



Monografía 10

Consumo de energía y emisiones asociadas a la construcción y mantenimiento de Infraestructuras

*Energy consumption and emissions associated with the
construction and maintenance of infrastructures*

Timoteo Martínez Aguado
M^a José Calderón Milán
Ana Isabel Muro Rodríguez

Consumo de energía y emisiones asociadas a la construcción y mantenimiento de Infraestructuras

Energy consumption and emissions associated with the construction and maintenance of infrastructures

Timoteo Martínez Aguado

M^a José Calderón Milán

Ana Isabel Muro Rodríguez

Universidad de Castilla-La Mancha

<http://www.enertrans.es>

© José M^a López Martínez, Javier Sánchez Alejo

© De esta edición, Grupo Gestor del Proyecto EnerTrans, 2008

ISBN: 978-84-89649-43-9

Déposito Legal: M-13499-2009

Esta monografía ha sido redactada por sus autores en el marco del Proyecto de Investigación “*Desarrollo de un modelo de cálculo y predicción de los consumos energéticos y emisión del sistema de transporte que permita valorar la sensibilidad de los consumos a las decisiones de inversión en infraestructura y de política de transporte*” (*EnerTrans*).

El proyecto *EnerTrans* ha sido desarrollado por los siguientes organismos: Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Universidad Pontificia Comillas de Madrid, Universidad Politécnica de Madrid-INSIA; Universidad de Castilla-La Mancha; ALSA; Fundación General de la Universidad Autónoma de Madrid; Fundación “Agustín de Betancourt”; Fundación Universidad de Oviedo.

El proyecto *EnerTrans* contó con una ayuda económica del Centro de Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) dentro de su primer programa de ayudas (2006).

El proyecto *EnerTrans* estuvo dirigido por su investigador principal Alberto García Álvarez con el apoyo de un “Comité Científico” del que formaron parte las siguientes personas: Alberto García Álvarez (Fundación de los Ferrocarriles Españoles); Ignacio Pérez Arriaga y Eduardo Pilo de la Fuente (Universidad Pontificia Comillas de Madrid); Jose María López Martínez (Universidad Politécnica de Madrid-INSIA); Alberto Cillero Hernández y Carlos Acha Ledesma (ALSA); Timoteo Martínez Aguado y Aurora Ruiz Rúa (Universidad de Castilla-La Mancha); José Miguel Rodríguez Antón y Luis Rubio Andrada (Fundación General de la Universidad Autónoma de Madrid); Manuel Cegarra Plané (Fundación “Agustín de Betancourt”) y Rosa Isabel Aza y José Francisco Baños Pino (Fundación Universidad de Oviedo). El coordinador del proyecto por parte del CEDEX fue Antonio Sánchez Trujillano.

The aim of the EnerTrans research project is to obtain an accurate model to find out the energy consumption (and associated emissions) of the Spanish transport system, according to the important variables on which it depends, and thereby avoid the need to extrapolate historical data series calculated with various methodologies in the European sphere for each mode of transport. The participants include various universities and foundations linked to different modes of transport: Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Universidad Politécnica de Madrid-INSIA, Universidad de Castilla-La Mancha, ALSA, Universidad Pontificia de Comillas de Madrid, Fundación General de la Universidad Autónoma de Madrid, Fundación Agustín de Betancourt and Fundación Universidad de Oviedo.

The project has involved constructing a model which can be used to explain and predict energy consumption (and associated emissions) in the Spanish transport system, using a coherent methodology for all modes, considering all energy utilizations (construction, operation, maintenance, movement) and the whole energy cycle from source to final use, thus allowing the effects of the results of infrastructure or transport policy to be anticipated and evaluated. As a secondary objective, the project will permit assessment of the impact of any type of technical or operational measure aimed at reducing this energy consumption, which will be useful for transport operators.

It includes innovations such as taking into consideration different routes between the same points for each one of the different modes of transport, or separating consumption from load or space utilization coefficients.

The published documents corresponding to the EnerTrans project fall into three categories: Monographs, Articles and Technical notes.



Con la subvención del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (Ministerio de Fomento), número de proyecto PT-2006-006-01IASM.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	3
1. INTRODUCCIÓN	4
2. INFRAESTRUCTURAS DEL TRANSPORTE POR CARRETERA.....	5
2.1. Metodología de los Casos de Estudios	5
2.1.1 Resumen de las alternativas para cada caso de estudio.....	7
2.2. Análisis de las etapas de la construcción de infraestructuras.....	9
2.2.1 Definición de las fases de construcción	9
2.2.2 Movimiento de tierras	10
2.2.3 Secciones tipo y Firmes	14
2.2.4 Drenajes: Longitudinal y Transversal	20
2.2.5 Estructuras: Viaductos, pasos superiores e inferiores y túneles.....	22
2.2.6 Construcciones auxiliares.....	24
3. CONSUMOS ENERGÉTICOS DE LA CONSTRUCCIÓN DE INFRAESTRUCTURAS	26
3.1. Metodología Básica	26
3.2. Metodología para cuantificar el consumo por etapas de construcción	27
3.2.1 Movimiento de tierras	28
ANEXO.....	29
BIBLIOGRAFÍA	33

1. INTRODUCCIÓN

La construcción de infraestructuras representa un gran respecto a la contaminación atmosférica del transporte por carretera, se pueden diferenciar dos fases, la fase de construcción y la fase de explotación de la infraestructura.

En la fase de construcción se producirán alteraciones por la emisión de partículas en los procesos de extracción, preparación, almacenamiento y transporte de tierras; y emisiones de agentes contaminantes a consecuencia de la circulación de la maquinaria. A su vez, dentro de esta fase, podemos distinguir dos tipos de consumos energéticos:

- Tipo I: Aquellos consumos energéticos que son propios de la fabricación del material necesario en la ejecución de la obra (cemento, hormigón, etc.)
- Tipo II: Aquellos consumos energéticos que son propios de la ejecución de la obra en si misma, que son fundamentalmente las maquinarias a utilizar en cada fase (transporte de materiales, movimientos de tierra, etc.).

En la fase de explotación la principal afección será la emisión de gases contaminantes de los vehículos que circulen por la autovía.

En esta monografía nos ocupamos del análisis del consumo y emisiones asociadas a la primera fase, la fase de construcción de la infraestructura.

2. INFRAESTRUCTURAS DEL TRANSPORTE POR CARRETERA

Esta parte del estudio de la construcción de infraestructuras del transporte por carretera, se centra en el análisis de los proyectos de construcción de vías de doble carril (o incluso triple carril) y sentido, autopistas y autovías, por considerar que estas representan un mayor coste, en términos económicos y un mayor empleo de materiales y maquinarias, en términos de consumo energético.

Para una mayor diversidad de muestras a estudiar, la elección de los casos de estudio se centra principalmente en aspectos geográficos debido a la importancia de este aspecto en lo referente a la construcción de infraestructuras para el transporte por carretera.

Para la elección de los casos de estudio y siguiendo el criterio geográfico del proyecto se presentan diferentes configuraciones en donde predominan aspectos como: un entorno urbano (como la construcción de una circunvalación de una gran ciudad), un entorno montañoso (como la construcción de autovía en territorio escalpado) y un entorno llano (combinación de los anteriores).

Estos Casos de estudio, con principalmente de construcción de nuevas carreteras, incluyendo algunos de ellos ampliaciones de vías ya existentes y mantenimiento o reposición de las mismas.

2.1. Metodología de los Casos de Estudios

Para comenzar con la base de una metodología respecto al cálculo del consumo energético en la construcción de infraestructuras del transporte por carretera se han analizado diversos proyectos de construcción de autopistas y autovías.

