

Fe de erratas

José Manuel Sanz García, Manuel G. Romana García, Antonio Sánchez Soliño (2021). La contribución de Edgeworth al éxito del macadam. Expansión internacional en sus albores. *Informes de la Construcción*, 73(563): e402. <https://doi.org/10.3989/ic.80899>

Se modifica este artículo para corregir la filiación del autor José Manuel Sanz García que, en lugar de “INECO” debe ser “Universidad Politécnica de Madrid”.

8 de septiembre de 2022

La contribución de Edgeworth al éxito del macadam. Expansión internacional en sus albores

The contribution of R.L. Edgeworth to macadam success. International spread at its beginnings

José Manuel Sanz García (*), Manuel G. Romana García (**), Antonio Sánchez Soliño (***)

RESUMEN

En la historia de la ingeniería de carreteras, el nombre de John Loudon McAdam tiene un lugar de honor como el inventor del firme de macadam. Sin embargo, el diseño original de McAdam presentaba algunas limitaciones que fueron resueltas por Richard Lovell Edgeworth, siendo este diseño combinado el que se impuso por sus mejores prestaciones en las carreteras de Europa y del mundo occidental. El fallecimiento de Edgeworth en 1817, dos años antes de que McAdam publicara su obra principal, facilitó que la contribución del ingeniero irlandés fuera olvidada por la historia. El presente artículo saca a la luz la contribución de Edgeworth a la concepción del macadam, fundamental para el éxito del diseño, y la expansión de este tipo de firme por las carreteras de los países occidentales en sus primeros años.

Palabras clave: macadam; carretera; pavimento; firme; Edgeworth.

ABSTRACT

In history of road engineering, the name of John Loudon McAdam has an honor place as the inventor of macadam. However, his original design had several limitations, which were solved by Richard Lovell Edgeworth. This combined design of both engineers prevailed because of its better benefits through European roads and western world highways. The decease of Edgeworth in 1817, two years before McAdam published his main work, favored that history forgot the contribution of the Irish engineer. This paper presents the Edgeworth's contribution to macadam conception, essential to the success of the design, and explains the international spread of this kind of pavement structure across the roads of western countries at the very beginning.

Keywords: macadam; road; pavement; Edgeworth.

(*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid (España)

(**) Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid (España)

(***) Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid (España)

Persona de contacto/Corresponding author: jmsanz@ciccp.es (J.M. Sanz García)

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3226-1769> (J.M. Sanz García); <http://orcid.org/0000-0003-1025-7419> (M.G. Romana García); <http://orcid.org/0000-0003-3821-463X> (A. Sánchez Soliño)

Cómo citar este artículo/Citation: José Manuel Sanz García, Manuel G. Romana García, Antonio Sánchez Soliño (2021). La contribución de Edgeworth al éxito del macadam. Expansión internacional en sus albores. *Informes de la Construcción*, 73(563): e402. <https://doi.org/10.3989/ic.80899>

Copyright: © 2021 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Recibido/Received: 04/06/2020
Aceptado/Accepted: 05/11/2020
Publicado on-line/Published on-line: xx/xx/2021

1. INTRODUCCIÓN

A finales del siglo XVIII, la concepción de los firmes de carreteras en Europa estaba dominada por los diseños de Pierre Marie Jérôme Trésaguet (1717-1796), ingeniero inspector de la generalidad de Limoges.

El diseño propuesto por Trésaguet en 1775 conservaba conceptos del firme romano, como el embordillado de las calzadas y la disposición en capa de base de piedra orientada de canto, formando un estrato de gran capacidad portante. Esta base de piedras gruesas de canto es un concepto romano que recibe el apelativo galo de «hérisson» (erizo). Sobre esta base se situaba una capa de piedra de menores dimensiones que se colocaba como mampuesto. Por último, se disponía una capa de rodadura de 3 pulgadas [8,1 cm], formada por árido machacado de tamaño máximo de en torno a 40 mm («machacada hasta el grosor de aproximadamente una nuez») (1). Trésaguet indicó que el machaqueo del árido se debía realizar a martillo en un emplazamiento aparte, sobre un yunque, para a continuación ser colocado en la estructura del firme mediante palas, formando el bombeo transversal. La sección de firme de Trésaguet se representa en la Figura 1.

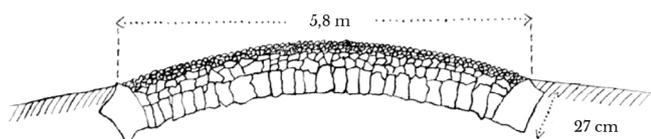


Figura 1. Diseño de firme de Trésaguet. Fuente: Arbellot, G. (1973)

El gran éxito de Pierre Trésaguet fue sintetizar todas las experiencias previas y conectarlas con su experiencia profesional para dar lugar a un diseño, plasmado en una memoria escrita, que sería propuesto como modelo a los ingenieros civiles de las escuelas de Europa en las décadas siguientes.

No obstante, este diseño presentaba algunas limitaciones, entre las principales:

- Mantenía el concepto de «caja» del firme, esto es, excavación donde se comenzaba a disponer los materiales de la base, con los consiguientes problemas de evacuación del agua filtrada a la plataforma, que quedaba retenida en la caja.
- Se trataba de una sección de firme de potencia significativa, cuyo elevado espesor demandaba gran cantidad de piedra para la ejecución del «hérisson» y de la capa intermedia, así como del embordillado.

Este diseño era el patrón académico que se enseñaba en las Escuelas técnicas de Europa a comienzos del siglo XIX para el diseño de carreteras.

2. EL DISEÑO ORIGINAL DE JOHN LOUDON MC. ADAM

El diagnóstico que lleva a McAdam a proponer una nueva sección de firme lo expone el ingeniero escocés en su informe *Extracts from Observations on the Highways of the*

Kingdom, remitido a la Cámara de los Comunes en junio de 1811. McAdam identifica tres problemas principales en las carreteras británicas (2):

- Capacidad portante: McAdam la relaciona directamente con la cantidad de los materiales de la fábrica. En este sentido, el autor considera que todas las antiguas carreteras de Gran Bretaña fueron dotadas excesivamente de material, encontrándose en cada carretera material suficiente para usarlas durante años.
- Regularidad superficial: esta propiedad la relaciona con la selección, preparación y distribución adecuada de los materiales. Así, el tamaño máximo del árido debe ser proporcional al ancho de la rueda de los carros con que entra en contacto, para producir una conducción suave y cómoda. En ese sentido, McAdam considera un tamaño adecuado aproximadamente 25 mm.
- Cohesión de los materiales: esta propiedad, que McAdam considera conjuntamente con la anterior, le lleva a proponer tamaños de árido pequeños para la construcción de carreteras. Este principio está basado en el hecho físico de que, cuando una rueda apoya sobre un árido pequeño, lo compacta contra el terreno, mientras que, si lo hace sobre un árido mayor que el área de apoyo, la presión diferencial tiende a provocar el descalce y el movimiento de los áridos, incomodando la conducción y reduciendo drásticamente la durabilidad de la carretera.

