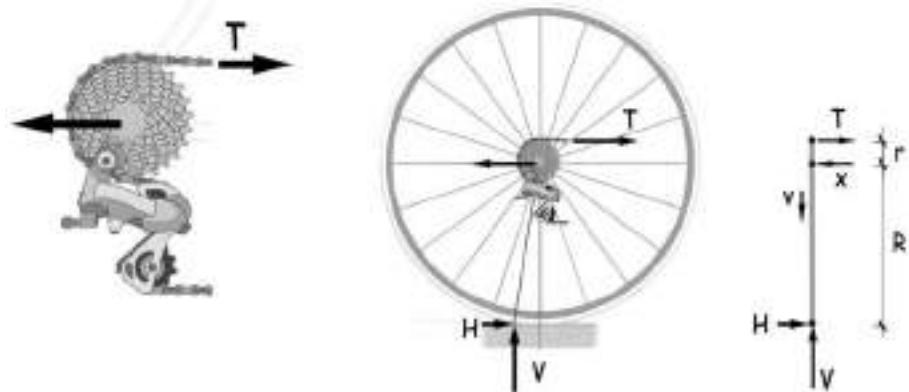
En la práctica habitual del ciclismo, la fuerza de tracción en la cadena estará lejos de estos valores límites. La fuerza máxima que puede aplicar un ciclista colocado de pie sobre los



pedales podrá alcanzar e incluso superar su peso propio, pero nunca sería mayor que la necesaria para llegar a agotar la capacidad resistente de una cadena con todos sus eslabones en buenas condiciones. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que en una cadena de 114 eslabones, es el más débil de todos ellos, el que limita su capacidad resistente. Además, las cargas que solicitan a la cadena serán de naturaleza dinámica, estarán amplificadas por coeficientes de impacto y por los de concentración de tensiones inherentes a su geometría. Pero, sobre todo, las cargas serán áridas y provocarán la fatiga del material, que suele ser la causa más habitual que provoca su rotura.

El análisis del equilibrio de la rueda trasera permite estimar los valores de las fuerzas que puede transferir la cadena y completa, además, la reflexión sobre el sistema de transmisión de una bicicleta.

A la rueda motriz trasera, a través de los piñones, llegará transformada la fuerza que transmite la cadena, que a su vez, proviene de la aplicada por el ciclista sobre el pedal y transferida a través del plato del pedalier a la cadena. Sobre la rueda actuará, además, su reacción de apoyo en el pavimento. El flujo de fuerzas que actúan y se autoequilibraron en la estructura de la rueda trasera será la representada en los esquemas siguientes:



La fuerza horizontal que impulsa la bicicleta, y que se localiza en el área de contacto de la cubierta y el pavimento, será de acuerdo con la condición de equilibrio:

$$T \cdot r = H \cdot R$$

es decir

$$H = \frac{T \cdot r}{R}$$

siendo T la tracción transmitida por la cadena; r , el radio del piñón asociado a la cadena y R el radio de la rueda.

Además, la reacción X que se genera en el buje de la rueda será

$$X = T + H = T \left[1 + \frac{r}{R} \right]$$

Si, por ejemplo, consideramos un piñón de 18 dientes que tendrá un radio, aproximadamente, de $r = \frac{18 \cdot 12,7}{2\pi} = 36,4 \text{ mm}$ tendríamos, siendo $R \approx 350 \text{ mm}$,

$$H = \frac{T \cdot 36,4}{350} \approx 0,10 T$$

Si la tracción en la cadena fuese, como hemos visto anteriormente, de 1.750 N (que corresponde a la fuerza en los pedales de 1.000 N), el valor de H sería de 175 N. Dicho valor podría corresponder al esfuerzo puntual que se podría producir en una subida de pendiente pronunciada, porque asociada, pongamos, a una velocidad de 5 m/s correspondería a una potencia $175 \text{ N} \cdot 5 \text{ m/s} = 875 \text{ W}$, que estará próximo al límite que puede generar un ciclista profesional en períodos muy cortos de tiempo.

De otra manera, si el valor de la fuerza tractora H fuese uno más habitual de 14 N (a lo que corresponderían potencias de 140 W para velocidades de 10 m/s) la fuerza de tracción en la cadena sería, del orden de

$$T \approx \frac{H}{0,10} = 140 \text{ N}$$

y en el pedal, de aproximadamente

$$F \approx 140 \text{ N} \cdot \frac{10}{17,5} = 80 \text{ N}$$

Todos estos valores son muy inferiores a la capacidad resistente que poseen todos los componentes del sistema de transmisión de una bicicleta. Lo que confirma que su dimensionamiento se basa en escenarios en los que se producen impactos, con fuerzas muy elevadas en períodos muy breves de tiempo, o para acciones repetidas que pueden provocar la fatiga del material para tensiones sensiblemente inferiores a las estáticas que podrían agotar su capacidad resistente.

Definir las fuerzas máximas que el ciclista puede introducir, a través de los pedales, en el sistema de transmisión de su bicicleta, es muy incierto. Por eso, la normativa establece ensayos específicos, para evaluar el comportamiento de bielas y pedales, en condiciones muy exigentes.

6. MÉTODOS DE CÁLCULO. CRITERIOS DE SEGURIDAD. ENSAYOS DE CONFORMIDAD

En la metodología tradicional que se utiliza para el dimensionamiento de las estructuras de la ingeniería civil y de la arquitectura, conocidos los esfuerzos que son consecuencia de las cargas reglamentarias aplicadas, y multiplicándolos por un coeficiente de seguridad, se pueden establecer las dimensiones adecuadas para cualquier tipo de estructura, con materiales, como la madera, el acero, el aluminio, el hormigón armado o pretensado, para los que disponemos normas que especifican sus características, y modelos de comportamiento. Siempre con las incertidumbres, cuya gestión es fundamental tarea ingenieril, asociadas a los nudos y zonas singulares de la estructura.

Pero con la bicicleta, ese entrañable y útil artefacto, tantas veces construido y experimentado, y aparentemente, tan bien conocido, no sucede así. A cada instante cambian las reacciones de apoyo en las ruedas y cambian las fuerzas que transmite el ciclista al sillín, a los pedales y al manillar en donde apoya sus manos. Pero no es éste, en realidad, el problema, o en todo caso, si llegase a serlo, sería un problema bien acotado. Porque, en condiciones normales, la suma de las reacciones verticales de apoyo, no pueden superar a la suma del peso del ciclista y de su montura. Y, sabemos, que cuando la bicicleta se desplaza a velocidad constante, por un pavimento perfectamente liso, la rueda delantera canaliza un porcentaje del peso total que no suele sobrepasar el 40%. Es decir, que rara vez, en las condiciones citadas, dicha componente vertical supera, pongamos, los 400 N y las reacciones horizontales, longitudinales y transversales rara vez superarán los 100 N.

Pero, en la realidad, las reacciones de apoyo de las ruedas de una bicicleta, pueden ser muy superiores a los valores que se pueden deducir con planteamientos basados en “condiciones normales” de funcionamiento. Porque, la bicicleta, de hecho, discurrirá por superficies que tendrán algunas rugosidades superficiales y podrán encontrarse con algún obstáculo inesperado en su camino. La rueda de la bicicleta tampoco será perfectamente circular ni estará siempre perfectamente equilibrada. El pedaleo se hace a impulsos y no se transmite a la rueda posterior una fuerza motriz constante. El movimiento del cuerpo ciclista en su pedaleo, la postura cambiante que adopta sobre su bicicleta, las diferencias de las geometrías de los trazados que dibujan las ruedas delantera y trasera sobre el pavimento, sobre todo en recorridos con curvas, los cambios de velocidad más o menos bruscos y frecuentes que por voluntad del ciclista o por la naturaleza del itinerario se suelen producir, son todos factores que provocan aceleraciones verticales y horizontales, longitudinales y transversales, en las masas del ciclista y de su bicicleta. La aceleración vertical de la gravedad pierde su monopolio. Aparecen nuevas fuerzas de inercia, que intervienen en el equilibrio dinámico y determinan reacciones de apoyo amplificadas que se van modificando a cada instante.

En las circunstancias más habituales, incluso las que se presentan en la alta competición, en casos de frenadas bruscas, o impulsos puntuales, las aceleraciones horizontales no suelen superar el valor de 0,5 g y en sentido vertical la cifra que se añade o resta a la de la gravedad suele ser aún inferior. Por tanto, aún tratándose de valores significativos, las reacciones de apoyo y los esfuerzos que se transfieren a la bicicleta, no se incrementan extraordinariamente en relación con los valores asociados al caso de referencia en el que el ciclista discurre a velocidad constante, por un pavimento horizontal.

Los incrementos sustanciales en fuerzas y reacciones tienen lugar cuando se producen impactos bruscos de la bicicleta contra obstáculos inesperados, bordillos o baches con los que se encuentra en su camino. El coeficiente de impacto por el que se multiplicarán las reacciones de apoyo y los esfuerzos en la bicicleta, pueden, dependiendo de la geometría del obstáculo y de las características de la bicicleta, multiplicarse por 5 o incluso superar este valor. Como es muy incierta la cuantificación de las consecuencias de impactos sobre obstáculos indeterminados, que sin embargo, es probable que tengan lugar durante la vida de una bicicleta, se han establecido, un conjunto de ensayos normativos, estáticos, dinámicos y de fatiga, que deben superar los componentes, las subestructuras y las estructuras de las bicicletas en su conjunto, antes de que puedan ser comercializadas. La industria de la bicicleta ensaya prototipos para asegurar, antes de proceder a fabricaciones en serie, que la bicicleta se comportará, tanto desde el punto de vista estructural como funcional, adecuadamente.

En cualquier caso, para interpretar y contrastar los resultados obtenidos en los ensayos normativos (y para evaluar prototipos teóricos) se utilizan modelos, más o menos detallados, para su análisis por el ya tradicional método de los elementos finitos con la ayuda de programas específicos de ordenador, más o menos sofisticados, que si están bien utilizados facilitan un alud de resultados relativos a tensiones, deformaciones y desplazamientos de la estructura modelizada que no son siempre fáciles de interpretar. El método de los elementos finitos es también ampliamente utilizado en la evaluación de las estructuras de la ingeniería civil. Y por eso sabemos, o deberíamos saber, las dificultades que tiene una acertada caracterización de los materiales, especialmente de los materiales compuestos como el hormigón armado o pretensado, y las incertidumbres que se plantean en la modelación de nudos y zonas singulares de una estructura.

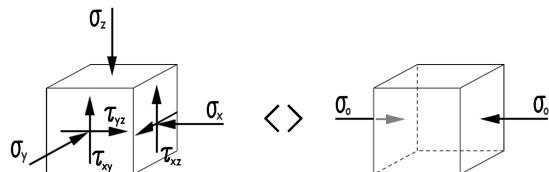
Es lo que sucede también con la modelización de los cuatro nudos críticos del cuadro de una bicicleta: el del encuentro de la barra de dirección con los tubos superior y diagonal; aquel del que arranca la tija del sillín; la conexión junto al eje de la rueda trasera de los tirantes con las vainas en V; y, finalmente, la unión de estas últimas con los tubos vertical y diagonal, configurando el espacio en el que se aloja el eje del pedalier.

El comportamiento de estos cuatro nudos determina la capacidad resistente del cuadro en su conjunto y, por ello, de la bicicleta. Sin embargo es muy incierta la evaluación del

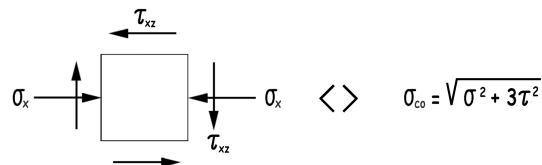
comportamiento de estas zonas singulares tan determinantes. Cuando los cuadros se construían de tubos de acero de sección constante, estos nudos se reforzaban con "raceres". Ahora, la posibilidad de conformar los tubos de aluminio, ensancharlos y dando más espesor a sus extremos equivalen a aquellos "raceres" de antaño.

El método de los elementos finitos generan unos atractivos e interesantes mapas tensionales que, en realidad, deben ser interpretados como mapas de riesgos potenciales al destacar zonas en las que se concentran las tensiones y por dónde puede iniciarse la rotura de alguna de las uniones del cuadro. Es evidente la complejidad que tiene una correcta modelización de las uniones y, en especial, de las soldaduras y, de las zonas próximas en donde las características del material de base, al estar térmicamente afectadas, puede, además, haberse modificado.

Supuesto que, tras laboriosos cálculos, disponemos de los valores de las tensiones normales y tangenciales, que actúan en cada punto del cuadro, debemos contrastarlos con los valores límites que admite el material utilizado. En los que tienen comportamientos marcadamente elastoplástico, como son los aceros al carbono, se suele utilizar para ello el criterio de Von Mises, que permite establecer una tensión de comparación que se deduce igualando la energía de distorsión asociada al estado pluritensional con la correspondiente a un estado unitensional. La tensión de comparación así deducida debe ser inferior al límite elástico que caracteriza al material estructural y que señala el inicio de la plastificación de la probeta normalizada ensayada a tracción pura.



$$\text{CRITERIO DE VON MISES } \sigma_{co} = f[\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}] \leq \sigma_e$$



En el caso de materiales que no muestren un escalón de fluencia, la utilización del criterio de Von Mises es más discutible. Los postulados de la mecánica de fractura y el concepto asociado de tenacidad del material deberían ser la guía para determinar más rigurosamente

la seguridad de un cuadro, o de cualquier estructura, construida con estos materiales de altas capacidades mecánicas pero de limitada durabilidad.

La caracterización de los materiales compuestos es particularmente compleja. Ensayar prototipos, en lugar de ensayar probetas normalizadas, es el camino que se pueden permitir los fabricantes de bicicletas para garantizar la seguridad y la funcionalidad de los modelos que ofrecen al mercado. Lo que desde luego no ocurre con las estructuras de la ingeniería civil y de la edificación.

En todo caso quienes dedicamos nuestros mejores afanes a fabricar mejores bicicletas o a construir puentes más eficientes, unos y otros, consciente o inconscientemente, solemos tomar en consideración al verificar nuestras estructuras el “criterio de seguridad” más utilizado a lo largo de la Historia de la Humanidad y que se puede enunciar como sigue:

“Una estructura se considera suficientemente segura si sus dimensiones y los materiales empleados son similares a los de otras estructuras anteriormente construidas, que se hayan comportado satisfactoriamente”.



En tiempos muy pretéritos, allá por el año 1950 a.C., a los constructores negligentes que no tuviesen en cuenta tan razonable criterio se les aplicaba severas penas como las que estableció, Hammurabi, rey de Babilonia, en el famoso código que lleva su nombre y que se conserva, grabado en una placa de basalto, en el Museo del Louvre. Su primer y cuarto precepto, cambiando los conceptos de casa y bienes, por los de bicicleta, dirían, más o menos lo siguiente,



- Si un constructor construye una bicicleta, no la hace sólida, y la bicicleta se rompe matando su propietario, el constructor será ejecutado.
- Si la bicicleta sólo resulta dañada, su constructor deberá reponer todo aquello que hubiese sido dañado, asumiendo los gastos consiguientes.

A modo de síntesis de lo expuesto hasta ahora en este apartado, se puede decir que la moderna industria de la bicicleta prepara prototipos, que una vez ensayados en laboratorio, pasan a ser probados por especialistas, antes de su comercialización. Los prototipos ligeramente evolucionados, en general, en relación con modelos precedentes, son sometidos a exigentes ensayos y pruebas para confirmar la bondad de su diseño antes de pasar a su fabricación en serie. Por contraste en el campo de la ingeniería civil, sólo construimos prototipos. Cada estructura es, en mayor o menor medida, diferente a cualquiera que hubiese podido ser construida anteriormente. Por eso la metodología para su dimensionamiento es radicalmente diferente. Nosotros tenemos normas que precisan las cargas que hemos de considerar, con valores que no son sino aproximaciones a una realidad muy compleja. Aplicamos unos coeficientes de seguridad para cubrir las diferencias que pueden haber entre las cargas utilizadas, las características de los materiales considerados, y las cargas y materiales reales. Y, en el mejor de los casos, una vez la obra construida y antes de su entrada en servicio, hacemos una sencilla prueba de carga para confirmar que la respuesta de la estructura se asemeja suficientemente al comportamiento previsto en los cálculos del proyecto.

Entre los ensayos que se realizan para validar el dimensionamiento y funcionalidad de las bicicletas hemos seleccionado, a modo de amplia muestra, algunos de los especificados en las normas vigentes.

a) ENSAYO DE FATIGA DEL CONJUNTO RUEDA-NEUMÁTICO

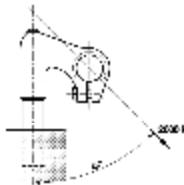
La rueda motriz tiene un resalto constituido por un listón de madera de 50 mm de anchura, 25 mm de altura, con un chaflán de 12 mm en los bordes. Durante el ensayo girará 750.000 veces, produciéndose en cada vuelta un impacto que no debe provocar en la rueda ensayada (cargada en su eje con una fuerza vertical de 640N) separaciones, fisuras visibles o deterioros de ninguno de sus componentes ni pérdida de presión en el neumático.

b) ENSAYO DE FLEXIÓN DEL MANILLAR Y LA POTENCIA

Sometido a una carga estática de 1.000 N en la posición indicada en el esquema adjunto la deformación remanente del manillar en el punto de aplicación de la carga no deberá superar los 15 mm.

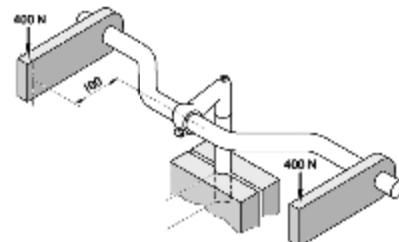
c) ENSAYO DE FLEXIÓN DE LA POTENCIA

Inicialmente se aplica una fuerza de 1.000 N durante 1 minuto para confirmar que las deformaciones no superan los 10 mm. Después, la carga inclinada 45° y aplicada en el plano de simetría, se incrementa lentamente hasta los 2.600 N, si no se han detectado fisuras o hasta que la potencia se desplace 50 mm en el sentido de la fuerza aplicada.



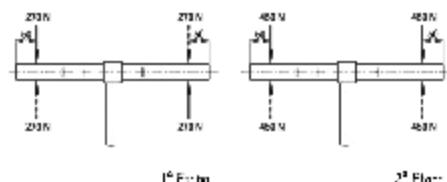
d) ENSAYO DE FLEXO-TORSIÓN DEL MANILLAR Y DE SU SUJECCIÓN CON LA BARRA DE POTENCIA

Se introducen dos fuerzas de 400 N en los bordes del manillar con una excentricidad que provoca una torsión máxima de 40 Nm.



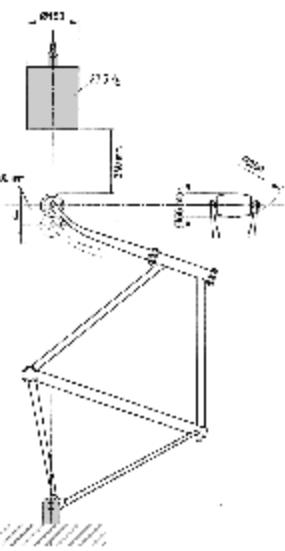
e) ENSAYO DE FATIGA DEL MANILLAR Y SU POTENCIA

Se aplican pares de fuerzas verticales a 50 mm de los bordes del manillar. En una primera etapa con fuerzas opuestas de ± 270 N, durante 100.000 ciclos de 25 herzios de frecuencia (4.000 segundos como tiempo de ensayo). En una segunda etapa con las dos cargas variables de ± 450 N actuando en el mismo sentido y en condiciones análogas. La ausencia de fisuras o roturas localizadas es el criterio de conformidad de este ensayo. Y en el caso de utilización de materiales compuestos con fibras de carbono en el que los posibles daños pueden no ser visibles, se limita el desplazamiento tolerable al 20% del provocado por la fuerza de 450 N aplicada estáticamente.



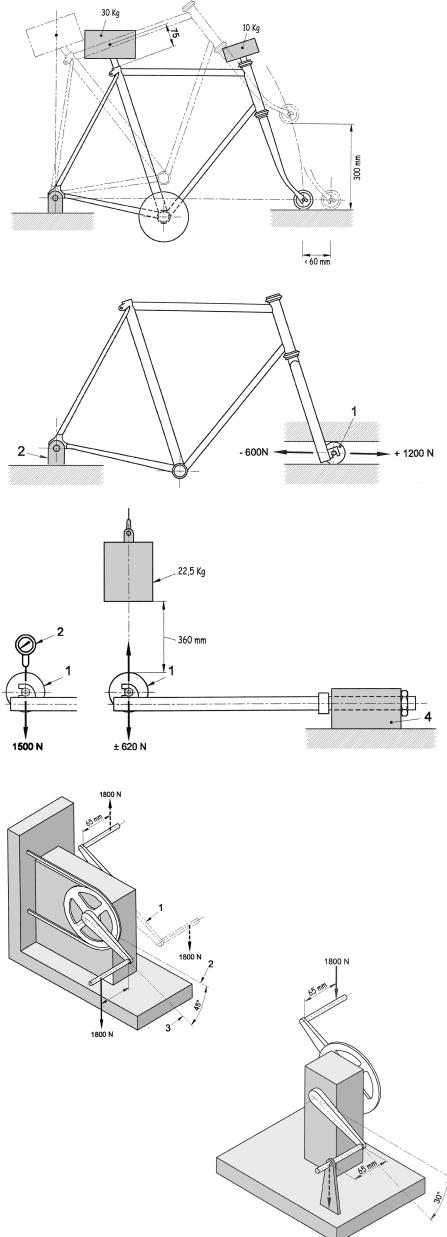
f) ENSAYO DE IMPACTO

El extremo de la horquilla es golpeado por una masa cilíndrica de 22,5 kg que se hace caer desde una altura de 360 mm, tal como se muestra en el esquema. Como criterio de conformidad se establece que la deformación remanente máxima ha de ser inferior a 30 mm. La energía absorbida por horquilla y cuadro en el ensayo será del orden de 1.200 julios.



g) ENSAYO DE IMPACTO DE LA HORQUILLA Y EL CUADRO

En una bicicleta desposeída de sus ruedas se simula el peso del ciclista por aplicación de una masa de 30 kg en el sillín, de 10 kg en el eje del manillar, y de 50 kg en el de los pedales: 90 kg en total. Se deja caer bruscamente el conjunto, fijado por una articulación en la ubicación del eje posterior, desde una altura de 300 mm sobre una superficie rígida. El criterio de conformidad es la ausencia de fisuras o roturas observables. Y, además, la deformación horizontal remanente, tras el ensayo, del extremo de la patilla, debe ser inferior a 60 mm. La energía que disipa la estructura, en el ensayo, será del orden de 1.500 julios.



Sería deseable que en éste, como en otros ensayos que se presten a ello, se dispongan de células dinamométricas, que permitan medir las reacciones de apoyo y estimar así, los coeficientes de impacto, y poder estimar los esfuerzos en la estructura y su comportamiento deformacional.

h) ENSAYO DE FATIGA PARA EL MISMO CONJUNTO HORQUILLA-CUADRO DEL ENSAYO ANTERIOR

Se aplican durante 50.000 ciclos, de 25 Hz de frecuencia, una carga máxima horizontal hacia el exterior de 1.200 N y de 600 N en sentido contrario. El dimensionamiento de los cuadros de fibra de carbono se considera aceptables si la deformación remanente no supera el 20% de la flecha al inicio del ensayo. Con cuadros de otros materiales el criterio de aceptación será la ausencia de fisuras o daños observables visualmente.

i) OTROS ENSAYOS EN HORQUILLAS

Están establecidos, además, ensayos específicos de impactos, fatiga por flexión y de flexión estática para las horquillas de las bicicletas de carretera o las que llevan incorporadas una suspensión como prolongación de la barra de dirección. El dispositivo y las modalidades de los ensayos son los representados.

En el ensayo de impacto, la deformación que permanece tras el ensayo no deberá superar los 45 mm. En el de fatiga, tras la aplicación de la fuerza alternada de ± 650 N, durante 100.000 ciclos a la frecuencia de 25 Hz, no deberían aparecer fisuras o síntomas de roturas y en los cuadros de fibra de carbono la deformación remanente no debería superar el 20% de la inicial. En el ensayo de flexión estática la deformación permanente no debe superar los 5 mm ó 10 mm en las horquillas con suspensión.

j) ENSAYO DE FATIGA CON BIELAS A 45°

Sobre el modelo esquematizado se aplican fuerzas de 1.800 N alternativamente en uno u otro pedal, en un caso hacia abajo y en el otro hacia arriba un total de 50.000 ciclos, con una frecuencia máxima de 5Hz. El resultado se considera aceptable si al concluir el ensayo no se perciben fisuras o desperfectos en los ejes de los pedales, en las bielas o en el eje del pedalier. El plato, además, continuará firmemente unido a la biela.

k) ENSAYO DE FATIGA CON BIELAS A 30°

En uno de los pedales, con la biela inclinada a 30°, se aplica una fuerza de 1.800 N, también durante un total de 50.000 ciclos y a una frecuencia máxima de 5 Hz.

7. EL MOVIMIENTO DE LA BICICLETA

7.1. FRECUENCIA DE PEDAleo Y VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO

Los sistemas de engranajes, con sus múltiples variantes, tienen una larga y bien conocida historia detrás. Hace más de 3.000 años que se utilizaban en los molinos para transformar el giro de las palas movidas por el viento, en rotación de las piedras que molían el grano. En el Renacimiento, los mecanismos de engranaje –protagonistas de muchas de las invenciones de Leonardo da Vinci, en el siglo XVI– fueron la base del desarrollo de los relojes que permitían medir el tiempo con gran sencillez y precisión. Con la revolución industrial llegaron los motores de explosión y con ellos las máquinas de todo tipo que convertían el desplazamiento de los émbolos del motor en movimientos de otra naturaleza, mediante mecanismos crecientemente sofisticados.

Es natural que con estos antecedentes, somerísimamente expuestos, los primeros fabricantes de bicicletas incorporasen mecanismos de transmisión que fueron evolucionando hasta llegar al actual sistema de pedal-bielo-plato-cadena-piñón-rueda, que permite convertir tan eficientemente cada pedalada del ciclista en movimiento de la bicicleta.

Por cada vuelta que dan los pedales, y por tanto el plato del pedalier, el piñón trasero dará un número de vueltas igual a la relación de dientes del plato y del piñón, unidos por la cadena. Y a cada vuelta que da el piñón, la rueda trasera a la que está rígidamente unida, dará también una vuelta. De manera que el número de vueltas, n , de la rueda trasera, y lógicamente de la delantera también, se deduce de la sencilla relación:

$$n = \frac{\text{dientes del plato}}{\text{dientes del piñón}}$$

Así, si la cadena solidariza un plato de 48 dientes con un piñón de 16, por cada pedalada las ruedas darán 3 vueltas recorriendo una longitud igual a n veces su perímetro. A las más habituales de carretera se les atribuye un diámetro de 70 cm que, en realidad es un valor aproximado que traduce en centímetros el nominal de 28 pulgadas. Aunque en realidad, con un neumático bien hinchado, su diámetro exterior es de 0,679 m y su perímetro de 2,133 m.

Abramos aquí un paréntesis para comentar que las de 29", las "twenty-nine" en el lenguaje de ultramar desde donde se está impulsando fuertemente su uso, ya tienen una presencia destacada en el mundo de la bicicleta, siquiera como motivo de conversación. Y que las de 26" son protagonistas, hasta ahora, en todas las modalidades de "mountain-bike".

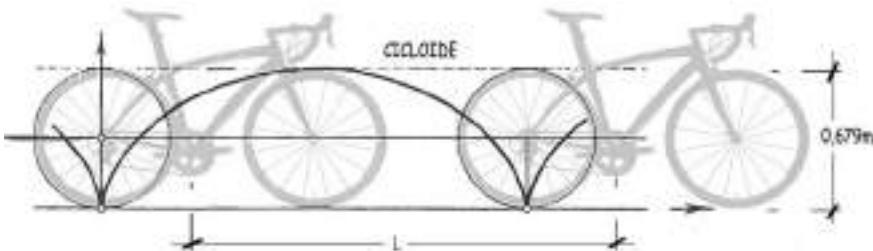
En el caso que estamos considerando, con la cadena uniendo un plato de 48 dientes con un piñón trasero de 16, cada pedalada del ciclista, provocará un desplazamiento de la bicicleta de

$$L_1 = \frac{48}{16} \cdot 2,133 \approx 6,40 \text{ m}$$



Para una cadencia de 60 pedaladas por minuto –una por segundo–, la velocidad de recorrido será

$$v = 6,40 \text{ m/pedalada} \cdot 1 \text{ pedalada/s} = 6,40 \text{ m/s} \simeq 23 \text{ km/h}$$



$$L \text{ (por pedalada)} = \frac{48 \text{ (dientes del plato)}}{16 \text{ (dientes del piñón)}} \times 2,133 \text{ m} = 6,40 \text{ m}$$

Si la cadencia fuese de 90 pedaladas/minuto (1,5 p/s) la velocidad de desplazamiento sería

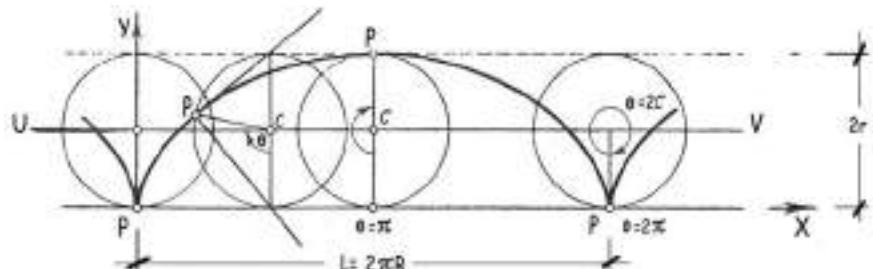
$$v = 1,5 \cdot 6,40 = 9,60 \text{ m/s} \simeq 34,5 \text{ km/h}$$

Cuando un ciclista excepcional (tal vez, un Cipollini), mueve un plato de 53 dientes, con un piñón de 11 y una cadencia de 120 pedaladas por minuto, la velocidad correspondiente resulta:

$$v = \frac{53}{11} \cdot 2,133 \text{ m/pedalada} \cdot \frac{120}{60} \text{ pedaladas/s} = 20,55 \text{ m/s} \simeq 74 \text{ km/h}$$

7.2. LA GEOMETRÍA DEL DESPLAZAMIENTO

Cuando la bicicleta se desplaza, sin deslizarse, siguiendo una línea teórica perfectamente recta, el punto que en un instante preciso será el de contacto de la rueda con el pavimento comenzará a describir una curva que se conoce con el nombre de cicloide.



Es a Galileo a quien se debe la denominación de esta curva que él mismo descubrió hacia 1590, al tratar de comprender la trayectoria de un punto de una rueda que se desplazaba, sin deslizar, a lo largo de una recta. Su alumno Torricelli, y otros sabios, se ocuparon, también, del estudio matemático de la cicloide. Pero fue Pascal quien realizó un estudio exhaustivo de sus propiedades y las dio a conocer en 1659 ("Historia de la cicloide"). A partir de entonces sabios como Huygens, Newton, los Bernouilli o Leibnitz trabajaron sobre numerosas aplicaciones prácticas.

La ecuación de la cicloide ordinaria, a la que nos estamos refiriendo, tiene por ecuaciones en coordenadas paramétricas

$$x = R(\phi - \operatorname{sen}\phi)$$

$$y = R(\phi - \cos\phi)$$

siendo ϕ el ángulo de rotación de la rueda.

Entre sus numerosas y notables peculiaridades se encuentra el que la longitud del arco que describe la cicloide es igual a ocho veces el radio, R , de la rueda que la genera y que la superficie de un bude es tres veces la de la rueda.

Hagamos, ahora, a modo de primerísima aproximación, algunas reflexiones acerca de las geometrías que dibujan las ruedas delantera y traseras cuando el ciclista gira el manillar para "negociar" la curva de una carretera. Debe ser, sin duda, una cuestión compleja que ha tenido que ser muy estudiada, sobre todo, en relación con los automóviles y las motocicletas.

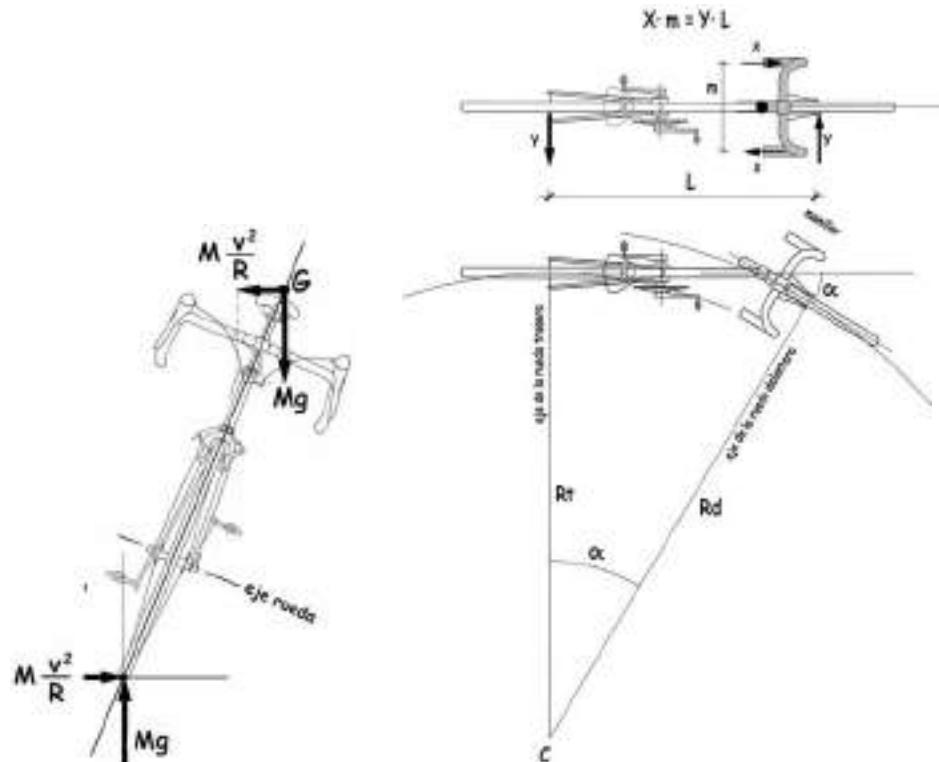
La bicicleta, a estos efectos y muy elementalmente se puede considerar que está constituida por dos cuerpos rígidos. Por una parte, el que forman la rueda motriz posterior, con el cuadro, el sillín y el sistema de transmisión. Por otra, el de la rueda delantera con el sistema de dirección, incluida la horquilla y el manillar. Los dos cuerpos estarán enlazados por la barra de dirección del cuadro en cuyo interior se alojan los dos rodamientos, que permiten el giro relativo entre los dos cuerpos y transfieren las fuerzas entre ellos. Muy esquemáticamente los dos cuerpos se pueden representar, para mayor claridad, separados y vistos en planta.



Aún más esquemáticamente, podemos representar el conjunto de la bicicleta con el manillar girando un ángulo α , por la acción de las manos del ciclista.

Suponiendo que los puntos de contacto de las ruedas con el pavimento coinciden con la vertical de sus bujes, observamos en el esquema que la perpendicular a la alineación del eje de rueda trasera se encontrará con la del eje de la rueda delantera en el punto C, que será el centro instantáneo de rotación del movimiento de las ruedas. La posterior, se desplazará, en el instante considerado, por una circunferencia de radio, R_t , y el de la rueda delantera por otra ligeramente mayor, de radio R_d . Si el ciclista mantuviese fija la posición del manillar, su centro de gravedad daría, en efecto, vueltas por el perímetro de un círculo de radio intermedio entre R_t y R_d . Al modificar el giro del manillar iría variando, simultáneamente, el radio de los círculos, de manera que el recorrido real de cada rueda se haría tangente a cada uno de los sucesivos círculos instantáneos que jalonarán el movimiento.

Por otra parte, el ciclista para girar el manillar habrá tenido que aplicar con sus manos un par de fuerzas iguales y contrarias. Y para equilibrar dicho par torsor aparecerán unas fuerzas transversales en el contacto con el pavimento de la rueda delantera y otra, igual pero de sentido contrario en la rueda trasera, de manera que se verifique la condición de equilibrio



Sin embargo, con estos planteamientos, estamos olvidando al ciclista, indiscutible protagonista de esta historia. Su centro de gravedad, en el que muy simplificadamente, consideramos que se concentra toda la masa del ciclista y de su bicicleta, también se desplazará describiendo una circunferencia cuyo radio no coincidirá con el que habrán dibujado en el pavimento las ruedas delantera y trasera.

Y como consecuencia de este movimiento circular del centro de gravedad, aparecerá una fuerza centrífuga transversal, que es una fuerza de inercia, de valor

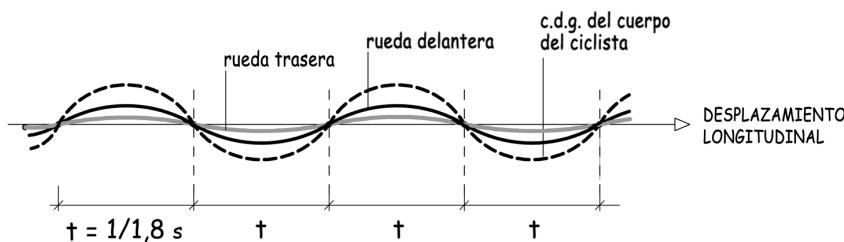
$$F_t = M \cdot a_t = M \cdot \frac{v^2}{R}$$

siendo a_t , la fuerza centrífuga asociada al movimiento e igual a $\frac{v^2}{R}$.

El ciclista y su bicicleta se inclinarán lo suficiente para que, a cada instante, se produzca el equilibrio dinámico de fuerzas.

Por lo tanto, el giro del manillar, y la consiguiente modificación de la trayectoria de la bicicleta, exigirá que el cuerpo del ciclista y de su bicicleta se inclinen lateralmente. En los contactos de las ruedas delantera y trasera con el pavimento aparecerán fuerzas transversales, de diferentes orígenes, que se relacionarán entre ellas a través de las reacciones en los rodamientos de la barra de dirección, así como de las debidas al propio cuerpo del ciclista situadas en los puntos en los que se apoya en la bicicleta. El cuadro de la bicicleta estará, también, solicitado por esfuerzos torsionales consecuencia de la transferencia de las fuerzas transversales entre los dos cuerpos delantero y trasero de la bicicleta, cuya geometría en planta se quiebra, al girar el manillar alrededor del eje de dirección.

Los movimientos de un ciclista cabalgando sobre su bicicleta tienen su componente de misterio. Aún cuando pretenda seguir una trayectoria recta en una carretera sin curvas, su pedaleo no producirá fuerzas simétricas. La aplicada en uno de los pedales será, en un instante dado, mayor que en el opuesto. Instintivamente el cuerpo del ciclista se moverá transversalmente en el sentido del pedal más cargado y, consiguientemente, aparecerá una fuerza transversal de inercia que se opondrá a dicho movimiento hasta anularlo e iniciar el cambio de sentido, lo que hará posible un mayor esfuerzo en el pedal opuesto. Y así sucesivamente, con el ritmo correspondiente al de la cadencia del pedaleo. En este proceso, la geometría del recorrido de la bicicleta no será una recta, sino una línea de aspecto senoidal que cambiará de curvatura 1,5 veces por segundo, cuando la cadencia sea de 90 pedaladas por minuto. Las trazas que dibujarán, por otra parte, las ruedas delantera, trasera y el centro de gravedad del cuerpo del ciclista serán similares pero no idénticas. Las amplitudes máximas podrían ser del orden de pocos centímetros en el cuerpo del ciclista y de imperceptibles milímetros en las ruedas.