La carretera se define como una vía de comunicación (por la que se viaja) que utiliza un pavimento estabilizado, abierta a la circulación pública y destinada esencialmente al uso de vehículos de carretera que se desplazan sobre sus ruedas. Se distinguen los siguientes tipos de carreteras:

- Las autopistas son las carreteras que están especialmente proyectadas, construidas y diseñadas para la circulación de automóviles, pueden ser de peaje (exigen a los usuarios una tasa de peaje) o autopistas libres, y reúnen las siguientes características:
 - No tienen acceso a las mismas las propiedades colindantes.
 - No cruzar a nivel ninguna otra senda, vía, línea de ferrocarril o tranvía, ni ser cruzada a nivel por senda o servidumbre de paso alguno.
 - Contar con distintas calzadas por cada sentido de circulación, separadas entre sí, salvo en puntos singulares o con carácter temporal, por una franja de terreno no destinada a la circulación o en casos excepcionales por otros medios.
 - Está especialmente señalizada como autopista y está reservada a categorías específicas de vehículos automóviles. Las autopistas se clasifican como de peaje o libres según se exija o no a los usuarios una tasa de peaje.

- Las autovías son las carreteras que, no reuniendo todos los requisitos de las autopistas, tienen calzadas separadas para cada sentido de circulación y limitación de acceso a las propiedades colindantes.

La estructura y contenido de los mencionados proyectos depende fundamentalmente del agente encargado de realizar el estudio y por tanto se plantean distintas configuraciones en su realización, aunque todos cumplen un contenido básico común.

Este contenido básico se centra en los siguientes aspectos:

- Introducción y Antecedentes del proyecto: Se realiza una descripción de las actuaciones previas al informe.
- Delimitación del área de estudio: Donde se analiza detalladamente el contexto geográfico de la carretera además de la división de la misma en tramos para facilitar su estudio.
- Datos básicos: Este punto de análisis consta de los siguientes estudios:
 - Cartografía y topografía.
 - Geología y procedencia de los materiales. Partiendo de la caracterización del territorio mediante las Unidades Geotécnicas, el análisis geológico del terreno se utiliza para detectar las posibles dificultades en la ejecución de la obra respecto a los desmontes, rellenos, estructuras y túneles. El estudio de materiales se enfoca, fundamentalmente, al aprovechamiento de los materiales presentes en el entorno del corredor en estudio, con vista a su utilización como préstamos respecto al movimiento de tierras.
 - Climatología e hidrología. Se describen las características climáticas del área mediante el estudio de la termometría, pluviometría (para determinar posteriormente los elementos de drenaje necesarios) y vientos. Además, con estos datos se calculan unos coeficientes medios de reducción por días de climatología adversa, para el cálculo de días laborables en las diferentes actividades incluidas en el estudio.
 - Datos socioeconómicos: Análisis y evolución de la población, de los equipamientos y servicios del área y sus principales actividades económicas.
 - Datos del tráfico: Análisis de la red viaria actual y prevista que permite caracterizar la oferta viaria y realizar una previsión de los tráficos futuros, a partir de datos del tráfico proporcionados por las estaciones de aforo del Ministerio de Fomento, de estudios de campo realizados para la toma de datos. De esta forma se determina el Índice Medio Diario (IMD) del tráfico pesado que es necesario para determinar las características del firme a utilizar y el Índice Medio de Servicio (IMS) para determinar la funcionalidad de las alternativas.
 - Condicionantes medioambientales: Análisis de los elementos y factores ambientales de carácter geomorfológico, hidrológico, biológico, e incluso espacios naturales protegidos que serán los principales condicionantes del área de estudio. Se incluye además un estudio del Impacto medioambiental del proyecto. En este estudio se analizan los efectos contaminantes de los vehículos, los ruidos emitidos, las vibraciones de los mismos, el efecto barrera que supondría la infraestructura para el medio natural, etc.
- Definición de opciones estudiadas: Se definen distintas alternativas de trazado para cada uno de los tramos en los que se ha dividido previamente

el proyecto. Estas alternativas de trazado cumplen con los objetivos marcados por los condicionantes expuestos en los datos básicos del proyecto. En este punto del proyecto se expone la cuantificación de las etapas de la construcción de la carretera.

- Síntesis de la comparación de alternativas: Cada alternativa de trazado propuesta por tramo, es analizada y comparada para la selección de la alternativa más óptima para la ejecución de la obra de acuerdo con los objetivos propuestos. Para la elección de la alternativa óptima se establecen comparaciones de acuerdo a unos criterios territoriales (desde el punto de vista del trazado y de la construcción de la vía), económicos y de rentabilidad, medioambientales (alteraciones sobre la fauna, tala de árboles, etc.) y funcionales (según el tráfico captado y las futuras conexiones).
- Concepción global de la opción seleccionada: Descripción de las alternativas elegidas como óptimas por cada uno de los tramos.

En cada caso de estudio por tanto se plantean varias alternativas de trazado para la carretera en cuestión que tras un exhaustivo análisis, cada documento concluye con las mejores opciones que cumplen de una manera más óptima con los objetivos propuestos.

A continuación se detalla la tramificación y las alternativas propuestas de los Casos de Estudio analizados.

2.1.1 Resumen de las alternativas para cada caso de estudio

La elección de los casos de estudio se centra principalmente en aspectos geográficos, por tanto se clasifican según el entorno en el que se realizan, distinguiendo un entorno urbano (como la construcción de una circunvalación de Sevilla), un entorno montañoso (como la construcción de autovía en Despeñaperros) y un entorno llano (autovía Badajoz- Granada).

Caso de Estudio I: Badajoz-Granada

Este caso de estudio tiene una longitud aproximada de 400 km y se subdivide en dos sub-proyectos de aproximadamente 200 km cada uno que se detallan a continuación.

Sub-proyecto I: En esta primera se plantean dos alternativas A y B. La alternativa propuesta como la más ventajosa es la A con una longitud de 199 Kilómetros. El trazado de la misma se caracteriza geoméricamente por su suavidad, tanto en planta como en alzado. No existen grandes desmontes (9,4 millones de m³) o rellenos (26,1 millones de m³) y no se hacen necesarios ni viaductos importantes ni túneles. Se prevén un total de 25 enlaces lo que implica, aproximadamente, un enlace cada 8 kilómetros. Los pasos inferiores y superiores son 134 y 99 respectivamente.

Sub-proyecto II: Este proyecto se divide en 5 Tramos, cada uno dividido a su vez en distintos Ejes (nunca coincidentes entre si y que no tienen porqué abarcar la totalidad del recorrido del tramo), cuya combinación da lugar a alternativas de trazado completas para cada tramo (de inicio a fin).

- **Tramo I:** Se divide en 4 ejes que dan lugar a 6 alternativas. La alternativa seleccionada es la 2 con 35 kilómetros de longitud.

- **Tramo II:** Se divide en 11 ejes que dan lugar a 14 alternativas. La alternativa seleccionada es la 6 con 60 kilómetros de longitud.
- **Tramo III:** Se divide en 2 ejes que dan lugar a 2 alternativas. La alternativa seleccionada es la 1 con 22 kilómetros de longitud.
- **Tramo IV:** Se divide en 4 ejes que dan lugar a 6 alternativas. La alternativa seleccionada es la 3 con 36 kilómetros de longitud.
- **Tramo V:** Se divide en 3 ejes que dan lugar a 4 alternativas. La alternativa seleccionada es la 1 con 53 kilómetros de longitud.

En conjunto los cinco tramos con sus respectivas alternativas seleccionadas tienen una longitud de 206 kilómetros con las siguientes características:

- Número de Viaductos: 17
- Pasos superiores e inferiores: 57 y 134
- Obras de drenaje: 314
- Desmante (m³): 45.656.013,90
- Terraplén (m³): 33.020.207,00

Caso de Estudio III: Despeñaperros

Se trata de un caso de estudio de aproximadamente 9 kilómetros de longitud. Para este recorrido se plantean dos alternativas.