A la hora de construir una carretera, McAdam considera que la práctica (habitual entonces) de mezclar la piedra con arena o suelo debe evitarse tajantemente, en tanto los suelos retienen la humedad y son muy sensibles a la helada y a los cambios de volumen o cohesión por la climatología. En cambio, el ingeniero escocés considera que la piedra partida con una limpieza adecuada es un material inerte completamente a la acción del clima, por lo que una carretera de piedra permanecería inalterable en todas las estaciones del año (3).

En este sentido, el autor desaconseja de forma estricta realizar refuerzos o aportaciones de material a una carretera si en las proximidades no se encuentran bancos de piedra limpia de al menos 25 cm de espesor.

El árido debe asimismo machacarse, de forma que solo se extienda sobre la carretera piedra partida de 6 onzas de masa, lo que equivale aproximadamente a un tamaño máximo del árido de 25 mm. McAdam indica expresamente que el machaqueo del árido debe hacerse fuera de la calzada, nunca sobre el firme de la misma, para evitar provocar asientos diferenciales e irregularidades. En la Figura 2 se recoge un croquis aproximado de la sección tipo de McAdam.

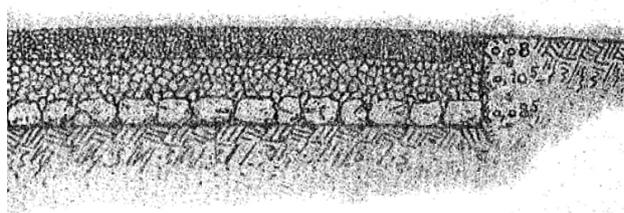


Figura 2. Diseño de firme de McAdam. Fuente: Bucchi, A. (2014)

3. LA CONTRIBUCIÓN DE EDGEWORTH

3.1. Semblanza de R.L. Edgeworth

Richard Lovell Edgeworth (1744-1817), representado en la Figura 3, nació en 1744 en una casa de la calle Pierrepont en la ciudad inglesa de Bath. Fue el séptimo hijo de Richard y Jane Edgeworth, de ascendencia irlandesa.

Según la información disponible (4) debió de ser una visita a un taller mecánico en Dublín a la edad de seis años lo que despertó la curiosidad del pequeño Richard por la ingeniería. A partir de entonces, dedicó gran parte de su vida al estudio y diseño de las ruedas de carruaje y la construcción de carreteras.

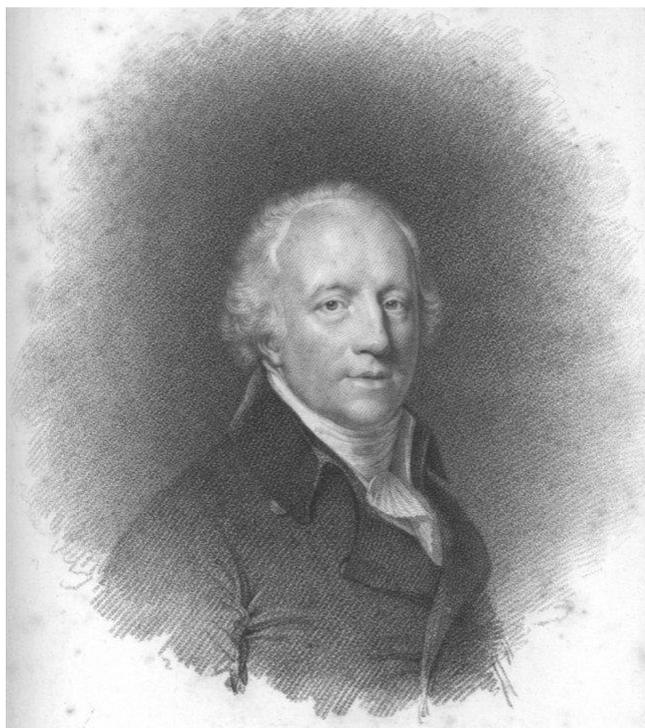


Figura 3. Retrato de Richard Lovell Edgeworth en 1812. Fuente: *Memoirs of R.L. Edgeworth* (1821)

Tras cursar sus primeros estudios en Warwick, Drogheda y Longford, el 26 de abril de 1761 Edgeworth entró en el *Trinity College* de Dublín, siendo enviado el 10 de octubre de 1761 a estudiar a Inglaterra, trasladándose al *Corpus Christi College* en la Universidad de Oxford (5).

Hacia 1772 Richard iniciaría un viaje a Francia con su hijo y uno de sus mejores amigos, Thomas Day, residiendo en Lyon durante aproximadamente un año. Durante su estancia en la ciudad francesa tuvo la oportunidad de aportar su conocimiento de ingeniería en la ampliación urbanística de la ciudad, concretamente en el desvío del Ródano por la construcción de un nuevo canal, estableciendo su confluencia con el Saona en un punto más alejado del núcleo urbano. El lecho dejado por el río se rellenó con toda la basura de la ciudad, a fin de obtener una superficie urbanizable para proyectar un nuevo barrio de la ciudad. Los materiales para la obra de desvío (tierra y grava, principalmente) se transportaban a través del Ródano en barcos, a los que subían trabajadores con capazos llenos de material. Esto requería gran mano de obra y tenía muy bajos rendimientos. Para remediarlo, Edgeworth

ideó un sistema formado por dos pilas erigidas hasta 3,65 m sobre el nivel del agua (6):

«Sobre las pilas se colocó una plataforma móvil, como un carro muy grande con lados bajos, todo girando sobre un árbol de eje, apoyado en un soporte a modo de tenedor en la parte superior de cada una de las pilas. La plataforma tenía en torno a 5,5 m², y podía almacenar gran cantidad de grava. Una pasarela, a modo de andamio inclinado de tablas, conducía a la plataforma desde el suelo, por donde los trabajadores con cestas podían ascender y llenarla de material. Se erigió una plataforma similar en el barco principal, en la que se vaciaba el contenido de lo que se llenaba en la orilla. El barco cruzaba posteriormente el Ródano y descargaba el material en el punto deseado. [...] También construí, a través de un barranco, un puente, apoyado en ligeros caballetes, que era lo suficientemente fuerte y ancho como para sostener una carretilla».

En enero de 1780, Edgeworth entró a formar parte de la Royal Society, por invitación de su presidente entonces, Sir Joseph Banks. En 1782 Richard se estableció definitivamente en Irlanda para gestionar personalmente las propiedades familiares. En esos años prestaría especial atención a las condiciones de vida de los trabajadores de sus estados, reduciendo la pobreza y mejorando las viviendas de sus inquilinos.