Entre las reflexiones que suscita el sistema de dirección no puede faltar la que tratan de explicar su geometría. La barra de dirección suele formar un ángulo de 72º-73º con una línea horizontal y su eje está situado de tal manera que su prolongación virtual encuentra al pavimento ligeramente por delante, unos 50 ó 60 mm, del punto de contacto con la cubierta de la rueda delantera. En consecuencia, la respuesta al momento torsor que aplica el ciclista en el manillar para hacer girar la rueda delantera, será una fuerza transversal que tendrá por valor

$$F_t = \frac{M_T}{r}$$

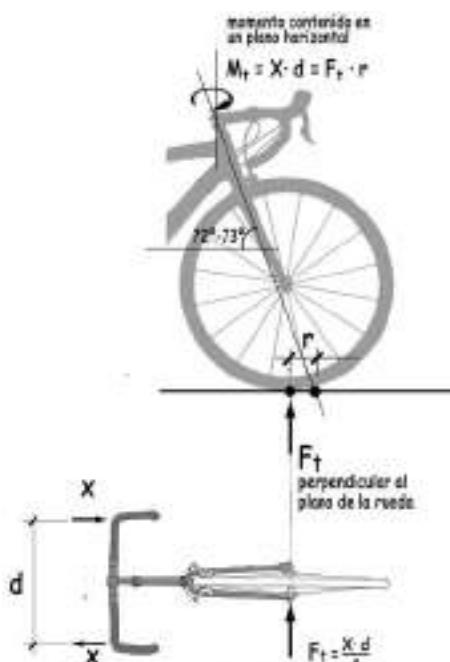
Si no existiese este decalaje y el valor de r fuese próximo a cero, la fuerza F_t sería mucho más grande y costaría girar el manillar. Si, en el otro extremo, la distancia r fuese excesiva la fuerza asociada al giro del manillar sería muy pequeña, y cualquier pequeño obstáculo provocaría su rotación y la bicicleta sería difícil de controlar.

La bicicleta está plagada de sabios detalles geométricos avalados por las experiencias vividas por centenares de millones de ciclistas.

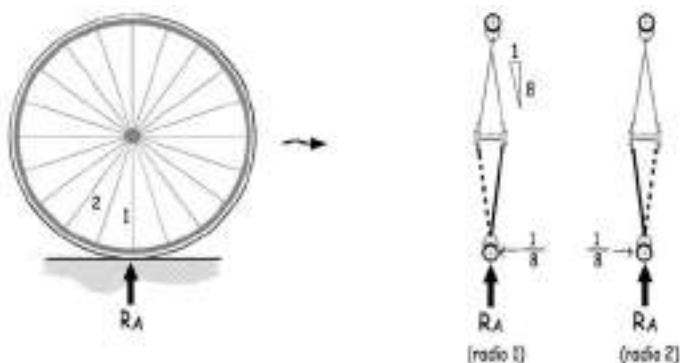
Por otra parte, el curvado de la horquilla del sistema de dirección y la esbeltez habitual de su geometría contribuye, además, a dotar a la rueda delantera de una flexibilidad que mitigue los pequeños impactos que puede padecer una bicicleta de carretera debidos a las irregularidades del pavimento. La rigidez vertical que se consigue de esta manera, debida en parte a la deformación de la rueda y en mayor medida a la flexibilidad de la horquilla puede ser del orden de 100 N/mm.

Además, la rueda delantera puede ser, en ocasiones, origen de sorprendentes y perturbadoras vibraciones transversales a las que, en la terminología anglosajona, se conoce con el término "shimmy", y para las que no existe, a lo que parece, una explicación del todo convincente. Tal vez entre las causas que pueden provocar estas vibraciones esté la que se aventura a continuación. Los radios de la rueda delantera están indinados sucesivamente a un lado a un lado y otro de su plano de simetría con una indinación aproximada de

$$\frac{H}{V} = \frac{1}{8}.$$



Si imaginamos que la totalidad o buena parte de la reacción de apoyo se transmitiese a un único radio, como consecuencia de su indinación aparecería una fuerza transversal que valdría la octava parte de la reacción de apoyo. Al continuar girando la rueda, se cargaría (o se descargaría, para ser más precisos) el radio siguiente, que tendría una indinación opuesta al anterior.



La fuerza transversal pasaría a tener, por tanto, el mismo valor pero de sentido contrario y así ocurriría sucesivamente en cada uno de los radios. Por tanto, transversalmente a la rueda irían apareciendo fuerzas alternativas con una frecuencia que, tratándose por ejemplo de una rueda de 36 radios que giran 3 veces por segundo (plato de 48 dientes piñón de 16) sería de $3 \cdot 36 = 108$ herzios, valor que puede coincidir con alguna de las frecuencias propias de la bicicleta y, consiguientemente provocar un efecto de resonancia.

Podría ser, en cierto modo, algo parecido a lo que sucedió con la pasarela del Millennium que se construyó en Londres sobre el Támesis para festejar el tránsito entre los siglos XX y XXI, y que se clausuró a los pocos días de su inauguración para proceder a su refuerzo. Un peatón puede producir, al apoyarse sucesivamente en uno u otro pie fuerzas alternativas transversales del orden de 25 N, aproximadamente un 3% de su peso, con frecuencias del orden de 1 herzio ($T = 1s$) que pueden ser similares a alguna de las frecuencias propias de vibración, en el modo transversal, que tenía la pasarela original. Cuando el número de peatones circulando sobre el tablero fue suficientemente importante, del orden de 200, y cuando cada uno de ellos, estimulados por las vibraciones incipientes, ajustaron, instintivamente, su paso con el de todos los demás, se produjo una notable amplificación de los movimientos transversales con aceleraciones entre 0,2 y 0,3 g que justificó su derrumbe y la colocación de numerosos amortiguadores que resolvieron el problema al año de haberse planteado. Las aceleraciones máximas que se suelen considerar tolerables por un ser humano no superan los 0,05 g ó 0,5 m/s².



También, en los modernos aerogeneradores eólicos, se produce un efecto similar, más sistemático y relevante, porque es determinante en el dimensionamiento de las torres que sostienen los aerogeneradores. Al girar las palas, pasan por delante de la torre con una frecuencia que es la del giro del eje del aerogenerador multiplicado por 3 que es el número de palas. Dicha frecuencia debe mantenerse alejada de la frecuencia propia de la torre para evitar amplificaciones indeseables.



COMPETICIÓN RÍGIDA



FREERIDE



COMPETICIÓN DOBLE SUSPENSIÓN



DOWNHILL



ENDURO



DE PASEO

8. LAS BICICLETAS DE MONTAÑA

El progreso en los materiales y en las tecnologías de fabricación, han multiplicado, con el paso del tiempo, las tipologías de los cuadros que se utilizan para las bicicletas de paseo o de competición en carretera. Además, en las últimas décadas, se han popularizado las bicicletas de montaña, las “mountain bikes”, y con ellas han surgido una multitud de geometrías, que se adaptan a una gran diversidad de usos a los que se conocen con denominaciones anglosajonas que recuerdan su origen (“cross country, freeride, dirt-bikes, downhill...”) y de las que no existe aún aceptadas traducciones al castellano. Entre las “mountain bike” se pueden distinguir las de cuadro rígido, dotadas de un amortiguador de impactos incorporado en la rueda delantera, y las de doble cuadro, con suspensión trasera que exigen configuraciones especiales para las vainas y tirantes que permitan a la rueda posterior desplazarse en relación con el triángulo rígido de la parte delantera del cuadro.

Las bicicletas de montaña suelen estar sometidas a condiciones mucho más exigentes que las tradicionales de carretera, pensadas para desplazarse por superficies bien pavimentadas. Las irregularidades y obstáculos que encuentran en sus singulares recorridos provocan impactos que afectan a la bicicleta y al ciclista, que se manifiestan por importantes incrementos de las reacciones de apoyo, en el contacto de las ruedas con el terreno, y que afectan al itinerario que siguen las fuerzas para configurar el equilibrio dinámico que se ha de producir en cada instante. Los amortiguadores delanteros y suspensiones traseras mitigan los efectos de los impactos reduciendo el factor de amplificación de las reacciones de apoyo y reduciendo las aceleraciones y vibraciones que afectan al cuerpo del ciclista.

En las bicicletas convencionales, con el ciclista sentado, las aceleraciones que se producen como consecuencia de la dinámica del movimiento, tanto las de componente horizontal, longitudinal o transversal, debidas a frenadas o cambios de velocidad, como a las de componente vertical que se producen cuando el ciclista se levanta del sillín y su centro de gravedad se desplaza hacia arriba y hacia abajo, tienen valores reducidos que, en general, no superarán los 0,5 g. Por el contrario, en las bicicletas de montaña los valores de las aceleraciones pueden ser mucho más importantes. Cuando en las competiciones acrobáticas el ciclista salta despegándose del suelo la aceleración vertical supera el valor de g y cuando vuelve a tomar contacto con el suelo, el impacto correspondiente está asociado a aceleraciones verticales que pueden superar muchas veces el valor de la aceleración de la gravedad.

Los protagonistas de esta sorprendente y atractiva evolución son las suspensiones que van incorporadas en las horquillas delanteras, y los amortiguadores ubicados en diversas posiciones en la parte posterior de las bicicletas de doble cuadro. Se fabrican con sistemas de una o de cuatro articulaciones que permiten la movilidad relativa buscada entre los dos cuerpos del cuadro de lo que resulta, por otra parte, geometrías variadísimas e inéditas de un gran interés visual.

Además, la funcionalidad de este tipo de bicicletas, su razón de ser, ha exigido cambios significativos en relación con las soluciones que utilizan las bicicletas tradicionales. Los manillares son específicos y las alturas a las que se colocan, también. La posición del ciclista debe estar más próxima al suelo, para reducir el riesgo de caídas, paliar sus consecuencias si se producen y lograr, además que las magnitudes de los impactos, que dependen de la altura de caída, se reduzcan también. Todo un mundo, nacido en muy pocos años en sociedades prósperas de allende los mares, que evoluciona cada día teniendo como referente lo que ocurre en el campo de las motocicletas, sus hermanas mayores.

Las bicicletas de montaña de cuadro rígido, las denominadas “hard tail” (de “cola dura”, podría ser la traducción literal al castellano), integran la suspensión, en las barras laterales de la horquilla. Las más tradicionales y económicas constan de un muelle de acero en el interior de uno de los cilindros, y de una cámara con aceite para amortiguar la respuesta posterior al impacto. Las más modernas sustituyen el muelle de acero, por un sistema de aire a presión, buscando la reducción de peso.

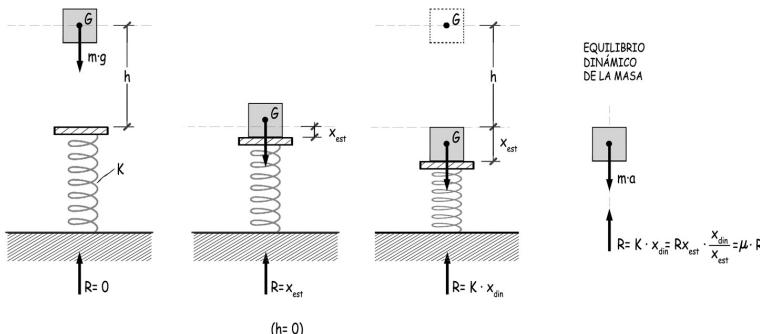
Las de cuadro doble, las “fullis” en el lenguaje coloquial del ciclismo, cuentan además con un amortiguador trasero que enlaza el triángulo delantero rígido, con los tirantes y vainas de la parte posterior del cuadro, lo que permite que la rueda trasera se desplace horizontal y verticalmente adaptándose a las irregularidades del terreno y contribuyendo a mitigar, también, impactos inevitables. La distancia entre las ruedas delantera y trasera podría, en consecuencia variar, lo que, entre otras cosas, influirá en la velocidad de transmisión de la fuerza de los pedales a los piñones.

Los sistemas de suspensión de la rueda delantera y de amortiguación de la trasera se han ido sofisticando con el tiempo para optimizar el comportamiento de la bicicleta en recorridos con curvas bruscas, pendientes pronunciadas de subida o bajada, y superficies de rodadura, de tierra o fango, con baches, piedras y obstáculos frecuentes. Existen, para ello, sistemas para bloquear y ajustar el recorrido de los muelles de acero o de la presión del aire que el ciclista puede activar con sus manos, así como para variar el grado de amortiguación que proporciona el aceite. Un mundo crecientemente complejo y eficiente que, por otra parte, responde a unos conceptos muy sencillos de la dinámica de las estructuras, que expondremos, someramente, a continuación.

Analicemos, para ello, el comportamiento de una masa, m , que cae desde una altura, h , sobre un muelle elástico, de rigidez k , y masa despreciable. Como consecuencia del impacto, el muelle se acortará una cantidad x_{din} . La energía potencial correspondiente a la masa desplazada una altura $h+x_{\text{din}}$ debería ser igual a la energía elástica acumulada por el muelle (área rayada del diagrama fuerzas-desplazamientos, $F-x$)

$$m \cdot g \cdot (h + x_{\text{din}}) = \frac{1}{2} k \cdot x_{\text{din}}^2$$





Como $x_{est} = \frac{mg}{k}$, es el desplazamiento elástico que hubiese tenido el muelle si la masa se hubiese posado suavemente, sin impactos, sobre él, tendremos

$$x_{est} (h + x_{din}) = \frac{1}{2} x_{din}^2$$

$$\text{de donde resulta, } x_{din} = x_{est} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{x_{est}}} \right]$$

El coeficiente de impacto, γ , factor de amplificación también de los desplazamientos y de las reacciones provocados por dicho impacto, valdrá

$$\gamma = \frac{R_{din}}{R_{est}} = \frac{x_{din}}{x_{est}} = \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{x_{est}}} \right]$$

Por otra parte, la masa aún teniendo velocidad nula al final de su recorrido estará sometida en ese instante a una aceleración, a , distinta de la gravitatoria, de manera que la correspondiente fuerza de inercia, $m a$, equilibrará a la reacción dinámica

$$R_{din} = k \cdot x_{din}.$$

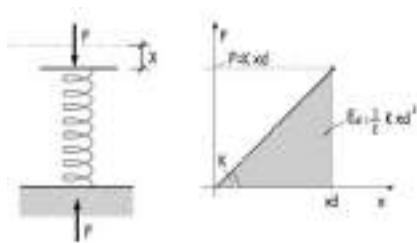
En consecuencia, el coeficiente de impacto, γ , se podrá interpretar también como la relación entre las aceleraciones a y g , $\gamma = \frac{a}{g}$ y por lo tanto

$$a = g \cdot \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{x_e}} \right]$$

Si, a modo de ejemplo, consideramos que la altura de caída es de 50 mm y el desplazamiento estático del muelle fuese de 10 mm, tendríamos un coeficiente de impacto

$$\gamma = 1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot 50}{10}} \simeq 4,3$$

y la aceleración consiguiente sería también 4,3 veces la de la gravedad.



Una reacción estática en la rueda delantera de aproximadamente 250 N, hubiese aumentado hasta $4,3 \cdot 250$ N = 1.075 N, como consecuencia del impacto.

Cuando $h = 0$, porque la masa se aplica bruscamente sobre el muelle con el que estará inicialmente en contacto, se obtiene el conocido valor de $\gamma = 2$.

Podemos representar, en términos cualitativos, la variación del coeficiente de impacto

$$\gamma = \frac{R_{\text{din}}}{R_{\text{est}}} ,$$

para distintos valores de h — en función de la rigidez del muelle representado por el parámetro $x_e = \frac{m \cdot g}{k}$.

Cuando el valor de x_e es muy pequeño, y por consiguiente, la rigidez del muelle muy grande, los valores de γ y de R_d tienden a infinito. Tenderán, por el contrario, a la unidad cuando la rigidez del muelle sea muy reducida y el desplazamiento estático, x_e , muy elevado. En el caso de una bicicleta sin amortiguadores “externos” será la propia rueda delantera y la horquilla curvada la que actuarán a modo de amortiguador “intrínseco”. La reacción de apoyo generará una pequeña deformación en la cubierta de la rueda, a la que se sumarán la provocada en su estructura (llanta más radios) y la debida a la flexión de la horquilla, que suele ser la más importante. En conjunto dicho desplazamiento puede ser de pocos milímetros para reacciones estáticas de apoyo de pocos centenares de newtons. La rigidez intrínseca podría situarse en el entorno de los 50 ó 100 N/mm, muy superior a la que proporcionan los amortiguadores externos que, suelen situarse en rangos de 5 a 10 N/mm, pudiendo variar al incrementarse el desplazamiento.

Realmente el sistema global de amortiguación podría modelizarse mediante dos muelles en serie: el del amortiguador “externo” de rigidez k_a , dispuesto a continuación del que representa la rigidez, k_r , de la rueda y horquilla. El conjunto de los dos muelles equivale a un muelle único de rigidez k_{eq} , tal

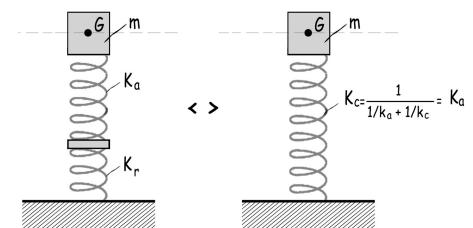
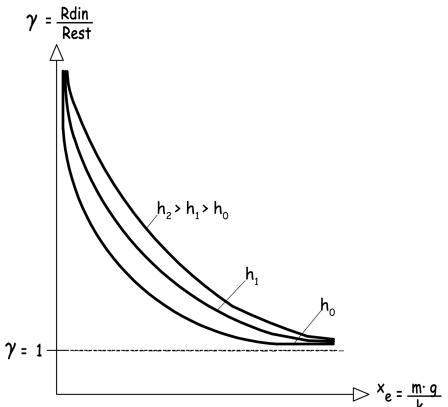
$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_a} + \frac{1}{k_r} .$$

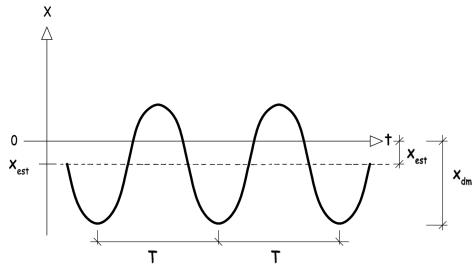
Como k_a suele ser mucho mayor que k_r la rigidez equivalente, k_{eq} coincidirá prácticamente con k_a . Por ello, la existencia de un sistema de amortiguación incorporado a las horquillas hace innecesario el curvado característico de las bicicletas de carretera. No así la excentricidad de la horquilla en relación con el eje de la rueda delantera (para facilitar el giro controlado del manillar) que se logra con la geometría que se adopte para las punteras.

Si no existiese amortiguación en el sistema, la masa m , una vez alcanzado su descenso máximo x_d , comenzaría a ascender debido al alargamiento del muelle y se movería indefinidamente con un movimiento armónico de expresión

$$x = A \cdot \sin \omega t$$

en donde $A = x_d - x_e$ será la amplitud del sistema, y ω su pulsación.





La ecuación de equilibrio dinámico será

$$m\ddot{x} = kx \quad \text{fuerza elástica, } f_e$$

$$\text{fuerza de inercia, } f_i$$

es decir

$$\ddot{x} = \frac{k}{m} x = \omega^2 x$$

siendo $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{k}{m}}$, la pulsación del sistema, cuyo periodo de vibración valdrá

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

del que resulta la conocida y útil expresión para el periodo propio del sistema:

$$T \approx 0,2\sqrt{x_{est}}$$

siendo x_{est} , el desplazamiento estático en centímetros.

En el caso que hemos supuesto con $x_{est} = 10$ mm, T valdría 0,2 segundos y la frecuencia del sistema sería de 5 herzios.

Una situación como la descrita sería intolerable para el ciclista. El movimiento que provoca un impacto debe ser rápidamente amortiguado. El aceite dispuesto en el interior de los tubos de la horquilla tiene esta finalidad, y crea una fuerza de amortiguamiento, $f_c = cx$, que por ser de naturaleza viscosa es proporcional a la velocidad de desplazamiento. La ecuación del equilibrio dinámico de las fuerzas, siendo c el coeficiente de amortiguamiento, se convierte en

$$\text{fuerza elástica, } f_e$$

$$m\ddot{x} = cx + kx \quad \text{fuerza de amortiguación, } f_c$$

$$\text{fuerza de inercia, } f_i$$

La solución de esta ecuación diferencial es del tipo $x = e^{\lambda t}$, expresión que introducida en la anterior de equilibrio permite deducir el exponente, λ

$$\lambda = \frac{c \pm \sqrt{c^2 - 4mk}}{c^2}$$

El amortiguamiento crítico, c_{cr} , será el que anule el radical, $c_{cr}^2 - 4mk = 0$

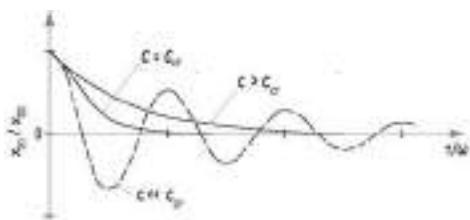
o lo que es lo mismo

$$c_{cr}^2 - 4m^2\omega^2 = 0$$

Por lo tanto,

$$c_{cr} = 2 \cdot m \cdot \omega$$

Para que el movimiento se amortigüe rápidamente el valor de c debe estar próximo al de c_{cr} . Los esquemas del movimiento amortiguado son los siguientes. Cuando $c \ll c_{cr}$ (es lo que ocurre en las estructuras de la ingeniería civil, en las que, en general, sólo se cuenta con la amortiguación de la propia estructura), la amplitud de la vibración se irá amortiguando progresivamente. En el otro extremo, cuando $c \gg c_{cr}$, el desplazamiento no cambiará de signo y el sistema volverá, sin vacilaciones, a su posición estática original.



9. LA ESTRUCTURA DEL CICLISTA

En el crepúsculo de este relato, del que nunca ha estado del todo ausente, el ciclista vuelve a ser protagonista destacado. Porque nuestra querida y admirada bicicleta –que ha ocupado buena parte de las páginas que nos han traído hasta aquí– cuando se queda sola, tal vez exhibiéndose en el escaparate de una tienda, vestida con sus mejores galas, tratando de despertar la concupiscencia de quienes desearían poseerla, nuestra querida y admirable bicicleta, inmóvil e inanimada, es muy poca cosa. Hasta que llega el ciclista y la monta, inyectándole la energía que necesita para iniciar su resurrección.

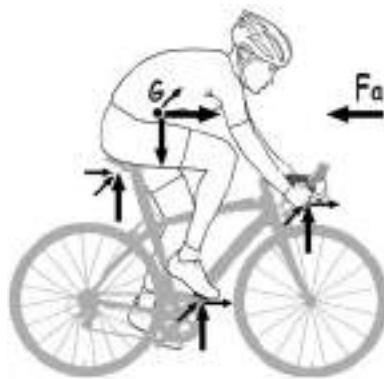
El cuerpo del ciclista es, desde luego, almacén y transformador de energía. Pero contiene, también, la estructura que cobija y sostiene el motor que lo mueve y sus complejísimos componentes. La bicicleta es, realmente, un pedestal estructural, por el que se encaminan las fuerzas que nacen en el cuerpo del ciclista hasta que alcanzan el suelo en el que reposan.

El cuerpo en movimiento del ciclista debe ineludiblemente cumplir, como todos los objetos animados o inanimados que pueblan nuestro planeta, las tres leyes que, como descubrió Newton, explican y gobiernan su comportamiento. Como cualquier otra parte de la estructura que forma con su bicicleta, el cuerpo del ciclista y cada uno de sus miembros deben estar, a cada instante, en equilibrio. Y, para ello, las fuerzas gravitatorias, las aerodinámicas y las de inercia que actúan sobre él, estarán contrarrestadas por las reacciones que aparecen en los puntos de contacto –sillín, manillar, pedales– del cuerpo del ciclista con su montura.

En síntesis, sobre el cuerpo del ciclista de masa, m , actuarán las fuerzas gravitatorias, mg , así como las de inercia, ma_v , cuando existan aceleraciones verticales, a_v , debidas al movimiento. Actuarán, también, las fuerzas aerodinámicas, F_a y las de inercia, ma_l , originadas por las aceleraciones longitudinales del cuerpo del ciclista. Y finalmente, intervendrán las fuerzas transversales de inercia, ma_T , debidas a las aceleraciones, a_T , asociadas a la movilidad transversal del cuerpo del ciclista, así como a la componente, en dicha dirección, de las fuerzas aerodinámicas.

Las reacciones en los tres posibles apoyos –el del contacto de sus manos con el manillar, de sus glúteos con el sillín y de sus pies con los pedales– deben fluir por la estructura del cuerpo para alcanzar cada punto de su masa. Aunque al haber considerado un modelo muy simplificado en el que toda ella se concentra en su centro de gravedad, éste será la diana hacia la que apuntarán los itinerarios por los que discurrirán las reacciones de apoyo.

La estructura del cuerpo humano, que puede parecer de concepción sencilla es, sin embargo, de una enorme complejidad real. Está constituida, como tantas celosías estructurales que utilizamos en la ingeniería civil y en la arquitectura, por robustas y



rígidas piezas –los huesos– que pueden trabajar esencialmente en flexo compresión y por flexibles tirantes que sólo pueden hacerlo en tracción: los músculos con sus tendones, que los prolongan y anclan a los huesos. Y en las zonas donde confluyen las extremidades de huesos y tendones, se ubican las esenciales y especialmente complejas articulaciones en cuyo equilibrio colaboran los ligamentos que, sin impedir su movilidad, la limitan a rangos funcionalmente útiles.

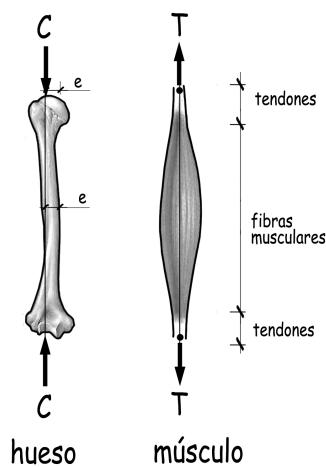
Por tratarse de una estructura articulada puede ser relativamente sencillo, a partir de las reacciones del cuerpo en las superficies en las que se apoya, estimar los esfuerzos a que podrían verse sometidos huesos, y músculos, y evaluar su respuesta a las solicitudes que reciben. Pero, como en las estructuras de la ingeniería, las articulaciones son las zonas más críticas del entramado estructural, las de fundonamiento más complejo y las de evaluación más incierta.

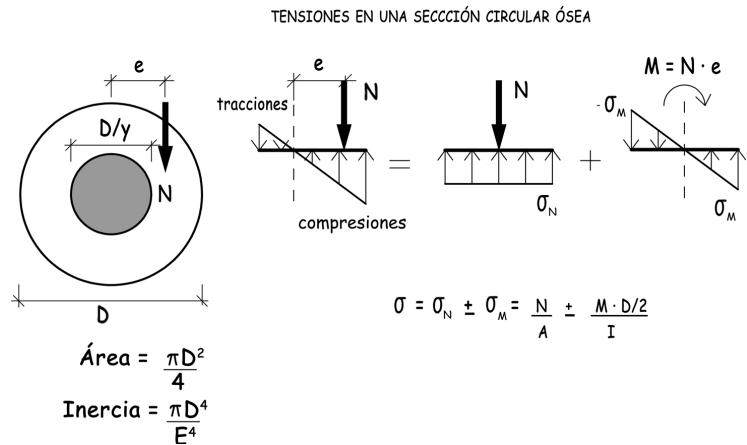
En todo caso, hay que reiterarlo, cada hueso y cada músculo con sus tendones, tienen que estar en equilibrio y si se aíslan virtualmente, las fuerzas aplicadas en uno de sus extremos deben contrarrestarse con la que actúa en el otro, y, para que así suceda, deben de estar en prolongación unas de otras.

Los huesos suelen estar solicitados en flexo compresión y no en compresión pura. Porque, por una parte, su geometría nunca es perfectamente recta y en algunos casos está notoriamente curvada. Y porque las cargas que se introducen en las articulaciones, en el contacto con los huesos contiguos, suelen tener una cierta excentricidad que, además, varía con el movimiento de la articulación. Por tanto, en cualquier sección perpendicular a la directriz del hueso, por exigencias de equilibrio, actuará un esfuerzo de compresión, un cortante y un momento fletor.

Para que los huesos estuviesen exclusivamente comprimidos, la línea de acción de las fuerzas de compresión que se transfieren de una extremidad a la otra, debería situarse dentro del núcleo central de cualquier sección perpendicular a su directriz. En una sección cilíndrica de diámetro D, el borde de dicho núcleo central está definido por un círculo, de radio muy reducido, $D/8$. Por eso, la línea de acción de los esfuerzos de compresión que solicitan a los huesos, se sitúan habitualmente fuera de su núcleo central y, en consecuencia, la zona del hueso, más alejada de la línea de acción de la compresión estará habitualmente traccionada, dentro de unos límites aceptables para el material óseo.

Los músculos, en cambio sólo pueden trabajar en tracción. Son como tirantes estructurales constituidos por un cuerpo central de fibras paralelas envueltas en tejido muscular. En sus extremidades los músculos se convierten en tendones que los anclan, a un hueso en un extremo y a otro diferente en el otro. Entre los músculos y los tendones existe una zona de transición en la que se imbrican para transferirse las fuerzas entre ellos.





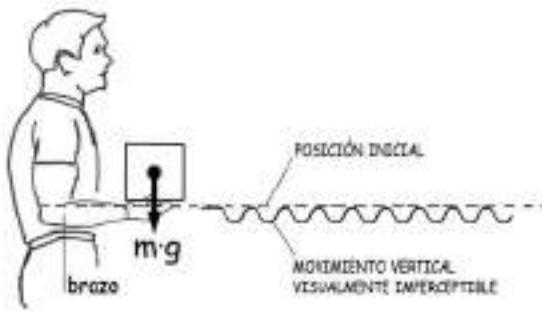
Todo ello expuesto de forma muy elemental. Porque el cuerpo humano, ese gran desconocido para la inmensa mayoría de los seres humanos, es de una extraordinaria y fascinante complejidad. Quien esto escribe, tuvo que estudiar y aprender en un bachillerato ya remoto, algunas nociones de biología y de química y, desde entonces, ha mantenido una cierta curiosidad e interés, por estas disciplinas, como por tantas otras. Y ahora, en la preparación de este elemental texto, ha huroneado por las páginas de algunas encyclopedias y de algunos prestigiosos textos de anatomía, fisiología y, sobre todo, de biomecánica. En los capítulos introductorios de estos últimos se suelen exponer los principios de la mecánica racional. Y, de hecho, en el resto de los capítulos, llenos de informaciones y esquemas de indudable interés, las exigencias de equilibrio, formuladas por Newton en sus leyes centenarias, suelen tener una presencia, generalmente implícita, pero relevante.

Y no he podido dejar de preguntarme si el contenido de estos capítulos introductorios será suficientes para aportar a unos estudiantes, a los que, probablemente, en su gran mayoría, se les podrían calificar de “letras”, los sólidos conocimientos que se requieren para comprender realmente la mecánica del comportamiento de un cuerpo humano.

No es probable que así ocurra porque he tenido induso la impresión que los saberes estructurales de los autores de estos especializados libros de texto, en tantos aspectos tan valiosos, parecían insuficientes para explicar en profundidad las exigencias que imponen las insoslayables leyes de Newton en el comportamiento de todas y cada una de las partes en que podemos, virtualmente, deconstruir la compleja estructura de un ser humano.

Así, en uno de los prestigiosos textos a los que me refiero, se asegura, que el concepto de trabajo, como producto de la fuerza por el desplazamiento, que está tan arraigado en la

física, no es aplicable en biología. Y para justificar tan insólita afirmación se utilizan argumentos que, cuando menos, producen perplejidad y que pueden ser manifestación de la lamentable ausencia de diálogo entre profesionales de diferentes especialidades y, por otra parte, esperanzadora manifestación de las posibilidades que se abrirán en la investigación y en la educación de estas materias cuando existan auténticas colaboraciones interprofesionales.



Aunque, por otra parte, este confuso estado de cosas, podría tener una cierta justificación por la existencia de una aparente paradoja, de las que tanto agradaban al gran Niels Bohr: *“Es magnífico, dijo, que hayamos dado con una paradoja. Ahora tenemos la esperanza de realizar progresos”*.

Y es que como la física newtoniana nos enseña, y nos enseña bien, el trabajo es, desde luego, el producto de la fuerza por el desplazamiento de dicha fuerza siguiendo su línea de acción. Pero si sostenemos un peso en la palma de la mano de un brazo estirado que mantenemos inmóvil, no se produaría trabajo: el cuerpo no necesitaría generar energía y no tendría porqué cansarse. Lo que, evidentemente, no es cierto. El cuerpo se cansa y, cuando el peso es grande, sólo es capaz de sostenerlo un tiempo limitado.

Acaso se pueda explicar esta paradoja considerando que la inmovilidad del peso es tan solo aparente, y que, en realidad, está moviéndose cínicamente, con amplitudes muy reducidas, que suelen pasar desapercibidas. Porque, tal vez, el músculo bajo un esfuerzo sostenido –como ocurre con la relajación de los aceros de pretensar y con la fluencia de los hormigones– se distienda y el peso comience a descender muy ligeramente hasta que el músculo recibe instrucciones para acortarse y devolverlo a su nivel inicial. De manera que el peso subiría y bajaría innumerables veces y realizando en cada ciclo un trabajo y consumiendo energía generada por el cuerpo humano. Este hecho se puede apreciar, por ejemplo, entre los levantadores de grandes pesos que en situaciones límites, mueven, instintivamente, los músculos con movimientos un tanto espasmódicos que concluyen cuando suelta el peso y dejándolo caer al suelo. Y entre los “castellers”...



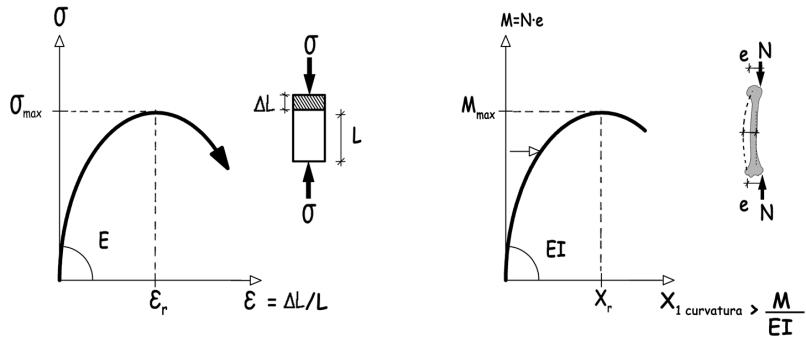
Los huesos, que conforman el esqueleto de un ser humano, son componentes esenciales de su estructura. Una persona de constitución normal suele tener unos 208 huesos de muy variadas geometrías: largos y cortos, grandes y pequeños, rectos, planos y curvados. Su masa conjunta es de unos 9 kilogramos, de los que el 70% aproximadamente está constituido por una sustancia que contiene calcio, fósforo, oxígeno e hidrógeno, en proporciones que responden a la formulación de los hidroxiapatitos $[3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2\cdot\text{Ca}(\text{OH})_2]$, así como sales de magnesio y otras sustancias menos relevantes en inferiores proporciones. El 30% restante lo forman fibras de colágeno (una mezcla de aminoácidos) que envuelven, desordenadamente, a los cristales microscópicos de hidroxiapatito.

Desde un punto de vista estructural, se puede considerar que los huesos están constituidos por un material compuesto por cristales de hidroxiapatito envueltos en una matriz de colágeno. Según la proporción de cristales, las características mecánicas de los huesos varían considerablemente. Como ocurre, en cierto modo, con los materiales compuestos por fibras de carbono de los que se ha tratado en el apartado 5.5. Aunque en este caso el componente más resistente no se encuentre en forma de fibras sino de cristales.

Como consecuencia de todo ello, los huesos tienen características mecánicas muy heterogéneas y son marcadamente anisótropos. Trabajan, como ya se ha comentado, fundamentalmente a flexocompresión y están constituidos por una parte interior más esponjosa por la que discurren las arterias que los mantienen con vida y otra, externa, más resistente.

Los huesos largos tienen sección tubular cuya área resistente útil es sensiblemente inferior a la encerrada por el perímetro externo de la sección. Pequeñas probetas extraídas de la parte más externa de los huesos largos, y ensayadas a compresión para determinar sus diagramas σ - ϵ , manifiestan módulos de elasticidad longitudinal que puede superar los 1.500 N/mm^2 , reduciéndose a la mitad cuando se ensayan transversalmente. La tensión máxima de compresión puede superar puntualmente los 100 N/mm^2 , en zonas que están previsiblemente confinadas. Es, como la piedra o el vidrio, un material esencialmente frágil, que rompe bruscamente con deformaciones muy pequeñas, y lo hace sin avisar. Sus diagramas cualitativos de tensiones-deformaciones, deducibles del ensayo de una probeta pequeña tomada del hueso, y el de momentos-curvaturas que se pueden obtener del ensayo de un hueso completo aplicando cargas excéntricas en sus bordes, deberían mostrar geometrías lineales en el origen, que se irían incurvando progresivamente al aproximarse a las cargas límites, en la frontera de la rotura frágil.

Los músculos a los que corresponde un elevado porcentaje, del orden del 40%, de la masa corporal son, por el contrario, esencialmente dúctiles. Se deforman significativamente antes de romper y cuando se los solicita en exceso avisan, mediante el dolor muscular, que se está逼近ando el límite de su capacidad resistente.

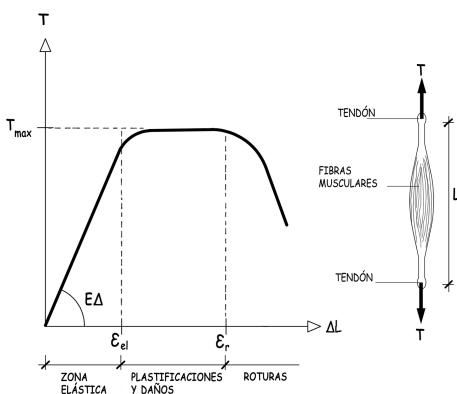


Se suelen clasificar en lisos y estriados. Los “músculos lisos” aseguran la pausada movilidad que necesita para su funcionamiento el sistema digestivo, por ejemplo. Pero los que interesan, desde la perspectiva de este texto, son los denominados “músculos estriados” que, responden con gran rapidez, a los impulsos voluntarios que provienen del sistema nervioso conectado con el cerebro, contrayéndose y provocando, al hacerlo, los movimientos que se desea que haga el cuerpo humano y los que necesita el corazón para alimentarlo con la sangre oxigenada.