La Alternativa 1 tiene una longitud total de trazado de 8,8 Km correspondientes a la Nueva Calzada Norte (sentido Madrid) y 1.2 Km que corresponden a remodelación y adecuación como calzada sur (sentido Sevilla) de las antiguas calzadas. Además presenta 6 túneles, 7 viaductos y 2 pasos inferiores.

La Alternativa 2 cuenta con una longitud total de 9,4 Km de doble calzada, y presenta 3 túneles, 7 viaductos, 1 paso superior y 1 paso inferior.

La alternativa elegida como óptima es la alternativa 2.

Caso de Estudio IV: Circunvalación de Sevilla.

El proyecto plantea 6 opciones que tienen una longitud que varía de 20 a 22,6 kilómetros de nominadas: Opción 1, Opción 2, Opción 2', Opción 3, Opción 3', Opción 4.

La opción elegida por el proyecto como óptima es la Opción 2 que tiene una longitud de 22,04 kilómetros.

Como resumen, los parámetros característicos que definen la calidad del trazado se pueden citar:

- Longitud total: 22.039,576 m.
- Desmante: 1.608.793,1 m³
- Desmante tierra Vegetal: 421.183,1m³
- Terraplén: 2.642.955,5 m³

Para el análisis de la construcción de infraestructuras viarias, nos centramos en las alternativas elegidas por cada caso de estudio ya que resultan ser las óptimas.

2.2. Análisis de las etapas de la construcción de infraestructuras

En la construcción de una carretera vamos a diferenciar dos fases de ejecución o de trabajos, diferenciando entre los trabajos ejecutados para la construcción de la vía y sus estructuras y otras obras. La primera se denominada construcción básica, que consta de la propia construcción de la plataforma denominada firme (que consta de la calzada y el arcén) y las estructuras necesarias para su utilización (puentes, túneles, etc.). La segunda fase se denomina construcciones auxiliares que consta de todos aquellos trabajos necesarios para la finalización de la obra en cuanto a seguridad, iluminación, etc.

Para la ejecución de la obra, los trabajos que se realizan en cada una de las fases anteriores son:

Para la construcción básica: Los trabajos realizados en esta fase se denominan movimiento de tierras, secciones tipo y firmes, drenajes y estructuras. Estos trabajos se realizan para la formación del firme y de sus estructuras.

El firme es el conjunto de capas ejecutadas con materiales seleccionados, y generalmente, tratados, que constituye la superestructura de la plataforma, resiste las cargas del tráfico y permite que la circulación tenga lugar con seguridad y comodidad. Estas capas del firme son:

- La capa base o formación de la explanada: depende de la categoría de la explanada y del tipo de suelo de la traza o explanada (desmote).
- La capa intermedia: Es la capa de un pavimento de mezcla bituminosa situada debajo de la capa de rodadura.
- La capa de rodadura: Es la capa superior de un pavimento de mezcla bituminosa.

Para la construcción auxiliar: Los trabajos realizados en esta fase son la señalización, balizamientos y defensas de la vía, las obras complementarias y las obras varias como la recuperación del impacto medioambiental, la reposición de los servicios afectados, la iluminación el cerramiento metálico, la limpieza, terminación y conservación de obra y las áreas de servicio.

2.2.1 Definición de las fases de construcción

El índice a seguir en los epígrafes siguientes, que muestra de forma esquemática las diferentes fases que conforman la ejecución de la obra, es el siguiente:

Primera Fase: Construcción básica (formación del firme y estructuras). Las actividades que se desarrollan en esta fase son:

- Movimiento de tierras: Diferenciando las actividades de desmote y relleno del terreno. Previo a la realización de está actividad es necesario partir del análisis geológico y de procedencia de los materiales.
- Secciones tipo y Firmes. En esta etapa se determinan las secciones y el tipo de material a utilizar para la formación del firme, para lo cual es necesario determinar la categoría de la explanada y el tipo del tráfico de la vía.

- Drenaje: Diferenciando entre los trabajos del drenaje longitudinal y del transversal de la vía. Previo a la realización de esta actividad es necesario el análisis de la climatología e hidrología del entorno.
- Estructuras: Diferenciando entre la construcción de viaductos, pasos superiores e inferiores y túneles en función de las características de la vía.

Segunda Fase: Construcción auxiliar. Los trabajos en esta fase varían en función del caso de estudio y atienden a la siguiente clasificación:

- Señalización, balizamientos y defensas
- Obras complementarias
- Obras Varias
 - Recuperación impacto medioambiental
 - Reposición de servicios afectados
 - Iluminación y cerramiento metálico
 - Limpieza, terminación y conservación de obra
 - Áreas de servicio

A continuación se describe cada una de las actividades de las fases de construcción y los resultados de las mediciones para cada caso de estudio, haciendo especial referencia a las actividades de la primera fase de construcción básica de la vía.

2.2.2 Movimiento de tierras

El movimiento de tierras corresponde a la primera fase de construcción de la carretera (construcción básica) y en concreto se realiza para la formación de la capa de base del firme o de formación de la explanada.

Para determinar el espesor mínimo de la explanada¹ o de la capa de base del firme y de los materiales a utilizar, es necesario conocer la categoría de explanada y el tipo de suelo de explanación.

Se establecen tres categorías de explanada (E1, E2 y E3) y seis tipos de suelos de explanada (Inadecuados y marginales (IN), tolerables (0), adecuados (1), seleccionados (2 y 3) y roca (R)). Además se establecen como materiales los denominados suelos estabilizados in situ, que proceden de la mezcla de suelos adecuados (1) y seleccionados (2 y 3) con cal o cemento obteniéndose los denominados S-EST1, S-EST2 y S-EST3. Los trabajos realizados en esta etapa se describen a continuación, diferenciando entre trabajos de desmonte o excavación y trabajos de relleno o terraplén.

El desmonte del terreno se realiza para la formación de la explanada y su cuantificación se determina en función del tipo de suelo.

Los trabajos de relleno, se pueden efectuar con materiales propios del desmonte, siempre que los materiales obtenidos sean apropiados en función de la categoría de la explanada.

¹ Ver tabla anexa de la formación de la explanada.

Por tanto, dependiendo del tipo de suelo obtenido en la excavación se determinan unos criterios para la contabilización y compensación de volúmenes tanto para su utilización en el trabajo de relleno, para aquellos que sean adecuados, como para el desecho de los mismos en caso de que sean inadecuados. Estos criterios generalmente son:

El suelo seleccionado obtenido de las excavaciones se emplea directamente y estabilizado como S-EST-3 en la explanada. El sobrante, cuando exista, se emplea en rellenos tipo terraplén.

Respecto al pedraplén y todo-uno, éstos se destinan a formación de rellenos de la traza, cimienta en zonas encharcables, etc. Cuando los desmontes en roca sean considerables podrá estudiarse su explotación mediante machaqueo para obtener suelos seleccionados, zahorras, etc.

En cuanto a los suelos adecuados, se destinarán a la formación de terraplenes y de las capas de S-EST-1 de la explanada.

El suelo tolerable se destinará, igualmente, a la construcción de terraplenes.

Finalmente los suelos marginales e inadecuados se llevarán a vertedero, así como los excedentes de los apartados anteriores.

La compensación, con vertedero y préstamos necesarios, es resultado de aplicar coeficientes de paso, aprovechamiento y el reparto a lo largo de las alternativas.