En 1798 Edgeworth fue elegido diputado en el Parlamento irlandés por el condado de Longford, Durante su breve etapa política, impulsaría iniciativas para mejorar la educación de la población. Protestó contra las severas medidas adoptadas contra los insurrectos que se habían alzado contra la dominación británica de Irlanda. Aunque personalmente Edgeworth aprobaba la unión con Gran Bretaña, votó en contra de la misma porque consideró que el ánimo de la mayoría del pueblo irlandés era opuesto a ella (7). Tras el Acta de Unión de 1801, que disolvió la cámara irlandesa, Edgeworth abandonaría la política.

En 1804, Lord Hardwicke, Lord Lugarteniente de Irlanda, encargó a Edgeworth el proyecto de establecimiento de la primera línea telegráfica de la isla entre Dublín y Galway. Edgeworth no aceptó ninguna remuneración económica, dedicando a este proyecto dos años de su vida y ejercicio profesional. Tras el proyecto de Edgeworth, los días en que el tiempo atmosférico era benévolo, la señal telegráfica era capaz de cubrir los más de 200 km entre Dublín y Galway en 8 minutos (7). A la finalización de las obras, se encargó a Edgeworth la formación de un cuerpo de telegrafistas, que Richard seleccionó entre los hombres de confianza y trabajadores de sus estados. Sin embargo, debido a los éxitos militares de Napoleón Bonaparte y al miedo fundado de que pudiera producirse una invasión francesa en Irlanda, el gobierno transfirió en 1806 la gestión de los telégrafos al ejército regular británico en la isla, por lo que a Edgeworth se le relevó de la dirección, agradeciéndole sus servicios (5).

En los años 1807-1809, Edgeworth centró sus esfuerzos en el diseño de ruedas de carruajes y en escribir sus memorias. En 1809 informó favorablemente sobre la posibilidad de drenar algunas ciénagas, realizando comprobaciones experimentales mediante la incorporación de amortiguación en los vehículos de tracción animal, lo que permitía obtener mayores rendimientos en el movimiento de tierras y transporte de materiales (7).

En 1811 Edgeworth dirigió las obras de construcción de una aguja en la iglesia de Edgeworthstown que había diseñado él mismo. Estaba formada por una estructura de hierro recubierta de lajas de pizarra, pintadas y lijadas, que imitaban la piedra caliza de Portland (5). En esa época ya había adquirido un conocimiento práctico relevante sobre la interacción de las ruedas de los carros y el firme de las carreteras, ya que consideraba que ambos campos (vehículo e infraestructura) estaban ligados.

Debido a su experiencia en el diseño de ruedas de carruaje, ese mismo año de 1811 el Comité de Ruedas Anchas (*Committee of Broad Wheels*) de la Cámara de los Comunes requirió a Edgeworth emitir un informe sobre la clasificación de las llantas de los coches en función de sus ventajas y su mayor o menor influencia en el deterioro de las carreteras. En 1813 publicaría su principal contribución a la ingeniería de carreteras, *An Essay on the Construction of Roads and Carriages* (1813), en cuya primera edición incluyó como apéndice el informe realizado dos años atrás para la Cámara de los Comunes. En su obra, Edgeworth describió en detalle su diseño del firme y la metodología propuesta para su construcción, que puede sintetizarse en el recebo con árido fino (algo que siempre rechazó McAdam), y que con el tiempo acabaría por convertirse en una práctica aceptada y extendida internacionalmente, por encima del diseño que había propuesto por el escocés en 1811. El método de Edgeworth, con el tiempo, acabaría denominándose «macadam», negándosele al irlandés una contribución que resultó fundamental para el buen funcionamiento de esos firmes. Edgeworth probó experimentalmente el recebo de la piedra partida con una mezcla de polvo de árido o filler (subproducto del propio machaqueo del árido con martillo) con agua, consiguiendo mejorar significativamente la regularidad superficial y la comodidad del tráfico. Este recebo recibió el nombre de «*water-bound macadam*», esto es, macadam cohesionado con agua, en lo que sería un antecedente de los ligantes bituminosos que llegarían a mediados de siglo (8).

Lay y Clarke, referencias importantes en la historia de la ingeniería de carreteras, reconocieron justamente la aportación de Edgeworth, porque su idea de emplear un material de recebo que otorgara cohesión a la sección del firme resultó determinante para el éxito del diseño. En este sentido, John Joly escribió lo siguiente en 1913 sobre el ingeniero irlandés:

«*Edgeworth formuló un procedimiento científico exhaustivo basado en principios correctos. Es uno de los ingenieros de carreteras con mayor visión científica de conjunto de todos los tiempos*».

En 1813, el ingeniero irlandés viajaría a Inglaterra por última vez, siendo reconocido por un gran número de personalidades de la alta sociedad británica. Richard Edgeworth murió rodeado de su familia en su hacienda de Edgeworthstown el 13 de junio de 1817. Sobre su historia familiar resultan de especial interés sus memorias, completadas a su muerte por su hija María, así como una obra española sobre uno de sus nietos, Francis Isidro Edgeworth, cuya madre era una dama barcelonesa, y que explica con detalle la vida de Richard Lovell Edgeworth (9).

3.2. El diseño de macadam mejorado

En su obra principal, si bien trata diversos temas y se centra mayormente en la ingeniería mecánica del diseño de

vehículos, Edgeworth también dedica una parte relevante al diseño de carreteras. Así, el ingeniero irlandés es escéptico frente a la gran variedad de diseños presentados ante la Cámara de los Comunes en los años anteriores, otorgando una importancia fundamental al pavimento como elemento protector y esencial para la defensa de la infraestructura frente a la acción del agua:

«*Se han sugerido al Comité de la Cámara de los Comunes varios diseños de carreteras, cuyos planos son totalmente opuestos unos de otros: algunos las prefieren convexas, otros cóncavas, otros proponen dividir las en dos carriles paralelos con un canal en medio para evacuar las aguas, [...] pero en todos estos esquemas para dar salida al agua de las carreteras por inclinación del terreno, parece haber escapado a la atención de quienes los proponen que ninguna pendiente de bombeo compatible con la seguridad de los carruajes vaciará [de agua] una rodera de 3 pulgadas [7,6 cm] de profundidad.*»

En este sentido, Edgeworth propone una sección de firme que se caracterice por su cohesión y menor sensibilidad al agua. En el cimientado, en caso de contar con suelos de mala calidad, prescribe la disposición de broza, con el fin de darles cierta cohesión. Esta actuación, concebida como una mejora de la cimentación, propone realizarla con ramas de abeto, con aliagas o con brezos. Finalmente, como terminación del cimientado y plataforma de apoyo de la estructura del firme, se decanta por la disposición de piedras de plano o lajas (10).