Los músculos estriados están constituidos por fibras paralelas, cada una de ellas conformadas por una sucesión de eslabones biológicos que se contraen cuando reciben las señales del sistema nervioso y vuelven, a su posición inicial al cesar el estímulo. No tienen la geometría simple y recta –propia de los tirantes tradicionales en las estructuras de la ingeniería– con las que se suelen representar en algunos confusos croquis que aparecen en algunas publicaciones. No hay más que palparse una pierna o bien observar las expresivas imágenes que abundan en cualquier atlas de anatomía, para confirmar que la geometría de los más de 600 músculos que configuran el cuerpo humano es espacial y compleja, que se abren y se estrechan, se entrecruzan y envuelven a los huesos, protegiéndolos.

En las extremidades de los músculos se encuentran los tendones que se pueden considerar, muy esquemáticamente, como los andajes que transfieren las tracciones a los huesos. De ellos brotan, en efecto, los tendones que salen a recibirlas, para insertarse en la masa muscular.

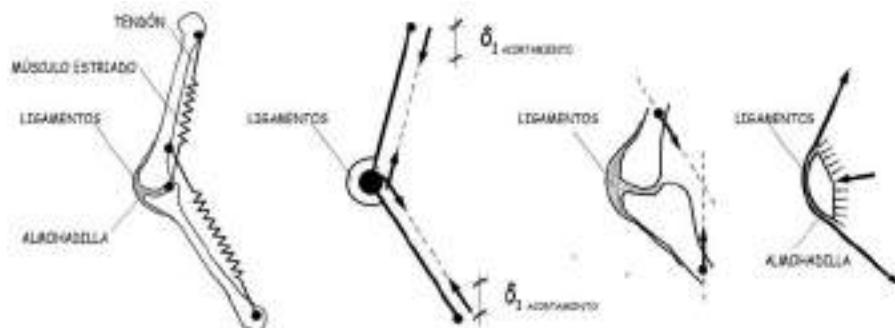
Han existido intentos, infructuosos, para caracterizar con generalidad, el comportamiento de los tirantes constituidos por músculos y tendones. Cada persona es un mundo y cada conjunto muscular tiene su propia vida, variable con la edad y las circunstancias. Pretender establecer un diagrama tensiones-deformaciones, como los que se utilizan para caracterizar materiales estructurales convencionales, no parece que pueda conducir a



resultados útiles y fiables. Los progresos tecnológicos son los que podrán facilitar información precisa del comportamiento de músculos y tendones cuando se les solicita con fuerzas o con desplazamientos impuestos cuya cuantificación se desconoce. En todo caso, el tirante constituido por el paquete central muscular y por los tendones que lo anden a los huesos, cuando esté solicitado por fuerzas de tracción se comportará, probablemente, de acuerdo con lo mostrado en el diagrama fuerzas-desplazamientos.

Los huesos y los músculos con sus tendones son fundamentales en la conformación de la bioestructura del cuerpo humano. Pero aún lo son más, las conexiones entre ellos, las articulaciones, nudos estructurales esenciales, que canalizan las fuerzas que llegan a ellos provenientes de los tendones musculares y de los huesos y aseguran las rotaciones flexionales y torsionales que imponen los movimientos del cuerpo. Y en el entorno de las articulaciones y formando parte de ellas, se encuentran los ligamentos, y, protegiendo las superficies de las rótulas, los cartílagos permeables.

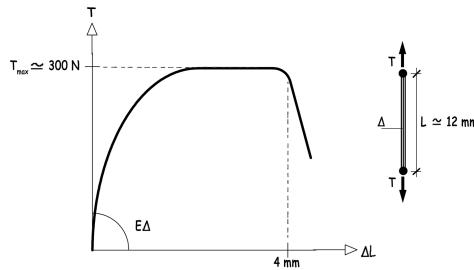
Muy esquemáticamente, y distorsionando notoriamente la realidad, podremos representar la función estructural de huesos y músculos en los croquis siguientes:



Los ligamentos tienen una composición material y unas características mecánicas en cierto modo similares a los tendones. Son esenciales tanto para generar los esfuerzos de tracción, que demanda el equilibrio de la articulación, como para limitar los giros de las rótulas en las extremidades de los huesos. Algunos ensayos de ligamentos sitúan su módulo de elasticidad, en rangos de unos 10.000 a 20.000 N/mm 2 , y su rigidez longitudinal en valores del orden de 75 N/mm. La carga de rotura puede alcanzar los 300 N con una capacidad última de alargamientos muy notable que puede superar los 4 mm, en ligamentos que no superan los 12 mm de longitud.

Las máximas tensiones que se producen en el conjunto del sistema óseo están localizadas, obviamente, en las zonas de contactos de los dos huesos que configuran una articulación.



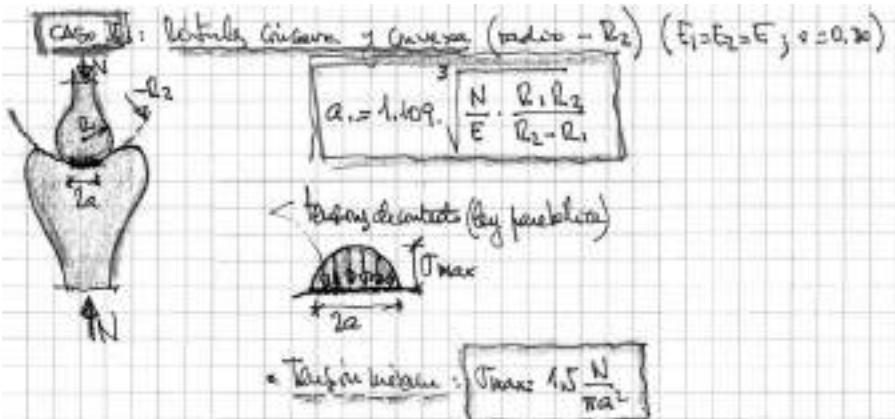


Para proteger las superficies en contacto las rótulas suelen ir recubiertas de capas cartilaginosas de pocos milímetros de espesor que, siendo permeables, permiten además el acceso al líquido sinovial almacenado en las proximidades de las superficies que tienen que lubricar para permitir el giro relativo de las rótulas de uno y otro hueso, con coeficientes de rozamiento asociados muy bajos, del orden del 1%.

Las rótulas de las articulaciones óseas suelen estar constituidas por dos superficies aproximadamente esféricas, una cóncava de radio $-R_2$ y otra convexa de radio menor R_1 . Hacia 1881 Hertz publicó en el libro "Über die Berührung fester elastischer Körper" la fórmula que lleva su nombre y que permite determinar la tensión máxima en el contacto de las dos superficies que transfieren una fuerza N . Suponiendo que el módulo de elasticidad de los dos huesos que configuran la rótula es el mismo, E , y que el coeficiente de Poisson del material es $\nu = 0,30$, tendremos una ley de tensiones máximas de contacto aproximadamente parabólica, con un valor máximo

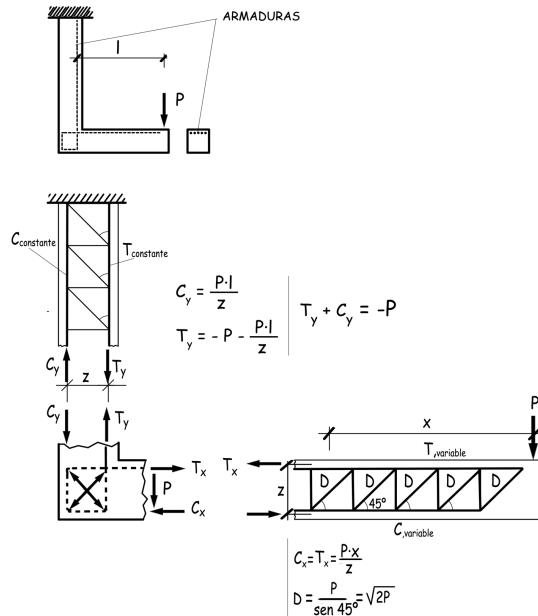
$$\sigma_{\max} = 1,5 \frac{N}{\pi a^2}$$

siendo a , el coeficiente que figura en el croquis adjunto.



Las rótulas no solamente deben permitir las rotaciones del sistema en un plano, el del papel en los croquis dibujados. Los giros de tipo torsional son también habituales. Por eso, los músculos y ligamentos deben tener una configuración espacial para que sean posibles, al tiempo, que deben controlar que se mantienen dentro de límites tolerables. Los ligamentos cruzados, por ejemplo, tienen una función en cierto modo análoga, aunque mucho más evolucionada, que las barras de acero a 45° que solemos disponer en las vigas o soportes de hormigón estructural para asegurar el equilibrio de las fuerzas que generan los esfuerzos cortantes y de torsión.

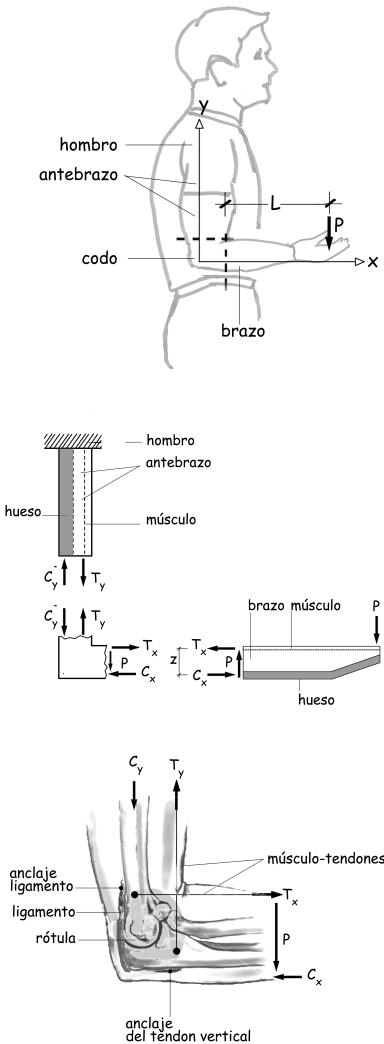
Podría ser interesante, llegados a este punto, contrastar el equilibrio de las fuerzas que actúan en el codo de un brazo extendido horizontalmente y soportando un peso dispuesto sobre su mano extendida, con el de una pieza, en cierto modo equivalente, de hormigón armado, en forma de L soportando también en su extremo una carga vertical. Comencemos por subrayar algunos rasgos característicos en el comportamiento de la estructura en L de hormigón armado. Pongamos para ello en equilibrio la barra vertical que se empotra en cabeza, la barra horizontal que sostiene en su extremo al peso P y el nudo de encuentro entre ambas.



La pieza vertical, solicitada por un esfuerzo de tracción P y por el momento fletor concomitante, $P \cdot L$, transferirá estos esfuerzos desde el nudo hasta la sección de empotramiento, por la tracción T_y que se mantendrá constante a todo lo largo de la barra vertical y por la compresión $C_y = T_y - P$ que permanecerá también constante.

La pieza horizontal se comportará como una celosía, de acuerdo con un modelo tradicional ampliamente utilizado en estructuras. Las armaduras conformarán el tirante traccionado gracias a su adherencia con el hormigón que le rodea, podrá ir reduciendo su esfuerzo de tracción entre un valor máximo

$$T_{\max} = \frac{P \cdot x}{z}$$



en las proximidades del nudo y un mínimo $T_{\min} = P$, en el otro extremo. Tendremos, además, las diagonales comprimidas

$$D = \frac{P}{\operatorname{sen} 45^\circ} = \sqrt{2}P$$

que equilibrarán, el cortante P que no varía a lo largo de la viga.

Tanto la pieza horizontal como la vertical, a partir de una distancia suficientemente alejada del nudo, se comportan en razonable conformidad con la hipótesis clásica de Bernouilli-Navier (secciones planas antes de la deformación se mantienen planas después de la deformación), lo que simplifica notablemente los análisis numéricos de este tipo de estructuras constituidas por piezas prismáticas.

El comportamiento del nudo es mucho más complejo. Es una zona singular, cuya capacidad resistente, de incierta evaluación, condiciona la del conjunto de la estructura de la que forma parte. Aquí no es aplicable la cómoda hipótesis de Bernouilli-Navier y hay que esforzarse en identificar un modelo del tipo "strut and tie", con barras comprimidas y tirantes traccionados, que sea coherente con la disposición adoptada para las armaduras dispuestas en el interior del nudo.

En el elemental ejemplo que estamos considerando, podremos lograrlo si la armadura horizontal traccionada que penetra en el nudo hiciese en su interior un bude, como el esquematizado, y volviese a surgir del nudo en la posición que ocupa la armadura traccionada de la barra vertical que conduce la tracción T_y hasta el empotramiento. El bude de la armadura genera, por otra parte, bielas comprimidas, cruzadas en el interior del nudo, que son esenciales para la transferencia de los esfuerzos de compresión, C_x , de la barra horizontal y, C_y , de la vertical y del esfuerzo P , que es tracción en ésta y cortante en aquella. Consideremos ahora el caso del brazo horizontal sosteniendo en el extremo de la mano la carga P . Y para visualizar el equilibrio, aislemos el brazo, el antebrazo y el codo en el que confluyen. El modelo para el antebrazo puede ser asimilable al de la barra vertical de la estructura de hormigón. El músculo toma la tracción y el hueso asume la compresión necesaria para el equilibrio. No hay cortantes.

El posible modelo para el brazo plantea más interrogantes. Es evidente que, para equilibrar el momento $P \cdot d$ en una sección perpendicular, muy próxima al codo, tendremos la tracción T_x , y una compresión C_x . Pero, además, existe un esfuerzo cortante $Q = P$ que cambia sustancialmente el panorama en relación con lo que ocurriría en el antebrazo.

El valor de T_x se puede deducir de la siguiente expresión en la que z es el brazo de palanca, o distancia a la fuerza de compresión C_x .

$$T_x = \frac{M}{z} = \frac{P \cdot x}{z}$$

Pero, al aceptar este valor, estaríamos implícitamente considerando que el brazo se comporta como una estructura mixta, de músculos traccionados y huesos comprimidos trabajando al unísono. Y, consiguientemente estaríamos aceptando que la tracción T_x se va reduciendo progresivamente a medida que la sección estudiada se aleja del codo, porque el esfuerzo rasante entre músculo y hueso, también se iría reduciendo linealmente, al ser proporcional al momento flector, hasta anularse al alcanzar la mano. Para que así pudiera ser, debería existir una, poco probable, adherencia perfecta entre músculos y huesos.

También existiría otro posible modelo para la estructura del brazo, en el que músculos y huesos trabajasen independientemente y no se produjese rasante entre ellos. En este caso, la tracción constante del músculo sería igual a $T = P \cdot \operatorname{tg} 45^\circ = P$, suponiendo que la carga, a partir de su punto de contacto con la mano, se difunde a 45° . En este hipotético modelo, el hueso trabajaría a flexo compresión y estaría pretensado por la fuerza P aplicada con la excentricidad correspondiente a la distancia entre el eje del músculo y el del hueso.

¿Cuál de los dos modelos expresa mejor el comportamiento real del brazo? No he encontrado respuesta a esta pregunta en los limitados documentos que, sobre estas cuestiones, he podido brevemente consultar.

En todo caso, la complejidad de un hipotético modelo para la estructura del brazo, es poca cosa en comparación con la que tiene una pieza tan esencial como es el codo. En él se anclan, por intermedio de los tendones respectivos, los músculos del brazo y del antebrazo. A él llegan, también, los huesos que se encuentran en la rótula compartida, con su superficie cóncava en la extremidad de uno de ellos, convexa, y complementaria en la del otro. Y, entre ambas superficies de contacto, se encuentran los cartílagos protectores y permeables al líquido sinovial. En la zona de la rótula encontraremos, también, andados a los huesos por un mecanismo de adherencia, los esenciales ligamentos que traccionados generan en sus superficies curvadas, adaptadas a la geometría de los huesos con los que están en contacto, tensiones de compresión que contribuyen al equilibrio de la articulación. Me he atrevido a esbozar un esquema muy impreciso de la estructura del codo —que, en todo caso, debería ser espacial y no plano— poniendo de manifiesto al hacerlo una ignorancia a la que sería injusto calificar de culpable. Porque he buscado respuestas a mis dudas y no las he tenido a mi alcance.

Tal vez porque hasta ahora no ha sido posible modelizar con rigor la compleja estructura de un ser humano ni caracterizar los diversos materiales que lo constituyen. Las metodologías que utilizamos para modelizar las estructuras de la ingeniería civil, de la arquitectura y de la industria, algunas complejas y de gran responsabilidad, no parecen las adecuadas para modelizar la estructura del cuerpo humano. Los cada día más sofisticados

programas de cálculo de elementos finitos que tan profusamente se utilizan, aunque no siempre acertadamente, no sirven, por ejemplo, para analizar el comportamiento del cuerpo de un ciclista en acción. Y no parece que existan tendencias nuevas que abran vías serias de progreso.

Yo he tenido la impresión, tras lecturas, sin duda someras y superficiales, de algunos prestigiosos textos que se utilizan en la formación de especialistas, que la ciencia de la biomecánica está en sus albores. Y me ha sorprendido el interés que parecen despertar los modelos “tensegrid”, bien conocidos en la ingeniería, para explicar una estructura, la de un ser humano, constituida por huesos que no trabajan sólo a compresión, por músculos que no son, desde luego, tirantes rectos, y por articulaciones extremadamente complejas que permiten el milagro de la movilidad. Su impulsor B. Fuller fue un personaje extraordinario y fronterizo, ingenioso y seductor que, realmente, poco aportó a la ingeniería estructural. En el magnífico documental, no exento de sombras, que sobre la vida de Norman Foster, el más ingeniero de los arquitectos estrella, se proyecta estos días de octubre de 2010 en las pantallas de los cines de Barcelona, nuestro admirable arquitecto y apasionado esquiador, le hace un hueco a su lado y le toma prestado el título, no demasiado afortunado, del film.

El progreso de la biomecánica, especialidad que parece tener más futuro que presente requerirá, creo yo, que quienes investiguen, enseñen o practiquen tengan, desde luego, unos sólidos conocimientos de anatomía. Pero que, además, conozcan a fondo el significado de las leyes de Newton. Los especialistas en este campo complejo y fascinante, al que me he asomado, con mi bagaje de conocimientos e ignorancias, deberían ser, idealmente también ingenieros. Y algunos ingenieros con las ideas claras, que no todos las tienen, debería ser estrechos colaboradores de los profesionales de esta rama de la medicina, de la salud y del deporte.

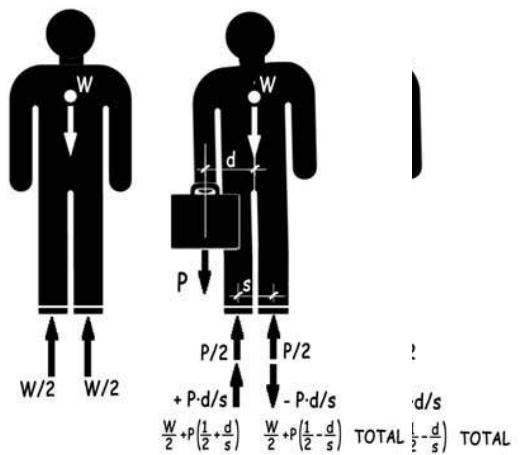
El ser humano nace con el sentido de equilibrio genéticamente instalado. El concepto de equilibrio debería presidir todo intento de comprender y de mostrar la estructura de su cuerpo. Equilibrio que, solo excepcionalmente, suele ser estático. Porque el cuerpo humano es esencialmente dinámico. Se desplace o no sobre una bicicleta.

Desde la perspectiva del equilibrio, que ha presidido muchas de las reflexiones anteriores, me permito para concluir este apartado unos breves comentarios:

- Al representar en croquis las fuerzas que actúan sobre una parte del cuerpo, es muy importante y esclarecedor asegurar que dichas fuerzas están en equilibrio.
- El conocimiento de las reacciones de apoyo del ser humano, se encuentre erguido, tumbado o montado en una bicicleta, es un instrumento de análisis valiosísimo. Si, por ejemplo, una persona que pesa W , puesta en pie, sostiene una bolsa de peso P en una

de sus manos, las reacciones de apoyo, obviamente, cambiarán en relación con las que existían antes de levantar la bolsa del suelo. El peso P "ascenderá" por el brazo hasta los hombros para descender después, a través de la estructura del cuerpo, hasta llegar al suelo. En la transferencia de esta carga interviene (con excepción del brazo no cargado) la totalidad del cuerpo. En cualquier movimiento o esfuerzo interviene una gran parte o la totalidad de la estructura corporal.

- La estructura del cuerpo humano está concebida para que los huesos trabajen preferentemente a compresión y para que cuando esté en reposo los músculos no trabajen o lo hagan mínimamente. Por ello las fuerzas que deben transmitir las articulaciones deben llegar bien centradas, para que tensiones de transferencia sean las más reducidas posibles. Algunas de las patologías que padecen muchas personas pueden ser consecuencia de que en su cuerpo estos preceptos no se cumplen y que, por una u otra razón, en el itinerario que siguen las cargas a través del esqueleto aparecen quiebros, que hacen trabajar excesivamente a los músculos y a los tendones, y obligan, también, a esfuerzos indebidos en las articulaciones.
- Conocer las reacciones de apoyo del cuerpo humano es muy importante. Y es perfectamente asequible. La complejidad de la estructura de los pies confirma dicha importancia. Lo que ocurre en la frontera entre los pies y el suelo, es también determinante. De eso saben mucho, sin duda, los ingenieros especializados en calzados y pavimentos deportivos.
- El mundo del deporte es un campo de experimentación excepcional. Comprender el equilibrio dinámico de las fuerzas que actúan sobre el cuerpo de un corredor de fondo, de un velocista, de un saltador de pértiga, de un ciclista, o de tantos otros, ayudará a comprender mejor el cuerpo de cualquier ser humano, lo que contribuirá a su salud y bienestar.
- Analizar el comportamiento del cuerpo de un ser humano debería ser una ciencia cuando se enseña y un arte cuando se practica. Estamos lejos de haber conseguido lo primero y los hay que parecen haber logrado lo segundo. El comportamiento del cuerpo humano no se puede calcular, pero se puede sentir. Hay algunos admirables médicos, fisioterapeutas de una u otra rama, osteópatas, y quizás sobre todo, maestros de yoga y disciplinas afines, que apoyándose en la sabiduría acumulada a lo largo de siglos, parecen comprender y sentir el cuerpo humano. Y no puede ser casualidad que Moshe Feldenkrais fuese físico nuclear de profesión. Porque comprender ayuda a sentir. Y comprender es una aspiración que podría estar al alcance de muchos.



10. LA ENERGÍA DEL CICLISTA



¿Cuánta energía necesita un ciclista para mover su bicicleta? ¿Cómo genera su cuerpo la energía necesaria? La física newtoniana aporta la respuesta a la primera pregunta. Contestar a la segunda, requiere una incursión, siquiera muy somera, por los dominios de la bioquímica. Pero además, una reflexión sobre la energía reclama la ayuda de las dos leyes fundamentales de la termodinámica. Porque están en juego los conceptos de trabajo, potencia y energía y asoma entre líneas el sutil concepto de entropía, tan frecuentemente citado y tan escasamente comprendido.

En lo que sigue, he pretendido, simplemente, recuperar la memoria sobre algunas cuestiones de cultura general, relacionadas con la química de la vida, que muchos hemos sabido alguna vez y que ninguno deberíamos haber olvidado del todo.

Ya se ha recordado en el apartado 4, que el ciclista para desplazarse con su montura realiza un trabajo que, genéricamente, se define como la fuerza que actúa sobre un cuerpo por la distancia que éste recorre en la dirección de la fuerza. Las unidades que habitualmente se utilizan para cuantificar el trabajo o la energía son el julio, el kilowatio-hora y la kilocaloría.

La caloría es la energía necesaria para elevar 1 grado centígrado la temperatura de 1 gramo de agua. El inglés James Prescott Joules (1818-1889), que trabajó como director de una fábrica de cerveza, y fue científico en sus ratos libres, demostró con un sencillo e ingenioso experimento que la caloría equivale a 4,186 julios, denominación que en castellano proviene del apellido distorsionado de nuestro admirado científico aficionado. La relación entre las tres unidades más habituales de trabajo y energía, son

$$1 \text{ kilowatio-hora} = 1.000 \text{ julios/segundo} \cdot 3.600 \text{ segundos} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ julios}$$

$$1 \text{ kilocaloría} = 4.186 \text{ julios} = 4.186 \text{ julios} \times \frac{1 \text{ kWh}}{3,6 \times 10^6 \text{ julios}} = 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ kWh}$$

La potencia, por su parte, es el trabajo o energía por unidad de tiempo y suele medirse en watios (julios/segundo) o en alguno de sus múltiplos, como el kilovatio (10^3 W) o el megavatio (10^6 W). Aunque también es habitual, en el mundo del motor, utilizar el caballo de vapor, CV ó HP (horse-power en la terminología anglosajona), siendo la equivalencia

$$1\text{CV} \approx 736 \text{ watios}$$

La denominación de watio proviene del apellido del ingeniero inglés, James Watt (1736-1819), que en la segunda mitad del siglo XVIII acabó de poner a punto la máquina de vapor, que al transformar la energía calorífica en energía mecánica, hizo posible la sustitución de la tracción animal por la mucho más eficiente tracción mecánica. La invención de la máquina de vapor fue capital para impulsar la revolución industrial

inglesa, que fue contemporánea de la revolución francesa, y que, de otra manera, más para bien que para mal, aunque de todo haya habido y haya en la viña del Señor, contribuyó a transformar el mundo.

El cuerpo humano es una máquina, fascinante y compleja, que transforma la energía química, que proviene de los alimentos con los que se nutre, en la energía mecánica que, en parte, utiliza el cuerpo humano para mover sus músculos y, en mucha mayor medida, se hace calor, en coherencia con el 1^{er} principio de la termodinámica.

Los complejísimos procesos metabólicos que en los seres humanos hacen posible el movimiento, y por tanto, el milagro de la vida, están muy estudiados y se conocen con gran precisión. Aquí recordaremos solamente, somera e imprecisamente, algunos aspectos de dichos procesos.

El “1er Principio de la Termodinámica” nos dice que la variación de energía interna de un sistema, el del cuerpo del ciclista y su entorno ambiental, es igual al trabajo externo que realiza más el calor que genera

$$\Delta E = \text{calor generado}$$

$$\Delta E = W + Q$$

W = trabajo externo realizado

Q = variación de la energía interna

Lo que nos viene a recordar, también, que “la energía ni se crea ni se destruye, solo se transforma”.

Desde una perspectiva energética al cuerpo humano se le puede considerar muy poco eficiente. Sólo un 24% aproximadamente, de la energía que le aportan los alimentos se pueden convertir en trabajo mecánico. Una buena parte del resto se dedica al mantenimiento de las funciones fisiológicas, asociadas al metabolismo basal: respiración, circulación sanguínea, digestión, excreciones, mantenimiento de la temperatura corporal, crecimiento, reconstrucción, etc.

La energía solo se transforma, pero algunas formas de energía pueden ser más aprovechables que otras. De la posibilidad o imposibilidad de hacer un uso útil de la energía trata el 2º Principio de la termodinámica, que nació años después del primero, para aportar las respuestas que éste no podía dar. Tuvo diversos enunciados. Como los que formularon Kelvin, Clausius o Carnot, orientados al análisis del rendimiento de los motores de vapor y térmicos.

Con carácter más general, el enunciado del 2º Principio nos dice que durante un proceso irreversible la entropía total de un sistema y su entorno aumenta siempre. La entropía es una función termodinámica que mide el desorden de un sistema. La entropía S –como la presión, V , la temperatura, T , y la energía interna, E_{int} – es una función de estado de un sistema: el cambio de un estado inicial a otro final no depende del proceso, tan solo

cuenta cuál es el origen y cuál es el estado final. Por ello, en la entropía como en la energía potencial y cinética, lo que es importante, es lo que cambia y no los valores absolutos. Se puede definir, dicho cambio diferencial, con referencia al calor, Q_{rev} , absorbido en un proceso reversible, mediante la expresión

$$dS = \frac{dQ_{rev}}{T}$$

En un proceso irreversible la energía también se conserva, pero parte de ella no está disponible para hacer trabajo útil.

Consideremos un bloque de masa, m , que colocado a una altura h del suelo acumula una energía potencial mgh que podría transformarse en trabajo útil. Pero si el bloque cae y se produce un choque totalmente inelástico contra el suelo, se habrá perdido dicha posibilidad. Con el impacto habrá aumentado la energía interna de las moléculas que conforman el bloque de masa m . La energía perdida, mgh , sería igual a $T \cdot \Delta S$, siendo ΔS el aumento de la entropía del sistema y T la temperatura absoluta en grados Kelvin (recordamos que -273°C es la temperatura del cero absoluto, y por tanto una temperatura de 20°C equivale a 293K). Si la masa fuese de 10 kg, la altura de la caída de 1 m y, como consecuencia del choque, la temperatura inicial del sistema (20°C) no se modificase prácticamente la entropía habría aumentado en el valor

$$\Delta S = \frac{mgh}{T} = \frac{10 \text{ kg} \cdot 9,8 \text{ m / s}^2 \cdot 1 \text{ m}}{293 \text{ K}} = \frac{98 \text{ julios}}{293 \text{ K}} = 0,33 \frac{\text{julios}}{\text{K}}$$

El ciclismo es obviamente un proceso irreversible. Como ya hemos comentado, solamente una parte de la energía que genera el cuerpo del ciclista, del orden del 24%, sirve para mover la bicicleta. Aunque no se debería considerar como energía inútil la que hace posible el funcionamiento de su cuerpo. En cualquier caso, es evidente que parte de la energía se convierte en el sudor que desprende el ciclista, y que se pierde también energía en los rozamientos de los componentes de la bicicleta que se mueven y en los que se producen entre las ruedas y el pavimento. Los ruidos y los susurros que acompañan al ciclista en su pedaleo es la música de la políglota entropía, su contribución al incremento del desorden del universo.

La energía necesaria para el movimiento de un ser humano, en general, y del cuerpo del ciclista, en particular, proviene de los nutrientes de los alimentos que consumimos:

- Los glucidos o hidratos de carbono, están especializados en el aporte energético. La glucosa, su forma más simple, es, por cierto, la única forma de energía que aceptan nuestros cerebros.
- Los lípidos o grasas, además de ser la gran fuente de energía del cuerpo humano, contribuyen a la creación y mantenimiento de las membranas celulares y de los tejidos adiposos en los que se almacenan.

- Las proteínas pueden aportar también energía, pero tienen otras misiones fundamentales de naturaleza estructural y metabólica.
- Los minerales, las vitaminas, y el agua que nos proporcionan los alimentos, no contribuyen directamente al aporte de energía, pero regulan los procesos metabólicos –catabólicos de descomposición y anabólicos de síntesis– del organismo.

Como los diferentes tipos de nutrientes tienen misiones específicas o complementarias, una dieta equilibrada debería aportar suficientes cantidades de unos y otros. Algunas recomendaciones dietéticas apuntan a porcentajes del 50% ó 60% de hidratos de carbono, del orden del 30 al 35% de grasas y de 10 al 15% de proteínas.

Los hidratos de carbono $[C_6(H_2O)_6]_n$, con $n = 1$ para los monosacáridos como la glucosa o la fructosa, $n = 2$ para los disacáridos como la sacarosa o la lactosa y con valores de n mucho más elevados en los polisacáridos, como el glucógeno o el almidón, se encuentran en los cereales, legumbres, leche, frutas y verduras y en los dulces que consumimos.

Los lípidos –triglicéridos y ácidos grasos– son compuestos orgánicos insolubles en agua, constituidos por C, H, O. Los proporcionan la mantequilla, el aceite, la carne, el pescado graso, los huevos y los productos lácteos.

Las proteínas están constituidas por aminoácidos muy diversos, con presencia del nitrógeno en proporciones del 16%. Son suministrados, en proporciones muy variables, por la carne, el pescado, los quesos, la leche, los huevos, los cereales y las legumbres y por las frutas y verduras.

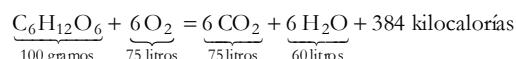
A modo de referencia, se pueden recordar los aportes de kilocalorías que proporcionan 100 gramos de algunos alimentos (ver Tabla adjunta).

La energía que nos aportan los alimentos que consumimos no suelen necesitarse hasta algún tiempo después de haberlos ingerido. Por ello, el cuerpo humano, la almacena en forma de energía potencial química. Como ocurre, en otro contexto, con las baterías que alimentan los motores eléctricos. O como sucede, de otra manera, con la energía acumulada en el agua de los embalses asociados a centrales hidroeléctricas.

En los procesos aeróbicos –los más habituales en los glúidos y los únicos que pueden utilizar los lípidos y las proteínas– las transformaciones metabólicas que movilizan los músculos, se realizan con la colaboración imprescindible del oxígeno contenido en el aire que respiramos. La energía proveniente de los glúidos se puede activar, también, mediante procesos anaeróbicos que no utilizan el oxígeno proveniente de la respiración porque para su transporte y asimilación por las fibras musculares se requiere un tiempo del que no se dispone. Ni las urgencias que demandan algunos movimientos musculares, casi instantáneos, ni las elevadas potencias que puntualmente requieren algunos deportes de alta competición, son compatibles con los sosegados procesos aeróbicos, que son los más habituales tanto en el deporte como en la vida normal, y a los que nos referiremos, en primer lugar.

ALIMENTO	KCAL (100 g)
ALUBIAS	300
CARNE MAGRA	100-150
CHOCOLATE	500-600
HÍGADO	100-150
HUEVOS	100-150
LECHE	50-100
MAYONESA	750
MERLUZA	50-100
NARANJA	30-40
QUESO	300-400
PAN	200
PATATA	100
TOCINO	700

El oxígeno que porta la sangre y proviene del aire respirado interviene en la pausada transformación de la energía química almacenada en el cuerpo, en calor y en el trabajo que hace contraer los músculos. A modo de ejemplo, la combinación de 100 gramos de glucosa ($C_6H_{12}O_6$) con 75 litros de oxígeno (O_2) produce otros tantos litros del famoso CO_2 –de los que la respiración animal es un productor destacado– 60 litros de agua (H_2O), y libera 384 kilocalorías de energía.



Un indicador muy valioso de la energía que se genera en estos procesos es el denominado “equivalente calorífico del oxígeno”. En el caso analizado de la glucosa, las kilocalorías producidas por litro de oxígeno inhalado serían:

$$\frac{384 \text{ kilocalorías}}{75 \text{ litros de oxígeno}} = 5,1 \text{ kilocalorías/litro de } O_2$$

Este índice es análogo al que se produce en la transformación de grasas y proteínas, según se muestra en el cuadro siguiente en el que figura, además, la energía asociada a cada gramo de estas substancias. Obsérvese que las grasas, que no contienen agua y están, por ello, muy concentradas, son, energéticamente, muy eficientes: generan 9,3 kilocalorías por gramo frente a las poco más de 4 de las proteínas y de los hidratos de carbono.

ALIMENTO	EQUIVALENTE CALORÍFICO DE OXÍGENO (KILOCALORÍAS/LITRO DE O_2)	ENERGÍA MEDIA METABOLIZABLE POR GRAMO (KCAL/GRAMO)
Hidratos de carbono	5,1	4,1
Grasas	4,8	9,3
Proteínas	4,5	4,2

En realidad, las proteínas generan mayores niveles de energía pero, al contrario de lo que sucede con las grasas y los hidratos de carbono, pierden una parte, del orden de 1,25 kcal/g que están asociados con el amoníaco y la urea que se elimina por la orina.

Son incontables las investigaciones que se han llevado a cabo para estimar el volumen de oxígeno, VO_2 , que consumen los seres humanos para generar la energía que necesitan según el tipo de actividad al que se dediquen. En el cuadro adjunto se inducen algunos datos de referencia. En la última columna se ha indicado la potencia útil disponible, también en vatios, supuesto que el rendimiento de su organismo sea del 24%.

TIPO DE ACTIVIDAD	CONSUMO DE OXÍGENO	POTENCIA METABÓLICA PARA UNA PERSONA DE 65KG	POTENCIA ÚTIL (P = 24%)
	$\frac{1}{m} \left(\frac{dV_O_2}{dt} \right)$ [mililitros/minuto/kg]	(kcal/h)	(watos)
Reposo	3,5	70	80
Ligera	10 *	200 *	230
Moderada	20	400	460
Intensa	30	600	700
Extrema	70	1.400	1.627

$$(* 10 \cdot 10^{-3} \frac{\text{litros}}{\text{minuto} \cdot \text{kg}} \cdot 60 \frac{\text{minutos}}{\text{hora}} \cdot 65 \text{ kg} \cdot 5,1 \frac{\text{kcal}}{\text{litro}} = 198,9 \text{ kcal / h} \simeq 200 \text{ kcal / h})$$

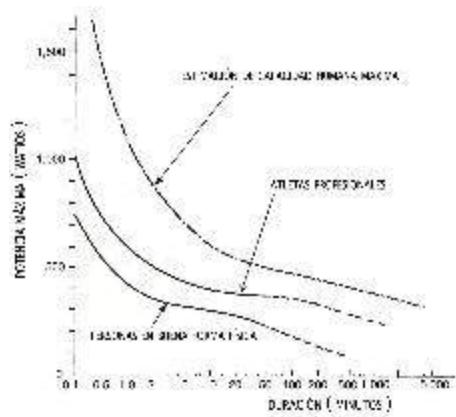
El oxígeno es indispensable para movilizar los músculos que permiten a los pulmones inhalar el aire que respiramos y al corazón bombear la sangre que lo transporta. El oxígeno es el soporte indispensable de la vida. Un ser humano puede vivir unos días sin beber y algunas semanas sin comer, pero tan sólo unos escasos minutos sin respirar.

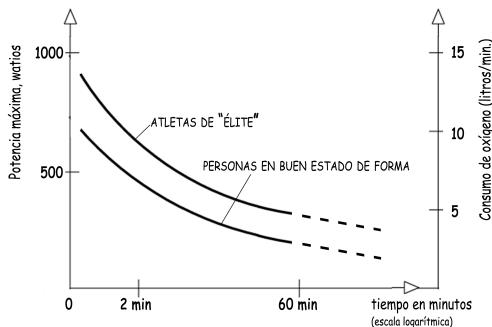
En coherencia con los valores del cuadro, el consumo de oxígeno de un ciclista profesional, en una exigente competición y durante un tiempo limitado, podría alcanzar los 70 ml/min/kg, lo que le permitiría generar una potencia corporal de 1.400 kcal/hora (1.627 W) y ejercer sobre la bicicleta una potencia útil de $0,24 \cdot 1.627 \simeq 390$ W. Como contraste una persona mientras duerme –siempre que no se trate del republicano “sueño eterno”– necesitaría 20 veces menos de oxígeno, su potencia metabólica se reduciría en idéntica proporción hasta 70 kcal/h (80 W), limitándose su potencia útil a 19 W aproximadamente.

Un varón de complejión normal que duerma 8 horas y dedique las 16 restantes a actividades sedentarias, necesitaría diariamente entre 2.000 y 3.000 kcal de las que unas 1.700 corresponden a las exigencias del metabolismo basal.