Además los principales desplazamientos de material consistirán en:

- El transporte a los vertederos del material excavado. Este transporte depende de la cantidad de vertederos y el reparto de los mismos en la zona de ejecución de la obra.
- La compensación interna de la alternativa seleccionada, que depende de la distancia media entre la compensación de desmontes y terraplenes.
- El trasiego de materiales desde préstamo. En caso de necesitar más materiales, este transporte dependerá de la localización de las zonas de préstamo donde la demanda es mayor.

A continuación se muestran los resultados de la cuantificación de esta etapa por cada uno de los casos de estudio.

Caso de Estudio I: Badajoz-Granada

Los criterios para la contabilización y compensación de volúmenes son:

1. El suelo seleccionado obtenido de las excavaciones se emplea directamente y estabilizado como S-EST-3 en la explanada. El sobrante, cuando exista, se emplea en rellenos tipo terraplén.

Respecto al pedraplén y todo-uno, éstos se destinan a formación de rellenos de la traza, cimienta en zonas encharcables,...

Cuando los desmontes en roca sean considerables podrá estudiarse su explotación mediante machaqueo para obtener suelos seleccionados, zahorras,...

En cuanto a los suelos adecuados, se destinarán a la formación de terraplenes y de las capas de S-EST-1 de la explanada.

El suelo tolerable se destinará, igualmente, a la construcción de terraplenes.

Finalmente los suelos marginales e inadecuados se llevarán a vertedero, así como los excedentes de los apartados anteriores.

La compensación, con vertedero y préstamos necesarios, es resultado de aplicar coeficientes de paso, aprovechamiento y el reparto a lo largo de las alternativas.

Además los principales desplazamientos de material consistirán en:

- El transporte a los vertederos del material excavado, que dada la gran cantidad de vertederos repartidos por el área de estudio no se considera excesiva.
- La compensación interna de la alternativa, que tampoco supone una distancia media elevada, ya que la alternancia de desmontes y terraplenes es buena.
- El trasiego de materiales desde préstamo, que se han localizado especialmente en las zonas donde la demanda es mayor.

La tabla siguiente muestra las mediciones realizadas para este caso de estudio.

Tabla 1. Mediciones de movimiento de tierras: Caso de Estudio I.

EXPLANACIONES		
Unidades	Descripción	Medición
m3	EXCAVACION EN DESMONTE SIN CLASIFICAR, INCLUSO TRANSPORTE A LUGAR DE EMPLEO O VERTEDERO	8.379.295,00
m3	EXCAVACION DE TIERRA VEGETAL	4.011.136,00
m3	EXTENDIDO Y COMPACTACION DE TERRAPLEN CON PRODUCTOS DE LA PROPIA EXCAVACION	8.379.295,00
m3	EXTENDID O Y COMPACTACION DE TERRAPLEN CON PRODUCTOS DE PRESTAMO	16.680.197,00
Totales	Excavación en tierra vegetal	4.011.136,00
	Excavación en desmonte	8.379.295,00
	Terraplén	25.059.492,00

Fuente: Ministerio de Fomento. Elaboración propia.

Caso de Estudio II: Despeñaperros.

Para el cálculo del movimiento de tierras se ha considerado un coeficiente medio de paso de desmonte a terraplén de 1,15. Este coeficiente de paso es de desmonte a relleno todo-uno ó pedraplén para el conjunto de los desmontes del trazado.

La práctica totalidad del material excavado en desmontes será aprovechable para su empleo en rellenos. Los productos de excavación de los macizos rocosos darán en general un relleno todo- uno. Las litologías de mayor calidad (02 y 03) pueden dar lugar a un relleno tipo pedraplén.

Los volúmenes se presentan en la tabla 2.

Tabla 2: Mediciones de movimiento de tierras: Caso de Estudio II.

MOVIMIENTO DE TIERRAS		
Unidades	Descripción	Medición
m2	Despeje y desbroce	437.555,54
m3	excavación en tierra vegetal	65.545,45
m3	excavación sin clasificar	1.001.358,90
m3	Relleno "Todo-uno" procedente de la excavación	1.377.361,92
m3	Explanada E3	98.379,17
m3	Hormigón HM-20	17.963,71
m3	Suelo adecuado proc excavación	2.626,47
m2	Refuerzo de desmontes en roca	34.614,50
ud	Instrumentación y auscultación de rellenos	1,00
ud	Protección de taludes de desmonte	1,00
ud	Protección de taludes de relleno	1,00
m2	Malla triple torsión en protección de taludes	69.229,00
m3	Demolición edificaciones	3.520,00
m3	Demolición de firmes	21.088,00
m2	Demolición de estructuras	464,00

Fuente: Ministerio de Fomento. Elaboración propia.

Para la formación de la explanada:

- En rellenos tipo pedraplén o todouno, que deberán contar con una coronación de suelo seleccionado o adecuado de 50 centímetros de espesor, la explanada E3 se obtendrá mediante la estabilización "in situ" del suelo con cemento en los 30 centímetros superiores de la coronación.
- En desmontes, la existencia generalizada de roca sana en los fondos de excavación hace posible que la explanada E3 se obtenga a través de la extensión de una capa de hormigón HM-20 de regularización, con un espesor mínimo de 15cm.

En relación al resto de viales comprendidos en el proyecto de construcción, se ha optado también por la adopción de una explanada tipo E-3, de cara a homogeneizar materiales, también por la adopción de una explanada tipo.

Caso de estudio III: Circunvalación de Sevilla

Las unidades se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3. Mediciones de movimiento de tierras: Caso de Estudio III.

MOVIMIENTO DE TIERRAS		
Unidades	Descripción	Medición
m2	Desbroce y retirada de tierra vegetal	554.671,00
m3	Excavación en desmonte en terreno blando	478.737,90
m3	Excavación en desmonte en terreno en tránsito	1.167.555,20
m3	Terraplén procedente de la excavación	1.399.349,14
m3	Terraplén procedente de préstamos	1.370.254,37
m3	Terraplén con suelo seleccionado	513.606,35
m3	Pedraplén	20.000,00
m3	Escollera	1.800,00
m2	Geomalla	11.500,00

Fuente: Ministerio de Fomento. Elaboración propia.

2.2.3 Secciones tipo y Firmes

Para la definición de las secciones tipo se siguen las prescripciones recogidas en la normativa vigente: Instrucción 6.1-IC “Secciones de firme” de Diciembre de 2003 (Orden FOM/3460/2003 y Orden FOM/891/2004, de 1 de Marzo de 2004 “Firmes y Pavimentos. Pliego de prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carretera y Puentes PG-3”.

La definición geométrica se completa con la elección del paquete de firme para cada sección tipo, para lo cual es necesario llevar a cabo un estudio técnico y económico de la alternativa de firme más adecuada para cada caso.

La sección tipo adoptada en todos los ejes de cada alternativa, para la redacción, es la siguiente:

Vía principal

- Calzada: 2 x 7 m.
- Arcenes exteriores: 2,5 m.
- Arcenes interiores: 1 m.
- Mediana: 10 m. Tal y como señala la Instrucción 3.1.-I.C. Trazado se entiende por ancho de mediana la distancia entre las dos plataformas separadas por la franja longitudinal no destinada a la circulación, esto es, la distancia existente entre los bordes interiores de los arcenes interiores. Dicha instrucción marca como anchura mínima de la mediana 10 m, cuando se prevea ampliación del número de carriles a expensas de la mediana (para velocidad de proyecto de 100 ó 120 Kmlh) y en caso contrario (cuando no se prevea la ampliación) de 2 m.
- Berma desmonte / terraplén: 1 m.

- Talud de desmonte / terraplén: 3H:2V / 2H:1V (salvo excepciones por motivos geotécnicos)

Ramales

Unidireccionales de 1 carril de cuatro metros, con arcén exterior de 1,5 metros e interior de 1 metro. Unidireccional de 2 carriles de 3,5 metros cada uno con arcén interior de 1 metro y exterior de 1,5 metros. Bidireccional de dos carriles (uno en cada sentido) de 4 metros de ancho y arcén exterior de 1,5 metros e interior de 1 metro, cada uno.