Como capa de base que otorgue capacidad estructural, el ingeniero irlandés diseña una capa de piedras de «seis o siete libras en masa» [$\approx 3,0$ Kg]. Tomando una densidad del árido de $2,65 \text{ t/m}^3$ y el volumen de la esfera, se tiene un tamaño de árido aproximado de 130 mm de diámetro. Considerándose una extensión monocapa, tendríamos una capa de base de 13 cm de espesor aproximado, como se representa en la Figura 4.

Posteriormente, Edgeworth prescribe la ejecución de una capa de rodadura de árido calizo machacado de entre 8-10 pulgadas de espesor [20-25 cm]. En este punto, Edgeworth refiere que el espesor indicado de capa de machaqueo es suficiente para cualquier carretera, e incluso 2/3 de ese espesor conforma una base excelente en los tramos de aproximación a las ciudades. En la terminación de esta capa realiza Edgeworth su principal contribución respecto al diseño de McAdam: el recebo.

«*No debe extenderse sobre la piedra machacada cobertura alguna de ninguna clase que no sea gravilla limpia y angular, que pueda insertarse ella misma entre los intersticios de las piedras; pero no debe usarse más cantidad que la que pueda absorberse sin alterar la rasante de la superficie. [...] No debe permitirse que áridos mayores de una pulgada y media de diámetro [38 mm] permanezcan en la carretera. [...] En todos los casos, una vez la carretera se haya cubierto de piedras, debe ser cuidadosamente examinada, y todo árido demasiado grande debe ser retirado o machacado en partes más pequeñas. Donde se dispone de sílex o pedernal, una vez machacado, se convierte en el mejor de los materiales comunes que puede emplearse; en cambio, el árido redondeado y los*

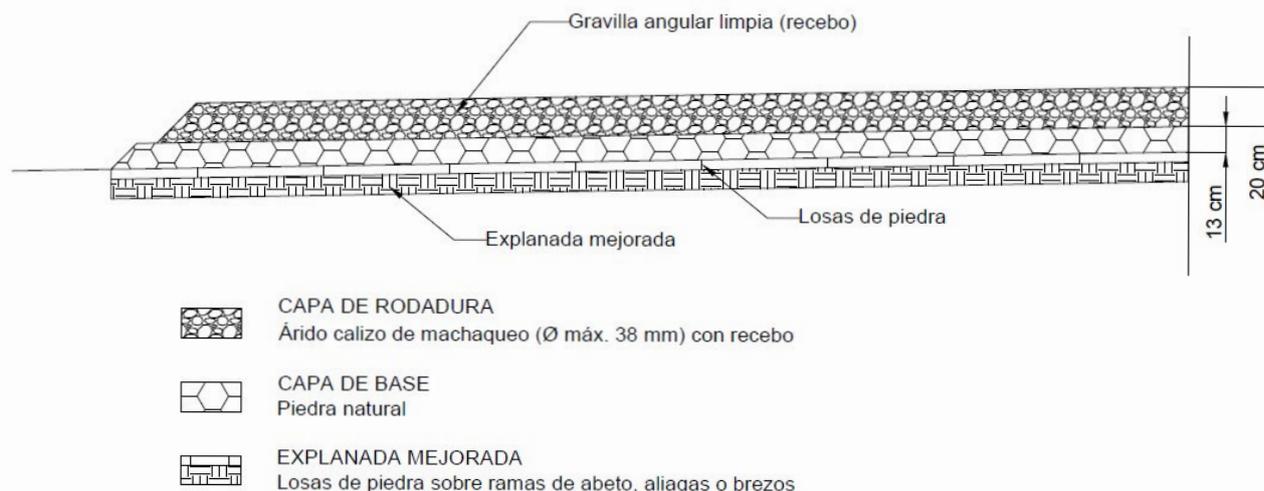


Figura 4. Diseño de «water-bound macadam» o macadam mejorado de Edgeworth. Fuente: elaboración propia

guijarros, si no están machacados, jamás conforman una carretera aceptable».

En cuanto a la manufactura de los áridos, Edgeworth indica que el método más fiable es que los mismos operarios los machaquen sentados con la ayuda de un martillo. En este sentido, refiere algunos intentos de años anteriores para mecanizar el proceso «con la fuerza de caballos, del viento y del agua». El resultado es que los trabajos de molienda realizados con árido calizo reducían la piedra a polvo antes que conseguirse los ansiados fragmentos pequeños.

En lo relativo a las zonas en las proximidades de las ciudades donde no fuera posible la obtención de árido de machaqueo de buena calidad, el ingeniero irlandés recomienda la pavimentación de dichos tramos como vía urbana:

«En tramos que se encuentren en esta situación, la pavimentación es el único método seguro que proporciona suficiente dureza, regularidad superficial y pervivencia a la carretera».

4. LA EXPANSIÓN INTERNACIONAL DEL DISEÑO DE MC. ADAM – EDGEWORTH

4.1. La difusión europea en los primeros años

Diversos ingenieros en toda Europa alabaron el sistema de McAdam – Edgeworth, promoviendo la implantación en sus respectivos países.

La primera aplicación experimental del macadam en la Europa continental se realizó en Francia en 1817, pero con poca difusión (11). En 1821 y 1823, Claude-Louis-Marie-Henry Navier fue a Reino Unido para estudiar sus puentes colgantes, y regresó a Francia haciendo un alegato realmente favorable del afirmado con macadam.

Pocos años después de la muerte de Edgeworth, con McAdam todavía vivo, las primeras noticias fuera de Reino Unido relativas al macadam fueron publicadas en 1823 por uno de los oficiales del Cuerpo de Puentes y Calzadas de Francia (12):

«Un simple particular, sin nombre, sin gran fortuna, sin función pública, sin instrucción teórica, se ocupa con perseverancia de la reparación de las carreteras, y de hecho, como simple comisario, una aplicación aislada y afortunada, publica su método mostrando sus ventajas, y, en pocos años, los prejuicios y los intereses ceden, y su sistema se convierte en popular, mejorando las carreteras de forma general. Este particular es Monsieur McAdam».

En enero de 1825, se publica en el boletín de la *Société d'Encouragement de l'Industrie Nationale* una nota con el título *Nuevo medio de construcción y reparación de carreteras, por Monsieur McAdam*.

En este sentido, la primera aplicación del macadam en la zona centro-septentrional de Europa parece haber sido la carretera de Pflingstberg, en el ducado de Holstein (Alemania), cuyas obras finalizaron en 1826. Se trata de un tramo de 2 km en la carretera federal 306, en el entorno de la aldea de Pflingstberg.