Por otra parte, la máxima potencia energética que puede generar el cuerpo de un atleta depende del tiempo que dure el esfuerzo que ha de realizar. Los especialistas de la NASA, que han investigado a fondo el comportamiento del cuerpo humano, han establecido unos rangos de valores en función de la duración del ejercicio para personas en buena forma física y para atletas profesionales bien preparados. En el gráfico adjunto, el tiempo en abcisas se representa a escala logarítmica.

Cuando batieron el récord de la hora, los registros de potencia de pedaleo de Eddy Merckx, de nuestro Miguel Indurain, o de Chris Boardman, indicaban valores de 450 a





500 W, a lo que corresponderían fuerzas aerodinámicas y de rozamiento del orden de los 30 N para velocidades de desplazamiento próximas a los 15 m/s ($30 \text{ N} \cdot 15 \text{ m/s} = 450 \text{ W}$). En otros deportes más explosivos, la potencia necesaria durante los escasos segundos o décimas de segundos que puede durar el esfuerzo, puede alcanzar los 4.000 watos, que serían de origen an aeróbico.

Se puede representar también la relación existente entre la velocidad de la bicicleta y la potencia metabólica que necesita generar el cuerpo del ciclista para desplazarse, en posición inclinada sobre la bicicleta o en una posición erguida, menos eficiente.

Lógicamente, el $\text{VO}_{2,\text{máx}}$ será específico para cada persona, y dependerá de su capacidad pulmonar, de la eficiencia de su sistema cardiovascular para captar oxígeno y transportarlo por el fluido sanguíneo, así como por la eficacia de los tejidos musculares para almacenar y utilizar el oxígeno aportado por la sangre.

Una fórmula para estimar, en una primera aproximación, el valor de $\text{VO}_{2,\text{máx}}$, en mililitros/min·kg, para un varón de t años de edad y constitución normal podría ser:

$$\text{VO}_{2,\text{max}} = 50 - 0,4(t - 25)$$

En atletas bien entrenados estos valores pueden ser muy superiores, dependiendo, por otra parte, del tipo de deporte practicado. Los índices $\text{VO}_{2,\text{máx}}$ de muchos ciclistas pueden superar los 70. Miguel Indurain en sus mejores tiempos parece que alcanzaba los 88 y Greg Lemond, menos corpulento, superaba los 92.

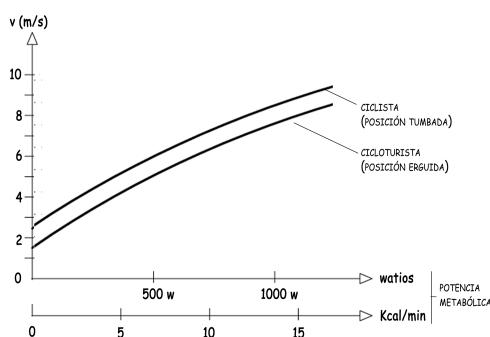
No es éste lugar inadecuado para recordar, por otra parte, que la bicicleta, con el ciclista como motor, está considerada como uno de los sistemas con mayor eficiencia energética. Estimemos, en efecto, la energía que necesitaría un ciclista de 65 kilogramos de masa para recorrer en unos 70 s la distancia de 1 km a la velocidad de 14 m/s. Las fuerzas aerodinámicas y de rozamiento, opuestas al movimiento podrían valer 30 N aproximadamente, y la potencia requerida será, por consiguiente $W = F \cdot v = 30 \text{ N} \cdot 14 \text{ m/s} = 420 \text{ W}$. La energía que habría necesitado por gramo de masa sería

$$\frac{420 \text{ julios/s} \cdot 70 \text{ s/km}}{65.000 \text{ gr}} = 0,45 \text{ julios/km} \cdot \text{gr}$$

Como contraste, a un caminante le podría corresponder un índice entre tres y cuatro veces mayor

$$\frac{100 \text{ watos} \cdot 1.000 \text{ s/km}}{65.000 \text{ gr}} = 1,54 \text{ julios/km} \cdot \text{gr}$$

Cifras también superiores parecen resultar para una vaca, un caballo, o incluso para un automóvil. En alguna publicación se atribuye a los salmones índices de 4, a los conejos de 40, a las abejas de 130 y a los ratones, menos mal, superiores a 400.



Al recordar, por otra parte, estos valores que se suelen citar para entronizar la bicicleta como medio de transporte, tampoco se debe olvidar que la tracción animal, como productora de energía, es muy poco eficiente.

Hace pocos años, en la oscura ciudad de Barcelona, se instalaron algunos artificiosos árboles navideños, revestidos de bombillas, que se encendían con la energía que generaban los ciudadanos que se prestaban a mover los pedales de unas bicicletas estáticas. La ocurrencia no produjo, darse está, los efectos que pretendieron sus desnortados promotores y en años posteriores no se volvió a repetir. Pero no está de más recordarlo aquí, porque la potencia suministrada por los ingenuos y esforzados ciudadanos que se prestaron a dar a los pedales, pudo ser de unos 100 vatios. Si suponemos que se trataba de un mileurista, al que podríamos asignar un coste humano de 10 €/hora (imaginemos lo que hubiese supuesto la participación de un controlador aéreo...), el precio del kilowatio hora generado sería de

$$\frac{10 \text{ euros}/\text{h}}{0,100 \text{ kW}} = 100 \text{ euros / kWh}$$

Este coste es mil veces superior al que supone la producción de la energía en centrales hidroeléctricas –las más eficientes–, térmicas, nucleares, eólicas y es muy superior, indudoso, a la generada en parques fotovoltaicos o solares. Aquella ocurrencia ecologista era, sin saberlo y sin desearlo desde luego sus promotores, un merecido homenaje a la ingeniería.

En el mismo sentido conviene observar, también, que el extraordinario esfuerzo que realiza un ciclista profesional en alguna etapa contrarreloj de las que deciden un Tour de Francia, y duran una hora, supone un consumo de energía del orden de $400 \text{ W} \cdot 1 \text{ h} = 0,40 \text{ kWh}$. La que se necesita para tener encendidas 4 bombillas de 100 vatios durante 1 hora, con una repercusión en la factura de la luz inferior a 0,04 €.

Análogamente, la ascensión, en un muy meritario tiempo de media hora 1.800 s, de una pendiente que salva un desnivel de 1.000 metros, por un ciclista que con su bicicleta tuviese 70 kg de masa, supondría (sin contar las pérdidas por rozamiento) un consumo energético del orden de $70 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2 \cdot 1.000 \text{ m} = 700.000 \text{ julios}$, esto es, una potencia de

$$\frac{700.000 \text{ julios}}{1.800 \text{ s}} = 388 \text{ vatios}.$$

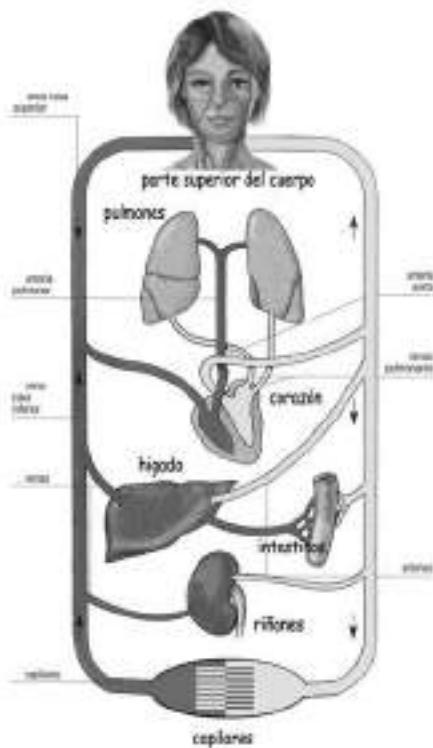
La energía consumida en la ascensión sería, por tanto,

$$0,388 \text{ kW} \cdot 0,5 \text{ horas} \approx 0,20 \text{ kWh}$$

y el coste de la energía eléctrica correspondiente sería inferior a 2 céntimos de euro.

En los próximos párrafos, con el corazón en la mano, recordaremos –es cultura general– cuál es su tan bien conocida y poco romántica misión principal y cuáles son algunas de sus características. Y nos referiremos también a la sangre que es su razón de ser.





El cuerpo de un varón contiene unos 75 mililitros de sangre por kilogramo, entre 5 y 6 litros en total. Un 15% menos el de las mujeres. Su corazón, que tiene unos 260 gramos de masa y el tamaño de un puño cerrado, hace circular la sangre por su organismo. Late unas 72 veces por minuto cuando está sosegado, y en cada latido impulsa unos 100 mililitros, de manera que, en menos de sesenta segundos, la totalidad de la sangre recorre por completo el cuerpo humano.

El corazón distribuye la sangre al organismo, por dos circuitos separados, y está dotado, para ello, de dos aurículas y, separadas por sendas válvulas unidireccionales, de dos ventrículos. La aurícula izquierda recibe la sangre oxigenada proveniente de los pulmones. De allí pasa al ventrículo del mismo lado que al contraerse en el movimiento de sistole, la impulsa a través de la aorta a las arterias que la difunden por todo el organismo. La aurícula derecha, a través de las venas cava superior e inferior, recibe la sangre pobre en oxígeno, y en su diástole, la impulsa hacia los pulmones, donde se nutre de oxígeno antes de volver al corazón para iniciar un nuevo recorrido por las arterias, y capilares que la distribuyen por los tejidos corporales.

Cada pulsación, cuando el ritmo es de 72 por minuto, requiere un tiempo de unos 0,8 segundos, la mitad aproximadamente para la sistole (0,1 segundos para la recepción de la sangre y 0,3 para su expulsión) y los 0,4 segundos siguientes para la diástole. La sistole provoca una presión en las paredes arteriales del orden de 120 mm de mercurio (Hg) que en la diástole se reduce a 80 mm. Casi todo el mundo sabe que cuando nos medimos la tensión, el rango de normalidad, en general, se sitúa entre valores de 12 y 8, con variaciones por arriba, en individuos hipertensos, y por abajo, en los hipotensos, que pueden ser manifestación de posibles patologías. Menos gente recuerda que realmente dichos valores de la presión arterial están expresados en decenas de milímetros de mercurio. El científico italiano Evangelista Torricelli, que fue discípulo de Galileo y murió en Florencia en 1647, en sus experimentos pioneros utilizó un metal líquido, el mercurio, que es 13,6 veces más denso que el agua y mucho más sensible a las variaciones de temperatura que el vidrio. Por eso, aún hoy los termómetros con los que estamos más familiarizados constan de un tubo graduado de cristal que encierra una columna de mercurio, con su característica tonalidad plateada.

La presión sanguínea de 12, corresponde a la producida por una columna de mercurio de 120 milímetros de altura y es equivalente a la que ejercería una de agua (o de sangre que tiene análoga densidad) de $13,6 \cdot 120 = 1.630$ mm.

La presión arterial no es la misma en cualquier lugar del cuerpo. Así, en los pies de una persona erguida, a la presión generada por la sistole del corazón, situado, por ejemplo, a 1,20 m. de altura, habría que añadir la creada por el propio peso de la sangre en las arterias, y podría alcanzar la correspondiente a $1.630 + 1.200 = 2.830$ mm de altura equivalente de agua. Por esta razón se suele medir la tensión arterial en la zona del antebrazo próximo al codo que se encuentra a la altura del corazón y en situación de reposo. Es éste también el motivo por el que se recomienda que el cuerpo no pase

bruscamente desde una posición tumbada a otra erguida, porque la sangre para acceder al cerebro necesitará un mínimo de tiempo.

El ritmo de 72 pulsaciones por minuto en un cuerpo sometido a actividades ligeras corresponde, como hemos visto en un cuadro anterior, a un consumo de oxígeno de unos 10 ml/min·kg, y a una potencia metabólica de unos 230 W. Cuando se intensifica el esfuerzo, dichos valores se incrementan más o menos linealmente y alcanzan, por ejemplo, consumos de O₂ de 30 ml/min·kg para potencias de unos 700 W que pasan de los 1.600 cuando el consumo de O₂ alcanza 70 ml/min·kg.

Para alcanzar estos últimos niveles de esfuerzo las pulsaciones del corazón se multiplican también casi por tres y pueden alcanzar valores máximos que, en primera aproximación, se pueden estimar en 220 menos la edad de la persona en años: a un joven cincuentón, le corresponderían unas 170 pulsaciones/minuto. Buen lugar éste para recordar, también, que "el corazón que vive poco, late deprisa". Lo que ocurre, por ejemplo, con las aves. Este incremento de pulsaciones pretende, lógicamente, que el corazón bombee más sangre al sistema arterial y el organismo disponga de más oxígeno para transformar aeróbicamente la energía química almacenada en energía mecánica. Para lograr este impresionable objetivo, el ritmo de la respiración también se acelera, triplicándose, como los latidos del corazón, en relación con el habitual de 15 respiraciones por minuto.

La sangre es el fluido vital. Transporta el oxígeno y los nutrientes que necesita el cuerpo humano, así como las sustancias necesarias para los metabolismos celulares. El 55% de la sangre está constituida por plasma, que tiene un 90% de agua, un 8% de proteínas y electrolitos diversos. Envueltos por el plasma se encuentran tres corpúsculos en suspensión: los glóbulos rojos (denominados también hematíes o eritrocitos) que son los encargados de transportar el oxígeno, los glóbulos blancos, o leucocitos, componentes esenciales del sistema inmunitario y las plaquetas que colaboran en los procesos de coagulación sanguínea. En cada mm³ de la sangre de un varón existen entre 4,4 y 5,4 millones de glóbulos rojos (un 10% menos en las mujeres), de 4.000 a 10.000 glóbulos blancos y 200.000 a 400.000 plaquetas.

Los glóbulos rojos se forman fundamentalmente en las médulas óseas. Tardan 4 ó 5 días en hacerlo y viven unos 120 días. Tienen geometría de lentilla biconcava entre 6 y 9 micras (10^{-6} m) de diámetro, para favorecer los intercambios gaseosos a través de su superficie, y disponer de la deformabilidad que requiere su tortuoso viaje por conductos circulatorios que a veces no sobrepasan las pocas micras de diámetro. La hemoglobina es una proteína que se encuentra en el interior de los glóbulos rojos, en una proporción de unos 15 gramos por cada 100 mililitros de sangre. Se combina con el oxígeno formando la oxihemoglobina que fluye por la sangre para, tras llegar a su destino, disociarse de nuevo liberando el oxígeno transportado. La hemoglobina tiene la geometría aproximada de una

esfera de 5,5 nanómetros ($5,5 \cdot 10^{-9}$ m) de diámetro. A la salida de los pulmones, se encuentra saturada al 96% de O₂, mientras que cuando retorna sólo lo está al 64%: sólo un tercio del oxígeno que transporta la sangre se queda en los tejidos corporales, unos 6,5 ml de O₂ por cada 100 ml de sangre. La hemoglobina, cuando retorna con la sangre, transporta también el hidrógeno, H₂, y el CO₂, generados en los procesos metabólicos, hasta los pulmones y los riñones que los eliminan por la respiración y por la orina.

La esencial importancia de la sangre y del oxígeno en el comportamiento de un cuerpo humano justifica que los entrenamientos de los deportistas estén orientados a incrementar la capacidad impulsiva de su corazón, aumentar los porcentajes de oxígeno que pueda incorporar al sistema sanguíneo, mejorar la eficiencia en su captación y optimizar los procesos de transformación metabólicos para poder disponer de mayor energía y poder utilizarla más rápidamente. Con tal finalidad se suelen programar ejercicios que provoquen diferentes niveles de pulsaciones, durante períodos determinados seguidos de otros de descanso. En la preparación de atletas para la alta competición, la programación de tandas de entrenamiento y el seguimiento de resultados, es lógicamente fundamental. Y la colaboración de los profesionales de la preparación física esencial. Contribuirán a mejorar rendimientos, minimizar el riesgo de lesiones, y reducir los tiempos de recuperación si llegan a producirse. El deporte, por otra parte, realizado en forma moderada y controlada, puede ser una actividad fundamental para preservar la salud y mejorar el bienestar de quienes los practican. Aunque el cuerpo humano sea un gran desconocido, induso para quienes habitamos en él, los progresos científicos han hecho posible que aumente notablemente nuestra esperanza de vida. Vivimos más años y podemos vivirlos saludablemente para alcanzar un objetivo que podría ser deseable para todos: morir a edad muy avanzada, llenos de salud. Conocer nuestro cuerpo y ejercitarnos sensatamente nos ayudará a lograrlo.

Hasta aquí este relato se ha referido exclusivamente al metabolismo aeróbico que utiliza solamente una pequeña proporción del oxígeno contenido en el aire que respiramos. El O₂ ocupa el 20% del volumen del aire atmosférico, pero solamente 1 por cada 24 litros del aire inspirado que llega a los pulmones es utilizado para transformar la energía química que se almacena en los tejidos musculares en la energía mecánica que contrae los músculos y hace posible el movimiento del cuerpo humano. Para que tal cosa ocurra el ritmo al que el oxígeno llega a las fibras musculares, a través de la sangre, debe coincidir con el caudal que aquéllas necesitan para poder contraerse. Y esto sólo puede suceder cuando los esfuerzos son de moderada intensidad.

Los glúcidios almacenados en el cuerpo humano permite un mecanismo alternativo anaeróbico, que no utiliza el oxígeno que proviene del flujo sanguíneo, para generar la energía que necesitan los esfuerzos puntuales, e intensos y para añadir también energía a

la que más moderadamente se puede obtener de los metabolismos aeróbicos de los propios glúcidos, en mucha mayor medida de los lípidos y, en proporciones menores, de las proteínas incrementándose así la potencia total que es posible alcanzar.

En todo caso, provenga la energía de los metabolismos aeróbicos de glúcidos, lípidos o proteínas o de los anaeróbicos alternativos que son exclusivos de los hidratos de carbono, la única sustancia química que provoca realmente el acortamiento de las fibras musculares es el adenosintrifosfato ó ATP. Las fibras musculares almacenan pequeñas cantidades de dicha sustancia, que se pueden utilizar instantáneamente, al no necesitar el oxígeno externo transportado, y que son suficientes para producir esfuerzos de muy corta duración, unos 2 segundos, y de muy alta intensidad. Las fibras musculares almacenan también pequeñas cantidades de fosfocreatina, PC_r, sustancia que puede ser rápidamente metabolizada para formar ATP y permite ampliar en otros 10 segundos aproximadamente el periodo de intensa actividad muscular anaeróbica.

Los músculos corporales deben regenerar constantemente las reservas agotadas de ATP, porque en otro caso no podrían contraerse y se tornarían rígidos: es el “rigor mortis” que se aprecia en un cuerpo sin vida. La cantidad total de ATP de la que dispone el cuerpo humano es muy pequeña. Pero la cantidad que necesita para sus actividades musculares diarias es muchísimo mayor. Una persona con actividades sedentarias necesita renovar sus reservas de ATP centenares de veces al día.

La mayor parte del oxígeno que almacena un músculo, y que le permite realizar actividades anaeróbicas, se encuentra en la mioglobina, proteína de la familia de la hemoglobina, especializada en almacenar oxígeno en las fibras musculares. Si la carne de pollo, y la de otras aves de corral, es blanca es consecuencia de su sedentarismo: se esfuerzan poco, y no necesitan mioglobina para almacenar el oxígeno. El color oscuro de la carne de la perdiz o del faisán, del jabalí, del venado, y de la caza en general, es debido por el contrario a su “talante nómada” que les exige una intensa actividad muscular, lo que a su vez explica la presencia abundante de mioglobina en sus músculos. Los conejos se mueven por espacios próximos a su madriguera y por ello su carne es más blanca que la de la liebre que utiliza territorios más abiertos y necesita más energía para desplazarse.

Cuando la movilidad de los músculos demanda más oxígeno que el directamente obtenido a través de los pulmones, toma “prestado” el almacenado en las mioglobinas de las fibras musculares, para devolverlo una vez concluido el ejercicio. Al hacerlo contrae una “deuda de oxígeno”. El atleta que jadea fuertemente al final de un ejercicio intenso, está comenzando a saldar así la deuda contraída, para lo que puede necesitar más o menos tiempo, porque según la intensidad del ejercicio, así será de importante la deuda que tendrá que pagar.

Profundicemos ahora, un poco más acerca de la contribución energética de los tres grupos de nutrientes que incorporamos al alimentarnos a nuestro organismo. Los lípidos o grasas corporales, son el mayor almacén de energía de que dispone el cuerpo humano. Son fundamentalmente triglicéridos, (una molécula de glicerol unida a tres moléculas de ácidos grasos), que para desplazarse por el fluido sanguíneo se unen a determinadas proteínas formando compuestos que son solubles en la sangre. Las grasas sólo se pueden utilizar aeróbicamente y, en general, como combustible de baja intensidad. Suministra la mayor parte de la energía que necesita el cuerpo cuando descansa o realiza actividades de baja o media intensidad. Necesitan un tiempo considerable para acceder a los músculos que los asimilan con relativa lentitud. Sin embargo, como el cuerpo humano almacena entre 50.000 y 200.000 kilocalorías de grasa –unos 135.000 como media–, puede proporcionar energía para cientos de horas de ejercicio continuado. No obstante, a pesar de su abundancia, los lípidos no cubren la demanda energética durante actividades musculares de gran intensidad. Y, de hecho, cuando las reservas de hidratos de carbono se han agotado, la oxidación de lípidos sólo aportan la energía necesaria para actividades asociadas al 50% del $\text{VO}_{2,\text{max}}$.

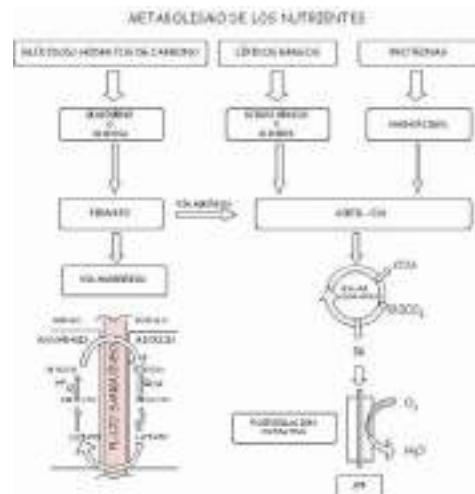
Las proteínas están constituidas por largos polímeros de aminoácidos. Si hacemos abstracción del agua, son la fracción celular más importante del organismo. Algunas tienen propiedades catalíticas y actúan como enzimas; otras pueden servir para funciones estructurales, como receptores de señales o para transportar sustancias específicas hacia el interior o el exterior de las células. Son las biomoléculas más versátiles. Pueden contribuir, asimismo, a la generación de energía. Para ello, tienen que eliminar primero el grupo amino. Esto ocurre en el hígado. El carbono “desaminado”, que no desanimado, puede convertirse en glucosa en el proceso denominado “gluconeogénesis”.

Los glúcidos o hidratos de carbono pueden adoptar la forma más simple de los monosacáridos, azúcar o glucosa, constituidos por seis átomos de carbono unidos a seis moléculas de agua $[\text{C}_6(\text{H}_2\text{O})_6]$. O se pueden almacenar como glucógeno en largas cadenas de polisacáridos $[\text{C}_6(\text{H}_2\text{O})_6]_n$ o en su forma parcialmente metabolizada que es el lactato.

Utilizados aeróbicamente la glucosa y el glucógeno almacenado en el cuerpo podrían proporcionar durante un par de horas la energía que se necesita para regenerar el ATP. Alternativamente, el glucógeno muscular metabolizado anaeróbicamente en un proceso que se conoce como “glicólisis” solamente aprovecha un 7% de su energía potencial y puede ser agotado en escasos minutos. El glucógeno se caracteriza también por su incapacidad para moverse entre fibras bien abastecidas y otras agotadas. La energía que contiene sólo puede ser transportada en forma de lactatos. Por ello, el lactato no es, como a menudo se le considera, el residuo indeseable, por ser origen de los calambres, agujetas y dolores musculares que limitan la intensidad del ejercicio de un atleta. El lactato, en la

gluconeogénesis que tiene lugar en el hígado, a donde llega a través del flujo sanguíneo, se vuelve a reconvertir en piruvato, que a su vez, se transforma en glucosa reiniciándose el ciclo metabólico. El lactato es, en consecuencia, un indicador muy valioso del comportamiento muscular y los “umbralés lácticos” indican los límites de la capacidad de generación de energía y los anuncia con dolores crecientes que acaban haciéndose intolerables. Con ejercicios de baja o media intensidad la concentración de lactato en la sangre puede ser de 5 milímoles/litro. En corredores de élite, y en carreras de una hora de duración, suele estar por debajo de 8 mM/l. En otras más cortas, de 10 a 15 minutos, pueden llegar a alcanzar los insoportables 15 mM/l.

A modo de síntesis, para concluir este apartado, podemos reflejar, en el cuadro siguiente y en grandes trazos, los procesos metabólicos aeróbicos que permiten la producción de ATP, a partir de los glúidos, lípidos y proteínas que ingerimos con los alimentos así como los anaeróbicos, con los que, alternativamente, los glúidos pueden regenerar más rápidamente las reservas de ATP.



En los procesos de digestión, las grandes moléculas de los glúidos, se dividen en moléculas de glucosa u otros monosacáridos; los lípidos se hidrolizan transformándose en ácidos gramos y glicerol; las proteínas, se hidrolizan también en sus 20 bases de aminoácidos constituyentes. A continuación, la mayoría de estas moléculas se convierten en el fragmento acetilo del acetil-CoA, cuya oxidación completa se produce primero en el ciclo del ácido nítrico, en el que se desprende la coenzima A y dos moléculas de CO₂ y después en la fosforilación oxidativa que conduce con la producción de ATP.

En el caso específico de la glucosa, por un complejo proceso que engloba diez reacciones químicas y que se denomina glicólisis, se producen piruvatos que, por vía aeróbica, se transforman en las moléculas de acetil-CoA. Cuando el aporte de oxígeno no es suficiente la glucosa se metaboliza anaeróbiamente en moléculas de lactato, que a su vez llegan por el fluido sanguíneo al hígado donde, en el proceso denominado "gluconeogénesis", se reconvierte en piruvato y, a continuación, en glucosa iniciándose de nuevo el ciclo que acaba con la regeneración de ATP que provoca la contracción de los músculos. Los valores medios de la energía almacenada (en kilocalorías) por los diferentes nutrientes en los músculos, en los tejidos adiposos y en el hígado de un adulto de unos 70 kg de masa corporal son los que se muestran en el cuadro siguiente:

	Glucosa o Glucógeno	Triglicéridos	Proteínas movilizables
Músculos	1.200	450	24.000
Tejidos adiposos	80	13.500	40
Hígado	400	450	400

Por otra parte, la velocidad máxima de producción de ATP, en milimoles* por segundo para una persona también de 70 kg con una masa muscular del 40%, son:

Fuente de energía	Velocidad de producción de ATP (mmol/s)
PCr	73,3
Conversión del glucógeno muscular en lactato	39,1
Conversión del glucógeno muscular en CO ₂	16,7
Conversión del glucógeno hepático en CO ₂	6,2
Conversión de los ácidos grasos del tejido adiposo en CO ₂	6,7

* Recordemos que el mol es la cantidad de sustancia que contiene el mismo número N_A, de entidades elementales (átomos, moléculas...) que 12 g de carbono, C-12 siendo N_A=6,02214199·10²³/mol, constante de Avogadro, que nos recuerda el nombre del científico italiano que vivió entre 1776 y 1856.

El ritmo de regeneración de las moléculas de ATP es más de 10 veces superior cuando el organismo utiliza la fosfo creatina, PC_r, que cuando recurre a la conversión de las grasas en CO₂ en los parsimoniosos catabolismos aeróbicos.

11. COLOFÓN

La bicicleta es una maravillosa estructura que se puede sentir aunque no se deje calcular. Desconocemos las cargas que pueden actuar sobre ella y que, además, van cambiando a cada instante. Aún supuestas unas cargas, no se pueden conocer las tensiones que ellas inducen. Jóvenes y sofisticados programas de ordenador nos pueden proporcionar una avalancha de cifras, de difícil digestión, y unas atractivas imágenes, que no son sino referencias de variaciones tensionales, y no verdades absolutas. Son las experiencias acumuladas a lo largo de muchos años y de millones de bicicletas utilizadas por innumerables ciclistas, las que aportan los conocimientos imprescindibles para establecer geometrías genéricas y definir dimensiones de cada uno de los componentes. Con la finalidad, naturalmente que las bicicletas puedan cumplir la misión para la que han sido creadas. Pero tampoco la definición de la funcionalidad de la bicicleta resulta evidente. ¿Para qué sirve? ¿Para facilitar la movilidad del usuario? ¿Pero, en todo caso, quién es el usuario? ¿Un ciudadano? ¿Un trabajador? ¿Un ciclista profesional? ¿Un deportista aficionado? ¿Por qué caminos ha de transitar? ¿Por algunos inexplorados de montaña o por senderos bien pavimentados que comparten con caminantes, camiones, coches o tractores? En todo caso, cada usuario es diferente, aunque existan, ciertamente, grupos afines. Y cada bici, aun siendo la misma, es diferente según quien la utilice porque cada uno la puede sentir de diferente manera.

La bicicleta no se calcula, se siente. Hay que reiterarlo. Aviso contra la “calculitis” esa enfermedad profesional tan peligrosa y tan extendida que podría ser, entre los ingenieros, el equivalente a la silicosis entre los mineros. Porque cuanto más se calcula menos se piensa. Y si no se piensa, no se siente. Aunque el sentir sea diferente del pensar.

Sentir la bicicleta. Un artefacto lleno de racionalidad pero lleno de sutilezas que nos oculta su alma. Su flexibilidad y su robustez son conceptos difíciles de cuantificar y, en todo caso, imposibles de caracterizar en toda su complejidad. ¿Y quién siente la bicicleta? No quienes las condiblen y establecen sus dimensiones, sino quienes hacen uso de ella. ¿Son, acaso, los músculos del ciclista los que llegan a sentirla? Ciertamente no, porque los músculos son intermediarios entre la bicicleta y el cerebro de quien la utiliza. Es al cerebro al que llegan todas las señales, el que las procesa, analiza y toma las decisiones adecuadas para ponerla y mantenerla en movimiento.

Las sutilezas de la bicicleta se manifiestan en cada uno de sus componentes y en el conjunto de todos ellos. El ciclista que tenga la sensibilidad bien despierta, podrá percibir la presión de los neumáticos, la deformabilidad de la llanta y de los radios que aportan al tiempo rigidez y flexibilidad a las ruedas. Se puede sentir la deformabilidad de la horquilla delantera, de la barra de dirección, de la potencia unida a manillares de geometrías tan

diversas, tan lógicas y, en cierto modo, tan inexplicables. Sobre el papel, los tubos que configuran su cuadro suelen estar, teóricamente, sobredimensionados. Pero sus dimensiones, aunque injustificables, están justificadas para quien siente la bicicleta. Como lo está la deformabilidad de vainas y tirantes de la parte posterior del cuadro, característica, al menos tan importante como su capacidad resistente. Deformabilidad que es difícil de establecer y que, sin embargo, se puede sentir. Como se sienten, los componentes que se prestan más a ello: los pedales y las bielas, los platos que se utilizan sin necesidad de ser vistos, los piñones que multiplican las rotaciones de los pedales y hacen girar las ruedas al ritmo deseado.

Las dimensiones y características de las ruedas. El rozamiento con el suelo. El estático y el, muy inferior, que se genera cuando las ruedas giran sin deslizar. Los contactos entre el hombre y la máquina. Los del sillín y las texturas de su piel que es también estructura. Y el tacto de las cintas y protectores de los manillares. Todo lo siente el ciclista y lo percibe su cerebro. Y su corazón, que es el motor, que impulsa y recibe la sangre cargada de oxígeno. Y su electrizante sistema nervioso, intermediario especialmente sensible entre músculos y cerebro. Todo el complejísimo cuerpo del ciclista siente su montura. Y percibe las irregularidades del terreno por el que circula. Y con precisiones del 0,5%, la pendiente de una carretera. Y las curvas, peraltadas o no, del trazado y cualquier obstáculo, por leve que sea, con el que se tropieza en su camino. Y el aire en movimiento. El que nace oponiéndose a su movimiento o el que viene de lejos y que no es imperturbable porque es perturbado por el ciclista, que siente cómo su velocidad se suma o se resta a la del viento meteorológico. Y trata, como hacen, hacían y harán quienes navegan en embarcaciones de vela, de aprovecharlo si es posible o, de limitar al menos, las dificultades que procura. Y el ciclista siente, también, y de qué manera, la sed que le hace beber y presente, más que siente, la necesidad de alimentarse para metabolizar la energía con la que insuflará vida a su montura.

Y siente que tiene genéticamente instalado en su cuerpo el concepto de equilibrio dinámico y que se mueve sin él saberlo gobernado por las tres leyes con las que Newton nos ayudó a comprender el mundo.

Y cuando se esfuerza, jadeando sudoroso, presente cuanto explican las leyes de la termodinámica. Y siente que la energía que produce su cuerpo sólo en una parte se hace trabajo “útil” y que otra parte más importante, y que no es desde luego del todo inútil, se convierte en calor. Y al escuchar, los ruidos y los susurros que brotan de la bicicleta al desplazarse presente que aún, queriendo evitarlo, añade entropía al universo contribuyendo a su confusión. Porque los ruidos, los susurros, las músicas del ciclismo, son también uno de los lenguajes de la políglota entropía.

Todo esto y mucho más es lo que siente o presiente el ciclista en su soledad de corredor de fondo, lo que le hace amar al ciclismo, lo que le hace adorar a su bicicleta, fiel compañera de fatigas corporales y de emociones espirituales.

Y así hemos llegado, jadeante el autor, probablemente exhausto el fiel lector, al final de este “tour de force” que me ha supuesto un esfuerzo que no podría imaginar cuando decidí iniciarla, sin saber muy bien el perfil del recorrido que tenía por delante. Aunque quizás podría haberlo hecho y preferí no hacerlo. Suele pasar. Hace falta, dicen, una pizca de locura para edificar un destino. No medí bien mis fuerzas. Ni el tiempo que iba a necesitar. Ni el que podría disponer. Ni valoré acertadamente mi bagaje intelectual antes de iniciar tan esforzado itinerario. A veces, mientras escribía, me sentía subiendo el Mortirolo. A trompicones. Con mis años a cuestas. Lastrado por mis ignorancias y con el consuelo, en cierto modo, de mi soledad intelectual. La potencia requerida, ya se sabe, es inversamente proporcional al tiempo que dura el esfuerzo necesario. Y han sido pocos los meses que he dispuesto para escribir este texto, al tiempo que me ocupaba de mis obligaciones profesionales, acrecentadas por la profunda crisis que tanto está afectando al sector de la ingeniería a la que yo dedico desde siempre mis desvelos.

Es un texto, por tanto, redactado intermitentemente, escrito a impulsos. Si fuese literatura, se podría decir que es literatura anaeróbica. Y por eso siento haber contraído una deuda de oxígeno, deuda intelectual, que tardaré en pagar. Solo a ratos he podido respirar tranquilo. Y cuando lo he hecho he disfrutado aeróbicamente teniendo en mis manos, veteranos y jóvenes libros de Física, de Materiales, de Estructuras, induso de Química o de Biología. Y a veces me he desesperado ante las dificultades que tenía por comprender algunos, cuando menos, confusos textos que cayeron en mis manos y que se me cayeron de las manos y que, a veces, me hicieron dudar de mi capacidad intelectual que, probablemente, no estará por debajo de la media de sus lectores potenciales.

Me he fijado, como no lo había hecho nunca, en las bicicletas que pasaban a mi lado y he dedicado algunos, esporádicos ratos libres, a admirar las expuestas en los escaparates de algunas tiendas y he entrado en otras, para verlas más de cerca y palparlas extasiado.

En todo este tiempo he tenido muy a mano los magníficos catálogos de bicicletas y componentes que publican revistas especializadas, con textos escritos por quienes saben muy bien de lo que están hablando. Y he husmeado, por persona interpuesta, en las páginas web de fabricantes, algunos míticos, otros que han sido nuevos para mí, pero que ya no volverán a serlo. He adquirido, leído y releído algunos libros, no son muchos, que tratan de la bicicleta. Entre ellos, algunos magníficos manuales de mantenimiento que me han hecho envidiar los conocimientos que poseen los extraordinarios mecánicos sin los cuales las bicicletas vivirían menos y vivirían peor. No puedo citar todas estas publicaciones, pero antes de dar este colofón por concluido, sí quería referirme al

magnífico libro “Bicycling Science” de David Gordon Wilson, un inglés, nacido en 1924, que se trasladó a U.S.A. en 1961 para trabajar como ingeniero en una compañía que diseñaba componentes de motores de propulsión. Se publicó por primera vez por la prestigiosa editorial del Massachussets Institute de Tecnology en 1974. Y su tercera edición, del 2004 llegó a mis manos, por recomendación de nuestros amigos de Orbea, cuando ya tenía mi texto muy elaborado. Si un día llegase su autor a leer lo que acabo de escribir que sepa que cuenta con mi admiración y con mi afecto.

El mundo de la bicicleta siempre ha atraído a intelectuales, artistas, filósofos y poetas. O mejor aún, hace aflorar las facetas más sensibles de quienes se aproximan decididos a él. Tras la aridez y la extensión inesperada del apartado que a mí me ha correspondido escribir llegan otros compañeros que toman mi relevo para mostrar, describir y hacer sentir, la riqueza y diversidad del ciclismo, la emoción y la belleza que atesora.



EL COMPONENTE

En la bicicleta se da una ecuación invisible que maravilla nuestra inteligencia de manera vibrante y para siempre. Las variables que se ecualizan son básicamente el equilibrio dinámico, la extrema sencillez de su economía como objeto y la pericia que requiere iniciarse en su manejo.

(Todos hemos aprendido a montar en bicicleta solos, ayudados, seguramente animados por un ser querido, pero en realidad solos, por ser un acto esencialmente intuitivo).

En la bicicleta, cada variable es en sí misma tan fascinante como el conjunto de la ecuación. Posiblemente, de ahí surja el atractivo universal que sin duda tiene.

Los componentes de la bicicleta es el tema que nos ocupa en este capítulo.

componente

(Del ant. part. act. de *componer*).

1. adj. Que compone o entra en la composición de un todo. U. t. c. s.



A partir de esta definición de la R.A.E. (Institución que representa en mi opinión el buen lujo, el que es necesario), está en realidad este capítulo del libro totalmente terminado. Si somos sensatos, no podemos aspirar a ampliar ni reducir una definición que cumple tan exactamente con la fe depositada en la consulta. Pocas veces significante y significado vibran tan al unísono, multiplicando la sencillez de su sentido en el silencio.

Podríamos decir que esta definición nos hace entrar directa y llanamente en la categoría de verdad, superando la capacidad explicativa de cualquier proceso de razonamiento, en el que existe un recorrido* razonable, seguramente necesario y muy probablemente brillante. Es una definición tan absoluta y directa que se libra de la redundancia de manera milagrosa pero elegante, renunciando a cualquier brillo.

Ávido lector, si avisado de que el capítulo ha terminado, no te conformas, la única propuesta que te puedo hacer es recorrer* esta definición caprichosamente, por disfrutarla. Entreteniéndonos en algunos puntos circunstanciales como ejemplos, peculiaridades, detalles, opiniones,... (que es lo que se suele hacer cuando uno tiene el trabajo ya terminado).