Vías de servicio

Bidireccionales de 5 metros de ancho.

Glorietas

Tres carriles de 3,5 metros de ancho y con arcén interior de 1 metro y exterior de 1,5 metros.

Para la definición del tipo de firme óptimo en cada situación es necesario el análisis y estudio de diversos factores que van a determinar el mayor o menor grado de adecuación de cada paquete de firme. Entre estos datos de partida pueden citarse aspectos como el clima (temperatura y pluviosidad), la geología y geotecnia, la accidentalidad en un tramo, la disponibilidad de materias primas, etc., pero sobre todos ellos hay una base de partida que condiciona la elección del firme: el tráfico y su composición.

Las categorías de secciones de firme² seleccionadas, dependen del tipo de tráfico y de la categoría de la explanada, cada sección se designa por un número de tres o cuatro cifras:

La primera (si son tres cifras) o las dos primeras (si son cuatro cifras) indican la categoría de tráfico pesado (T00, T0, T1, T2, T31, T32, T41 y T42)

La penúltima expresa la categoría de explanada, desde E1 a E3.

La última hace referencia al tipo de firme, con el siguiente criterio:

- Mezclas bituminosas sobre capa granular.
- Mezclas bituminosas sobre suelocemento.
- Mezclas bituminosas sobre gravacemento construida sobre suelocemento.

Pavimento de hormigón

Se pueden distinguir los siguientes tipos de pavimentos:

MACADAM

Es el pavimento de piedra machacada cuyos huecos se rellenan con un material fino denominado recebo, que una vez extendido se comprime con un rodillo. Cuando se utilizan productos bituminosos como elemento revestidor y estabilizante, se denomina macadam bituminoso.

² Anexo 2. Tipos de firmes en función de la categoría de la explanada y del tipo de tráfico pesado

Tratamiento superficial

Pavimento que resulta de cubrir la capa del firme denominada base, que puede ser granular, bituminosa o de grava-cemento, por otra de aglomerante que se cubre a su vez con una capa única de gravilla. Si se repite el procedimiento, la superficie resultante se llama tratamiento superficial doble. El aglomerante puede ser alquitrán, betún o emulsión asfáltica, o mezcla de los dos.

Aglomerado asfáltico

Pavimento resultante de cubrir la capa del firme denominada base, que puede ser granular o de grava-cemento, por una mezcla de áridos gruesos, áridos finos y un ligante bituminoso en proporciones previamente establecidas. Este último puede ser alquitrán, betún o emulsión asfáltica, o mezcla de los dos.

Pavimento de hormigón

Firme constituido por losas de hormigón que transmiten las cargas de los vehículos sobre una gran superficie. Los elementos que componen el hormigón son cemento, agua y áridos.

Otros tipos

Se incluyen dentro de esta tipología los pavimentos de bloques de granito, los embaldosados de madera o ladrillo, las losetas de asfalto, los caminos de tierra, etc.

A continuación, se muestran los datos cuantificados de cada Caso de estudio, en cuanto a la definición del firme. Cada caso de estudio presenta los datos más o menos desagregados en función del agente encargado del mismo. Aún así los criterios para determinar el tipo de firme son los seguidos en función de las características del tráfico pesado y de la categoría de la explanada.

Caso de Estudio I: Badajoz-Granada

Para la definición de las secciones tipo se siguen las prescripciones recogidas en la normativa vigente: Instrucción 6.1-IC “Secciones de firme” de Diciembre de 2003 (Orden FOM/3460/2003 y Orden FOM/891/2004, de 1 de Marzo de 2004 “Firmes y Pavimentos. Pliego de prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carretera y Puentes PG-3”.

Los parámetros mínimos en cuanto a la definición geométrica de las alternativas estudiadas ha sido realizado suponiendo una serie de parámetros mínimos de diseño, acordes en todo caso con los criterios marcados por la Instrucción de Carreteras.

Tabla 4. Mediciones de afirmados: Caso de Estudio I.

AFIRMADOS		
Unidades	Descripción	Medición
m	AFIRMADO DE CALZADAS DE TRONCO DE AUTOVIA	205.178,67

Fuente: Ministerio de Fomento. Elaboración propia.

Caso de Estudio II: Despeñaperros.

Para este proyecto, se ha definido una sección de tres carriles por calzada en toda su longitud. Únicamente en los entronques con la actual Autovía, al inicio y final del tramo se efectúan las correspondientes transiciones de 3 carriles proyectados a los 2 carriles existentes.

Doble calzada de tres carriles:

Sección general: Calzada: 2 x 10,50 m, Arcén exterior: 2 x 2,50 m, Arcén interior: 2 x 1,50 m, Berma exterior: 2 x 1,50 m y Mediana: 2,00 m.

Sección en viaducto: Calzada: 2 x 10,50 m, Arcén exterior: 2 x 1,00 m, Arcén interior: 2 x 1,00 m

Calzada de tres carriles:

Sección general: Calzada: 10,50 m, Arcén derecho: 2,50 m, Arcén izquierdo: 1,00, Bermas: 2 x 1,50 m.

Sección en viaducto: Calzada: 10,50 m, Arcén derecho: 1,00 m, Arcén izquierdo: 1,00 m.

Sección en túnel: Calzada: 10,50 m, Arcén derecho: 1,00 m, Arcén izquierdo: 1,00 m, Acera derecha: 0,75 - 0,83 m, Acera izquierda: 1,10-1,20 m.

Doble calzada de dos carriles:

Sección general: Calzadas: 2 x 7,00 m, Arcén exterior: 2 x 2,50 m, Arcén interior: 2 x 1,00 m, Berma exterior: 2 x 1,50 m

Mediana: 10 m salvo en el tramo de duplicación inicial en Santa Elena que es de 4 m

La sección de firme propuesta, en función del tipo del tráfico y la categoría de la explanada:

- Tronco de la autovía: (Tráfico TO y Explanada E3): Sección 032
- Ramales y vía de servicio del enlace de Santa Elena: (Tráfico T32 y Explanada E3): Sección 3232
- Ramales y vía de servicio de los enlaces de Aldeaquemada y Venta de Cárdenas (Tráfico T41 y Explanada E3): Sección 4132
- Reposición de Carreteras: (Tráfico T32 y Explanada E3) Sección 3232.

Tabla 5. Mediciones de afirmados: Caso de Estudio II.

AFIRMADOS		
Unidades	Descripción	Medición
m	Calzada simple de autovía de dos carriles	2.782,14
m	Calzada simple de autovía de tres carriles y andén derecho de 2,50 m	1.880,55
m	Doble Calzada de autovía de tres carriles con mediana	2.569,03
m2	Firme en túnel con firme flexible	11.119,63
m2	Firme en túnel con firme rígido	46.920,25
m	Glorieta con tráfico 3232	131,95
m	Ramal unidireccional con tráfico 3232	1.048,87
m	Ramal bidireccional con tráfico 3232	197,12
m	Vade servicio con tráfico 3232	624,05
m	Glorieta con tráfico 4132	534,07
m	Ramal unidireccional con tráfico 4132	1.401,52
m	Ramal bidireccional con tráfico 4132	388,01
m	Vade servicio con tráfico 4132	732,81
m	Reposición de carreteras	1.464,68
m	Caminos de servicio	0,00
m	Reposición de caminos	1.250,70
m2	Firme sobre estructuras en el tronco	48.951,03
m2	Firme sobre estructuras fuera del tronco	434,30

Fuente: Ministerio de Fomento. Elaboración propia.