Las obras fueron promovidas por Federico VI, Rey de Dinamarca, ya que Holstein pertenecía entonces a aquel Estado. En memoria de este primer tramo de carretera macadamizada se levantó una estela, recogida en la Figura 5, que reza:

JVSSV ET IMPENSIS FRIDERICI VI HOCCE STADIVI PRIMVM IN HOLSATIA STRATVM EST RATIONE MACADAMI BRITANNICI – MDCCCXXVI

POR ORDEN Y ESTIPENDIO DE FEDERICO VI SE HIZO ESTE PRIMER AFIRMADO EN HOLSTEIN POR EL MÉTODO BRITÁNICO DE MACADAM - 1826

En el caso del ingeniero irlandés, si bien Richard Lovell Edgeworth murió en 1817, su ensayo se tradujo al francés diez años después (12), completado en los apéndices con la traducción al francés del informe de McAdam para la Cámara de los Comunes.

Dos años después, el ingeniero francés Antoine-Rémy Polonceau publicaba su obra *Observations sur les routes, suivies*



Figura 5. Estela de la primera carretera de macadam en Holstein.
Fuente: licencia libre.

de propositions sur leur amélioration et sur leur entretien (1829), donde insiste en la necesidad de aplicar el método de McAdam – Edgeworth en las carreteras de Francia:

«Sería fácil remediar estos inconvenientes cuidando de cubrir la calzada con una capa de varios centímetros de pequeñas piedras de machaqueo cuyo grosor [tamaño máximo], variable entre el volumen de una avellana y una nuez, sería proporcional a los huecos de las piedras del recubrimiento».

Siguiendo más adelante:

«El mérito principal de las carreteras ejecutadas de este modo consiste en que la calzada, compuesta enteramente de pequeñas piedras, que en razón de sus caras de fractura se encajan unas entre otras y se afirman por el rozamiento en las esquinas, forma una masa compacta, homogénea, impermeable, dotada de una cierta flexibilidad y de una du-

rabilidad suficiente para resistir largo tiempo la acción de las ruedas. Su impermeabilidad, que resulta de la cohesión de los materiales, preserva el suelo que la soporta de la penetración de las aguas, y conserva la firmeza y resistencia necesarias para oponerse al hundimiento de las piedras inferiores. La homogeneidad de las partes que componen la calzada permiten que se pueda usar igualmente en todos los puntos, y que, además, sin refuerzos y usada sobre una parte de su espesor, conserve sus prestaciones y se mantenga siempre cohesionada y uniformemente resistente. Por último, su flexibilidad [...] permite a los materiales ceder sin romperse bajo esfuerzos de compresión, cuyo efecto se limita a encajar más las piedras superiores en las inferiores: tiene sobre todo la ventaja de repartir [las cargas] sobre una gran superficie y amortiguar los efectos de la presión de las ruedas, previniendo los hundimientos y la formación de rodadas, que se producen tan fácilmente en las calzadas que carecen de flexibilidad y cohesión».

En sus conclusiones finales, Polonceau proponía convertir progresivamente todas las carreteras de grava de Francia en carreteras «a la McAdam», suprimiendo también los firmes empedrados y reemplazándolos por el árido más común en cada localidad o comarca, machacado en pequeños fragmentos.

Hay que tener en cuenta que, en lo tocante al diseño del firme, Polonceau recomendaba siempre ejecutar el macadam con el recebo prescrito por Edgeworth (13):

«...cuidando siempre de cubrir las capas con los restos del machaqueo o con fragmentos muy pequeños».

En este sentido, el diseño de McAdam-Edgeworth tuvo partidarios franceses de peso como Antoine-Rémy Polonceau, Claude-Louis-Marie-Henry Navier (14) o Amé-Thérèse-Joseph Masolet, cónsul de Francia en Bristol (circunscripción donde McAdam realizó sus obras), que defendió expresamente el diseño del escocés frente al Ingeniero Jefe de Puentes y Calzadas, especialmente en lo tocante a eliminar la caja del firme y elevar la vía sobre el terreno para dar salida a las aguas (15):

«La primera operación a realizar para establecer una carretera no es la apertura de una zanja o excavación, es exactamente todo lo contrario: hay que elevar la carretera sobre el terreno, en lugar de excavar para situar el cimiento a una cota inferior a la del terreno adyacente, en tanto la carretera debe ser mantenida por encima del nivel de las aguas».

No obstante, no todas las opiniones sobre el firme de McAdam Edgeworth eran favorables, antes bien, el diseño tuvo detractores también desde sus inicios. Uno de los principales opositores en Reino Unido fue Benjamin Wingrove, inspector general de las carreteras del distrito de Bath. En este sentido, Wingrove rechazaba radicalmente la supresión de la capa de cimiento del firme propuesta por McAdam, así como el principio de cohesión sin aportación de agentes químicos (16):

«Cabría preguntarse: ¿puede acaso la piedra, incluso la piedra caliza, machacada en porciones de 6 onzas, ser reunida y confinada como un todo, como si fuera un tablero o un trozo de tabla, sin intervención de ningún conglomerante? Mr. McAdam rechaza todo agente químico, manteniendo la cohesión por meros principios mecánicos, para formar una

superficie capaz de soportar unas cargas de tráfico indefinidas».

Wingrove consideraba del todo imposible conseguir la cohesión de la capa sin mezclar el árido de machaqueo con otros materiales, así como indicaba que tampoco había pasado suficiente tiempo como para que el método de McAdam fuera considerado adecuado. Los alegatos de Wingrove contra McAdam, no obstante, fueron objeto de revisión por parte de otros técnicos y considerados «escritos aparentemente bajo sentimientos heridos, quizá por celos de Mr. McAdam» (17).

Por su parte, en Francia existió desde un principio un grupo de ingenieros y humanistas opuestos radicalmente a la introducción de este diseño en las carreteras francesas, por diversas razones. Entre los ingenieros se encontraban Antoine Thénard, Ingeniero Jefe de Puentes y Calzadas, y entre los humanistas sobresalía el arqueólogo Victor Godard-Faultrier. En este sentido, el problema planteado era el uso, en ocasiones, de piedra procedente de elementos patrimoniales próximos a las carreteras para su machaqueo y consiguiente fabricación del macadam. El arqueólogo llegó a decir lo siguiente del macadam (18):

«El macadam, ese enemigo de toda civilización antigua, con motivo lo maldicen los hombres con buen gusto y los artistas. Así pues, temo por nuestro dolmen de Monsabert. Esta guerra del macadam contra nuestras antigüedades es tan general que, durante un viaje de ocho días por Maine-et-Loire, he encontrado en él [formando parte del macadam de las carreteras] a los restos de los castillos de Saint Symphorien y Saint Offange en Rochefort. Este enemigo [el macadam] es particularmente peligroso para los monumentos celtas, a los que encuentra en su aislamiento, y que destruye sigilosamente, en el corazón mismo de los bosques y los campos».

En Rusia el macadam debió llegar a finales de la década de 1830, ya que Louis Eugène Robert confirma en sus cartas sobre el país eslavo (19) que la carretera de Moscú a Nizhni Nóvgorod se encontraba afirmada con macadam en septiembre de 1839.