DIRECCIÓN... Dicen que la cabeza piensa, pero el cuello dirige.



El juego de dirección de una bicicleta, es un mecanismo que continúa actuando esencialmente igual que en el que seguramente fue su primer prototipo, técnicamente mejorado y seguro (mayor durabilidad, precisión, suavidad,...), pero responde a la misma idea que la bicicleta draisiana (ver cap. 1) y que seguramente importó como solución de otro objeto o como componente de otro conjunto o sisa, natural o creado por el hombre.

En mi opinión, la dirección es el mecanismo que hizo pasar al objeto que nos ocupa, de juguete cortesano a vehículo útil (y por ende, a bicicleta). Fue, obviando las ruedas, claro, el mecanismo que inició la carrera tecnológica que tanto tiene que ver con nuestra manera de entender la bicicleta hoy. La dirección convirtió a un caballo de juguete en una máquina, concretamente en un vehículo mecánico personal. Un concepto inédito seguramente hasta que a la bicicleta se le incluyó esta articulación que permitía ya tratarla como una prótesis del conductor. En el momento en que la bicicleta incluye esta articulación, el conductor cambia totalmente su relación con la máquina y se convierte en ciclista, poniendo su relación con la bicicleta en un plano diferente.

Para explicar lo que significa el juego de dirección para el ciclismo, se me ocurre una afirmación que puede sernos útil:

“Si la bicicleta tiene juego de dirección, puedes utilizarla y pensar mientras en otra cosa.
Si no lo tiene, no puedes hacerlo.”

Bien: esta afirmación aparentemente tan inocente, demuestra que las bicicletas son realmente prótesis de las personas, y el juego de dirección es “eso” que hace que exista el ciclista como especie.

Suficiente para este capítulo.

MOCIÓN

Un pedal gira libremente sobre si mismo de manera necesaria para suspender nuestro pie en el lugar decidido* y transmitir nuestra fuerza con alta fidelidad** hasta el terreno, para transformarla en avance.



*La magia del pedal es que es estribo y/o pistón, según lo decidamos nosotros. Junto con el resto del pedalier (bielas y eje) y la transmisión (plato dentado, cadena o correa, y piñón trasero), nos permite aprovechar nuestra energía manteniéndonos a una agradable distancia del suelo. Seguramente, uno de los secretos del magnetismo que ha tenido y tendrá siempre la bicicleta, sea la peculiar sensación de poder mantenernos ligeramente elevados respecto al suelo, a la vez que nos desplazamos; de una manera especialmente sencilla y de la que formamos parte indispensable como sistema.





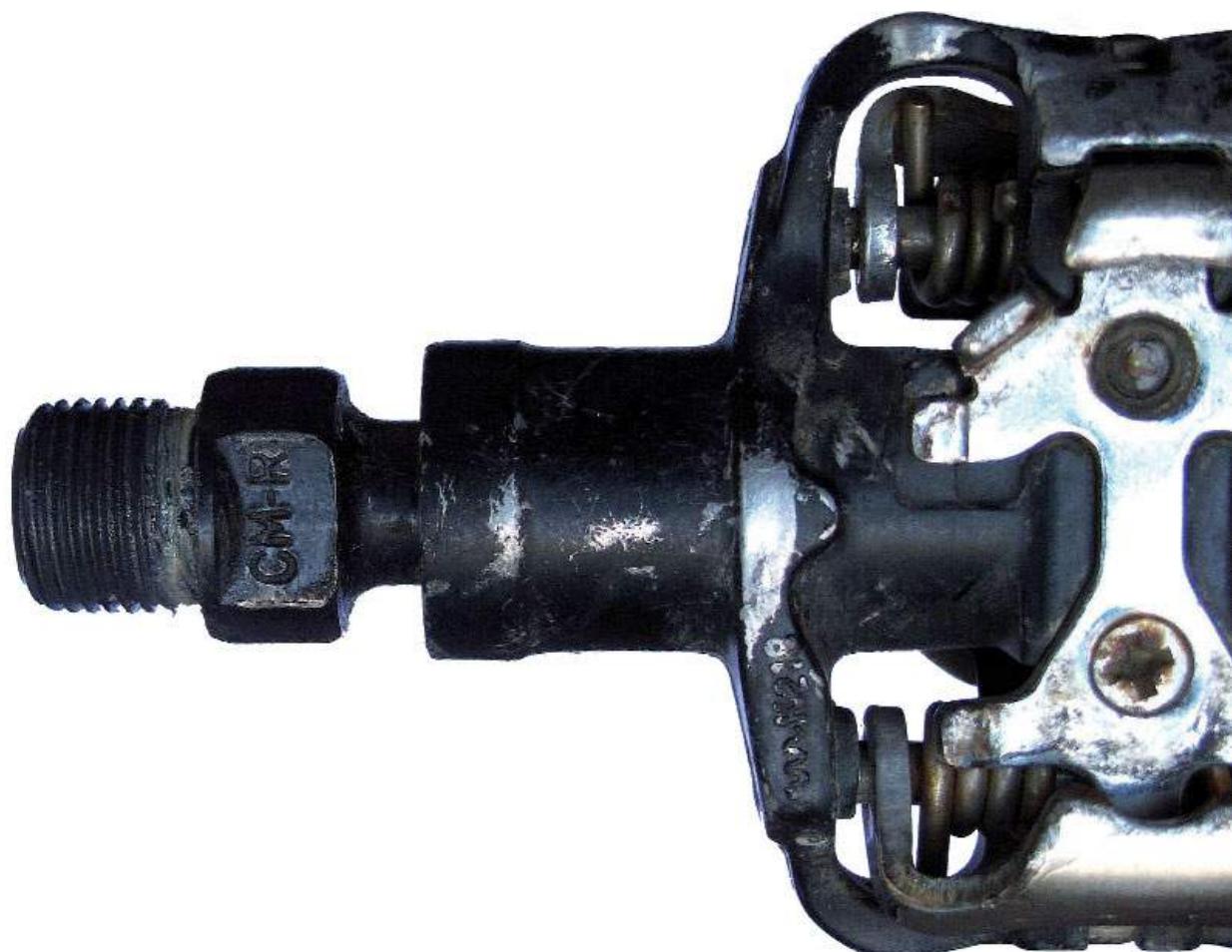




Los pedales, tan aparentemente gemelos, tienen un alma simétrica (e invisible) que es su rosca.

En todas las bicis, desde hace mucho tiempo, cada hilo de rosca de cada pedal cumple con un avance (y sentido de giro). El derecho cumple con un avance normal, mientras el izquierdo tiene un avance inverso al habitualmente convenido. Esta excepción tan universal* viene motivada por la previsión (tan al servicio de la fiabilidad). Siendo así, si uno de los pedales deja de girar tan suavemente sobre si mismo, nosotros al pedalear estaremos ejerciendo un par de apriete, en lugar de desenroscar el pedal.

La bicicleta, está llena de este tipo de detalles, tan necesarios y poéticos.



* Hoy todos los pedales derechos son intercambiables entre si y los izquierdos también. De cualquier bicicleta, sea cual sea su tipología; pero no se puede cambiar un pedal derecho por uno izquierdo, aunque aparentemente sean iguales

PIÑON LIBRE

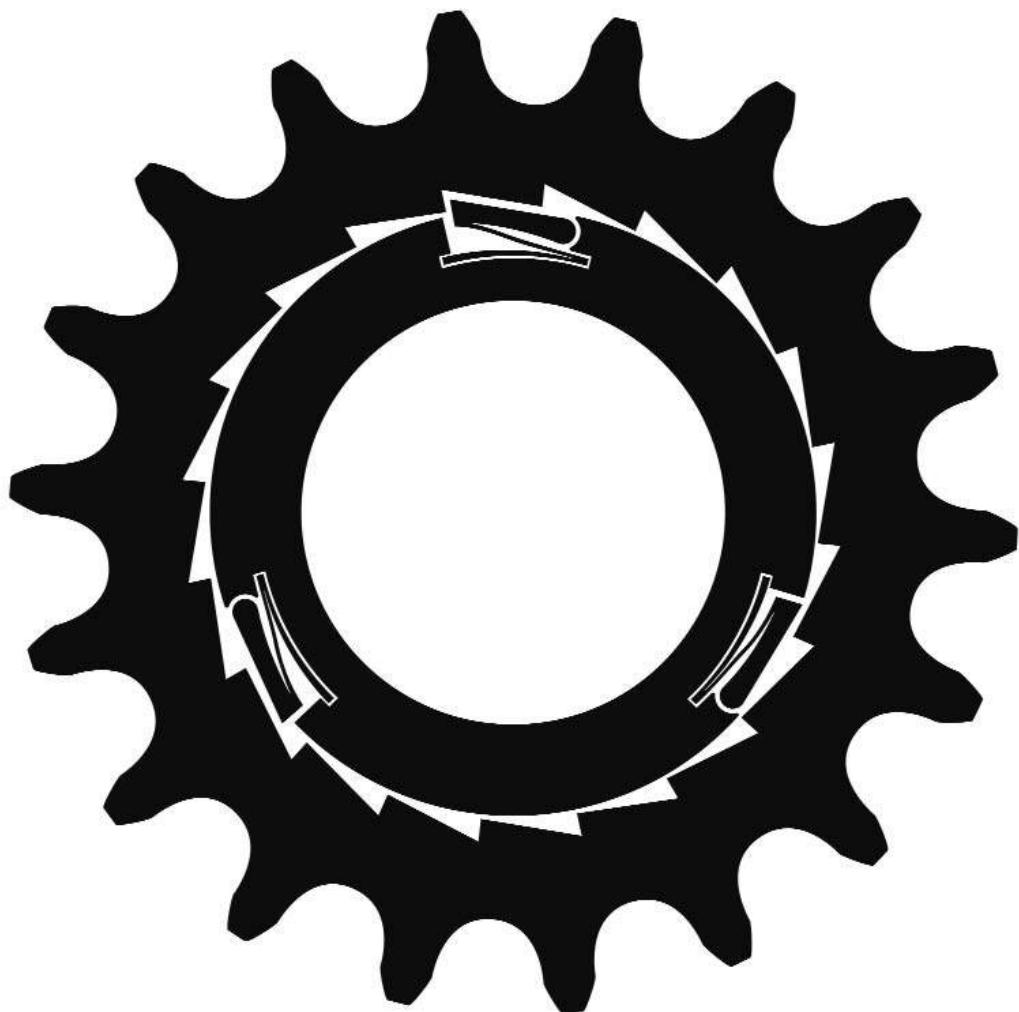
Según la web de “consulta democrática” wikipedia: PIÑÓN LIBRE es el mecanismo que permite a un eje girar libremente en un sentido y ser engranado en el sentido contrario.

En el caso de las bicicletas, este mecanismo oculto (de los pocos mecanismos ocultos que encontramos en cualquier bicicleta) y tan mayoritariamente extendido, libera parcialmente el sistema de tracción del avance del conjunto bicicleta-ciclista. Este pequeño detalle supone incrementar las posibilidades de la bicicleta muy notablemente, ya que permite que esta se desplace aprovechando su propia inercia o la pendiente del recorrido en los descensos. Avanzar “dejándose llevar” en bicicleta, lo que en el argot ciclista se denomina “ir a vela”, es uno de los placeres que todos conocemos por haberlo experimentado muchas veces desde pequeños. El “carraqueo” de los trinquetes de un piñón de bicicleta despierta sensaciones muy placenteras sencillas e individuales. Fundamentadas también en el mapa de recuerdos de nuestra infancia.

En otro orden también algo romántico, ese “carraqueo” es la seña de identidad de las principales marcas de componentes del sector (y las industrias más poderosas del escenario ciclista). Un ciclista experimentado, sabe que un “carraqueo” más sedoso y silencioso corresponde a un piñón libre seguramente de Shimano, y un “carraqueo” más marcado y sonoro, corresponderá casi seguro a uno Campagnolo.

El piñón libre, un componente tan característico de la bicicleta, también ha sido definitivo en el desarrollo empresarial del sector. La Corporación nipona Shimano es hoy sin duda la industria más importante del ciclismo. Empezó aprovechando su experiencia en la fabricación de carretes de pesca para la fabricación de este componente.

El resto de la tracción está a la vista.



PIÑON FIJO” FIXY

La transmisión de tipo fijo o denominada también coloquialmente como “fixy”, es el sistema que prescinde del piñón libre, de forma que la transmisión se comporta de manera solidaria y directa desde el pedal hasta la rueda. Las peculiaridades de este sistema son, sobre todo, el aprovechamiento de la inercia que se crea en el ciclo de pedaleo para superar las “zonas muertas”, y la posibilidad de utilizar la misma transmisión para frenar, ejerciendo sobre los pedales fuerza en sentido contrario al de pedaleo. Los sistemas “fixy” se utilizan sobretodo en las especialidades deportivas que se practican en velódromo por la pureza de su sistema de transmisión, aunque también existen amantes de este sistema que lo utilizan en sus bicicletas de ciudad.

La cadena de tipo “half-link” es muy apreciada en los grupos de transmisión “fixy” o de piñón fijo, dado que permite el ajuste de la longitud de la cadena con el doble de precisión que una cadena común. En el sistema “half-link” podemos extraer o añadir eslabones por unidades, mientras que en el sistema común sólo podremos hacerlo en números pares.



FRENO

Frenar una bicicleta es un acto que requiere generosidad con uno mismo y contención. Cuando vas en bicicleta, sabes que todo lo que frenes, tarde o temprano; antes o después, significa esfuerzo personal y/o tiempo. Es así.

Aunque hoy existan bicicletas con frenos hidráulicos de disco (cuyo origen está en la formula uno), la belleza del freno de zapata sobre la misma rueda (llanta o neumático) es para siempre insuperable en el plano de la simplicidad. Esa solución tan aparentemente provisional que supone intervenir directamente sobre la rueda (tal cual, sin añadirle nada), distinguiendo entre lo que es rueda y lo que es freno, tiene una elegancia de la que no gozan otros sistemas más evolucionados y efectivos.

Podríamos decir que en la tipología original, el freno reduce la velocidad de la rueda, pero no tiene vocación de ser una parte de la rueda. El freno es freno. La rueda es rueda. Y, si se encuentran, es para frenar sin mezclarse





BICIPERSONA

Si artificiamos una separación entre bici y persona nos encontraríamos con dos partes: por un lado la bici y, por el otro, la persona.

persona = persona
bici = aparato engorroso (Ya, yo tampoco sé porqué)
bici + persona no = (bici + persona)
bici + persona = bicipersona

Por lanzar una hipótesis en este plano teórico, veríamos que existen puntos de contacto entre la supuesta bicipersona sin persona y la supuesta bicipersona sin bici. Esos puntos que son el sillín, el manillar y los pedales, son componentes cuidadísimos por el ciclista refinado e importantísimos para cualquier bicipersona. De esos puntos depende una buena experiencia bicipersona (armonía es la palabra), o una mala experiencia, incluso la lesión física (con mayor probabilidad en algún componente humano de la bicipersona).

Sintamos esa armonía de la que hablamos: la bicipersona como una sola cosa.

Los componentes que definen la posición de la persona cuando es bicipersona, son definitivos para que la postura sea la perfecta para cada función. Desde la colocación y anchura del manillar, hasta la longitud de la biela o la regulación de la altura del sillín, estos elementos son decisivos para obtener confort o proporcionarnos eficiencia. Los componentes, componen la bicicleta, pero lo más importante es que también componen inequívocamente nuestra experiencia y nuestro “ser” bicipersona. Componen mucho.

** SOLUCIÓN: parte de la magia de un vehículo es que participa del ánimo de la persona que lo lleva. Digamos que una persona, no es en realidad la misma persona, si se encuentra “vehiculada” porque si no se encuentra “vehiculada”, Y, caso de estar “vehiculada”, su forma de existir en el momento, dependerá de la tipología y peculiaridades del vehículo. Al ser la bicicleta el vehículo más individual posible y existir “si y solo sr” con persona encima, cualquier persona que monte en una bicicleta cambia su velocidad de pensamiento.

Alto rendimiento y superstición



Si vamos al plano de lo deportivo, siempre más avanzado, el ajuste de los componentes linda muchas veces con el terreno de lo esotérico, y se instala tranquilamente en él otras.

Todos los ciclistas son muy cuidadosos en el ajuste de la bicicleta, y muchos de ellos buscan una precisión tal, que realizan el ajuste de los componentes que afectan su posición en la bicicleta sobre una mesa de juego de billar; garantizándose así la horizontalidad de la bicicleta y la precisión total en el ajuste. Pero la exigencia llega a un nivel literalmente incuantificable. Extracientífico. No existen decimales suficientes para el ajuste de la bicicleta de la mayoría de ciclistas profesionales, que entran sólidamente en el terreno de lo emocional y permiten que su bicicleta la toquen pocas personas o solamente su mecánico de confianza; quien no sólo la ajusta, sino que hasta la vela, y comparte con él el espíritu animista que los une a los tres en la aventura. Ciclista, mecánico y bicicleta, sin un orden establecido entre ellos.

Muchas veces en el proceso de ajuste, el ciclista tiene alguna costumbre de tono taurino que nadie le puede reprochar si se contrasta con el esfuerzo que hará después sobre la máquina que están ajustando. Un ejemplo podría ser el de la relación de “complicidad,... pero... mucho más que complicidad” (Sisquillo* dixit) que tiene por ejemplo Sisquillo, mecánico de bicicletas, con el también conocido Cippolini. Se entendían con la mirada entre la muchedumbre. Al instante. Y en muchos casos con la mera proximidad. Sólo Sisquillo tocaba las bicicletas de ‘Cippo’. Posiblemente uno de los ciclistas más perfeccionistas que ha conocido este deporte.

Otra manía conocida era la de Johann Museew, al que gustaba interrumpir a los mecánicos con una bandeja de café y pastas que traía él personalmente. También notas cuando hablas con Ixio Barandiaran* (seguramente el mecánico de Mountain-bike con más mundiales ganados en la historia de este deporte) que cuando está trabajando sobre la bicicleta, es como si la estuviese radiografiando permanentemente. Siempre consciente de que la carrera empieza mucho antes de que se de la salida.



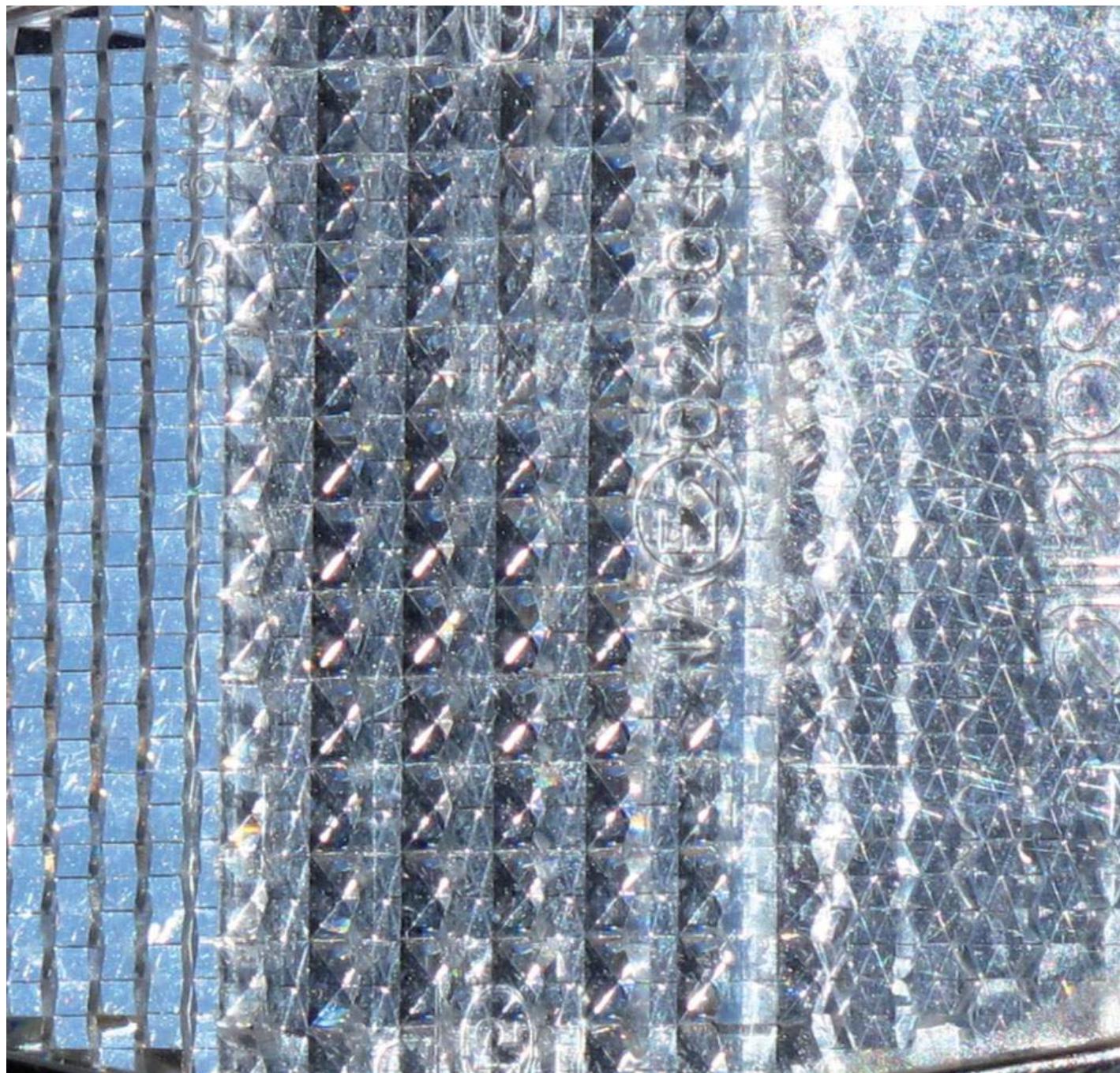
*Os aseguro por experiencia propia que la mirada de Sisquillo y de Ixio tienen más decimales que cualquier pie de rey fabricado por el ser humano. Y sus cerebros dan pedales desde la noche antes.

EL ACCESORIO

accesorio, ria.

(De *acceso*).

1. adj. Que depende de lo principal o se le une por accidente. U. t. c. s.
2. adj. **secundario** (no principal).
3. m. Utensilio auxiliar para determinado trabajo o para el funcionamiento de una máquina. U. m. en pl.



Es verdad que existe lo accesorio también en la bicicleta. Pero el concepto de accesorio en la bicicleta está sometido a una ley de economía general que exige* austeridad y rigor en el compromiso funcional, huyendo de cualquier exceso.

Una lista de accesorios es suficiente para comprender que son necesarios para desempeñar algunas acciones con la bicicleta, o moverse el ciclista con soltura en algunos entornos. Listamos, entonces: Bidón de agua. Candado. Guardabarros. Timbre. Alforjas. Cesta portabultos. Luces. Cuentakilómetros. Y pocos más.

Se sienten como un número finito*.

En ellos intuitivamente valoraremos de manera positiva el carácter esencial del objeto, la utilidad real (es decir “la que se usa”) de sus prestaciones y su integración en la bicicleta al cumplir las leyes económicas del objeto al que auxilia.

*La exigencia de austeridad, el rigor y el hecho de ser la tipología de accesorios un número finito, establece una relación directa con el ingenio y anula cualquier fantasía.

Sí. Es verdad que en el caso de las bicicletas infantiles, el accesorio, es a veces un accesorio y otras un complemento. En estas otras, la bicicleta pierde su rango para volver a ser el juguete que fue (no hay otra posibilidad).

Más allá de la casuística anterior, especialmente hoy, existe la posibilidad de que una bicicleta de adulto goce de un accesorio de tipo complemento. En este último caso, siempre oligofrénico en alguna medida, ni la bicicleta es en verdad bicicleta, ni el adulto es adulto.







LOS COMPONENTES INVISIBLES

EL CEREBRO DE LA BICIPERSONA

La bicicleta es algo más que razonable. Evoca cosas que van más allá de la razón.
El que pedalea sabe que cada momento es diferente.

Esto es motivo suficiente para destacar que el mejor componente de una bicicleta sigue siendo el cerebro humano, que es el que la impulsa en el sentido más directo y quien la equilibra, haciendo el milagro de la máxima sostenibilidad moviéndose sobre dos puntos de apoyo. El cerebro es el que actúa de centralita, el que decide como administrar los muchos recursos que nos ofrece la bicicleta. Es el cerebro el que percibe una ligera brisa que justifica subir un piñón, o una frenada suave al ver un arcén algo sucio, ... En la bicicleta todo es mecánico, manual y la optimización de los recursos depende de cómo nosotros pensemos sobre la bicicleta y de cómo la ajustemos a nuestra forma de uso. Así, la bicicleta, aunque cada día más evolucionada en sus componentes, todavía se mantiene pura en el sentido objetual, por ser un objeto sin inteligencia asistida, ni ser capaz de estar programada para variar de manera autónoma sus ajustes en función de la situación. Es nuestro cerebro el que seguirá tomando dichas decisiones. La bicicleta se desmarca entonces como objeto, al seguir una carrera evolutiva de momento diferente a la mayoría de objetos de nueva generación, superados a si mismos por sofisticados protocolos electrónicos que por ejemplo permiten endurecer/suavizar el sistema de dirección de un automóvil, según parámetros que el propio coche registra, herramientas de corrección automática en un procesador de textos, sistemas de antibloqueo en los frenos de una moto o un coche,...

EL AIRE COMO LUGAR

Desde la bicicleta, las variables aparentemente circunstanciales, deciden cual es la situación de manera intensamente caprichosa.

El aire es algo más que el medio ineludible, es también el componente por excelencia. El aire es el soporte invisible y único en el que suceden viento, temperatura, humedad, sonido y olor. Desde la bici, más por el aire que nunca, nos llegan estímulos que leemos en clave pura, como si lo más primitivo que hay en nosotros como bicipersonas, se multiplicase refinadamente.

Nunca un lugar es el mismo lugar nuevamente.

EL AIRE COMO MEDIO (Y COMPONENTE)

Las bicicletas son prácticamente aire interrumpido por una estructura imprescindible (y engorrosa), pero son en realidad un porcentaje muy alto de aire si consideramos su volumen envolvente; y sobretodo, su vocación. Podríamos decir que la bicicleta tiende a ser aire, o le gustaría serlo. Conceptualmente, no existe un “dentro” / “fuera” en la bicicleta, sino diversos puntos de aire al rededor y en la bicicleta. Conceptualmente, la bicicleta, es un objeto más rico en posibilidades que otros vehículos mecánicamente mucho más evolucionados. La bicicleta es un objeto que se siente antiguo, y que parece programarse cada vez que se va a usar. Es esta espontaneidad, hoy en extinción, lo que nos hace sonreír al verla e identificar siempre algo exótico en una bicicleta (o mejor: en cada una de ellas). Algo similar sucede con los bolígrafos. (¿Me sucede sólo a mí?).

El Aire tiene cada día más funciones en la bicicleta, y siempre que en un lugar ponemos aire, difícilmente encontraremos un material más eficiente que lo pueda sustituir. El Aire y la bicicleta dialogan en un canal sorprendentemente natural.

No sólo es su combustible principal, sino que da la sensación de que quiere ser eso y muchas más cosas. Parece que el aire quiere ser bici y la bici quiere ser aire.

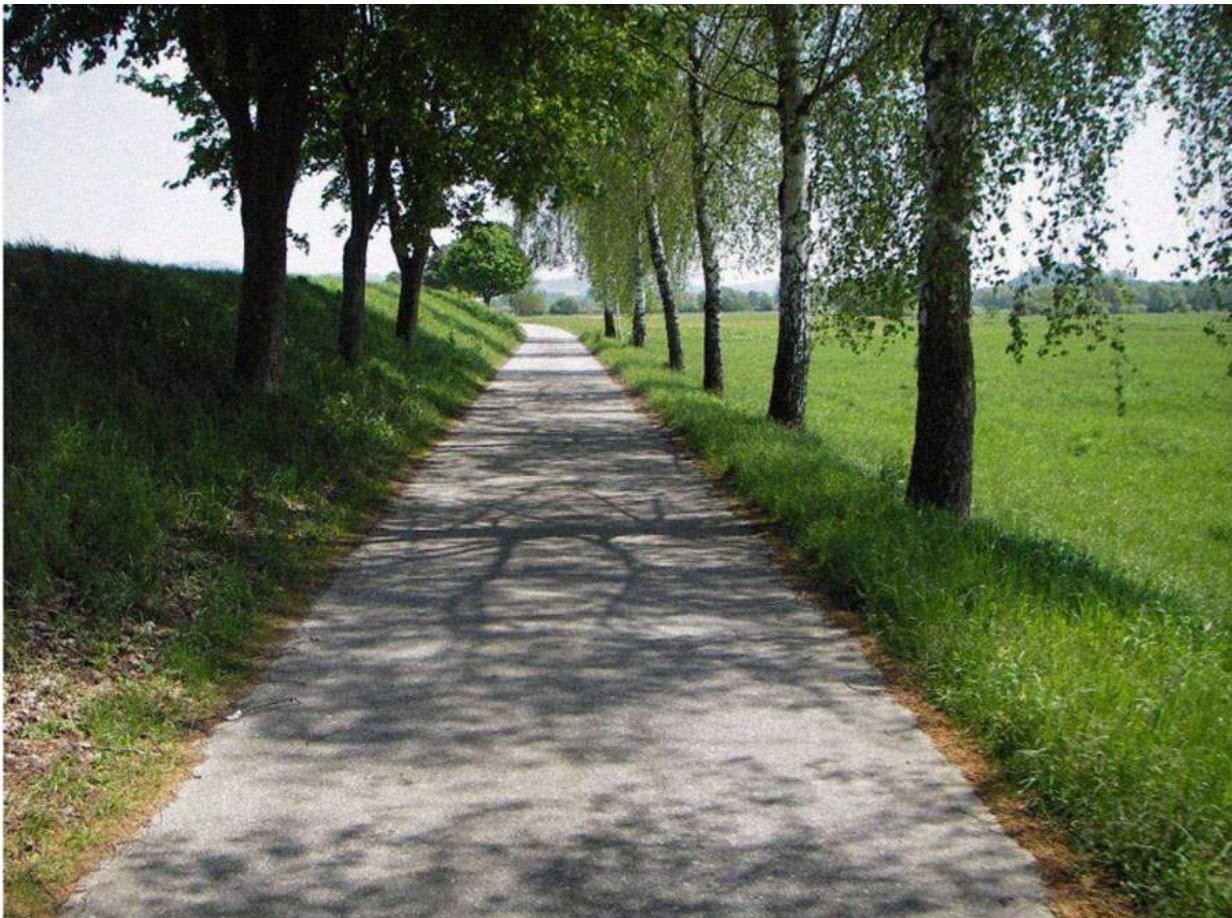
Me atrevo a afirmar asintóticamente que existirán bicicletas hechas de aire. Aire dentro de los tubos, Aire secando el sudor, Aire entre los radios de las ruedas, Aire en los neumáticos, Aire en los pulmones, Aire entre los cables y sus fundas, Aire entre los tubos del cuadro, Aire delante, debajo,... Aire diferente uno de otro y con unos límites algo difusos a veces. El Aire se nota mucho en la bici.

EL AIRE, COMO COMPONENTE TÉCNICO.

La bicicleta apresa técnicamente el aire (ya prudentemente en minúsculas), en una especie de actos de egoísmo, para ponerlo en sus ruedas desde hace ya años. Este aire, a presión, es el componente que imprimirá más carácter sobre el comportamiento de la bicicleta, otorgándole adaptabilidad al terreno o rodadura según ajustemos la presión a las necesidades de cada bicipersona en un modo muy diverso, desde poco más de una atmósfera (cuando una bicicleta de montaña busca la máxima adherencia y adaptación al terreno, para amortiguar sus irregularidades), hasta algo más de 10 atmósferas (cuando una bicicleta de carretera rueda sobre buen asfalto y trata de reducir la superficie de contacto con el firme para evitar al máximo el rozamiento con el suelo... alejándose con fuerza del suelo como tratando de volar a unos pocos centímetros, o haciéndolo en alguna medida). En ambos casos, el objetivo final sigue siendo uno y sencillo: “flotar” sobre el terreno lo máximo posible, para avanzar con la mayor eficiencia posible (fluidez en el movimiento). Este componente tan vital y antiguo, es también el componente que más importancia está tomando en las bicicletas de última generación. Al fin y al cabo, el aire es sin duda el más ligero de los materiales posibles. Así, y, como por omisión ajena, llega a cada vez a más rincones, “comiendo” espacio a otros materiales más sólidos, aparentes, y orgullosos. El Aire gana a base de reducir las piezas y/o hacerlas huecas hasta sustituirlas* con servidumbre y discreción inequívocos. El Aire, con el tiempo y la tecnología de su lado, va reduciendo los espesores de las paredes materiales para hacer cada parte de la bicicleta cada vez más ligera, más etérea.

EL AIRE ES EN REALIDAD “EL COMPONENTE”.

*El caso más revelador puede ser la sustitución, con mucha eficiencia, de los pesados muelles de amortiguación, los nuevos ejes de pedalier o sistemas de dirección cuyos interiores están cada vez más vacíos de materia y más llenos de tecnología e ingenio.



En capítulos anteriores hemos vivido profundamente y con todo detalle la ingeniería que encontramos en la bicicleta como máquina, como vehículo. Hemos vivido los flujos de fuerzas, las reacciones de apoyo, las interacciones ciclista-bicicleta y bicicleta-pavimento. Hemos podido comprender como se comportan e integran el cuadro, las ruedas y los componentes en la bicicleta y como responden a los flujos de fuerza. Hemos apreciado el comportamiento estructural del ciclista y de la bicicleta.

En las páginas que siguen vamos a observar la bicicleta desde otro punto de vista, desde otra ingeniería. Vamos a fijarnos en la bicicleta desde el punto de vista de la ingeniería de “*por donde*” circulan las bicicletas. La bicicleta, ingeniería pura como hemos visto, requiere de otra ingeniería para poder circular. Esa otra ingeniería es la ingeniería de los caminos, la ingeniería de trazado o, de manera más amplia, la ingeniería de las infraestructuras.

Pero para observar la bicicleta desde esa otra ingeniería se requiere de disciplinas complementarias. Ir en bicicleta requiere unos mínimos infraestructurales pero también de entorno. Hoy no concebimos transitar en bicicleta por entornos que nos sean hostiles.

Se trata, pues, del paisaje. Infraestructuras y paisaje se entrelazan para proporcionar al ciclista condiciones de rodadura seguras y agradables. El puerto más bonito del mundo con pendientes insuperables no sería apto para ser “ciclado”. No sería “cicitable”. Por otro lado, la pendiente perfectamente “cicitable” de una autovía urbana, desprovista de atractivo paisajístico, no invitaría a circular en bicicleta, aunque estuviera permitido hacerlo. Esos dos conceptos, infraestructuras y paisaje, van unidos, son inseparables y están presentes en casi todos los usos actuales de la bicicleta.

EL USO DE LA BICICLETA

Actualmente podemos distinguir tres usos principales de la bicicleta: la bicicleta como medio de transporte, la bicicleta entendida desde el punto de vista lúdico y de ocio, y la bicicleta como deporte puro. Y estos tres usos no siempre se han dado a la vez.

Si repasamos la historia de la bicicleta moderna, observamos que si bien al principio ésta sólo fue un medio de transporte, rápidamente surgieron las primeras pruebas deportivas ciclistas. La París-Rouen celebrada el 7 de noviembre de 1869 sobre un trazado de 123 kilómetros se considera la primera gran prueba ciclista. Pasaron más de 20 años, y en los años 90 del siglo XIX eclosionaron las competiciones ciclistas, tanto las conocidas “clásicas” de una jornada como las carreras “por etapas”. Así llegaron la París-Brest-París (1891), la Burdeos-París (1891), la Lieja-Bastogne-Lieja (1892), la París-Bruselas (1893), la Milán-Turín (1894), la París-Roubaix (1896) y la París-Tours (1896). Ya en 1903 se celebra el primer Tour de Francia y en 1909 el primer Giro de Italia, consideradas junto con la Vuelta Ciclista a España las *Tres Grandes*.

Durante buena parte del siglo XX el uso de la bicicleta se ha mantenido básicamente como medio de transporte y como herramienta de competición deportiva. Y esto es así hasta los años 80 en que eclosiona otro tipo de uso para la bicicleta. Aparece el factor ocio y la bicicleta vive un auténtico *boom* que hace revivir la fabricación, estimular el diseño y activar el factor del turismo asociado a la bicicleta.

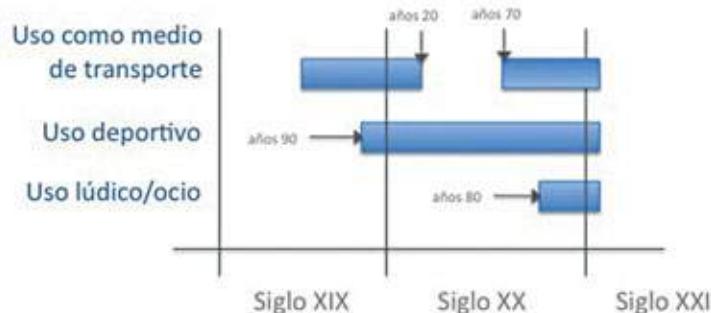
Hoy en día, y tras el éxito de algunas políticas de movilidad, fundamentalmente en Holanda y Dinamarca, vivimos otro renacimiento de la bicicleta como medio de transporte. Especialmente en áreas urbanas densamente pobladas. En el gráfico (de elaboración propia) podemos observar el desarrollo de los tres usos básicos de la bicicleta, vigentes en el siglo XXI, a lo largo de su historia moderna.

Podemos estudiar con más detalle esos usos básicos y determinar las características de cada tipo de ciclista. Según el *Pla Estratégic de la Bicicleta 2008-2012* de la Generalitat de Catalunya (datos 2004) y según datos de la Comunidad de Madrid, podríamos distinguir las siguientes tipologías de ciclistas.

Primeramente lugar el *ciclista cotidiano* que usa la bicicleta como medio de transporte urbano, básicamente, para dirigirse al trabajo, escuela, o a comprar, y que transita a lo largo de un recorrido del orden de los 5 km. Este ciclista utiliza itinerarios directos y de calidad, valorando la rapidez de desplazamiento. También usa la bicicleta por motivos de ocio asociado al paseo.