Caso de estudio III: Circunvalación de Sevilla

Las distintas secciones tipo, tanto de la vía principal como las de ramales de enlaces y vías de servicio existentes, se recogen los planos correspondientes y pueden resumirse en:

- Vía principal: Dos calzadas separadas por una mediana de 19 metros entre plataformas. Cada calzada con dos carriles de 3,5 metros cada uno y arcén exterior de 2,5 metros e interior de 1 metro. Talud 2H:1V en desmonte con un espacio para cuneta de 7,5 metros desde el borde del arcén. Bermas de 1,5 metros y talud 2H:1V en terraplén.
- Ramales: Unidireccionales de 1 carril de cuatro metros, con arcén exterior de 1,5 metros e interior de 1 metro. Unidireccional de 2 carriles de 3,5 metros cada uno con arcén interior de 1 metro y exterior de 1,5 metros. Bidireccional de dos carriles (uno en cada sentido) de 4 metros de ancho y arcén exterior de 1,5 metros e interior de 1 metro, cada uno.
- Vías de servicio: Bidireccionales de 5 metros de ancho.

- Glorietas: Tres carriles de 3,5 metros de ancho y con arcén interior de 1 metro y exterior de 1,5 metros.

Así, partiendo de la cantidad de vehículos y del porcentaje de pesados, se divide el tráfico de la vía en:

T0 (IMDP 2000) y T1 (IMDP 2000-800) en tronco principal de la autovía. T2 (IMDP 800-200) y T3 (IMDP 200-50) en los ramales

Como parámetros característicos se obtienen:

- R mm: 2.000 m
- Kvmin: -21803(cóncavo) 10.000 (convexo)
- Pdte. mm: 0,5° o
- Pdte. max: 3,5° o
- Longitud total: 22.039,576 m.

Las cantidades de firmes se muestran a continuación en la tabla 6.

Tabla 6: Mediciones de afirmado. Caso de Estudio III.

AFIRMADOS		
Unidades	Descripción	Medición
ML	Afirmado tipo T-0.2 en carriles bidireccionales	14.702,08
ML	Afirmado tipo T-1.2 en carriles bidireccionales	11.225,00
ML	Afirmado tipo T-2.1 en carriles unidireccionales	10.715,00
ML	Afirmado tipo T-2.2 en carriles bidireccionales	130,00
ML	Afirmado tipo T-2.3 en carril unidireccional (Glorietas)	1.083,50
ML	Afirmado tipo T-3.1 en carriles unidireccionales	2.940,00
ML	Afirmado en vía de servicio	3.000,00
ML	Afirmado en camino rural	44.079,16
ML	Refuerzo de calzada existente de dos carriles	7.300,00

Fuente: Ministerio de Fomento. Elaboración propia.

2.2.4 Drenajes: Longitudinal y Transversal

Uno de los aspectos importantes a considerar en un estudio informativo de obras lineales es el relativo al estudio y definición de las obras y elementos de evacuación de las aguas de escorrentía superficial que inciden sobre el trazado de éstas, tanto por intersección de los cauces naturales o artificiales que discurren por la zona, como por afluencia lateral de dichas escorrentías desde los terrenos adyacentes.

Los caudales asociados a las diferentes cuencas vertientes se obtienen mediante la aplicación del método hidrometeorológico, salvo en el caso de las cuencas de gran extensión para las que se han empleado formulaciones empíricas y datos foronómicos donde existían.

Como soluciones tipo a efectos de diseño se han considerado las siguientes:

- **Caños de secciones 1.800 y 2.000 mm**, que son utilizados con carácter prioritario en todos aquellos casos donde el caudal es suficientemente bajo o la pendiente natural es reducida.
- **Marcos unicelulares** (2,0 m × 2,0 m, 3,0 m × 2,0 m, 3,0 m × 3,0 m, 4,0 m × 2,0 m, 4,0 m × 3,0 m, 4,0 m × 4,0 m), marcos bicelulares (2 × (4,0 m × 2,0 m), 2 × (4,0 m × 3,0 m), 2 × (4,0 m × 4,0 m), 2 × (5,0 m × 4,0 m)) y estructuras y viaductos, para aquellos casos en los que los caudales de diseño son más elevados o para desaguar los caudales asociados a cauces de mayor entidad.
- **Pasos de permeabilidad transversal**. Se trata de pasos inferiores que colaboran en el drenaje transversal de la plataforma.
- **Viaductos**, en todos los casos donde la entidad del cauce atravesado, o el desnivel entre la rasante y el fondo de la vaguada aconsejaban la definición de una estructura de mayor entidad.

Las tablas 7, 8 y 9 muestran las características y las mediciones de los drenajes necesarios en cada uno de los casos de estudio.

Caso de Estudio I: Badajoz-Granada

Tabla 7: Mediciones de drenaje. Caso de Estudio I.

DRENAJE		
Unidades	Descripción	Medición
m	Drenaje transversal de tronco de autovía con tubería de Hormigón Armado de diámetro 1800 mm	4.500,00
m	Drenaje transversal de tronco de autovía con tubería de Hormigón Armado de 3x3	2.800,00
m	Drenaje transversal de tronco de autovía con tubería de Hormigón Armado de diámetro 5x3	560,00
m	Drenaje transversal de tronco de autovía con tubería de Hormigón Armado de diámetro 7x5	180,00
m	Drenaje longitudinal y profundo de tronco de autovía	205.178,67

Fuente: Ministerio de Fomento. Elaboración propia.

Caso de Estudio II: Despeñaperros.

Tabla 8: Mediciones de drenaje. Caso de Estudio II.

DRENAJE		
Unidades	Descripción	Medición
m	Caños 0 1,80 m	129,00
m	Marco 2 x 2 m	776,00
m	Marco 5 x 2,5 m	226,00
m2	Bajante escalonada	776,00
m	Drenaje longitudinal de calzada simple de autovía	4.662,68
m	Drenaje longitudinal de calzada doble de autovía	2.569,03

Fuente: Ministerio de Fomento. Elaboración propia.

Caso de estudio III: Circunvalación de Sevilla

Tabla 9: Mediciones de drenaje. Caso de Estudio III.

DRENAJE		
Unidades	Descripción	Medición
ML	Drenaje longitudinal de autovía	44.079,16
ML	Obra de drenaje con tubería de Hormigón Armado de diámetro 1800 mm	1.275,00
ML	Obra de drenaje con tubería de Hormigón Armado de diámetro 2x1800 mm	75,00
ML	Obra de drenaje con tubería de Hormigón Armado de diámetro 2000 mm	80,00
ML	Obra de drenaje con tubería de Hormigón Armado de diámetro 2x2000 mm	240,00
ML	Obra de fábrica de Hormigón Armado formado por marco de 4m. de anchura x 2 m. de altura	85,00
ML	Obra de fábrica de Hormigón Armado formado por marco de 4m. de anchura x 2,5 m. de altura	85,00
M2	Lámina de geotextil para su colocación en base de explanaciones	11.500,00
UD	Obra de drenaje en un enlace	5,00

Fuente: Ministerio de Fomento. Elaboración propia.

2.2.5 Estructuras: Viaductos, pasos superiores e inferiores y túneles

Para una definición de las estructuras necesarias de la construcción de carreteras, tendríamos que tener en cuenta las características particulares de cada vía y sobre todo el entorno en el que se van a explotar. Por tanto para un mayor análisis de este trabajo, se deben particularizar a cada uno de los casos de estudio.

Así en cada uno de ellos, en función de sus características, nos encontramos las siguientes mediciones por cada uno de los proyectos.

Caso de Estudio I: Badajoz-Granada

Tabla 10: Mediciones de estructuras. Caso de Estudio I.