En el caso de España, la difusión científica se vio interrumpida en gran medida por la situación política y militar del país, que vivió la I Guerra Carlista (1833-1840). En este sentido, la primera obra publicada que se ha localizado en España donde se menciona el macadam y se da noticia de este nuevo diseño de firme es *De la conservación de las carreteras*, del ingeniero de Caminos Ramón del Pino, que consideraba un gran éxito elevar la carretera en terraplén y eliminar el concepto de «caja» del firme (20). Adicionalmente, la Gaceta de Madrid publicó esos años por entregas unos textos denominados *Estudios sobre la Inglaterra*, donde se refiere por primera vez, en La Gaceta número 3336, correspondiente al 5 de noviembre de 1843, la existencia del macadam como invento aplicado en las calles de Londres. Años después, el ingeniero Espinosa refiere el método de McAdam en su *Manual de Caminos* (21), y en 1860 los afirmados de macadam se encontraban ya integrados en las lecciones de carreteras impartidas en la Academia de Ingenieros Militares de Guadalajara (22).

Hacia 1840, el uso del macadam se encontraba generalizado ya en toda Europa. En la actualidad, gran parte de las bases que conforman los firmes actuales de muchas carreteras europeas y españolas están formadas por macadam.

4.2. Difusión del macadam fuera de Europa

La primera aplicación del macadam fuera de Europa tuvo lugar en Australia en 1822, en el estado de Nueva Gales del Sur. En este caso se afirmó con macadam un tramo de la carretera entre las poblaciones de Prospect y Richmond, cuya autorización administrativa se publicó en el periódico oficial australiano *Sydney Gazette* (23), como se indica en la Figura 6.

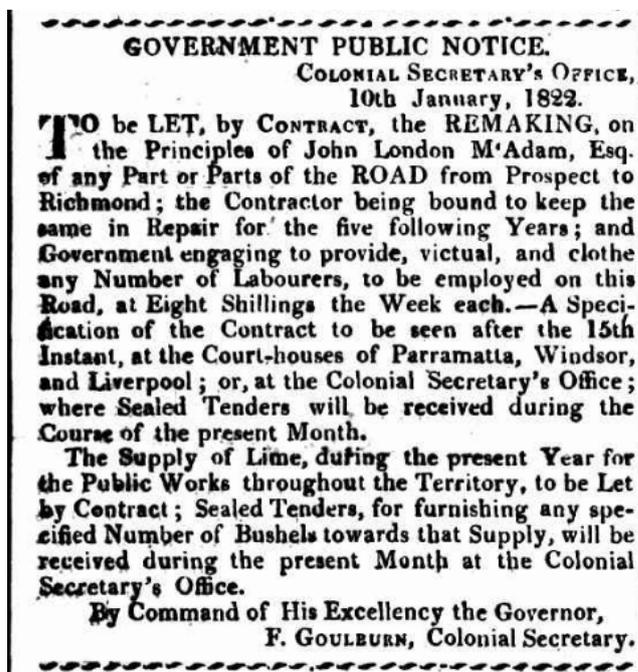


Figura 6. Autorización de la licitación por contrata de las obras del primer firme de macadam en Australia. Fuente: Sydney Gazette (1822)

En lo relativo al continente americano, la pavimentación con macadam llega primeramente a Estados Unidos, por su mayor desarrollo industrial y comunicación con Reino Unido, en tanto que va llegando posteriormente a las naciones hispanoamericanas.

En los Estados Unidos, el primer tramo de carretera pavimentado con macadam es el que corresponde actualmente a la *Alternate Route 40* entre las localidades de Boonsboro y Hagerstown (Maryland). En 1822, este tramo era el único sin firme proyectado en la carretera entre Baltimore, en la bahía de Chesapeake, y Wheeling, en el río Ohio. Los coches y carros que usaban la vía en invierno tardaban entre 5 y 7 horas para cubrir un trazado de 16 km. En este caso, se machacaron las piedras hasta conseguir un peso máximo de 6 onzas, o que pasaran por un anillo de 2 pulgadas (tamaño máximo aproximado ≈ 50 mm). Se ejecutó un firme en tres capas, cuya compactación fue realizada mediante el empleo de un rodillo metálico de hierro fundido, en lugar de permitir que se compactara por el tráfico (práctica inadecuada que era habitual en las áreas de Estados Unidos donde no se disponía de medios). La construcción de este primer firme de macadam en Estados Unidos se representa en la Figura 7.

La segunda infraestructura viaria en Estados Unidos en ser intervenida o «macadamizada», como se decía entonces, fue la *National Road* (actualmente *Route 40*) en un tramo de



Figura 7. «First macadam road in 1823», obra de Carl Rakeman. Fuente: Federal Highway Administration (EE.UU.)

117,5 km, cuyas obras se prolongaron entre 1825 y 1830. A partir de 1825, el macadam sería adoptado como firme estándar para el resto de tramos de la *National Road* (11).

En el caso de Canadá, la primera carretera con firme de macadam corresponde a un tramo de aproximadamente 40 km en la actual carretera 8 entre las localidades de Galt (municipio de Cambridge) y Hamilton, en el estado de Ontario (24).

En Hispanoamérica, el 20 de abril de 1844 se publicó en *El Peruano*, diario oficial de aquel país (Nº 38, Tomo XI), en la sección de *Varietades*, una semblanza de John Loudon McAdam donde se describe el firme diseñado y sus prestaciones. Un año después, en 1845, se publicó en México una reimpresión de la obra del ingeniero español Ramón del Pino, donde se habla sobre McAdam.

A mediados del siglo XIX los españoles construyeron la primera carretera de macadam en la isla de Puerto Rico, en un tramo de 41 km entre las localidades de San Juan y Caguas. El diseño del firme lo realizó el coronel de ingenieros Diego Gálvez, siendo director de las obras en una primera fase el coronel Tulio O'Neill, y posteriormente el comandante Santiago Cortijo. El primer segmento de carretera construido fue el tramo entre San Juan y el río Piedras, cuyas obras finalizaron en 1853 (25).

En los países africanos los firmes de macadam llegaron en el primer tercio del siglo XX, en su mayor parte ejecutados por las entonces potencias coloniales. En el Congo, por ejemplo, la primera carretera de macadam se construyó en 1931 en Léopoldville, llamándose entonces «*Grand Route de Kinshasa*», que actualmente es la «*Avenue de la Justice*» de la capital congoleña.

4.3. El uso del macadam en España

La construcción de los firmes de macadam llega a España en la segunda mitad del siglo XIX, convirtiéndose en una solución técnica popular en la primera mitad del siglo XX, siendo empleada hasta la década de 1970 en la Red de Carreteras del Estado, e incluso hasta la actualidad en redes de carreteras de las Diputaciones Provinciales y viales de titularidad municipal, si bien de forma excepcional.