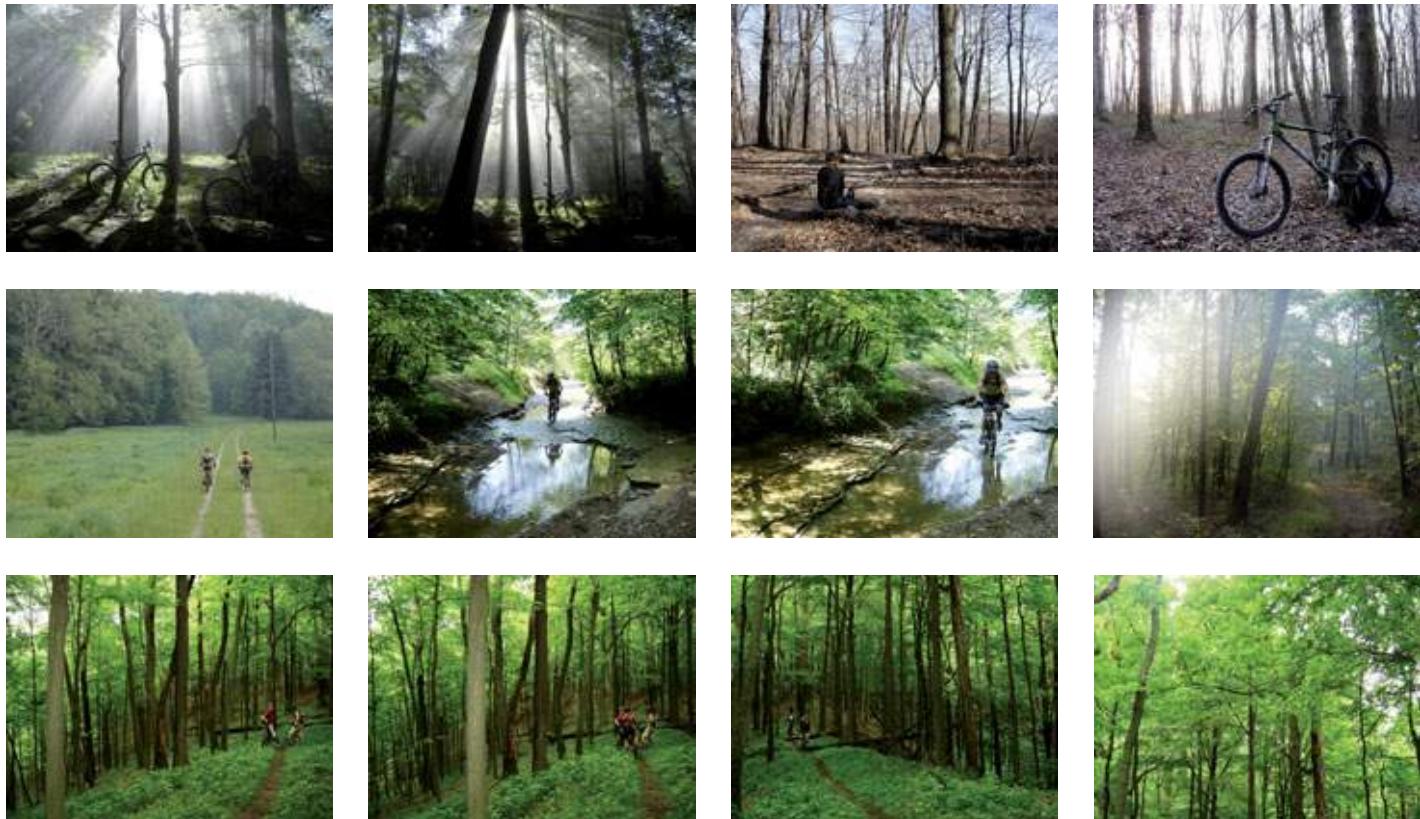
En el campo del uso lúdico se pueden llegar a distinguir a su vez tres tipos de ciclistas. En primer lugar el *ciclista recreativo en ámbito urbano o periurbano* que realiza salidas de proximidad. Circula por itinerarios tranquilos. Valora el paisaje y está motivado por el turismo en bicicleta. Circula habitualmente en pequeños grupos, en familia o en pareja. Se trata, generalmente, de recorridos relativamente cortos, del orden de los 10 km. Este ciclista requiere de la red urbana y periurbana, de itinerarios tranquilos y seguros. Se caracteriza por valorar ampliamente el entorno y el paisaje. Exige por tanto un alto grado de infraestructuras y de calidad paisajística. Dentro del uso lúdico, en segundo lugar, podemos distinguir al *ciclista recreativo en medio rural*. Se trata de un ciclista que circula claramente en día festivo por un pequeño circuito turístico del orden de los 30 km. Se trata de una tipología muy similar a la anterior. En este caso, acepta el circular por diferentes tipos de pavimentos y por caminos rurales. La tercera tipología de uso lúdico se refiere al *cicloturista de medio/largo recorrido* que transita por itinerarios con cierta vocación turística. Se trata de itinerarios tranquilos y con alto valor paisajístico. Esta tipología de ciclista recorre del orden de los 40-80 km y ya requiere de un firme de cierta calidad.

En el uso deportivo de la bicicleta, distinguimos también dos tipos de ciclistas. Por un lado, el *ciclista deportivo de montaña*, que circula en bicicleta por puro deporte en una “bicicleta todo terreno”, conocida como BTT. Se trata de un ciclista que suele circular en pequeños grupos o en solitario en caso de entrenamientos. Suele recorrer del orden de los 30-50 km y transita sobre caminos rurales o forestales y por zonas de orografía difícil. Finalmente, el *ciclista deportivo de carretera* transita en solitario o en grupo, recorriendo del orden de los 100 km y requiere de itinerarios seguros que permitan una velocidad sostenida. Requieren alta calidad de firmes.





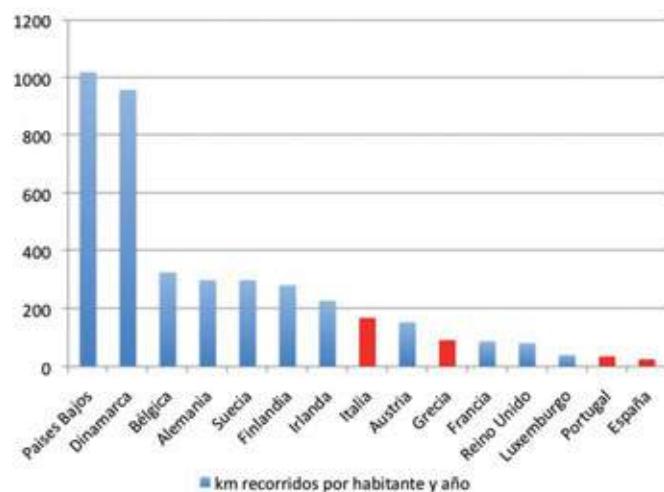
1. Cicloturismo deportivo por los puertos de Navarra.
2. Cicloturismo tranquilo junto a los caminos paralelos a los ríos navegables de Centroeuropa.
3. Ciclismo deportivo, en este caso disputando una carrera de aficionados y circulando en pelotón. En terreno llano y abierto, el pelotón circula unido y compacto. Las posiciones delanteras controlan el pelotón y “abren” el camino. En su interior, los ciclistas son llevados. Los efectos de succión en el ciclismo deportivo son sumamente importantes.



El uso de bicicletas todo terreno, BTT, permite transitar y descubrir parajes imposibles de explorar con una bicicleta de carretera convencional.

Todos estos usos sumados tienen una enorme repercusión en el crecimiento del número de bicicletas. Así, según datos del citado *Pla Estratégic* de la Generalitat de Catalunya, se estima un parque de aproximadamente 14 millones bicicletas en España. Ello significa una tasa de 325 bicicletas/1.000 habitantes y una media de crecimiento interanual de un 5% respecto de las 231 bicicletas/1.000 habitantes estimadas en 1997. En cualquier caso, la tendencia del período 2004-2010 no ha sido a la baja y es de prever, cuanto menos, el mantenimiento de esa media de crecimiento. De ser así, es muy probable que en España se haya doblado el número de bicicletas/1.000 habitantes entre 1997 y 2010.

De todos modos, esos ratios quedan aún muy lejos de los ratios alemanes, holandeses o daneses. Según datos del Eurobarómetro, en el año 1997, en Dinamarca se estimaba una tasa de 980 bicicletas/1.000 habitantes, en Alemania 900 bicicletas/1.000 habitantes y en Holanda de 727 bicicletas/1.000 habitantes. España ocupaba el segundo país con menor tasa después de Grecia. Estos datos todavía son más ilustrativos si los referimos a los kilómetros recorridos por habitante y año.



En el gráfico se ha distinguido en rojo los países pertenecientes a la bioregión climática mediterránea para poner en evidencia el elevado potencial de estos países con respecto al uso de la bicicleta en comparación con los países pertenecientes a las regiones bioclimáticas continentales y atlánticas¹



Cicloturismo de alforjas en Bagnères de Bigorre.



Red cicloturista prevista en el Pla Estratégic de la Bicicleta de Catalunya.

(1) Gráfico de elaboración propia según datos ECP UITP 1997.

LAS INFRAESTRUCTURAS Y EL ENTORNO

Cuenta la historia, y lo relatan fantásticamente Rafael Vallbona y Llorenç Pros en su libro “De Donostia a Portbou”, ed. Proa, como empezó “casi” todo.

El Tour de Francia, la competición ciclista por etapas disputada a lo largo de la geografía francesa y otros países de su entorno durante tres semanas del mes de julio, empezó a celebrarse anualmente desde 1903. Sólo interrumpida desde 1915 a 1918 a causa de la Primera Guerra Mundial y desde 1940 hasta 1946 debido a la Segunda Guerra Mundial.

El Tour de Francia de 1903 fue la primera competición ciclista por etapas de la historia. Anteriormente se habían realizado competiciones que cubrían enormes distancias, como el recorrido París-Brest de 1.200 km en 1891 o París-Burdeos de 576 km también en 1891. Sin embargo, fue el periodista francés Géo Lefèvre quién desarrolló la idea de crear una competición por etapas que transcurriera por parte del territorio francés. Así, el 1 de julio de 1903 el primer Tour de Francia comenzó en Montgeron, cerca de París, donde tomaron la salida 60 ciclistas que cubrieron la etapa inaugural de 467 km hasta Lyon. El recorrido constaba de seis etapas en un total de 2.428 km, casi tantos kilómetros como hoy en día pero en muchas menos etapas.

Henri Desgrange, ciclista y periodista deportivo francés, fundó en el año 1900 el diario deportivo L'Auto, junto con el Barón de Dion. La tirada del periódico no era demasiado buena y tenían que hacer alguna cosa para aumentarla. Así, en 1903, decidieron promover lo que hoy conocemos como Tour de Francia, tercer acontecimiento deportivo mundial, tras las Olimpiadas y los Mundiales de Fútbol. Y parece ser que la idea vino de uno de sus periodistas, Géo Lefèvre, de sólo 23 años, quien dijo que soltó la idea bruscamente porque se sentía bajo presión para decir algo en una reunión de crisis mantenida para resolver la pobre tirada del diario. Desgrange miró al tercer hombre allí presente, Georges Prade, y luego de nuevo a su joven periodista que contrató de un diario rival, Le Vélo: “Si te he entendido bien, pequeño Géo, lo que estás proponiendo es un Tour de Francia“, dijo.

Desgrange fue cauteloso y sugirió que él y Lefèvre almorzasen en el “Taverne Zimmer”, en el “Bulevar de Montmartre”. El café, ahora llamado TGI Viernes, está todavía allí y tiene una pequeña exposición para conmemorar la reunión. El asunto no fue mencionado hasta el café, al recordarlo Lefèvre, y lo más que dijo Desgrange fue que lo discutiría con Victor Goddet, el mánager financiero de L'Auto.

Pero Goddet quedó encantado con la idea, y ofreció a Desgrange a tomar cuento dinero necesitase de la caja. L'Auto anunció la carrera el 19 de enero de 1903. Aunque a Desgrange le gustaba ser llamado “El padre del Tour”, la idea no sólo no era suya sino que además estaba tan inseguro de la misma que permaneció al margen del primer acontecimiento en 1903 hasta que resultó ser, en contra de sus expectativas, un éxito. Cuenta la leyenda que Lefèvre, quien divulgó la carrera mientras viajaba en tren y bicicleta, fue cambiado repentinamente del ciclismo a otros deportes.



Integración de viejos caminos convertidos en carreteras al paisaje y su entorno, esencial para atraer el uso cicloturista y deportivo.

La promoción del Tour de Francia supuso un gran éxito para el periódico; la tirada subió de 25.000 ejemplares antes del Tour a 65.000 después del mismo.

En 1910, Henry Desgrange no estaba satisfecho del todo del funcionamiento del Tour. El periódico L'Auto, había aumentado las ventas hasta 200.000 ejemplares diarios durante los días de la prueba ciclista, el número de participantes había aumentado hasta los 150, de los cuales 55 la habían terminado. Sin embargo, el luxemburgoés Nicolas Franz, había ganado 6 etapas, dominando completamente la competición y quitando emoción a la carrera. Desgrange necesitaba reinventar el Tour. Tenía que encontrar una nueva fórmula para relanzar la prueba. Nuevamente un colaborador suyo, Alphonse Steiner, fue quien se la proporcionó.

Alguien le había hablado –y ahí empezará nuestra particular historia de bicicletas, infraestructura y paisaje– de la región de Bigorre, en los Pirineos. Era un lugar conocido por sus aguas termales, lugar habitual de veraneo de la gente adinerada, y lugar con impresionantes e inhóspitas rutas de montaña de gran belleza. La zona era conocida por los lugareños como “El círculo de la muerte”. La razón era bien sencilla: la presencia de osos devoradores de caballos, vacas y pastores. En el valle se comentaba sobre esqueletos humanos descubiertos en medio de la montaña. Esos puertos de montaña tan maravillosos y peligrosos, no eran otros que el Aubisque, el Tourmalet, el Aspin y el Peyresourde. Los cuatro grandes inseparables de la historia del ciclismo.

Así, en la primavera de 1910, Steiner visitó el lugar siguiendo instrucciones de Desgrange. El objetivo: llevar el Tour a los Pirineos para aumentar la emoción, y las ventas de periódicos. Steiner alquiló un coche y un chófer en la población de Eux Bonnes, al pie del Aubisque y se dirigió al Tourmalet por el camino abierto por Napoleón III en 1846. Como no podía ser de otra manera, a poco de alcanzar la cima, una tormenta de nieve impidió que el coche siguiera avanzando. Steiner mandó al chófer al pueblo y él siguió a pie, orientado por unos palos que delimitaban el camino. Cuentan que pasó la cima hundido en la nieve hasta la cintura. A las tres de la madrugada llegó a Barèges, más allá de Luz-Saint-Sauvere, justo donde Andy Schleck lanzó su duro ataque a Alberto Contador en el reciente Tour del 2010. Lo habían dado por muerto. Y ahí empieza “casi” todo. Tras calentarse y recuperarse, mandó el famoso telegrama a Desgrange: *“He pasado el Tourmalet. Muy buena ruta. Perfectamente practicable. Firmado: Steiner”*. Así, cuando se presentó el recorrido de la octava edición del Tour de Francia que incluía la travesía de los principales puertos de los Pirineos, la carrera tan sólo contó 110 participantes en la salida.



Col d'Aubisque. Puerto que une los valles de Ossau y Arrens en el Departamento francés de los Pirineos Atlánticos. Primero fueron los pastos, los caballos y los caminos de carro. Luego las carreteras y la comunicación entre valles. Luego el paso del ciclismo deportivo. Hoy en día, el uso como vía de comunicación entre valles ha caído en desuso y son los cicloturistas los que cada verano confluyen en el puerto con los que siempre estuvieron ahí antes que las carreteras: los caballos.

Subiendo el Col de l'Aubisque. El Tour se endureció enormemente con el paso por los puertos de montaña, a más de 2.000 metros de altura.



La primera etapa de montaña del Tour comenzó a Bagnères-de-Luchon, otra población turística conocida por sus aguas termales, y acabó en Bayona después de escalar el Peyresourde, el Aspin, el Tourmalet, el Soulor, el Aubisque, el pequeño Osquich y varias cotas más sin importancia. Total, 327 kilómetros. Octave Lapize, que fue el ganador de la etapa con un cuarto de hora de ventaja sobre Lafourcade y que posteriormente también fue el ganador de la carrera, franqueó el Tourmalet en segundo lugar. Al pasar se encaró a los organizadores y les gritó tratándoles de asesinos. La etapa había empezado a las tres y media de la madrugada, y muchos participantes terminaron bien entrada la noche. Lapize tardó 14 horas en hacerla. El último clasificado, Georges Cauvy, tardó 22 y llegó a Bayona de madrugada. Desgrange había reinventado el Tour.

El relato periodístico de las heroicidades de los ciclistas de principios de siglo XX por los caminos de los Pirineos atrajo con fuerza el público. El diario L'Auto, patrocinador de la carrera y que relataba día a día el devenir de la competición, pasaba a vender 300.000 ejemplares cada día. Durante el Tour de 1923 vendió medio millón al día. La tirada récord alcanzada por Desgrange fue de 854.000, durante el Tour de 1933.



Camino del Col d'Aubisque (1.709 m) desde el puerto del Soulor, en el pirineo francés. Hoy en día se pueden apreciar prácticamente las mismas carreteras de finales del siglo XIX. Esas carreteras, hoy superadas por vías de alta capacidad y que unen las poblaciones del fondo de los valles, son usadas prácticamente en exclusiva por cicloturistas en periodo estival, estando prácticamente cerradas durante el invierno.

Esta bella historia resulta idónea para centrarnos en nuestra cuestión: la relación entre la bicicleta, las infraestructuras, los caminos y el entorno por donde éstas circulan. Si pensamos un poco en cuales son los parámetros principales que influyen al ir en bicicleta, rápidamente nos damos cuenta de que la calidad del pavimento y la pendiente son los que mandan.

Respecto al tipo de pavimento y su calidad la historia nos revela que hoy en día circulamos en bicicleta por pavimentos lujosos. Estos mismos puertos que Desgrange “descubrió” en 1910 no fueron asfaltados hasta los años 50. Los esforzados ciclistas rodaron durante décadas por carreteras sin pavimentar. Auténticos barrizales en la época de deshielo, justo cuando éstos podían ser transitados por la ausencia de nieve. Caso a parte corresponde al uso de la bicicleta todo terreno, abreviada BTT, que como su nombre indica, circula principalmente por caminos no pavimentados: pistas forestales, caminos carreteros, caminos estrechos, sendas, senderos e incluso “trialeras”, auténticos “caminos” sólo aptos para los animalillos del bosque e intrépidos ciclistas provistos de buena técnica de bajada.





Caso particular de pavimento lo constituye el “pavés”. Un tipo de pavimento muy utilizado para la pavimentación de caminos en las regiones lluviosas y que se ha convertido en un referente de las clásicas ciclistas de los Países Bajos, Bélgica y Norte de Francia. Tras caer en desuso con la aparición del automóvil, hoy, algunos de estos caminos están protegidos y se someten a minuciosas restauraciones con el fin de preservar el auténtico espíritu ciclista de finales del siglo XIX.

La pendiente es el parámetro que marca realmente las características ciclistas de un camino. Marca la dureza y las posibilidades de transitar con cierta comodidad o esfuerzo llevadero por determinado camino. La pendiente, a su vez, suele expresarse a través dos parámetros diferenciados: la pendiente media y la pendiente máxima.

La pendiente máxima es un parámetro que nos indica cierta dificultad localizada y se trata de un parámetro que “se ve”. La pendiente máxima de un puerto la podemos apreciar en tal rampa o tal pequeño tramo. Habitualmente son dificultades localizadas y no representan mayor dificultad que lo doloroso que pueda significar superarlas. En los grandes puertos del Pirineo y de los Alpes puede llegar a alcanzar valores cercanos al 15% aunque siempre muy localizados. La pendiente máxima no es el parámetro más temido por ciclistas deportivos o por cicloturistas.

En efecto, es la pendiente media la temida. La pendiente media nos indica la dureza global de un puerto. No “se ve” localizadamente en ningún punto en concreto, pero está ahí, y se nota. Un cicloturista medianamente experto es capaz de distinguir la pendiente media de un puerto con un error del orden del 0,5%. Es un muy buen indicador del sufrimiento que deberá soportar un ciclista que quiera ascender a lo alto de un puerto.



Ascensión al Tourmalet por Luz Saint Sauveur.

Las máximas pendientes medias de los grandes puertos de 1^a Categoría y “Fuera de Categoría” del Pirineo y de los Alpes suelen situarse “muy alrededor” del 7%. Valor mágico que marca aproximadamente la frontera entre los puertos duros y los muy duros. Claro está que la combinación con la pendiente máxima y con el valor que adopten otros parámetros como la longitud total, el desnivel acumulado o la misma altura de llegada nos mostrará definitivamente la dureza del puerto en cuestión. De hecho, existen diversos métodos que combinan varios de estos parámetros y que están orientados a proporcionar un valor de referencia para cada puerto. Así encontramos, dependiendo de la vertiente considerada, los siguientes ejemplos de pasos por puertos naturales: Aspin: 6,5%, Peyresourde: 6,6%, Tourmalet: 7,7%, Soulor: 8,0%, Aubisque: 7,7%, Pailhères: 7,9%, Mont Ventoux: 7,2%, La Madeleine: 7,4; Izoard: 6,7%.

¿Y de dónde sale entonces este número mágico del 7%? Para saber el porqué de ese 7% debemos remontarnos a los manuales y a las recomendaciones de trazado de finales del siglo XIX. Así, en el número 1.169 de la Revista de Obras Públicas, publicado en 1898, ya encontramos referencias a la “Determinación de la pendiente máxima que conviene para salvar grandes alturas en las carreteras”. En el artículo se hace referencia a un artículo de M. Bonhomme publicado en el segundo semestre de 1897 en los *Annales des Ponts et*

Chausées. Bonhomme, en el artículo en cuestión, y tras considerar a la vez los “gastos de construcción y de conservación que costean los contribuyentes y los intereses del público que utiliza la carretera” concluye: “una pendiente del 8% no presenta inconvenientes si se tiene cuidado de disponer, cada 200 ó 300 metros, descansos constituidos por rasantes de 25 metros de longitud con pendientes del 3%. Se deben reducir también a este valor las pendientes de los lazos en los zig-zag y en las curvas de mucho desarrollo, porque en estos casos la mula de varas trabaja sola para arrastrar la carga”. Y es que el tráfico no era otro que el tráfico de carros tirados por tracción animal, y los condicionantes eran los derivados de las características del sistema de tracción.

Posteriormente, con la progresiva irrupción de los automóviles y los vehículos a motor en general, empezaron a plantearse de nuevo los aspectos relativos al trazado de carreteras. Así, José Clemente de Ucelay Isasi escribe en el número 1.971 de la Revista de Obras Públicas, publicado en 1913, un artículo titulado: “Las carreteras del porvenir”. En el artículo, avanza el contenido de la memoria presentada por el Ingeniero de Caminos Federico Moreno Pineda, de la Jefatura de Obras Públicas de Gerona al concurso convocado por el Instituto de Ingenieros Civiles sobre el tema “Las carreteras del porvenir”. En la memoria se detallan los parámetros básicos de una carretera y cuales deberían ser sus valores de referencia, atendiendo a las nuevas demandas de tránsito por parte de: “peatones, ciclistas, ganados, caballerías y vehículos ordinarios”. El autor, tras estudiar las potencias necesarias para poder circular por pendientes superiores a las ya habituales del 7%-8% como máximo para los vehículos de tracción animal, concluye que “deben conservarse las pendientes actuales”, oponiéndose a automovilistas, constructores y a algunos ingenieros que pretendían aumentar la pendiente máxima al 8%.

También publicado en 1913, en el número 1.961 de la Revista de Obras Públicas, podemos encontrar otra referencia interesante. El artículo de Manuel Díz Bercedóniz, Ingeniero Jefe del servicio de carreteras pirenaicas, titulado “Carreteras de Montaña” donde se confirma y recomienda el 8% como máximo para pendientes longitudinales de carreteras de montaña. Y así, hasta nuestros días. Hoy por hoy, la normativa de trazado vigente, aprobada en 1999 es muy clara y fija valores para las pendientes máximas en función de la velocidad de proyecto y de la tipología de vía. En el caso que nos ocupa, el de las carreteras con entorno suficientemente agradable para ser transitadas en bicicleta, debemos fijarnos en la tipología de “carreteras convencionales” y quedarnos con los valores máximos expuestos: entre un 4% y un 7%, en función de la velocidad de proyecto. En casos excepcionales puede llegarse a inclinaciones máximas entre el 5% y el 10%. Así, en el caso particular de una carretera convencional de montaña, con velocidad de proyecto de 60 km/h la pendiente máxima se deberá situar entre el 6% y el 8% para casos excepcionales.



El Passo dello Stelvio, requirió grandes esfuerzos en infraestructuras en su época. Hoy en día, el transporte por carretera transita por las grandes autopistas y los túneles transalpinos.



Bajando el Puerto de la Bonaigua, entre la Val d'Aran y el Pallars Sobirà en el pirineo de Lleida. Aún hoy, podemos ver infraestructuras modernas adaptándose a la topografía como lo hicieron las primeras carreteras de principios del siglo XX.

Se trata, pues, de un valor muy estable a lo largo del tiempo. Eso se refleja también en las pendientes medias de las numerosísimas ascensiones durante las pruebas ciclistas a estaciones de invierno. Así encontramos también pendientes medias cercanas al 7% en esos trazados más modernos, construidos en la segunda mitad del siglo XX: Luz-Ardiden: 7,4%, Hautacam: 7,0%, Plateau de Bonascre: 7,3% y Plateau de Beille: 7,9%.

Por último, no podemos olvidarnos de la seguridad. El ciclismo requiere de condiciones de seguridad. Las infraestructuras deben de tener unos parámetros de trazado y pavimentación adecuados, y el entorno ser amable; pero además el recorrido ha de ser seguro. En este sentido existen experiencias muy interesantes y novedosas que buscan, a partir de una mejor gestión de las infraestructuras el uso seguro de éstas por parte de todos sus usuarios. Un ejemplo de ello es el proyecto del Gobierno Vasco conocido como “Carreteras Compartidas”. Este proyecto persigue un uso compartido de las carreteras convencionales en función de la hora y del día de la semana. Así podemos encontrarnos con carreteras que de lunes a viernes se utilizan prácticamente para el transporte de viajeros y mercancías en vehículos a motor y que el fin de semana son usadas preferentemente por ciclistas, adaptándose los vehículos a motor a velocidades muy reducidas, compatibles con la velocidad de los ciclistas. Otra experiencia interesante es la las “Ciclo-rutas seguras”, impulsada por algunos ayuntamientos. Se trata de herramientas “online” que ayudan al ciclista a calcular previamente un recorrido “seguro”, en el sentido de menor conflictividad con otros tránsitos, en función del lugar de salida y llegada deseados.

Bello ejemplo de gran puerto: el Passo dello Stelvio, que une las localidades de Pratto Stelvio (Trentino-Alto Adige) y Bormio (Lombardia), superando más de 1.800 m de desnivel para alcanzar los 2.758 m de altura. Se trata de uno de los grandes puertos de montaña europeos. Hoy en día sólo es utilizado desde el punto de vista turístico. Tiene un gran atractivo ciclista.



EL HECHO DE IR EN BICICLETA

Tenemos la bicicleta y tenemos las infraestructuras necesarias en un entorno agradable. Ahora sólo falta darle a los pedales, cada cual en el uso que le convenga: el deportivo, el lúdico o simplemente el uso como medio de transporte. Y ahí ya no hay tanta ciencia por descubrir. Entramos en el mundo de lo que quiere decir “ir en bici”. En el mundo de el “hecho de ir en bicicleta”. Ese es un mundo de actitud, de aprender a sufrir y a soportar dolor. El ciclismo es un entrenamiento de la vida misma.

Los efectos del ciclismo sobre el cuerpo humano, a nivel físico y mental han sido ampliamente estudiados. Las conclusiones son claras y una de las muchas maneras de contarlo es hacerlo a través de las palabras del cardiólogo Valentí Fuster.

Valentí Fuster (Cardona, 1943) es Doctor en Medicina y Cirugía por la Universidad de Barcelona, director de la unidad de cardiología del Mount Sinai, el centro más prestigioso de Nueva York, presidente de la Asociación Mundial de Cardiología. Cardiólogo y ciclista, ha contado en numerosas ocasiones lo beneficiosa que resulta la práctica del ciclismo. Él mismo, como muchos de los que amamos este deporte, cada invierno se prepara para subir un puerto del Tour, sabiendo que el 50% es una cuestión mental. En efecto, siempre ha defendido de forma rotunda el uso de la bicicleta como medio de transporte, como un método preventivo de enfermedades cardiovasculares, antidepresivo y antiestrés. Para Valentí Fuster, el reto de afrontar una cima mítica de la ronda francesa supone una gratificación, una escapada hacia la libertad, algo así como poder aislarse de este mundo tan estresante en que nos ha tocado vivir.

Tourmalet, Galibier, Alpe d'Huez, Aubisque, Aspin, Peyresourde, Mont Ventoux... son algo así como maravillas que se exponen ante nuestros ojos y que esperan cada verano la visita de enamorados cicloturistas como él, o como cualquiera de nosotros o como tantos otros con los que te cruzas, te superan o superas en este tipo de ascensiones.

Al ciclismo no necesariamente se debe llegar de joven. Él mismo cuenta que empezó sólo hace algo más de 10 años. Para ello se entrena casi a diario, a veces con el rodillo, para fortalecer la musculatura, aunque durante las tres semanas de vacaciones de verano prefiere el fuego real y experimentar la satisfacción de subir a la bicicleta y completar, como mínimo, medio centenar de kilómetros al día.

Ascender al Tourmalet, necesita una cierta preparación, pero hay que tener claro que el 50% es una cuestión mental, de confianza en uno mismo. De todos los puertos que ha ascendido, la mayoría de los de los Pirineos y Alpes, no tiene ninguna duda al afirmar que el Mortirolo, situado en la Alta Valtellina, uno de los símbolos del Giro de Italia, se trata del puerto más duro de Europa, sin que ninguna montaña de la ronda francesa pueda rivalizar en cuanto a dificultad. El cardiólogo cuenta que en el Mortirolo uno se retuerce, se ahoga, se asfixia – comentario al que se une humildemente el autor de este capítulo- pero como en el resto de cumbres, en los momentos de dificultad, uno piensa que el esfuerzo ha valido la pena.



Inicio de la ascensión al Mortirolo. La pendiente media sostenida del 10,5% y las rampas con pendientes del 20%, empiezan a asfixiar desde el primer kilómetro.



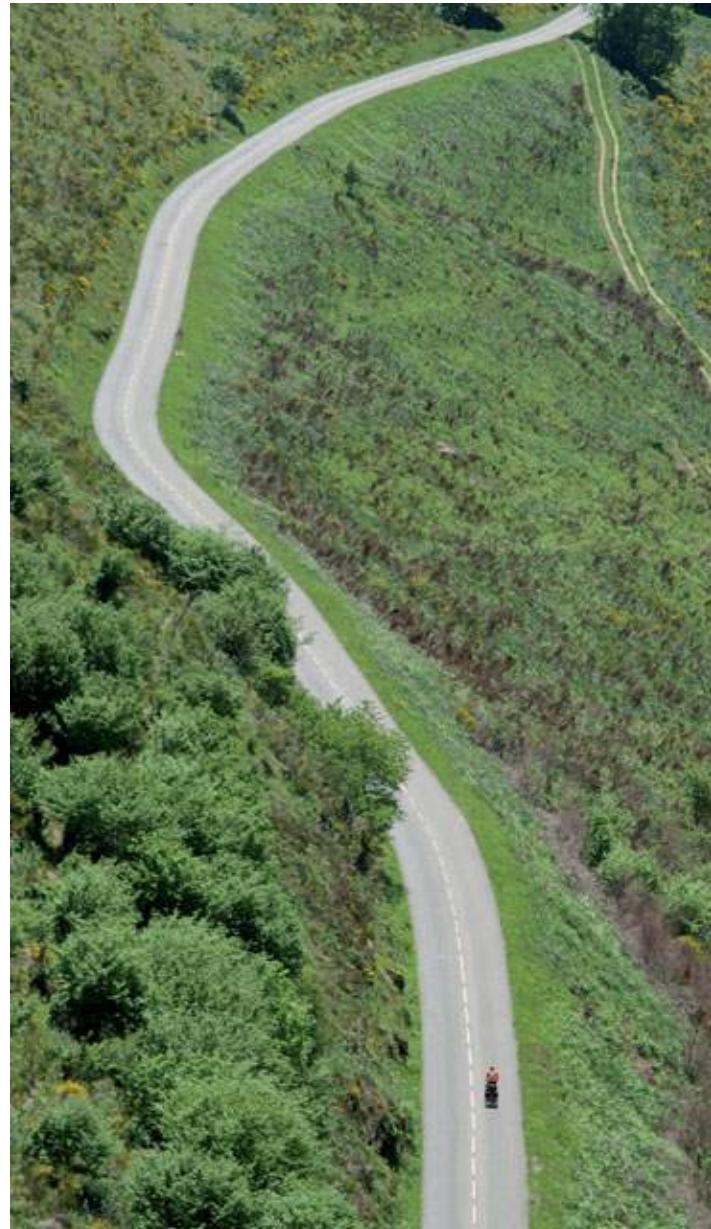
Gino Bartali, Il Ginettaccio, vencedor de 3 Giros de Italia y Fausto Coppi, Il Campionissimo, vencedor de 5 Giros de Italia, 2 Tours de Francia y Campeón del Mundo (1953), grandes rivales ciclistas italianos en los años previos y posteriores a la Segunda Guerra Mundial. Su rivalidad dividía a los italianos en el terreno político, religioso y deportivo. Aunque por encima de esa rivalidad, sesenta años antes que Andy Schleck y Alberto Contador, compartían una gran amistad. Incluso equipo, donde muchas veces uno actuó de gregario del otro y viceversa. Bartali fue de los primeros ciclistas en utilizar el cambio de marchas Campagnolo que permitió por primera vez cambiar de plato sin tener que bajar de la bici y cambiar de posición manualmente la cadena.



Atravesar los Pirineos por la ruta de los grandes puertos del Tour es una idea que reside en la mente de todos los grupos ciclistas que ruedan por carreteras y caminos cada domingo. El Tourmalet, el Aubisque o el Peyresourde son nombres míticos que resuenan un y otra vez en la cabeza, el corazón y los oídos de muchos aficionados.

En palabras de Valentí Fuster, “la bicicleta me permite estar en contacto con la naturaleza, a la vez que constituye un vehículo ideal para luchar contra el estilo de vida imperante, a veces neurótico, ansioso y alocado, al que muchos se ven abocados; porque, por desgracia, el mundo va a una velocidad increíble, pero las personas cada vez nos movemos menos”

Adaptación al medio. Soledad. Aprender a sufrir. Disfrutar. Contemplar.





En ciclismo es habitual la expresión “aprender a sufrir”. La ascensión de un puerto conlleva sacrificio físico y extrema satisfacción.

Federico Martín Bahamontes (Toledo, 1928), El Águila de Toledo, fue un ciclista profesional entre 1954 y 1965, periodo durante el cual logró 74 victorias. Consagrado como un especialista en la montaña, venció en el Tour de Francia 1959.

Bahamontes, finalizado el Tour, volviendo a Toledo con la maleta y la bicicleta



BIBLIOGRAFÍA

- <http://www.foromtb.com> • <http://www.utagawvtt.com> • <http://www.rutabike.com>
- <http://www.memoire-du-cyclisme.net> • <http://www.cyclingcols.com> • <http://www.crazyguyonabike.com>
- <http://www.tupedala.cat> • <http://www.maxciclismo.com> • <http://biciblog.com> • <http://carles-bici.blogspot.com>
- <http://www.amicsdelabici.org> • <http://www.barcelonacyclechic.com> • <http://www.theridejournal.com>
- <http://www.velo-city2010.com> • <http://www.infobici.com> • <http://www.bicinews.com>
- <http://ciclismodecarretera.blogspot.com> • <http://plataformarecorridosciclistas.org>
- <http://per-el-pre-pirineu.blogspot.com> • <http://cicloturisme100x100.blogspot.com>
- <http://cyclingcat.blogspot.com> • <http://eltourmalet.blogspot.com> • <http://www.routeyou.com>
- <http://www.tracks4bikers.com> • <http://www.ramacabici.com> • <http://cicloturismecatala.mforos.com>
- <http://www.wikiloc.com> • <http://plataformarecorridosciclistas.org> • <http://www.ciclismoafondo.es>
- <http://www.revistaciclismoenruta.com>



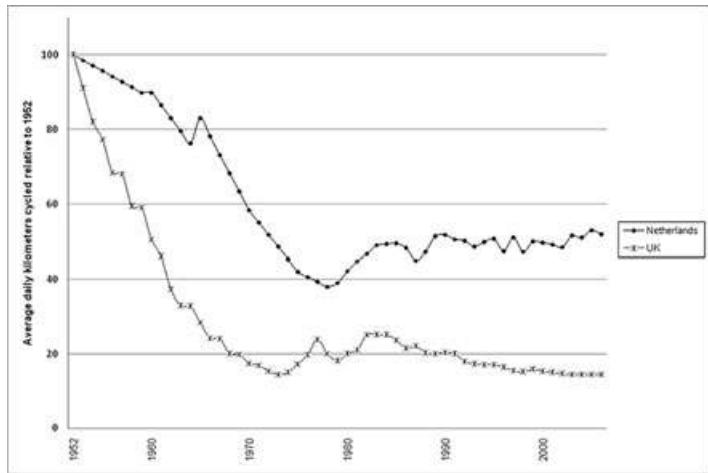
BICICLETA Y MOVILIDAD URBANA

La bicicleta ha tenido y aún tiene un papel en la movilidad cotidiana de muchos países y ciudades del mundo. Se trata sobre todo de zonas con bajo nivel de motorización, especialmente en sociedades urbanas de alta densidad de población en Asia. Incluso en Japón su uso es aún notable, ligado a la existencia de grandes cascos urbanos no preparados para el automóvil y al altísimo uso del transporte público, especialmente ferroviario, del que la bicicleta resulta ser un excelente complemento modal.

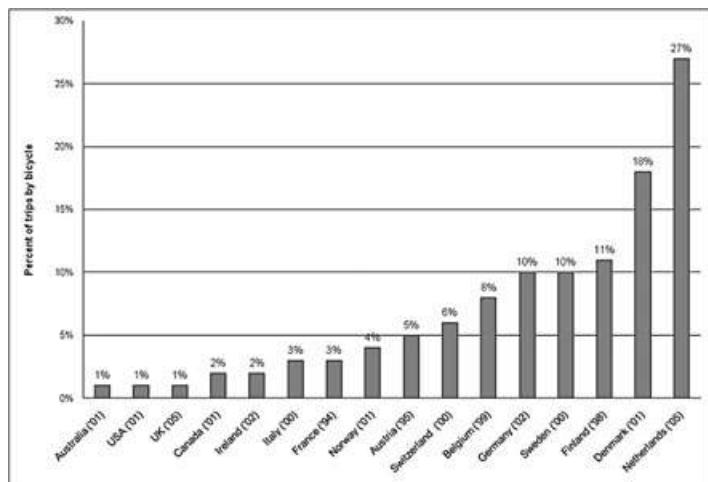
En Europa, el uso de la bicicleta como medio de transporte en los años inmediatamente posteriores a la Segunda Guerra Mundial era aún significativo, con valores del orden del 15% del total de viajes en el Reino Unido y Alemania. Pero la fuerte motorización que se produjo a partir de los años 1950 dejó el “modo bicicleta” como residual en la mayor parte de países, con algunas excepciones como Holanda y Dinamarca.

Pero a partir de los años 80, algunos países como Alemania y las mismas Dinamarca y Holanda, que nunca acabaron de perder la tradición ciclista en su movilidad cotidiana, como tampoco se habían desprendido de sus redes tranviarias, cuando ya se hizo evidente que el uso del automóvil estaba tocando techo impulsaron políticas de uso de la bicicleta, adecuando el espacio urbano y promoviendo la intermodalidad bicicleta-ferrocarril.