ESTRUCTURAS		
Unidades	Descripción	Medición
UD	PASO INFERIOR DE CAMINO	194,00
UD	PASO INFERIOR DE CARRETERA	50,00
UD	PASO SUPERIOR DE CAMINO	150,00
UD	PASO SUPERIOR DE CARRETERA	54,00
M2	VIADUCTO	86.940,00
UD	PASO INFERIOR AUTOVÍA	8,00

Fuente: Ministerio de Fomento. Elaboración propia.

Caso de Estudio II: Despeñaperros.

Tabla 11: Mediciones de estructuras. Caso de Estudio II.

ESTRUCTURAS		
Unidades	Descripción	Medición
m2	Viaducto de tablero de sección viga cajón de dovelas prefabricadas	51.167,52
m2	Paso superior tipo tablero de vigas	477,73
m2	Paso inferior tipo tablero de vigas	914,25
m	túnel de La Cantera (Alt. 2)	360,00
m	túnel de Despeñaperros	3.681,00
m	túnel de El Corzo	372,00
m	Falso túnel	254,00
m	Drenaje en túnel de longitud <500m	872,53
m	Drenaje en túnel de longitud >500m	3.793,69
ud	Balsa de decantación	4,00

Fuente: Ministerio de Fomento. Elaboración propia.

Caso de estudio III: Circunvalación de Sevilla

Tabla 12: Mediciones de estructuras. Caso de Estudio III.

ESTRUCTURAS		
Unidades	Descripción	Medición
m2	Estructura con tablero postensado construido "in situ"	14.410,00
ML	Pasarela peatonal sobre autovía	175,00
m2	Estructura con tablero sobre vigas prefabricadas	10.125,00
m2	Muro de Hormigón armado	11.735,00
m2	Muro de tierra armada	1.550,00

Fuente: Ministerio de Fomento. Elaboración propia.

2.2.6 Construcciones auxiliares

En esta se diferencian las señalizaciones, balizamientos y defensas, recuperación de impacto, servicios afectados, construcciones auxiliares y otras obras.

Como ejemplo, se muestran, en la tabla 13, las mediciones de estas construcciones auxiliares de uno de los casos de Estudio que aporta más actuaciones respecto a este tipo de construcción que es el caso de estudio III.

Tabla 13: Mediciones Construcciones auxiliares del Caso de Estudio III.

SEÑALIZACIÓN, BALIZAMIENTOS Y DEFENSAS		
Unidades	Descripción	Medición
ML	Señalización horizontal y vertical en tronco	22.039,58
UD	Señalización horizontal y vertical en enlace que conexiona dos autovías	4,00
UD	Señalización horizontal y vertical en enlace que conexiona una autovía y una carretera convencional	1,00
ML	Barrera de seguridad semirrígida	6.800,00
ML	Barrera de seguridad rígida	13.900,00
ML	Dispositivo de SOS en autovía	22.039,58
OBRAS VARIAS		
Unidades	Descripción	Medición
ML	Iluminación del tronco de autovía	22.039,58
UD	Iluminación de un enlace	5,00
ML	Cerramiento metálico	44.079,16
M2	Limpieza, terminación y conservación de obra	2.666.503,00
UD	Área de servicio	2,00
UD	Medidas correctoras del impacto ambiental que incluyen plantaciones, acondicionamiento de préstamos y vertederos. Prospecciones y vigilancia arqueológica y pantallas antirruidos	1,00
REPOSICIÓN DE SERVICIOS		
Unidades	Descripción	Medición
UD	Reposición de los servicios de saneamiento y alcantarillado	1,00
UD	Reposición de los servicios de abastecimiento	1,00
UD	Reposición de los servicios de correos y telégrafos	1,00
UD	Reposición de los servicios de gas	1,00
UD	Reposición de los servicios de Telefónica	1,00
UD	Reposición de los servicios de la Compañía de electricidad	1,00

Fuente: Ministerio de Fomento. Elaboración propia.

3. CONSUMOS ENERGÉTICOS DE LA CONSTRUCCIÓN DE INFRAESTRUCTURAS

3.1. Metodología Básica

En la fase de construcción se producirán alteraciones por la emisión de partículas en los procesos de extracción, preparación, almacenamiento y transporte de tierras; y emisiones de agentes contaminantes a consecuencia de la circulación de la maquinaria.

Para calcular el consumo energético en la construcción de infraestructuras para el transporte por carretera se deben diferenciar, dos tipos de consumo:

- Tipo I: Aquellos consumos energéticos que son propios de la fabricación del material necesario en la ejecución de la obra (cemento, hormigón, etc.)
- Tipo II: Aquellos consumos energéticos que son propios de la ejecución de la obra en si misma, que son fundamentalmente las maquinarias a utilizar en cada fase (transporte de materiales, movimientos de tierra, etc.).

Una vez distinguidos los tipos de consumo que nos podemos encontrar en la construcción de una vía, estos se van a analizar para cada una de las etapas o fases de construcción. Por tanto, en cada una de estas etapas, vamos a encontrar, en mayor o menor medida, los dos tipos de consumo energético, según la fase que estemos analizando. Un ejemplo de esta descompensación del consumo energético por tipos es la etapa de movimiento de tierras, la cual fundamentalmente contiene consumos energéticos del tipo II.

A continuación se detalla la metodología a utilizar para cada una de las fases de construcción, respecto del cálculo de la energía consumida de cada tipo de consumo.

3.2. Metodología para cuantificar el consumo por etapas de construcción

Las etapas de construcción de una vía se han descrito en los epígrafes anteriores. La metodología general para cada fase estará formada por los siguientes puntos:

1. Diferenciación clara de los tipos de consumo en la fase que constará de una:
 - Una descripción detallada de los materiales necesarios para la ejecución de la obra en esa fase (consumos energéticos de tipo I).
 - Una descripción detallada de las Maquinarias necesarias para la ejecución de la obra en esa fase (consumos energéticos de tipo II).
2. Cuantificación de cada uno de los tipos de consumo por kilómetro de carretera construido. Para este paso es necesario escoger distintos casos de estudio que resulten representativos para los diversos entornos geográficos. Analizando estos datos representativos para los distintos entornos, es posible obtener cuantificaciones medias para cada tipo de consumo. Así en función del tipo de consumo obtendremos:
 - Los tipos materiales utilizados por unidad de medida (toneladas, m³, m²) y por kilómetro en cada fase. Estos se calculan como una media de los valores por km de cada caso de estudio (o ponderados en función de los kilómetros construidos).
 - Las horas empleadas por tipo de maquinaria utilizada en cada fase de la ejecución de la obra. En este punto, además se calculan el número de horas de todas las maquinarias utilizadas en cada fase y el consumo medio de combustible de las maquinarias utilizadas en cada fase por hora. Este último se calcula de forma ponderada en función de las horas de utilización de cada maquinaria.
3. Cálculo del consumo energético por tipo de consumo por cada fase de la construcción:
 - Tipo de consumo I: mediante las cantidades de materiales empleadas por kilómetro y el consumo energético empleado en su fabricación en origen, obtenemos el consumo energético del material en un kilómetro. (tep/km)
 - Tipo de consumo II: mediante las horas empleadas por kilómetro de construcción y el consumo medio de combustible, obtenemos el consumo energético de la maquinaria en un kilómetro. (Litros de gasóleo/kilómetro, pasar a tep teniendo en cuenta además el consumo propio de la fabricación y distribución del gasóleo)
4. Para poder llevar a cabo el cálculo del consumo energético debemos conocer los datos de los materiales y su composición base y las maquinarias necesarias para la construcción. Estos datos desglosados serían:
 - De los materiales necesarios para la ejecución de obra (Consumos energéticos de tipo I) se clasifican en: Tipos de arena, Cemento, hormigón, acero, bituminosas (derivados del petróleo según tipo)
 - De los tipos de maquinarias necesarias para la ejecución de la obra por actuaciones y por fases: (consumos energéticos de tipo II). Para el cálculo

del consumo energético por cada fase se agregan el número de horas de las maquinarias y a través de un consumo medio a la hora (de los tipos de maquinaria ponderados).