El siglo XX en España es una sucesión de planes de carreteras técnicamente sólidos y certeros, pero financieramente poco dotados y en ocasiones ejecutados en porcentajes muy inferiores a los previstos. En primer lugar debe mencionarse el Circuito Nacional de Firmes Especiales, creado por Real Decreto-Ley de 9 de febrero de 1926, que preveía la construcción de nuevos firmes de macadam con riegos bituminosos, superficiales y profundos (26). En este sentido, los firmes ordinarios en las carreteras españolas hasta la década de 1930

fueron los formados por macadam, cubierto o no mediante riego bituminoso con gravilla (27).

La preponderancia absoluta del macadam en España comienza a cambiar a raíz de la construcción de las bases militares norteamericanas fruto del Tratado Hispano-Norteamericano de 1953. En ellas se utilizan soluciones técnicas de pavimentación más modernas, lo que influye en los ingenieros españoles de la Dirección General de Carreteras, que viajan en algunos casos a Estados Unidos para conocer de cerca la organización y técnica viaria americana (26).

Hay que tener en cuenta que las técnicas de construcción de firmes de macadam en España en la década de 1950 seguían siendo bastante manuales, como se evidencia en la Figura 8 y en la Figura 9.

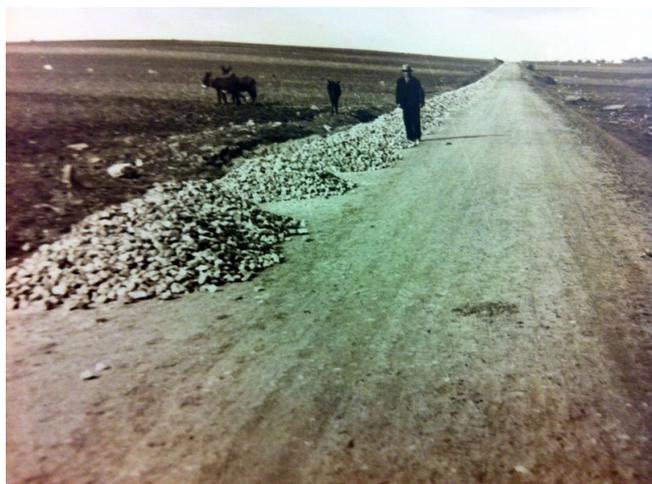


Figura 8. Acopios de macadam para su extensión en una carretera. Década de 1950. Fotografía: Vesalio Manso de Pedro.



Figura 9. Medición de la piedra partida a disponer en la carretera en cajón de 1 m³. Década de 1950. Fotografía: Vesalio Manso de Pedro.

En 1960 se construye la variante de Boceguillas (Segovia) en la carretera N-I, en donde se dispone una capa de base de granulometría continua (lo que actualmente sería una zorra artificial), representando la primera alternativa a los firmes de macadam. En 1964 se construye una capa de base de gravacemento entre los PP.KK. 18,0 y 40,0 de la carretera N-VI

entre Las Rozas y Villalba, lo que representa la primera estabilización in situ con cemento. Durante la década de 1960, el uso del macadam queda circunscrito a carreteras de segundo orden (27).

El 24 de enero de 1967 se inicia el Programa Red de Itinerarios Asfálticos (REDIA), fruto del Plan de Carreteras de 1961. El programa REDIA finaliza en 1975, habiendo revestido de aglomerado asfáltico 4.928 km de carreteras de firme granular.

En la modificación de los Presupuestos Generales del Estado de 1971 (B.O.E. de 28 de enero de ese año), se consigna un aumento de 300 millones de pesetas sobre los 800 millones inicialmente previstos para transformación de firmes de macadam. El esfuerzo presupuestario para la eliminación de superficies de macadam continuó prolongándose hasta 1978. En algunas carreteras no se retiró el macadam, sino que se cubrió con riegos asfálticos o aglomerados, según los casos.

Así, entre 1973 y 1978, el Plan de Transformación de Firmes de Macadam permitió revestir con capas asfálticas 21.500 km de carreteras de piedra partida recebada.

No obstante, en el año 1976 se aprueba el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), cuyo Art. 502 regula la construcción de firmes de macadam, norma que ha permanecido vigente hasta su derogación por la Orden FOM 891/2004.

La última superficie de macadam en los firmes de las carreteras del Estado desapareció en 1978 (27), pero el macadam ha seguido presente en las redes de otras administraciones hasta el día de hoy, si bien cubierto en casi todos los casos por riegos con gravilla o mezclas bituminosas en caliente. Asimismo, sigue siendo un material suministrado en la actualidad. A modo de ejemplo, la Diputación Provincial de Zamora publicó en su Pliego de Prescripciones Técnicas para obras de conservación en el periodo 2017-2019 las condiciones de suministro de macadam.

Según el Anuario del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana en 2018 (último publicado), existen en España un total de 6.718 km de carreteras con pavimento de macadam en el país, de los cuales el 81,2% pertenecen a las confederaciones hidrográficas (Figura 10). De los 204 km de vías

Carreteras con pavimento de macadam en España
Fuente: Anuario MITMA 2018

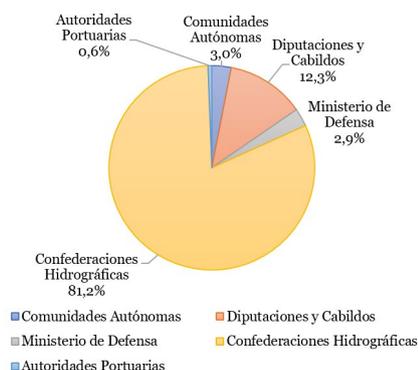


Figura 10. Carreteras con pavimento de macadam en España. Fuente: Anuario MITMA 2018.

que aún disponen de rodadura de macadam pertenecientes a las Comunidades Autónomas, 187 km están en Andalucía. En el caso de las redes de las Diputaciones Provinciales y Cabildos, de los 828 km de carreteras provinciales con pavimento de macadam, 582 km están en la provincia de Sevilla y 100 km en la provincia de Huesca.

5. CONCLUSIONES

John Loudon McAdam es conocido como el gran ingeniero de carreteras del siglo XIX. El escocés realizó una contribución significativa al proponer una alternativa sólida al diseño francés de Trésaguet, que permitió superar el «hérisson» romano para siempre. No obstante, debe indicarse que el empleo del árido de machaqueo no es original de McAdam, ya que Trésaguet lo propone en sus diseños 35 años antes.

El escocés, en este sentido, destaca por tener un gran sentido físico al considerar la interacción rueda-firme en el diseño y apostar por tamaños de árido menores, que, contra lo que podría parecer en un principio, favorecen la cohesión y la durabilidad de la carretera, así como la comodidad en la conducción. También demuestra McAdam un gran conocimiento de los materiales del país, de sus propiedades y de lo que cada uno de ellos puede aportar a un firme de carreteras. También, en este aspecto, es categórico respecto a los que deben evitarse, coincidiendo con Trésaguet en que debe optarse por materiales de buena calidad, limpios y sin mezclarse con suelos.