Parking de pago de bicicletas en una estación de ferrocarril de Tokio.

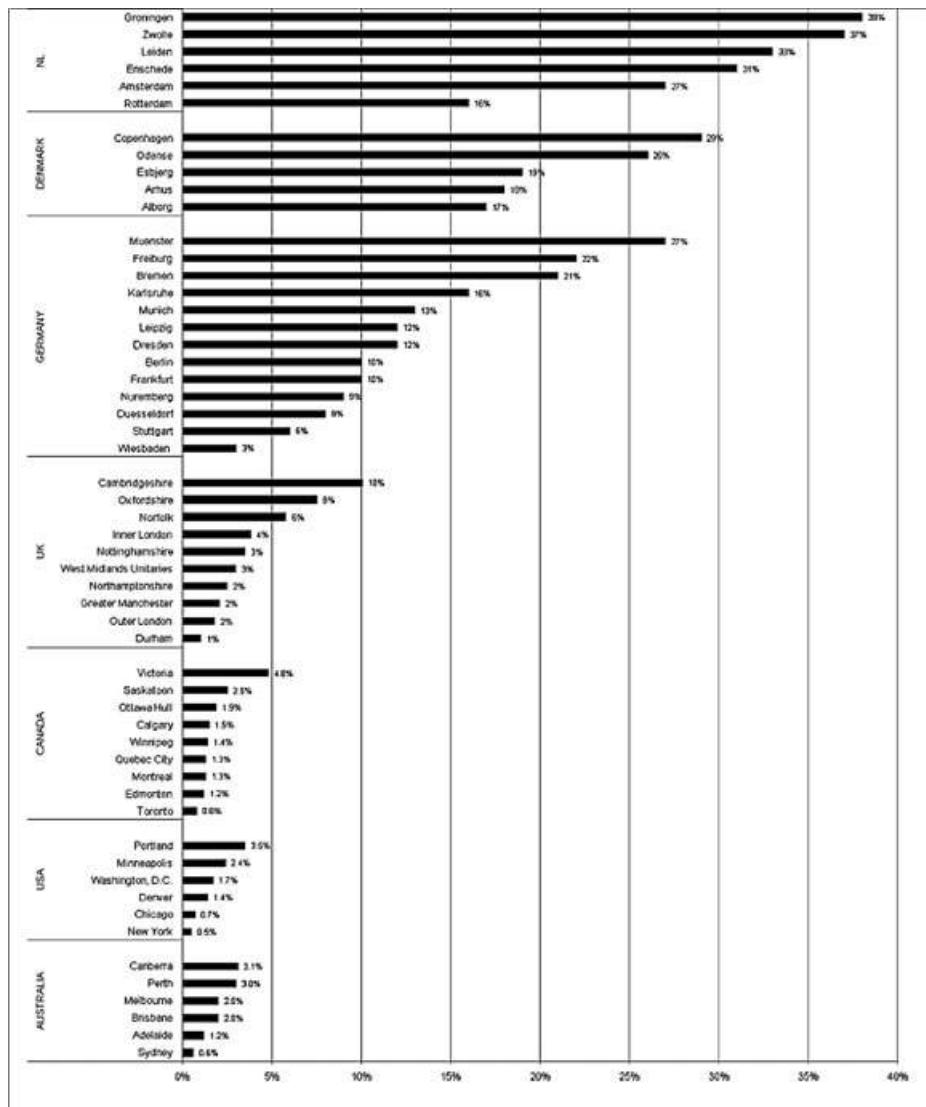


Sources: Department for Transport (2007); Netherlands Ministry of Transport (2007)



Sources: European Union (2003); German Federal Ministry of Transport (2003); U.S. Department of Transportation (2003); European Conference of the Ministers of Transport (2004); Department for Transport (2005); Organisation for Economic Cooperation and Development (2005); Netherlands Ministry of Transport (2006); Australian Bureau of Statistics (2007)

Vemos que las condiciones topográficas influyen en el uso de la bicicleta, pero no pueden justificar las diferencias entre el 2-3% de Irlanda y Francia, por un lado y el 10% de Suecia y Alemania por otro. Y lo más sorprendente es que las condiciones climáticas no tienen ninguna influencia, a no ser que queramos concluir ¡que cuanto más frío y lluvioso es el país más apetece usar la bicicleta!



(izquierda)

Evolución de los kilómetros circulados por habitante y día en Holanda y Reino Unido entre 1952 y 2006 (porcentaje relativo al nivel de 1950).

Porcentaje actual de viajes en bicicleta respecto de los totales en diversos países de Europa.

(derecha)

Porcentaje actual de viajes en bicicleta respecto de los totales en diversas ciudades del mundo.

Sources: Andersen (2005); Department for Transport (2006); Dutch Bicycling Council (2006); Australian Bureau of Statistics (2007); Netherlands Ministry of Transport (2007); Socialdata (2007); Statistics Canada (2007)

Las ciudades intermedias parecen más proclives al uso de la bicicleta, pero también en grandes ciudades como Amsterdam, Copenhague, Munich y Berlín su uso es importante.

Estos datos demuestran que las respectivas políticas de movilidad de cada país y ciudad proporcionan la mejor explicación sobre el uso de la bicicleta, y que por lo tanto el fomentar su uso es una decisión política a la que disponemos de herramientas técnicas para dar respuesta.

En España, la ciudad de Barcelona fue pionera en impulsar el uso de la bicicleta, iniciando una política voluntarista de implantación de carriles bici en 1983¹. Durante los primeros años los resultados fueron bastante desalentadores, pero a partir de finales de los 90 cuando ya se disponía de 120 km de carriles bici, se produjo un sorprendente punto de inflexión, y los carriles bici antes vacíos empezaron a poblararse de bicicletas, y a aparecer conflictos con peatones y automóviles..

La implantación del sistema de bicicletas públicas “bicing” en 2007 ha consolidado como un hecho ya irreversible la incorporación del “modo bicicleta” en la ciudad. Antes del bicing se producían en Barcelona unos 50.000 viajes al día en bicicleta, con el bicing son ya 100.000. Puede verse que son valores aún lejanos de los países del centro y norte de Europa, con lo cual se hace patente el enorme potencial de desarrollo del “modo bicicleta” en nuestras ciudades. Y creemos que se trata de un desarrollo no tan solo deseable, sino irreversible.

En nuestra opinión, tres son los requerimientos básicos para el uso de la bicicleta como medio de transporte cotidiano:

SEGURIDAD DEL VIAJERO. Este es el requerimiento básico para pasar de la bici como deporte a la bici como medio de transporte. La respuesta básica está en la INFRAESTRUCTURA y en el ESPACIO URBANO: carriles bici, calles de tráfico calmado, adecuación de cruces... El uso del casco, luces, reflectantes, el tipo de bicicleta... son aspectos secundarios frente a la importancia de la infraestructura.

SEGURIDAD FRENT AL ROBO. Este aspecto, al que en nuestro entorno se le da mucha importancia, y ciertamente la tiene, tiende a resolverse de forma sorprendentemente fácil cuando la bicicleta pasa de ser un raro objeto (de posible deseo o vandalización) en medio de la calle a ser un elemento masivo más, como los coches, las motos, los escaparates de las tiendas, las farolas, el mobiliario urbano... Aún así, está dando lugar a soluciones interesantes como aparcamientos cerrados, bicicletas urbanas baratas y discretas con una buena cadena para atarlas, bicicletas portátiles, bicicletas públicas...

	Barcelona ciudad (1,5 M de habitantes, 5,1 M de viajes diarios, datos EMO 2006) % sobre el total	Continuo urbano (ámbito EMT) (2,7 M de habitantes, 8 M de viajes diarios, datos EMO 2006) % sobre el total
A pie	46	44
Bici	1,4	1
Transporte público	30,4	27
Transporte privado	22,1	28
TOTAL	100	100

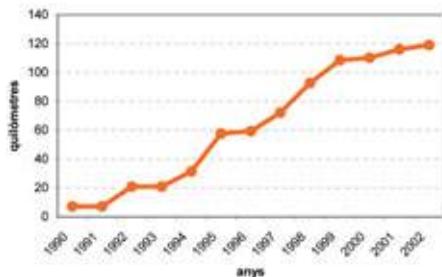


Gráfico de la Evolución de los kilómetros de carril bici en Barcelona entre los años 1990 y 2007.
(Fuente INTRA SL, a partir de los datos del Ayuntamiento de Barcelona)

¹ Según datos del Plan Estratégico de la bicicleta en Barcelona.

INTERMODALIDAD. El transporte no motorizado en una gran ciudad tiene que ser forzosamente intermodal, y la verdad es que el vehículo bicicleta no es fácil de encajar en los medios de transporte público urbano habitualmente abarrotados. Esta grave dificultad ha dado lugar a familias de soluciones totalmente diferentes, todas ellas muy interesantes:

- Adaptación de trenes y estaciones, e incluso de autobuses al transporte de bicicletas.
- Aparcamientos en estaciones (donde aparece de nuevo el problema de la seguridad al robo). Una solución nada excepcional es el disponer de una bicicleta en cada extremo del viaje en ferrocarril.
- Bicicletas portátiles de (relativamente) poco peso y volumen.
- Bicicletas públicas.



LA BICICLETA URBANA CONVENCIONAL

Las bicicletas urbanas presentan una enorme variedad, pero quizá su característica más común sea la discreción y el bajo precio: un bien fácilmente robable y que hay que dejar en la calle sometido a las inclemencias del tiempo no se presta a grandes alardes. Tampoco las solicitudes que se le requieren son tan extremas como el bajo peso en el caso de las bicicletas de carretera o la complejidad de las suspensiones y frenos en las de montaña. Aún así, el mundo de la moda, del lujo, de las “tendencias”, nos demuestra claramente que los humanos tendemos a la sofisticación y al exhibicionismo, más allá de las necesidades objetivas, y una bicicleta urbana puede ser un vehículo perfecto para su exhibición, como ocurre con coches y motos.

Pero lo cierto es que el hecho de que la bicicleta urbana deba dejarse aparcada en la calle frena las tendencias a la sofisticación y al alto coste. Aún así, un repaso atento de las bicicletas aparcadas en las calles de nuestras ciudades muestra una variedad de vehículos interesante, muchos de ellos “customizados” a partir de antiguas bicicletas de carretera y de montaña.



(izquierda)
Bicicleta urbana en las playas de Miami.

(abajo)
Las antiguas bicis de carretera y de montaña disfrutan de una segunda juventud adaptadas a bicicleta urbana.



LA BICICLETA ELÉCTRICA

Para apreciar el potencial de una bicicleta eléctrica nada mejor como probar una: resulta sorprendente cómo las subidas se convierten en llanos y los llanos en bajadas.

La bicicleta eléctrica es una bicicleta convencional con cuatro elementos nuevos:

UN MOTOR ELÉCTRICO sorprendentemente pequeño y discreto, normalmente situado en el eje de la rueda trasera, aunque también puede estar en el pedalier. Su potencia máxima legal es de 250 W, y acostumbran a ser de 180 W de potencia nominal.

EL CONTROLADOR es una pequeña cajita que mediante impulsos envía la energía de la batería al motor.

EL SENSOR DE PEDALED es el cerebro que regula la energía que envía el controlador al motor. Puede ser de dos tipos:

- El “sensor de par” es capaz de medir la fuerza que se transmite a los pedales y actúa sobre el controlador para que transmita al motor una cantidad de energía proporcional, con lo que se consigue una agradable sensación de bicicleta normal, sin que se precise ningún tipo de palanca para activar o regular el sistema
- El “sensor de movimiento” simplemente capta que giran los pedales y transmite al controlador la orden de proporcionar energía. Mediante una palanca el ciclista puede escoger entre varios niveles de potencia.

Bicicleta eléctrica.
Bicicletas eléctricas y coches híbridos empiezan a ocupar el Lower Manhattan.



Las BATERÍAS actuales son de Litio, de 24 V o de 36 V. Su duración depende evidentemente de su uso, normalmente es de más de 30 km. La batería es el único elemento cuyo peso y volumen distinguen a una bici normal de una eléctrica, pues los demás elementos, incluso el motor, resultan casi imperceptibles.

La próxima irrupción del coche eléctrico en las ciudades impulsará también la electrificación de la bicicleta. El coche eléctrico urbano será pequeño, lento y silencioso, mientras que la bicicleta eléctrica es un poco más pesada y rápida que la convencional. Puesto que las características de coches, motos y bicicletas eléctricas se aproximan, se facilitará su convivencia en los centros de las ciudades, lo cual tendrá repercusiones en el diseño del espacio urbano.

EL ESPACIO DE LA BICICLETA

El auténtico hecho diferencial que ha impulsado el uso de la bicicleta como modo de transporte ha sido la implantación de carriles bici en calles y avenidas, lo cual está obligando a modificar el espacio urbano más que ningún otro factor. Las enormes y necesarias inversiones en metro que se han producido en Madrid, Barcelona, Valencia, Bilbao y Sevilla han mejorado mucho la calidad de vida de sus ciudadanos y la eficiencia de las ciudades, pero han dejado enormes deudas y apenas han alterado el espacio urbano. En cambio, la extensión de la bicicleta (y la posterior del coche eléctrico) tendrá un coste mucho más reducido pero alterará en mucha mayor medida la imagen de nuestras ciudades. En efecto, la irrupción de la bicicleta, cuyas características de velocidad y maniobrabilidad son sustancialmente diferentes tanto de las del peatón como del coche, alterará el siempre delicado "statu quo" del reparto vial entre vehículo privado, transporte público de superficie y peatón, y está obligando ya a nuevos diseños en calles y espacio público en general.

Para implantar en un vial existente el espacio que requiere el uso seguro y eficiente de la bicicleta, hay que alterar el reparto de un bien escaso como es la sección.



(izquierda)

Coexistencia de buses, taxis y bicicletas en los carriles bus ampliados de París.

(centro)

Ejemplo de implantación de carril bici y estacionamiento de motos a costa de reducir el espacio del vehículo privado y preservando el espacio peatonal, en la calle Tuset de Barcelona.

(abajo)

Ejemplo de implantación de carril bici a costa de reducir el espacio peatonal en la Avenida Diagonal en Barcelona.



Pero no se trata tan solo del reparto de la sección vial, sino de la propia estructura vial de la ciudad. Las calles de sentido único, solución eficiente para el tráfico de vehículos de motor, provocan itinerarios ineficientes para las bicicletas, que se resuelven en indisciplina por parte del ciclista. Evidentemente (en contra de lo que piensan los no ciclistas, cada vez menos mayoritarios), la solución no llegará por el refuerzo de la disciplina, sino por la adecuación de la ciudad a la nueva realidad, y ya están apareciendo los carriles bici en contrasentido y las zonas de tráfico calmado (zonas 30) en las cuales las bicicletas, al igual que los peatones, circulan en los dos sentidos.

(derecha)

Circulación de bicicletas en contrasentido en zonas 30 en Clamart, Francia:

Carril bici bidireccional en la calle unidireccional Urgell, Barcelona.

(abajo)

Ejemplos de señalización de zonas de uso exclusivo de bicicletas y de carriles bici.





(izquierda)

La introducción de los carriles bici en Nueva York empieza a hacer posible el uso de la bicicleta a todos los públicos. Actualmente Nueva York impulsa un ambicioso plan de promoción de la bicicleta y dispone ya de 1.000 kilómetros de carriles bici. La eficiencia de la bicicleta como medio de transporte urbano podrá extenderse a una mayor parte de la población.

En Nueva York los mensajeros descubrieron la bicicleta hace décadas, pero se trata de un trabajo duro y arriesgado.

(abajo)

Bicicletas *fashion* en las calles de Nueva York.

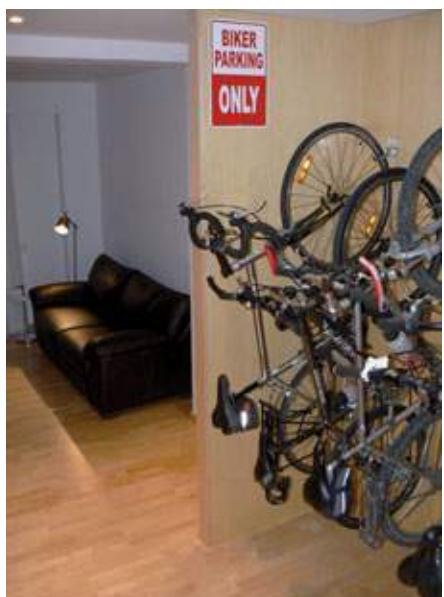


EL ESTACIONAMIENTO DE LA BICICLETA



Parking de bicis en la estación de ferrocarril de Gante (Bélgica).

El parking bici en la entrada de casa.



El estacionamiento de la bicicleta es un problema al que se están dando desde respuestas muy simples, como espacios en las calles con postes donde atar la bici, hasta ensayos de sofisticadas consignas con accesos mediante tarjetas y claves electrónicas. La realidad es que en las ciudades y países donde se produce un uso masivo de la bicicleta las soluciones adoptadas son poco sofisticadas, lo cual no quiere decir que no exista un espacio para la innovación. En cualquier caso, conseguir el mero espacio para estacionar centenares e incluso miles de bicicletas ya supone un reto, especialmente en los entornos de las estaciones de ferrocarril.

Un tema interesante es el del estacionamiento en recintos cerrados, ya sea en edificios residenciales o de oficinas, o parkings subterráneos. El liberar la superficie vial de automóviles estacionados, construyendo parkings privados o públicos de pago, subterráneos o en altura, es un hecho ya asumido en todas las ciudades avanzadas, y las normativas urbanísticas lo incorporaron hace ya decenios. En cambio, se ha permitido el estacionamiento libre y gratuito de motos en superficie (aceras...), lo cual constituye uno de sus principales atractivos, y se puede incluso justificar desde el punto de vista del interés público ya que es mucho mejor que estos viajes se realicen en moto que en coche. La bicicleta aprovecha también esta ventaja de la permisividad del estacionamiento en superficie, contrarrestada en parte por el temor al robo y al vandalismo.

En cualquier caso, el uso cada vez más masivo de la bicicleta aconseja empezar a pensar en su estacionamiento fuera de superficie, habilitando plazas en los parkings públicos y privados, dentro de los edificios (vestíbulos...), o incluso dentro de las casas. Empiezan ya a incluirse en las normativas urbanísticas obligaciones de espacio para estacionamiento de bicicletas en la planta baja de los edificios, lo cual podía ser interesante para zonas de oficinas o bloques residenciales.

INTERMODALIDAD

La presencia de bicicletas en los transportes públicos resulta problemática, aunque en los últimos años se están dando avances importantes.

En los trenes de cercanías, donde la mayor parte de estaciones son en superficie, resulta fundamental adaptar el interior de los trenes, y en la actualidad los nuevos modelos tienen este aspecto ya previsto, en general asociado a los requerimientos de las sillas de ruedas. Pero la pérdida de capacidad en asientos debido a estas nuevas necesidades es importante, de modo que la posibilidad efectiva del transporte de bicicletas va muy ligada al aumento de la calidad y la capacidad global del sistema.

En las redes de metro, generalmente subterráneas y con altos índices de aglomeración, el transporte de bicicletas es un problema, por lo que inicialmente se tendió a su prohibición, evolucionando posteriormente a la imposición de limitaciones de horario, horas punta de los días laborables, con lo que se reduce notablemente su posibilidad de uso en la movilidad cotidiana.

La bicicleta en el autobús es un tema no resuelto, y raramente abordado. Ejemplo en Los Ángeles, 2005.



LOS SISTEMAS DE BICICLETAS PÚBLICAS

Las bicicletas públicas aparecieron en Amsterdam en 1968. Se trataba de unas bicicletas muy simples y robustas que se podían dejar y recoger gratis en cualquier lugar. Otras ciudades europeas implantaron sistemas parecidos, que tuvieron un éxito relativo debido a problemas de vandalismo y mantenimiento. En 1995 se implantó a gran escala un sistema con pago de monedas en Copenhague, que aún funciona, y en 1997 en Rennes la contrata del mobiliario urbano y la publicidad ofreció como un plus el establecimiento de un sistema de bicicletas públicas. Éste fue el inicio de la competencia entre los dos gigantes mundiales de la publicidad y el mobiliario urbano, Clear Channel y JC Decaux, para desarrollar un modelo de gestión que llegó a su forma actual con la contrata de Lyon en 2005. Desde este año se han implantado, tan sólo en Francia, una veintena de instalaciones de este estilo y una cuarentena en España.

Pero lo que empezó como un complemento del mobiliario urbano se ha convertido en un fenómeno de movilidad, y las empresas operadoras de sistemas de transporte público están desembarcando en el sector, con la consecuencia de que empiezan a aparecer esquemas integrados de transporte público en los cuales el soporte de pago de los abonos de transporte es el mismo que el de las bicicletas públicas. Además, se ha observado que la implantación de un sistema de bicicletas públicas impulsa también el uso de la bicicleta privada, consolidando su incorporación a las políticas globales de gestión de los desplazamientos urbanos.

El sistema Vélib de París, introducido 2007. Cuenta con un terminal muy completo desde el que se pueden comprar, con tarjeta de crédito, los abonos diarios, semanales y anuales. Dispone ya de 20.000 bicicletas y 1.600 estaciones.





El Bicing de Barcelona, introducido en 2007. Las bicicletas se anclan en bases fijas y al acercar el abonado su tarjeta sin contacto al sensor, la pantalla le indica el número de bicicleta que debe recoger, que se desbloquea automáticamente. Los abonos son anuales, y por la primera media hora no hay pago adicional. Actualmente cuenta con unas 400 bases, 6.000 bicicletas y 180.000 abonados (11% de la población).

Berlín, 2005. Implantación del sistema de bicicletas públicas de la DB (compañía de los ferrocarriles alemanes). El abonado envía un mensaje telefónico con el número de la bicicleta que quiere coger y recibe otro mensaje con un código que le permite desbloquear la bicicleta. No existen bases fijas de bicicletas, sino que éstas se pueden dejar en cualquier lugar visible de la vía pública.

BIBLIOGRAFÍA

Pucher, John and Buehler, Ralph (2008). "Making Cycling Irresistible: Lessons from The Netherlands, Denmark and Germany", *Transport Reviews*, 28:4, 495-528.

BACC (Bicicleta Club de Catalunya). "Estudio sobre el impacto de la implantación de sistemas de bicicletas públicas en España", octubre 2009.

Ville Rail & Transports.

Los sistemas de bicicletas públicas han desarrollado también un nuevo concepto: el transporte público individual. Hasta ahora, el transporte público ha sido asociado a transporte colectivo (tren, autobús...) mientras que el transporte privado se asociaba a individual (coche, moto...), con la notable excepción del taxi, un transporte público individual. Los sistemas de bicicletas urbanas han desarrollado una compleja tecnología mixta de gestión de flotas, mecánica, telemática, implantación urbana... que tiene por delante un futuro prometedor, al permitir disociar los conceptos de uso (individual) y propiedad (colectiva). Y este concepto será clave para el desarrollo del coche eléctrico, de cuyo futuro ya pocos tienen dudas. En efecto, el coche eléctrico urbano es un vehículo poco interesante para su disfrute en propiedad, por su poca autonomía y versatilidad, pero el desarrollo de flotas públicas promovidas por fabricantes y administraciones será probablemente la mejor forma de acelerar su implantación.

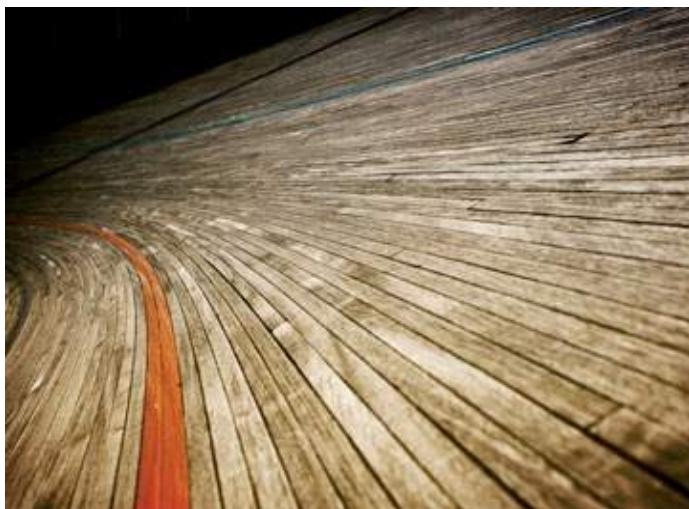
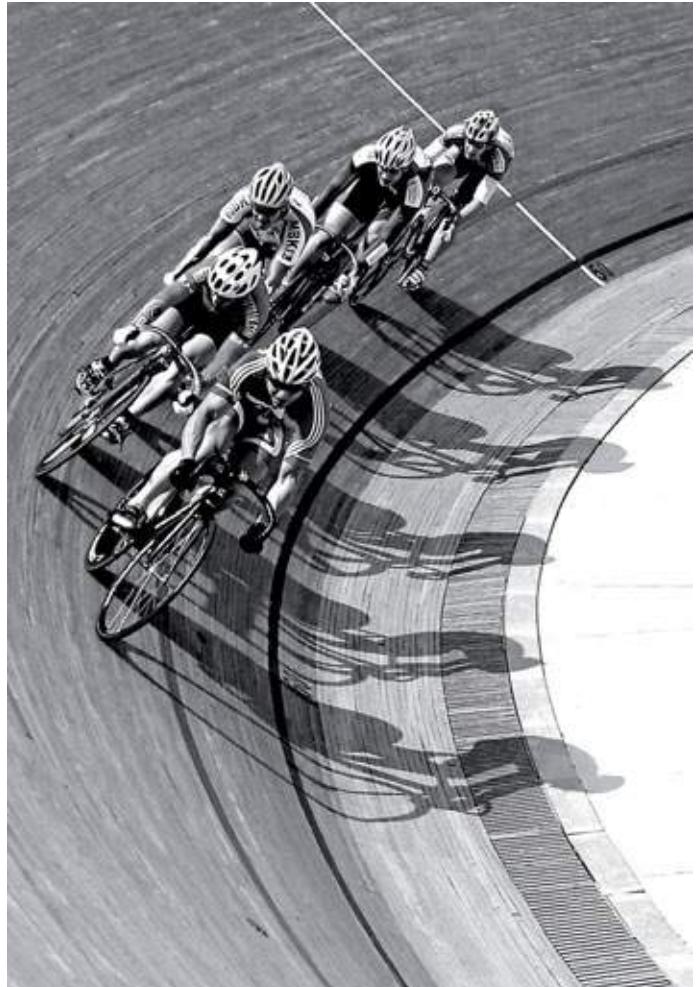




INTRODUCCIÓN

Hace 100 años que apareció el libro de Kandinsky “De lo espiritual en el arte”. Hace 10 años que empecé a rodar con el ingeniero. Y este año que acaba sentiremos la ausencia de Miguel Delibes y José Saramago.

Se dicen muchas cosas no muy exactas... que más vale pájaro en mano que ciento volando cuando ya Chillida decía que valía más ciento volando que pájaro en mano... También dicen que “una imagen vale más que 1.000 palabras”. Pues depende...porque si las palabras son de Delibes... o de Hemingway... pues necesitaríamos muchas buenisísimas imágenes para evocar lo que dicen sus palabras. Por eso, no sustituiremos las palabras por imágenes pero las acompañaremos en sintonía.



“He empezado muchas veces a escribir un cuento sobre carreras de bicicletas, pero nunca me ha salido ninguno que fuera tan bueno como son las carreras, las de velódromo cubierto o al aire libre tanto como las de carretera. Pero algún día lograré meter en unas páginas el Vélodrome d'Hiver con su luz que atravesaba capas y capas de humo, con la pista de madera y sus empinados virajes, y el zumbido de los tubulares sobre la madera cuando pasaban los ciclistas, y el esfuerzo y las tácticas y los corredores desviándose arriba o abajo en la pista, convertidos en una parte de sus máquinas. Lograré meter la impresión fantástica del medio fondo, el ruido de las motos de los entrenadores con sus rodillos, y los entrenadores con sus pesados cascos y sus teatrales trajes de cuero, que se inclinaban hacia atrás para proteger a los ciclistas de la resistencia del aire, y los ciclistas con sus cascos ligeros que se pegaban a los manillares, sus piernas que hacían girar a gran velocidad los pedales, y las pequeñas ruedas delanteras se pegaban al rodillo de la moto tras la cual se abrigaba el ciclista, y los duelos en que se alcanzaba el colmo de la excitación, con el petardeo de las motos y con los ciclistas corriendo codo a codo y rueda a rueda, arriba por el peralte y lanzándose abajo y dando vueltas a una velocidad como para matarse, y de pronto un hombre que no podía sostener la velocidad y se descomponía, y se le veía chocar brutalmente contra la sólida muralla de aire de la que hasta entonces había estado separado.

Había tantas clases de carreras. Los sprints por eliminatorias hasta llegar a la carrera final, en los que los dos corredores retenían durante largos segundos su velocidad, cada cual esperando que el otro guiara el sprint y así obtener un abrigo inicial, y luego las vueltas a medio paso hasta la zambullida final en la fascinadora pureza de la velocidad. Había los programas de carreras a la americana, con sus series de sprints que llenaban la tarde. Había las hazañas de velocidad absoluta, cuando un hombre corría solitario durante una hora contra el reloj, y había las terriblemente peligrosas y hermosas carreras de cien kilómetros en los grandes peraltes de madera de la pista de quinientos metros del Stade Buffalo, el velódromo al aire libre en Montrouge donde se hacían las carreras tras moto. Estaba Linart, el gran campeón belga a quien llamaban el Sioux por su perfil, que agachaba la cabeza para sorber aguardiente caliente por un tubo de caucho unido a un termo que llevaba debajo del jersey, y así cobraba fuerzas para el terrible arranque de velocidad de sus fines de carrera. Había los campeonatos de Francia tras moto, en la pista de cemento de seiscientos sesenta metros del Parc des Princes, en Auteuil, cerca del hipódromo, que era la pista más peligrosa de todas, y allí vimos un día caer al gran corredor Ganay, y oímos cómo se le aplastaba el cráneo dentro del casco, tal como uno aplasta un huevo duro contra una piedra, en una merienda en el campo, para quitar la cáscara. Tengo que escribir sobre el extraño mundo de las carreras de seis días y las maravillas de las carreras por carretera en la alta montaña. El francés es la única lengua en que se ha escrito bien sobre esto y los términos son todos franceses, y por eso es difícil escribir en otra lengua.”

A Moveable Feast, Ernest Hemingway



“Mi bicicleta nunca fue matriculada y en consecuencia constituía una sabrosa presa para los sa-buesos municipales. Y ¿por qué no matriculaba mi bicicleta y vivía tranquilo? ¡Ah! Esto formaba parte de la educación francesa de mi padre. Mi padre era enemigo de las tasas arbitrarias aunque fuesen menores. La arbitrariedad de la tasa la determinaba él naturalmente.[...] Aparte lo arbitrario de la tasa, mi padre alimentaba sobre el particular insensato punto de vista: un chico en bicicleta que se dejara prender por un hombre a pie era un tonto, se merecía la multa. Y, bien pensado, no le faltaba razón. Ante semejante filosofía, nuestro ciclismo, el de los ocho hermanos, no consistía tanto en pedalear como en escurrir el bulto, en tener el ojo abierto para descubrir a tiempo al guar-dia de la porra y no caer en sus manos. No era tarea sencilla porque hace medio siglo un agente municipal ponía tanto celo en agarrar a un ciclista sin matrícula como el que puede poner hoy en sorprender un coche aparcado en zona azul sin el tique de la ORA. De este modo, en la ciudad, el deporte de las dos ruedas sobre el ejercicio en sí, encerraba para un niño un singular atractivo: no dejarse cazar. Nos lanzábamos a tumba abierta en cuanto divisábamos un agente, doblábamos las esquinas como suicidas, de tal manera que cuando el guardia quería reaccionar ya estábamos a mil leguas. El riesgo estribaba en meterse uno en un callejón sin salida o adentrarse en una calle que tuviera un guardia en cada esquina. Si mal no recuerdo, en aquellos años los agentes urbanos usaban silbato y desde luego se ponían fuera de sí cada vez que un ciclista sin matrícula pasaba por su lado como una exhalación, afeitándoles. En esos casos, soplaban el pito y la presencia de otros guardias en las proximidades podía crear problemas. De modo que pedalear ojo avizor, eludiendo las asechanzas, era una actividad maravillosa que despabilaba a cualquiera.”

Mi Querida Bicicleta, Miguel Delibes



Más tarde, cuando me casé, intenté incorporar a mi mujer a mis veleidades ciclistas y en la petición de mano, además de la inevitable pulsera, le regalé una bicicleta francesa amarilla de nombre Velox. La marca era ya un augurio pero siempre imaginé que en el vocablo habría no poco de publicidad. Con las dos bicicletas nos fuimos a la casa de mi padre, en Molledo-Portolín, a pasar la luna de miel. Fueran de nuestros paseos cotidianos y de los amartelamientos naturales, apenas teníamos otra distracción que las bicicletas, de tal manera que al segundo día de estancia le propuse a mi mujer irnos a comer a Corrales de Buelna. Ella, desconociendo el itinerario, aceptó con entusiasmo de recién casada. Nos encaramamos en las bici y ya al bajar la varga de la iglesia me di cuenta de que aquello de la Velox no era una hipérbole. La máquina amarilla, con un radio de rueda la mitad que la mía, empezó a embalarse y al llegar al cementerio ya me sacaba seis metros. Entonces recordé que al terminar la cuesta, tras la curva, junto al pueblecito de Madernia, había un paso a nivel contra cuya valla podría estrellarse, de no moderar la marcha. Preocupado la voceé:

-¡Frena!

Pero ella me gritó a su vez:

- No puedo! ¡No me puedo parar!

Pedaleé con energía hasta alcanzarla y mientras nos deslizábamos emparejados a 60 km por hora trataba de convencerla de que la palanca de freno no estaba tan dura y que mediante un pequeño esfuerzo podría doblegarla. Inútil. No era fuerza lo que le faltaba sino envergadura de mano; no podía alcanzar la palanca sin soltar el puño. La Velox adquiría cada vez mayor velocidad y yo ya imaginaba, tras la curva que divisaba al fondo de la carretera, las portillas cerradas del paso a nivel y el topetazo inevitable. Entonces tomé una decisión a lo Tom Mix, una decisión disparatada: yo frenaría la rueda delantera de mi máquina con la mano izquierda y, simultáneamente, sujetaría el sillín de la velox con la derecha; es decir, frenaría por los dos hasta lograr detenernos. Era una determinación de enamorado, arriesgada, pero poco práctica. Con el primer tirón, Ángeles se desequilibró, y sin perder velocidad se fue de cuneta a cuneta en un zigzag peligrosísimo. Al segundo intento, las bicicletas entrechocaron y a punto estuvimos de irnos los dos a tierra. Nervioso, a medida que la curva se aproximaba, grité:

- Por Dios bendito, ¡frena!

Pero ella ya había perdido la moral:

- ¡No me puedo parar, no me puedo parar!

La Velox se aceleraba y, ante lo inevitable, alcé los ojos al cielo y pedí con unción que el paso a nivel estuviese abierto. Así fue en efecto, pero la Velox, ligera como el viento, haciendo honor a su nombre, atravesó la vía como una centella y no se detuvo hasta llegar a Santa Cruz, el pueblo inmediato, donde al fin nos repusimos del susto.

Mi Querida Bicicleta, Miguel Delibes



Mira siempre hacia delante; nunca mires a la rueda.

Yo salí pedaleando como si hubiera nacido con una bicicleta entre las piernas. En el extremo del jardín, doblé con cierta seguridad y al llegar al fondo volví a girar para tomar el camino del centro, el del cenador, desde donde mi padre controlaba mis movimientos. Así se entabló entre nosotros un diálogo intermitente, interrumpido por el tiempo que tardaba en dar cada vuelta.

- ¿Qué tal marchas?

- Bien.

- ¡No mires la rueda! Los ojos siempre adelante.

Pero la llanta delantera me atraía como un imán y tenía que esforzarme para no mirarla.

A la tercera vuelta reconocí que aquello no encerraba mayor misterio y en las rectas, junto a las tapias, empecé a pedalear con cierto brío. Mi padre, a la vuelta siguiente frenó mis entusiasmos.

- No corras. Montar en bicicleta no consiste en correr.

- Ya.

Le cogí el tranquillo y perdí el miedo en menos de un cuarto de hora. Pero de pronto se levantó en mí el fantasma del futuro, la incógnita de “¿qué ocurrirá mañana?”, que ha enturbiado los momentos más felices de mi vida. Al pasar ante mi padre se lo hice saber en unos de nuestros entrecortados diálogos.

- ¿Qué hago luego para bajarme?

- Ahora no te preocunes por eso. Tú despacito. No mires a la rueda.

Daba otra vuelta pero en mi corazón ya había anidado el desasosiego. Las ruedas siseaban en el sendero y dejaban su huella en la tierra recién regada, pero la incertidumbre del futuro ensombrecía el horizonte. Daba otra vuelta. Mi padre me sonreía. Yo me mantenía en mis trece.

- Y cuando me tenga que bajar, ¿qué hago?

- Muy sencillo; frenas, dejas que caiga la bicicleta de un lado y pones el pie en el suelo.

Rebasaba el cenador, llegaba a la casa, giraba a la derecha, encarrilaba el paseo junto a la tapia, aceleraba, alcanzaba el fondo del jardín y retornaba por el paseo central. Allí estaba mi padre solícito. Yo insistía tercamente:

- Pero es que no me sé bajar.

- Eso es bien fácil, hijo. Dejas de dar pedales y pones el pie del lado que caiga la bicicleta.

Me alejaba de nuevo, sorteaba el cenador, topaba con la casa, giraba a la izquierda, recorría el largo trayecto junto a la tapia hasta alcanzar el fondo del jardín para regresar por el paseo central. Mi padre iba caminando lentamente hacia el porche.[...] Y allí me dejó solo, entre el cielo y la tierra, con la conciencia clara de que no podía estar dándole vueltas al jardín eternamente.[...] Luego, cada vez que decidía detenerme, me asaltaba el temor de caerme y así seguí dando vueltas incansablemente hasta que el sol se puso y ya, sin pensármelo dos veces, arremetí contra un seto de boj, la rueda delantera se enrayó con las ramas y yo me apeé tranquilamente.