Así, debe reconocerse la importante contribución de McAdam a la ingeniería moderna de carreteras. Sin embargo, también es preciso señalar que, de haberse mantenido su diseño en puridad, difícilmente hubiera resultado exitoso, en tanto que la falta de confinamiento de la sección (que sí proyectaba Trésaguet) y la falta de recebo (que añadiría Edgeworth) habrían llevado previsiblemente al desplazamiento lateral del árido de machaqueo al paso de los carros y a la formación de rodaduras por falta de cohesión del firme.

Richard Edgeworth aprovecha los avances realizados y el estado del conocimiento, yendo un paso más allá y buscando preservar la durabilidad del firme. Para alcanzar este objetivo también tiene en cuenta la interacción rueda-firme, por su formación en el campo de la mecánica. Esta perspectiva le lleva a considerar la cohesión de la sección como elemento fundamental para la defensa de la infraestructura frente al agua, para mejorar la capacidad portante e incrementar la durabilidad, lo que le mueve a proyectar el recebo de la capa de árido de machaqueo que McAdam siempre rechazó. Así, Edgeworth demuestra también un sentido físico admirable, en tanto es consciente de que la filtración de la gravilla en los intersticios de la piedra de tamaño mayor va a dar lugar a un producto más sólido y durable.

El trabajo de McAdam y Edgeworth permitió dar lugar a un diseño conjunto que funcionó formidablemente durante los próximos dos siglos, y, aunque únicamente pasara a la historia como «macadam», sería proyectado frecuentemente en Europa hasta la segunda mitad del siglo XX.

REFERENCIAS / REFERENCES

- (1) Trésaguet, P. M. J. (1775). *Mémoire sur la construction et l'entretien des chemins de la Généralité de Limoges*. *Annales des Ponts et Chaussées*. París, Francia.
- (2) McAdam, J. L. (1811). *Extracts from Observations on the Highways of the Kingdom*. Londres, Gran Bretaña.
- (3) McAdam, J. L. (1819). *A practical essay on the scientific repair and preservation of public roads*. Board of Agriculture and Internal Improvement, (Ed.), Londres, Reino Unido: McMillan.
- (4) Skempton, A. W. (2002). *A Biographical Dictionary of Civil Engineers*. En Skempton, A.W. (Ed.), *Great Britain and Ireland*. Vol. 1. Londres, Reino Unido: Thomas Telford. The Institution of Civil Engineers.
- (5) Edgeworth, R. L., Edgeworth, M. (1821). *Memoirs of Richard Lovell Edgeworth, Esq.* Vol. 2. 2ª Edición. Vol. 2. Londres, Reino Unido: R. Hunter, Baldwin, Cradock & Joy.
- (6) Edgeworth, R. L., Edgeworth, M. (1821). *Memoirs of Richard Lovell Edgeworth, Esq.* Vol. 1. 2ª Edición. Vol. 1. Londres, Reino Unido: R. Hunter, Baldwin, Cradock & Joy.
- (7) Webb, A. (1878). *A compendium of Irish biography, comprising sketches of distinguished irishmen*, p. 163, Dublín, Irlanda: M.H. Gill & Son, Sackville Street.
- (8) Petroski, H. (2016). *The Road Taken: The History and Future of America's Infrastructure*. 1ª Edición. Bloomsbury.
- (9) Barbé, L. (2006). *Francis Ysidro Edgeworth: crònica familiar*. Barcelona, España: Servicio de Publicaciones. Universidad Autónoma de Barcelona.
- (10) Edgeworth, R. L. (1817). *An Essay on the Construction of Roads and Carriages*. 2nd ed. Hunter, R. (Ed.), Londres, Reino Unido.
- (11) Lay, M. G. (1992). *Ways of the World: A History of the World's Roads and of the Vehicles that Used Them*. Piscataway, NJ, Estados Unidos: Rutgers University Press.
- (12) Edgeworth, R. L. (1827). *Essai sur la construction des routes et des voitures*. París, Francia: Anselin et Pochard.
- (13) Polonceau, A. R. (1829). *Observations sur les routes, suivies de propositions sur leur amélioration et sur leur entretien*. París, Francia: Librairie des Ponts et Chaussées.
- (14) Navier, C. L. M. H. (1831). Considérations sur les travaux d'entretien des routes en Angleterre procédés de M. Mac Adam. *Ann des Ponts Chaussées*, 2:132–56.
- (15) Masclat, A. T. J. (1830). Système de Mac-Adam. Réplique du Chevalier Masclat a M. Thénard, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées. *J du Génie Civil, des Sci des Arts*. 8:161–99.
- (16) Wingrove, B. (1821). *Remarks on a bill now before Parliament, to amend the general laws for regulating turnpike-roads, in which are introduced strictures on the opinions of Mr- McAdam on the subject on roads*. Londres, Reino Unido: Richard Cruttwell.
- (17) The Gentleman's Magazine. (1822). Review.- Wingrove on Road-making. *Gentleman's Mag*, Jun; 92(I):621–2.
- (18) Godard-Faultrier V. Dangers du Mac-Adam. *Mem la Soc Natl d'Agriculture, Sci Arts d'Angers*. 1848;
- (19) Robert, L.E. (1840). *Lettres sur la Russie a Son Excellence Mr. de Struve*, p 67, Vol. Lettre III. París, Francia: Arthus Bertrand.

- (20) del Pino, R. (1841). *De la conservación de las carreteras*. Barcelona, España.
- (21) Espinosa, P. C. (1855). *Manual de caminos, que comprende su trazado, construcción y conservación*. Madrid, España: Imprenta de Ramón Ballone.
- (22) Muñoz, A. (1860). *Lecciones de caminos ordinarios, arregladas para uso de la Academia de Ingenieros*. Guadalajara, España: Imprenta de D. Elías Ruiz y sobrinos.
- (23) Goulburn, F. (1822). *To be let, by contract, the remaking on the principles of John Loudon McAdam, of any part or parts of the road from Prospect to Richmond*. Sydney Gazette and New South Wales Advertiser.
- (24) Galt, F. D. [Internet]. L'Encyclopedie Canadienne. 2009 [cited 2019 Dec 2]. Available from: <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/galt-2>
- (25) Pumarada O'Neill, L. F. (1995). *Historic bridges in Puerto Rico*, p. 1840-1850, San Juan, Puerto Rico.
- (26) Uriol Salcedo, J. I. (1997). Las carreteras desde Isabel II a nuestros días. En *Viaje por la historia de nuestros caminos* (pp. 245–341). Madrid: Fomento de Construcciones y Contratas, FCC.
- (27) Del Val Melús, M. Á. (2007). Los pavimentos en las carreteras españolas del siglo XX. *Rev Obras Públicas*, 154(3482):7–24.