Mi Querida Bicicleta, Miguel Delibes



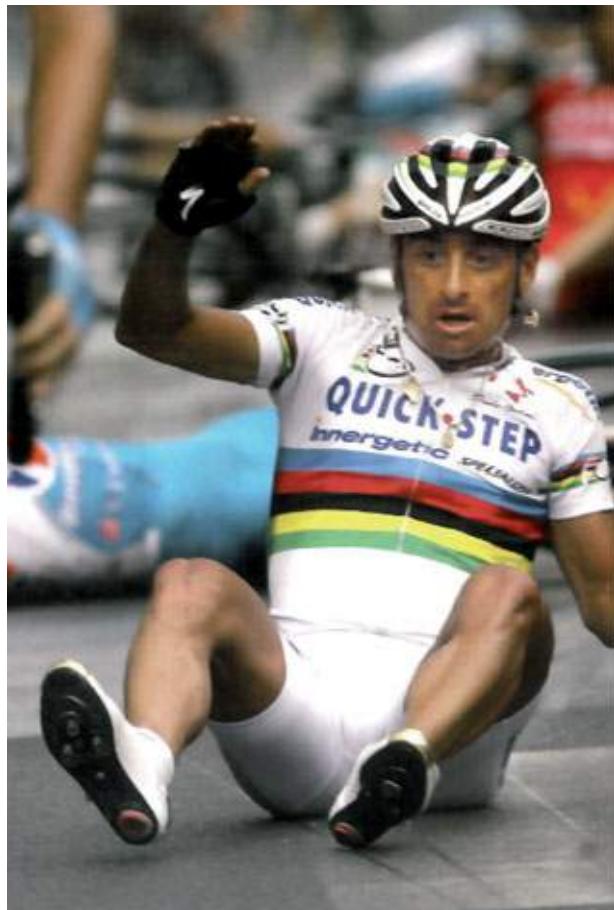
“¿Oficio?, le preguntaron. Y respondió él: “Ciclista, señor”.

Se hizo un vacío de ruido. Volvió a silbar el aire. Quejoso como antes. El capitán decapitó la liturgia, abandonó el senado de notables desde el que recitaba los nombres y dirigió sus pasos hasta ubicarse frente al tal Jesús, un vasco, intuí por el acento, al que examinó lentamente con gesto inexpresivo. El momento se hizo eterno por insospechado, por intrigante. Disipó la tensión la sonrisa de Aldamiz, un brazo lanzado al hombro de aquel chico y una sentencia jovial: “Perfecto Loroño. Serás el cartero”. El tiempo durante un encierro, sin libertad, se hace angustioso. Me destinaron, como tramé, a la cocina del cuartel. Pelaba patatas, cargaba calderos, removía sopas, recogía mesas y, claro, fregaba platos. La labor comenzaba al alba, con el desayuno, y apenas contemplaba descansos en los que fumar un cigarro, vicio al que me abracé nada más alistarme.

El humo de aquel tabaco negro me abstraía, me calmaba. El pitillo más gustoso era el de media mañana. Me sentaba en las escaleras, tres, de la puerta trasera de la cocina y miraba la montaña a la que daba la espalda el cuartel, plantado frente al mar. Esperaba allí noticias de casa. Me las traía el cartero, Jesús. Su labor consistía en descender por la colina hasta la oficina de correos de Santander, recoger allí la correspondencia militar y descoser el camino hasta alcanzar la cima de la loma. Lo hacía todo en bicicleta, un hierro roído en algunas partes por el óxido que había, según me dijo, montado con sus propias manos, recolectando piezas de donde podía para competir en las carreras ciclistas. Movía con sencillez aquel trasto. Se diría que se acompañaban como si hubiesen nacido el uno para el otro. Era armonioso aquel movimiento. Los veía subir por la revirada cuesta. Loroño, voraz, el gesto encrespado, urgente, como si en aquella saca que colgaba de la espalda llevara alguna noticia de extraordinaria relevancia. Y en realidad lo eran todas. Aunque íntimamente. Cargaba Loroño cuesta arriba con ardientes palabras de amor de parejas separadas por el espacio, muro insalvable; otras eran afectuosas, de algún hermano, de algún familiar; o extrañas por su procedencia, por el remite; alguna vez uno de esos sobres sobresalía por su funesto aroma. Era inconfundible la muerte.”

Tres Escalones, Alain Liseka*

* Bilbao, 1977. Fue responsable de la revista cultural Ortzadar y especialista en ciclismo.



“Mi tour de Langkawi acabó de la misma manera que la vuelta a Siam: en el asfalto. Si a ello se suma una caída sin consecuencias en la etapa inaugural de Malasia se llega a un total de tres accidentes en el plazo de un mes. Debo confesar que en los tres casos la culpa fue mía. Mi jefe de equipo lo llama “proceso de aprendizaje”, Morder el polvo forma parte de ello. Trato de convencerme de que voy bien mientras consiga levantarme después de cada caída. Pero no las tengo todas conmigo.”

Lluvia En Mis Ojos, Thijs Zonneveld

“Pero cuando evoco el mundo de la bicicleta suelo olvidar las complicaciones mecánicas que lleva consigo, mi incapacidad para volverla a su estado normal cuando algo se estropeaba. No quiero hablar de las averías del piñón, o del plato, de los juegos de bolas porque eso son ya palabras mayores, sino simplemente de los pinchazos, del humilde pinchazo de una rueda de bicicleta. Por supuesto conocía la técnica a emplear para su reparación: aplicar los desmontables, sujetarlos a los radios, extraer la cámara, inflarla, introducirla en un balde de agua, buscar la punzada, frotarla con lija, extender la disolución, orearla, quitar la membranita blanca del parche y aplicarlo. El camino de vuelta tampoco ofrecía dificultad: introducir la cámara bajo la cubierta, repartirla a lo largo de la rueda sin retorcerla, meter la cubierta en la llanta a mano mientras pudiese, y, finalmente, en los centímetros finales, con los desmontables.

Todo correcto pero era ahí donde empezaba mi calvario. La rueda, después de reparada no cogía aire o, si lo cogía lo expulsaba con la misma rapidez.

- Pellizcas la cámara con el desmontable, chaval. La rueda está pinchada.
Debía de ser cierto; al arreglar un pinchazo inevitablemente hacía otro.”

Mi Querida Bicicleta, Miguel Delibes

“Nada hay más escalofriante que la sensación de vacío que provoca una pedalada al aire. Un eslabón de la cadena que se suelta. El cuerpo de Arturo perdió de súbito su punto de apoyo. Casi tocó con el mentón en la tija del manillar. Adrenalina y un reflejo salvador. Al fin pudo recomponer la figura y sentarse mientras veía culebrear la cadena sobre el asfalto. Suelta. Inútil. Y ahí, una vez sorteado el peligro de la caída, empezó lo peor: ver cómo se alejaban las otras bicicletas. Escuchar incluso algún comentario con sorna. Eso le despellejaba por dentro.

[...]Trató de poner a salvo su dignidad pensando en otra cosa. Era difícil. No dejaban de circular otros participantes. Cada uno era una puñalada. Cada vez más gordos, más viejos. Más dolorosos. Echó la vista al otro lado. Al menos iba a aprovechar el mirador de La Arboleda. Pensó en el ingeniero de caminos o en el encargado de obra que elige la ubicación de los miradores. Sin querer, condicionan la forma de mirar el paisaje de todos los que por allí pasan”

Jesús Gómez Peña *

* Baracaldo, 1965. Redactor de Radio Euskadi y El Correo.



En 2011 se cumplen 100 años de la aparición del libro de Kandinsky “De lo espiritual en el arte”. En él describe que la composición tiene dos medios: color y forma.

Kandinsky en su libro: “Punto y línea sobre el plano” analiza en primer lugar el punto, en segundo lugar la línea y en tercer lugar el plano.

Cuando escribe sobre una recta lo hace de la siguiente manera: “Se trata de la recta, que en su tensión constituye la forma más simple de la infinita posibilidad de movimiento” y también escribe “La línea geométrica es un ente invisible. Es la traza que deja un punto al moverse y es por lo tanto su producto”.

Parece hablar de la bicicleta en las que esas rectas-ejes son imaginarios y sólo intuidos por los círculos concéntricos que van dando forma a cilindros, troncos de cono y a todos los elementos giratorios de la bicicleta.

Y sigue Kandinsky: “mientras la recta es una completa negación del plano, la curva contiene en sí un germen de plano”



“La recta puede engendrar un plano, pero, distintamente de la curva, que puede hacerlo a partir de dos impulsos, necesita tres. [...] La ausencia absoluta de toda recta y de todo ángulo en el caso de la curva tiene su contrapartida en el caso de la recta, pues en el plano por ella engendrado hay siempre tres líneas (rectas) y tres ángulos, índices que señalan entre los dos tipos de plano primario. De este modo dichos planos se oponen como el par de planos fundamentalmente antagónicos”.

Planos fundamentalmente antagónicos: triángulo y círculo.

Los planos que Kandinsky describiría como fundamentalmente antagónicos en la bicicleta son fundamentalmente necesarios. El círculo implica rotación y, por lo tanto, movimiento y el triángulo es la rigidez. Parecen conceptos contrapuestos pero se complementan.



“Todo el uso del color en el siglo XX se origina en Matisse, así como todo el uso de las formas se remonta a Cezanne. Picasso llegó a decir: “si todos los grandes pintores coloristas de este siglo pudiesen componer un estandarte con sus colores favoritos, el resultado sería seguramente un Matisse”. ¿y qué colores serían, sino los de la alegría pura y del placer, que se deleitaban en los matices de cobalto cromo y cadmio de la química del siglo XIX?”

La Invención del Color, Philip Ball

“Los colores te conquistan cada vez más. Certo azul se introduce en tu alma. Certo rojo afecta a tu presión sanguínea. Certo color te tonifica. Es la concentración de los tonos. Se inaugura una nueva era”.

Henri Matisse

El color, en la bicicleta y en el ciclista, no busca la belleza, pretende solo llamar la atención sobre sí mismo, diferenciar equipos y marcas. El color no trata de embellecer la bicicleta sino resaltarla. La bicicleta como señal o rótulo.



Diseñado por Achille y Pier Giacomo Castiglioni y producido por Zanotta (1957-1983).
Ensamblado con piezas de producción en serie, es un “taburete de teléfono”. Se entiende la idea recordando que en los años 50 la mayoría de las casas tenían teléfonos de pared, por lo que la persona que lo usaba tenía que estar de pie.

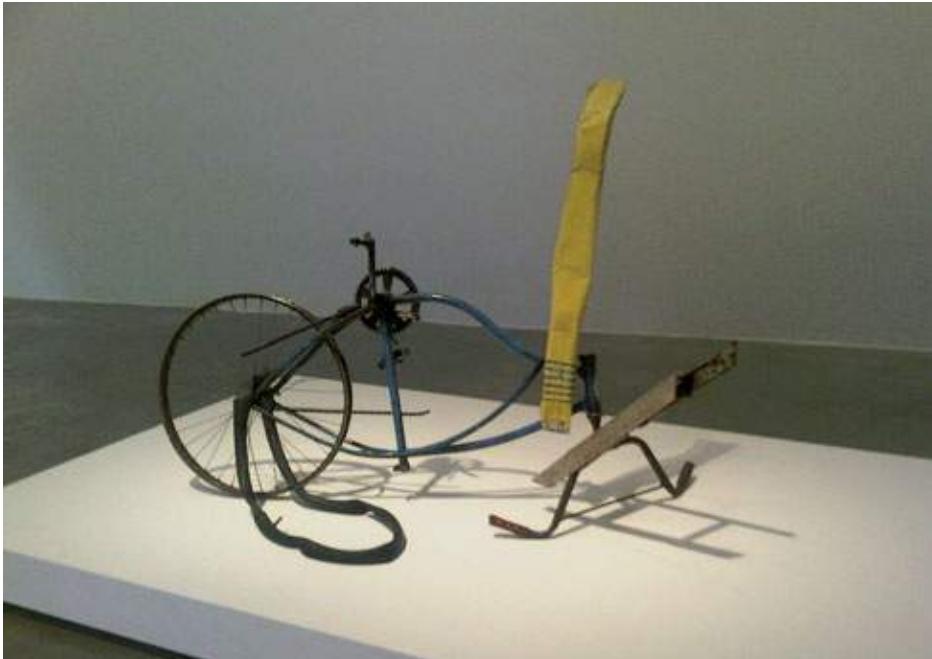
El asiento es un sillín de bicicleta de piel, sobre una semiesfera de hierro de 33 cm de diámetro, que da un balanceo dinámico. Su altura total son 71 cm y es regulable. El prototipo se presentó en 1957 en la exposición “Color y forma de la casa de hoy”, en Villa Olmo en Como.

Taburete Sella, prototipo 1957



“La primera fue en 1913, era una rueda de bicicleta, era una rueda corriente en un stand y cuando la girabas, su movimiento era como el del fuego de una hoguera, ¿sabes?, tiene el atractivo de algo que se mueve en la habitación mientras piensas en otra cosa”.

The Creative Act, Marcel Duchamp



Robert Rauschenberg (1925-2008) poseía la habilidad de reutilizar objetos que otros desecharan, otorgándoles una segunda vida. En *Gluts*, 1986-95, su última serie de esculturas, el artista ensambla objetos de metal, tales como señales de tráfico, tubos de escape, rejillas de radiadores o persianas, creando unidades integrales donde el todo es más que la suma de las partes. Mediante estos ensamblajes de metal Rauschenberg realiza una crítica de la situación económica de su Texas natal, en un momento de crisis motivado por los excedentes de petróleo en el mercado.

Robert Rauschenberg. *Primary Mobiloid Glut*, 1988. Colección particular.



La imprecación de Byam “ve a ver lo que hay más allá de la siguiente colina” iba dirigida a generaciones de americanos que vieron en una de sus caravanas Airstream una versión nómada del sueño nacional. Su primer trabajo fue como redactor publicitario para “Los Angeles Times”. Inventor incansable, publicó diseños de caravanas en la revista de gran tirada “Popular Mechanics”. En 1936 Airstream trailers de Van Nuys, California, empezó a fabricar la primera caravana “Clipper”. Van Nuys estaba en la zona de industria aeroespacial de California. La caravana “clipper”, de aluminio, se construyó con ligero monocasco de avión y con una base aerodinámica. Pronto encontró su lugar en América. Byam dijo: “Hago realidad el sueño de un buen viaje”. Los consumidores americanos podían adquirir este gran mito popular por tan sólo 1.200 \$.

Wallace Merle Byam (1896-1962)





“Ahora voy retirándome ya de mí, hacia vosotros, inevitables sabios del aire, por el aire”

Pedro Salinas

La siguiente reflexión tiene dos ocasiones. La primera es familiar: el Agosto pasado con Javier y Teresa en su (¿aéreo?) refugio de Queralbs (Girona). La segunda cultural: la lectura del “*Éloge de la bicyclette*” de Marc Augé (Payot, París 2008). A Javier he podido seguir a cierta distancia (muy grande) en la escapada académica que dará lugar a un nuevo libro de Esteyco. Marc Augé me ha parecido más accesible a mi ritmo literario, sobre todo cuando afirma que “no se puede hacer el elogio de la bicicleta sin hablar de uno mismo” (p.9).

Mi condición de peatón nació un Enero de 1944 a quinientos metros de la célebre y pendiente (en todos los sentidos de la palabra) Casa de Juntas de Gernika (Bizkaia). Desde entonces no he parado de andar: Bilbao, Salamanca, Kinshasa, Bujumbura, Lovaina, Frankfurt, San Francisco, Kigali, Bruselas, Quito. Ciudades que me han acogido de dos a cinco años o más, con su lengua, cultura, guerras y paces. Rememorando esos múltiples espacios recorridos me viene a la mente una reflexión de Idelfonso Cerdá, recogida de la maravillosa semblanza, técnica y humana, que Javier Muñoz Álvarez (*La modernidad de Cerdá*, Fundación Esteyco 2009) nos ofreció las pasadas Navidades: “*servir a este país que otros quieren tanto... sin hacer nada*” (p.159). Mi andadura vital sigue teniendo ese mismo motivo y parecidas decepciones. Aunque deseo el mismo edificante resultado.

DEL MITO A LA UTOPIA CICLISTA

Es el ambicioso recorrido que Marc Augé, antropólogo francés, propone hoy a los ciclistas: pasar del mito urbano a la utopía social. Dejo a profesionales competentes la reflexión sobre las avenidas abiertas y por abrir en “la urbanización del mundo” (Ibd., p.49). Es decir, los necesarios “apuntes de ingeniería y cultura” (subtítulo del escrito sobre “*La modernidad de Cerdá*”) con los que, por ejemplo, año tras años nos deleita la Fundación Esteyco. En esta breve reflexión me limitaré a un tema más propio de las ciencias sociales, con las que tengo una mayor cercanía. Trataré de lo que Augé llama “la recherche de la ville perdue” (Ibd.).

Confrontemos los hechos. “El mundo –constata Augé– se ha vuelto un mundo/ciudad, en cuyo interior circulan y se intercambian toda clase de productos, incluidos los mensajes, las imágenes, los artistas y las modas. Pero también es verdad que cada gran ciudad es un mundo, un resumen del mundo, con su diversidad étnica, cultural, social y económica. Los espacios cerrados que tenderíamos a olvidar –llevados por el fascinante espectáculo de la globalización–, los encontramos también en los ‘rotos’ del tejido urbano. La ciudad/mundo, en su existencia real, desenmascara la ilusión del mundo/ciudad. Los centros financieros, con sus famosos edificios conocidos en el mundo entero por haber sido diseñados por los más grandes arquitectos, se caracterizan por estar en comunicación con todo el planeta, y sin embargo permanecen inaccesibles para todo el que no trabaje allí. A propósito del mundo/ciudad y de la ciudad/mundo podemos tener la impresión de la desaparición de la ciudad como tal. Ciertamente que lo urbano se extiende por todas partes, pero los cambios ocurridos en la organización del trabajo y en las tecnologías –que a través de la televisión y del Internet imponen a cada individuo la imagen de un centro ‘desmultiplicado’ y omnipresente– suprinen cualquier relevancia a oposiciones del tipo ciudad/campo o urbano/no urbano. La oposición entre mundo/ciudad y ciudad/mundo es, por así decirlo, como la traducción espacial visible de una globalización entendida como el conjunto planetario de los medios de circulación y de las redes de comunicación y de distribución. Paul Virilio señalaba en *La bombe informatique* cómo ese conjunto *global* era considerado por los estrategas del Pentágono americano como el interior de un mundo en el que lo *local* se había vuelto exterior. Pero esa transformación es más general todavía. Por eso la gran ciudad se define en nuestros días por su capacidad de volverse al exterior. Por un lado, ella quiere seducir en primer lugar a los turistas extranjeros. Y por otro, el urbanismo está orientado por la necesidad de facilitar el acceso a los aeropuertos, a las estaciones y a las grandes autopistas. La facilidad por entrar y salir es el imperativo número 1, como si el equilibrio de una ciudad dependiera de sus contrapesos exteriores. La ciudad se descentra como se descentran los inmuebles y los hogares con la televisión y el ordenador, y como se descentrarán los individuos cuando los teléfonos móviles se habrán convertido a la vez en ordenadores y televisiones. Lo urbano se extiende por todas partes, pero hemos perdido la ciudad y nos hemos perdido a nosotros mismos” (p.49-52).

Al borde de tal apocalipsis, nuestro autor –Marc Augé– vuelve su mirada sobre una posible redención técnica: la bicicleta. “Entonces, sí, quizá la bicicleta pueda tener un papel determinante que jugar en ayuda de los humanos, ayudándoles a retomar conciencia de ellos mismos y de los lugares en donde viven, al ‘invertir’ –en lo que les concierne– el movimiento que proyecta a las ciudades fuera de ellas mismas. Tenemos necesidad de la bicicleta para re-centrarnos sobre nosotros mismos, al re-centrarnos sobre los lugares en donde vivimos” (p.52). Dejándose llevar por este milagro móvil, y por el sustrato cultural que lo transporta a él mismo, nuestro etnólogo trans-pirenaico, nos convoca para la

conquista de un nuevo humanismo. A grito de pedal: “À vos vélos, pour changer la vie!” (p.88). Pedalear nos permitirá acceder al *principio de realidad*, dejando atrás el mundo infantil de la ficción. ”Je pédale, donc je suis” (p.86).

¿LA MOVILIDAD INMÓVIL?

Muchos recordaremos la irónica reflexión sobre la post-guerra española, cuando se consideraba al franquismo histórico merecedor del premio nobel de física: había descubierto la inmovilidad del Movimiento. Ese mismo regusto de movimiento inmóvil parecerá tener, en algunas sensibilidades, la propuesta ciclista. ¿Movernos para qué? ¿Para quedarnos en el mismo sitio?

La utopía social tiene una larga andadura histórica. No es este el lugar para amplias descripciones. Con todo, teniendo en mano la “Utopía” de Tomás Moro (Alianza Editorial, Madrid 2010, octava reimpresión), quisiera subrayar – en este contexto - un par de sus reflexiones. Sobre las ciudades, por ejemplo, cuando dice que “quien conoce una ciudad las conoce todas” (p.118). Y prosigue: “Describiré una de ellas, no importa cuál, pero ¿cuál más a propósito que Amaurota? Ninguna más digna que ella. Así se lo reconocen las demás por ser sede del Senado. Es también la mejor que conozco por haber vivido en ella cinco años seguidos” (Ibd.). En griego la palabra “amaurota” evoca algo oscuro y difuminado. Parece ser que, en su urbanística reflexión, Moro idealizó a la nebulosa Londres.

Una segunda reflexión utópica bien podría posicionar a la Ingeniería por delante de la Banca. En la República ideal el oro tendrá menos valor que el hierro. “Cuanto más opuestas a nosotros son las costumbres extranjeras, menos dispuestos estamos a creerlas. Con todo, el hombre prudente, que juzga sin prejuicio las cosas, sabe que los *utopianos* piensan y hacen lo contrario de los demás pueblos. ¿Se sorprendería, acaso, de que empleen el oro y la plata para usos distintos a los nuestros?. En efecto, al no servirse ellos de la moneda, no la conservan más que para una eventualidad que bien no pudiera ocurrir nunca. Mientras tanto, retienen el oro y la plata de los que se hace el dinero. Pero nadie les da más valor que el que les da su misma naturaleza. ¿Quién no ve lo muy inferiores que son al hierro tan necesario al hombre, como el agua y el fuego? En efecto, ni el oro ni la plata tienen valor alguno, ni la privación de su uso o su propiedad constituye un verdadero inconveniente. Sólo la locura humana ha sido la que ha dado valor a su rareza. La madre naturaleza, ha puesto al descubierto lo que hay de mejor: el aire, el agua y la tierra misma. Pero ha escondido a gran profundidad todo lo vano e inútil (p.142).

Lo propio de la utopía es poner en cuestión lo que hay y proponer lo que todavía no abunda, pero existe. Algo así como la vuelta a la tierra y a la dignidad de sus habitantes. Hay mucha oposición a ello. Ya en 1947, dos años después de acabar la segunda guerra mundial, Karl R. Popper escribía: “Considero a lo que llamo utopismo una teoría atrayente, y hasta enormemente atrayente, pero también la considero peligrosa y perniciosa. Creo que es autofrustrante y que conduce a la violencia” (Ver capítulo “Utopía y Violencia” en *Conjeturas y Refutaciones*, Paidós 1994). Había ciertamente razones para sospechar de la utopía del comunismo tal como la desarrolló la Unión Soviética y de las variantes de la utopía nietzscheana aplicadas por el nazismo. Lo que Popper no podía prever es que *La sociedad abierta* que él proponía como alternativa se iba a desarrollar en la forma neoliberal del mercado total, tan postmoderno y tan guapo, pero generador de un darwinismo social más destructor –en cifras y en calidad de vida– que lo fueron Hitler y Stalin. Al menos eso constatamos caminando el planeta y leyendo informes de la ONU, entre otros *.

DEMOCRACIA CON CIUDADANOS

Tomo este enunciado de una publicación que constata lo contrario: *Democracia sin ciudadanos* (Edición de Victoria Camps, Trotta, Madrid 2010). Se trata, para los autores de este estudio, de salir al paso de “una inquietud específica de las democracias actuales, a saber, cuál es y cuál debe ser la función que la ciudadanía cumple en ellas. Si dicha inquietud no existiera, en muchos países de nuestro entorno, no se habría suscitado el debate en torno a la necesidad de una educación cívica, la incivilidad no sería una de las preocupaciones permanentes de las grandes ciudades, la abstención electoral no aumentaría, y el pensamiento político no habría producido movimientos como el *comunitarismo* o el *republicanismo*, movimientos críticos con la ideología liberal precisamente porque no ha sabido ir más allá de una concepción excesivamente jurídica y formal de ciudadanía” (p.9). Así, “las democracias liberales adolecen de capital social, los ciudadanos no viven cohesionados y no se sienten motivados para hacerse cargo de unas obligaciones que conciernen a todos” (p.10). ¿Bien común o mal menor? Tal parece ser el dilema de nuestra *aldea global* en donde habitamos tan juntos, pero tan poco “próximos”.

De ahí la aparición de otra utopía móvil: el concepto de ciudadanía. Parece que tal idea no puede limitarse a lo que ha sido, es y está dejando de ser el Estado Nación. La ciudadanía real – y global – está pidiendo nuevos horizontes. El sujeto, la persona y la comunidad que somos desbordan las leyes que fueron. Muchos y muchas se sienten humanos “sin atributos” (R. Musil), pero con atributos humanos. ¿Bastará un día con nacer para que se nos reconozca el haber nacido? No importará, quizás entonces, en qué ciudad del mundo.

* Para una más amplia reflexión sobre este conflicto de propuestas de sociedad recomendamos la lectura de “*La utopía secuestrada*” de José María Castillo en “*Espiritualidad para insatisfechos*”, Trotta, Madrid 2008, pp.189-196.

“Vuele bajo porque abajo está la verdad”, canta Facundo Cabral. Y remata: “Por correr el hombre no puede pensar; que ni él mismo sabe para adonde va”. Este cantautor argentino fue declarado por la Unesco, en 1996, “Mensajero Mundial de la Paz” y estiman sus biógrafos que ha recorrido unos 160 países, con su guitarra. A temprana edad, su padre abandonó el hogar dejando a su madre con sus siete hijos. “Un vagabundo me recitó el Sermón de la Montaña y descubrí que estaba naciendo; corrí a escribir una canción de cuna: *Vuele bajo...*”.

Concluyo esta caminata literaria, por mi parte. Tengo la convicción —que no pretendo cierta— de que la vida nos va retirando, cada día, un poco más de nosotros mismos, y nos va abriendo al abrazo de lo otro y del otro. A su aire, a su mar, a su tierra. Y sobre todo, ¡oh utopía!... a su corazón. ¿Será eso con lo que Salinas también soñaba, “vivir en los pronombres...”?



PACO NAVARRO

Naci en Lleida en 1962. Aprendi a ir en bici, como tantos ni os, de manera autodidacta, es decir a golpe de ca das. Mi primera bicicleta fue una BH plegable que me dur unos tres a os, ya que rompi al menos tres veces el cuadro. Recuerdo que mi madre, cansada de guardar en el balc n tan desbarajustada bicicleta, me obligo a deshacerme de ella y la vendi al chatarrero por cinco pesetas. Volvi a casa llorando amargamente, por haber perdido de golpe todo aquello que significaba ir en bicicleta, la posibilidad de descubrir las cosas por uno mismo.

Me desplac a Barcelona, para estudiar Arquitectura. Fue la época del bus 75, y un poco m s tarde, de la Vespa. Ocho a os sin subir a una bicicleta; tampoco haba tiempo ni sitio en las calles para ello. Acabada la carrera, tres meses despu s ya estaba trabajando en Esteyco en la direcci n de obra de la urbanizaci n de la Rambla Prim; 2,5 Km de paseo con dos carriles bicis de extremo a extremo. En 2001, compr una bicicleta plegable Brompton, para sustituir al coche en los cada vez m s inc omodos desplazamientos al trabajo. En aquel momento Barcelona vivi un impulso en infraestructuras para bicicletas, carriles bici y una notable mejor a en el transporte p blico. Descubri que llegaba al trabajo m s relajado; y al final del d a, vuelta a casa, cumplida la dosis de ejercicio f sico recomendada por la OMS.



JAVIER RUI-WAMBA MARTIJA

Nace en Gernika en 1942. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos por la Universidad Pol t cnica de Madrid. Se inicia profesionalmente en el Plan Sur de Valencia y en la oficina de Freyssinet en Par s (1969). Funda la Sociedad de Ingenier a Esteyco en 1970, dirigiendo a un equipo pluridisciplinar, actualmente de 100 personas, en Madrid y Barcelona, que ha realizado m s de 800 proyectos y direcciones de obras. Profesor de Estructuras y Puentes Met licos en la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid hasta 1991 (17 a os). Profesor honorífico de la Universidad Pol t cnica de Catalu a. Conferenciante invitado en Argentina, Francia, Uruguay y Espa a .Ha presidido la Asociaci n Espaola de Consultores en Ingenier a. Miembro de honor y medalla de la ATEP por la contribuci n al desarrollo del hormig n pretensado en Espa a. Premio Construmat 1993. Medalla al m rito profesional del Colegio Nacional de Ingenieros de Caminos. Miembro numerario de la Real Academia de Ingenier a (1997) y Correspondiente de la Real de Bellas Artes de San Fernando (2002). Miembro de los rganos de Gobierno de Innobasque. Preside la Fundaci n ESTEYCO, que cre en 1991. Est m casado con Teresa Ubach.



ALEX FERN NDIZ CAMPS

Nace en Barcelona en 1972. Cursa estudios de arquitecto t cnico combin ndolos con la pr ctica art stica en diferentes disciplinas como la pintura, la fotograf a y la instalaci n. Simult neamente, se inicia en la pr ctica del dise o industrial cumpliendo con la inquietud y la vocaci n de participar en las soluciones de los objetos que nos rodean de manera pr xima. Sus dise os han sido reconocidos con una menci n en los premios Delta (ADI-FAD) en 2005 y el premio IF Design Award 2009. La bicicleta es un objeto con el que mantiene un v nculo personal y natural, adem s de profesional. Su curr culum ciclista empieza a muy temprana edad y comprende la competici n deportiva en varias disciplinas, la colaboraci n con la prensa especializada, el dise o de producto y, lo que considera lo mejor: el transporte personal.

ORIOL ALTISENCH

Nacido en Barcelona en 1968, no empezó a saber lo que era sufrir hasta que en octubre de 1986 se encontró un cartelito del estilo “Comienza Puerto” en la Escuela de Ingenieros de Caminos de Barcelona. Asegura –junto a sus compañeros de pelotón– tener todavía pesadillas recordando algunas de las duras rampas de aquel puerto. Acabó la carrera y en plena crisis sacó la cabeza al mundo de verdad. Aprendió, desaprendió y tras unos años dedicados al bonito oficio de construir, pasó a dedicar sus esfuerzos e ilusiones a las infraestructuras post-olímpicas. En 2005 decidió probar el “Lado Oscuro” e intentó aportar algo de rigor al sector inmobiliario. Pero éste no se dejó y se fue haciendo tarde... Con la burbuja a punto de saltar por los aires, subió por primera vez el Tourmalet y descubrió la bicicleta de carretera. Redescubrió el principio ciclista de “aprender a sufrir” y no dejar de pedalear. El equilibrio dinámico necesario para casi todo. Se hizo tarde, la burbuja estalló y la crisis le pasó factura y volvió a dedicarse a la transformación urbanística. Actualmente dirige el plan del nuevo barrio de La Marina del Prat Vermell en la Zona Franca y dedica parte de su tiempo libre a rodar en bicicleta por los Pirineos, los Alpes, los Dolomitas o donde quiera que haya un puerto que franquear, explorar o descubrir. Es miembro y colaborador del Club Ciclista Camins.cat. Sin dejar de pedalear, siempre. En ciclismo, el primero es un campeón y el último un héroe.

JORDI JULIÀ

Nacido en Terrassa en 1959, estudió ingeniería de caminos, canales y puertos en la por entonces recién creada escuela de Barcelona. Con su primer sueldo a cargo de Urbanismo de la Generalitat pudo por fin comprarse unos esquís de montaña y una bicicleta de carretera. A principios de los 80 la bicicleta de montaña era aún desconocida. En 1990 descubrió el mundo del ferrocarril en Cercanías de Renfe y se inició con pasión en el universo del transporte. A partir de 1994 estuvo durante diez años en la agencia metropolitana Barcelona Regional, participando en todas las discusiones de las infraestructuras de transporte de Barcelona: el acceso de la alta velocidad, la ampliación del puerto y del aeropuerto, la extensión de la red de metro... pero la niña de sus ojos fue la implantación del tranvía, confluencia de transporte y urbanismo. En 2004 fue nombrado Director General de Puertos y Transportes de la Generalitat de Catalunya, pero a alguien se le hundió un túnel y el honor del cargo duró poco tiempo. Continuó en la administración pública desarrollando algunos proyectos ferroviarios faraónicos, disfrutando, sin saberlo, de los últimos coletazos de la euforia económica. Con gran visión de futuro, en 2008, poco antes del estallido de la burbuja, abandonó el cobijo del sector público para saltar a la intemperie de la consultoría.

CRISTINA GARCÍA BAÑUELOS

Nació en Oviedo en 1977 y estudió en Inglaterra, Francia y Austria antes de obtener en 2002 el título de Arquitecto con la especialidad de Urbanismo en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid (U.P.M), donde tuvo la suerte de aprender de maestros como Alberto Campo Baeza, Juan Navarro Baldeweg o Jesús Rodríguez Santiago. Obtuvo la beca AAGRAFA de esta escuela y cursa estudios de grado superior de Escultura en la Escuela Massana. Ha realizado un Master de postgrado en Urbanismo y participado en diversas jornadas sobre la Ley del suelo y valoraciones urbanísticas. Tras colaborar en varios estudios de Arquitectura, donde realiza proyectos de Arquitectura y Urbanismo, lleva seis años trabajando en una sociedad de tasaciones donde está especializada en valoración de terrenos. Su bicicleta rueda cada día por Barcelona transportando niños y todo tipo de materiales; espera a la puerta de la oficina y nunca va ligera pero siempre va rápida.

MIGUEL ÁNGEL RUI-WAMBA MARTIJA

Jesuita. Gernika 1944. Director de la Corporación SolJusticia (corporación de solidaridad que comprende las obras sociales de los Jesuitas en Ecuador). Doctor en Teología (Frankfurt). Licenciado en Filosofía y Letras (Salamanca y Kinshasa). Veinte años en África central (Congo-Kinshasa, Burundi y Ruanda). Dos años en Bruselas con la Unión Europea. Seis años en Ecuador, donde reside actualmente.



PRESENTACIÓN	9
BIOGRAFÍA DE LA BICICLETA	13
I. PRIMEROS ANTECEDENTES HISTÓRICOS HASTA LEONARDO DA VINCI	13
II. NACIMIENTO Y DESARROLLO DE LA BICICLETA MODERNA, 1790-2010	22
III. EVOLUCIÓN DE COMPONENTES, CUADROS Y NUEVOS MATERIALES	39
IV. LA BICICLETA PLEGABLE. HISTORIA DE LA "BROMPTON"	44
LA ESTRUCTURA DE LA BICICLETA	49
1. PREÁMBULO	49
2. ESTRUCTURAS DE LA INGENIERÍA CIVIL Y DE LA BICICLETA: SIMILITUDES Y DIFERENCIAS	51
3. EQUILIBRIO ESTÁTICO Y EQUILIBRIO DINÁMICO	53
4. FUERZAS Y REACCIONES. ENERGÍA DEL MOVIMIENTO	55
4.1. Introducción	55
4.2. Las fuerzas gravitatorias	56
4.3. Fuerzas de inercia longitudinales	57
4.4. Fuerzas aerodinámicas	61
4.5. Fuerzas en recorridos con pendiente	66
4.6. Fuerzas de frenado	69
4.7. Fuerzas transversales. Recorridos en curva	73
5. LA ESTRUCTURA DE LA BICICLETA	77
5.1. Introducción	77
5.2. Las ruedas de la bicicleta	79
5.3. Horquilla, potencia y manillar	99
5.4. El cuadro	105
5.5. Los materiales	110
5.6. La transmisión	117
6. MÉTODOS DE CÁLCULO. CRITERIOS DE SEGURIDAD. ENSAYOS DE CONFORMIDAD	121
7. EL MOVIMIENTO DE LA BICICLETA	128
7.1. Frecuencia de pedaleo y velocidad de desplazamiento	128
7.2. La geometría del desplazamiento	129
8. LAS BICICLETAS DE MONTAÑA	137
9. LA ESTRUCTURA DEL CICLISTA	142
10. LA ENERGÍA DEL CICLISTA	155
11. COLOFÓN	170
LOS COMPONENTES DE LA BICICLETA	175
INFRAESTRUCTURAS Y PAISAJE LA INGENIERÍA DE "POR DONDE" CIRCULAN LAS BICICLETAS	209
LA BICICLETA COMO MEDIO DE TRANSPORTE URBANO	231
BICIDIVERSIDAD	245
UTOPIA MÓVIL. REFLEXIONES DE UN PEATÓN	269
BREVES APUNTES BIOGRÁFICOS	274
ÍNDICE GENERAL	277



LA PRESENTE PUBLICACIÓN HA SIDO REALIZADA POR
LA FUNDACIÓN ESTEYCO

PUBLICACIONES DE LA FUNDACIÓN ESTEYCO

PABLO ALZOLA

LA ESTÉTICA DE LAS OBRAS PÚBLICAS
ESTETICA HERRI-LANETAN *

LUCIO DEL VALLE

MEMORIA SOBRE LA SITUACIÓN, DISPOSICIÓN Y CONSTRUCCIÓN
DE LOS PUENTES. 1844. *

VV. AA.

EN TORNO A LEONARDO TORRES QUEVEDO Y EL TRANSBORDADOR DEL NIÁGARA *

JULIO CANO LASSO

CONVERSACIONES CON UN ARQUITECTO DEL PASADO

VV. AA.

CARLOS FERNÁNDEZ CASADO *

JAVIER RUI-WAMBA MARTIJA

AFORISMOS ESTRUCTURALES / STRUCTURAL APHORISMS

MARIO ONZAIN

LA RÍA DE BILBAO

ANTONIO FERNÁNDEZ ALBA

ESPACIOS DE LA NORMA. LUGARES DE INVENCIÓN. 1980-2000

JOSÉ LUIS MANZANARES

LAS PUERTAS DEL AGUA

VV. AA.

LAS GEOMETRÍAS DEL TREN / LES GEOMETRIES DEL TREN

EUGÈNE FREYSSINET. FRANK GUYON. JAVIER RUI-WAMBA Y ANTONIO F. ALBA

EUGÈNE FREYSSINET

UN INGENIERO REVOLUCIONARIO / UN INGÉNIUR RÉVOLUTIONNAIRE

MIGUEL AGUILÓ. JAVIER MANTEROLA. MARIO ONZAIN. JAVIER RUI-WAMBA

JAVIER MANTEROLA ARMISÉN. PENSAMIENTO Y OBRA

PABLO OLALQUIAGA. ALFONSO OLALQUIAGA

EL LIBRO DE LAS CURVAS

JOSÉ SERNA GARCÍA-CONDE

LOS PUENTES DEL TREN

FRANCISCO GALÁN SORALUCE

LA ENERGÍA DE LOS FLUIDOS

ANDREU ESTANY I SERRA

ARQUITECTES ENTRE ENGINYERS · ARQUITECTOS ENTRE INGENIEROS

JAVIER MUÑOZ ÁLVAREZ

LA MODERNIDAD DE CERDÁ: MÁS ALLÁ DEL “ENSANCHE”

ALGUNOS APUNTES DE INGENIERÍA Y CULTURA

FUNDACIÓN ESTEYCO

Menéndez Pidal, 17. 28036 Madrid. Tel. 91 3597878. Fax 91 3596172

e-mail: fundacion@esteyco.es – web: www.esteyco.es



FUNDACION
ESTEYCO