A continuación se describe la metodología detallada de cada fase más relevante, siguiendo cada uno de los pasos de la metodología general anterior. Las fases de la construcción de una vía consideradas como más las relevantes respecto del consumo energético atienden a criterios como el tiempo de ejecución de la fase, importancia de los costes, cantidad de materiales necesarios así como la cantidad de horas de maquinaria utilizada. Estas fases son las de movimiento de tierras, drenajes, secciones tipo y firmes y estructuras.

3.2.1 Movimiento de tierras

En la fase de movimiento de tierras se diferencian las siguientes actuaciones, para cada una de las cuales se detallan las mediciones calculadas.

- Desbroce
- Excavación de terreno
- Terraplén

Siguiendo la metodología general se diferencian los siguientes puntos:

Diferenciación de los tipos de consumo:

- Esta etapa tiene fundamentalmente consumos energéticos de tipo I, para lo cual es necesario saber la asignación de las horas trabajadas por cada uno de los tipos de maquinaria.

Cuantificación de cada uno de los tipos de consumo por kilómetro de carretera construido, que se obtienen a partir de los datos de los casos de estudio

- Las horas empleadas por tipo de maquinaria utilizada en esta fase de la ejecución de la obra. En este punto, además se calculan el número de horas de todas las maquinarias utilizadas en cada fase y el consumo medio de combustible de las maquinarias utilizadas en cada fase por hora. Este último se calcula de forma ponderada en función de las horas de utilización de cada maquinaria.

Calculo del consumo energético por tipo de consumo por cada fase de la construcción.

- Tipo de consumo II: mediante las horas empleadas por kilómetro de construcción y el consumo medio de combustible, obtenemos el consumo energético de la maquinaria en un kilómetro. (Litros de gasóleo/ kilómetro).

ANEXO

Anexo 1: Primera tabla denominada formación de la explanada (tabla A1)

Anexo 2: Segunda tabla denominada Secciones de firmes para categorías de tráfico y categoría de la explanada (tabla A2)

Tabla A1: Formación de la explanada

Tabla A2: Secciones de firmes para categorías de tráfico y categoría de la explanada

Fuente: ORDEN/FON/3460/2003, de 28 de noviembre (BOE nº 297 de 12 de diciembre de 2003)

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO		CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO		
		T0	T1	T2
CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1			211 MB 28 ZA 40 212 MB 18 SC 30 ⁽²⁾ 214 HF 23 HM 15 ZA 20
	E2			221 MB 25 ZA 25 222 ⁽³⁾ MB 18 SC 22 ⁽²⁾ 223 MB 15 GC 20 ⁽²⁾ SC 20 224 ⁽³⁾ HF 23 HM 15
	E3	0031 MB 35 ZA 25 0032 MB 25 SC 30 0033 MB 20 GC 22 ⁽²⁾ SC 25 0034 HF 25 ⁽¹⁾ HM 15	121 MB 30 ZA 25 122 ⁽³⁾ MB 20 SC 25 ⁽²⁾ 123 MB 15 GC 22 ⁽²⁾ SC 22 124 ⁽³⁾ HF 25 HM 15	131 MB 25 ZA 25 132 MB 20 SC 20 ⁽²⁾ 134 HF 25 HM 15 231 MB 20 ZA 25 232 MB 15 SC 20 ⁽²⁾ 234 HF 23 HM 15

Esesores mínimos en cm

Mezclas bituminosas
 Hormigón de firme
 Hormigón magro vibrado
 Gravacemento
 Suelocemento
 Zahorra artificial

(1) Para las categorías de tráfico pesado T00 y T0 se emplearán únicamente pavimentos continuos de hormigón armado con los espesores indicados.
 (2) Capas tratadas con cemento que deberán prefisurarse con espaciamientos de 3 a 4 m, de acuerdo con el artículo 513 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales (PG-3).
 (3) Para poder proyectar esta solución será preceptivo que la capa superior de la explanada E2 esté estabilizada con cemento.

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO				
	T31	T32	T41	T42
E1	3111 MB 20 ZA 40 3112 MB 15 SC 30 3114 HF 21 ZA 30	3211 MB 18 ZA 40 3212 MB 12 SC 30 3214 HF 21 ZA 20	4111 MB 10 ⁽¹⁾ ZA 40 4112 MB 8 SC 30 4114 HF 20 ZA 20	4211 MB 5 ⁽¹⁾ ZA 35 4212 MB 5 SC 25 4214 HF 18 ZA 20
E2	3121 MB 16 ZA 40 3122 MB 12 SC 30 3124 HF 21 ZA 25	3221 MB 15 ZA 35 3222 MB 10 SC 30 3224 HF 21 ZA 20	4121 MB 10 ⁽¹⁾ ZA 30 4122 MB 8 SC 25 4124 HF 20 ZA 20	4221 MB 5 ⁽¹⁾ ZA 25 4222 MB 5 SC 22 4224 HF 18 ZA 20
E3	3131 MB 16 ZA 25 3132 MB 12 SC 22 3134 HF 21 ZA 20	3231 MB 15 ZA 20 3232 MB 10 SC 22 3234 HF 21 ZA 20	4131 MB 10 ⁽¹⁾ ZA 20 4132 MB 8 SC 20 4134 HF 20 ZA 20	4231 MB 5 ⁽¹⁾ ZA 20 4232 MB 5 SC 20 4234 HF 18 ZA 20

Mezclas bituminosas
 Hormigón de firme
 Suelocemento
 Zahorra artificial

(1) Estas capas bituminosas podrán ser proyectadas con mezclas bituminosas en caliente muy flexibles, gravaemulsión sellada con un tratamiento superficial o mezcla bituminosa abierta en frío sellada con un tratamiento superficial.

Nota 1: Para las categorías de tráfico pesado T3 (T31 y T32) las capas tratadas con cemento deberán prefisurarse con espaciamientos de 3 a 4 m, de acuerdo con el artículo 513 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales (PG-3).

Nota 2: En la categoría de tráfico pesado T42 con tráfico de intensidad reducida (menor que 100 vehículos/carril/día) podrá disponerse un riego con gravilla bicapa como sustitución de los 5 cm de mezcla bituminosa.

Espesores mínimos en cm

BIBLIOGRAFÍA

NORMATIVA

ORDEN FOM/3460/2003, de 28 de noviembre, por la que se aprueba la norma 6.1-IC «Secciones de firme», de la Instrucción de Carreteras. Viernes 12 diciembre 2003 BOE núm. 297

CORRECCIÓN de erratas de la Orden FOM/891/2004, de 1 de marzo, por la que se actualizan determinados artículos del pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes, relativos a firmes y pavimentos. BOE núm. 126 Martes 25 mayo 2004

ORDEN FOM/891/2004, de 1 de marzo, por la que se actualizan determinados artículos del pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes, relativos a firmes y pavimentos. Martes 6 abril 2004 BOE núm. 83

ORDEN MINISTERIAL de 6 de febrero de 1976, POR LA QUE SE APRUEBA EL PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TECNICAS GENERALES PARA OBRAS DDE CARRETERAS Y PUENTES DE LA DIRECCION GENERAL DE CARRETERAS Y CAMINOS VECINALES (PG-3/75). BOE 7-7-76.

Manual de Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3). Publicado por el Ministerio de Fomento.

FUENTES DE DATOS

ESTUDIOS INFORMATIVOS DE PROYECTOS CONSTRUCTIVOS DEL MINISTERIO DE FOMENTO.

Documentos del Proyecto EnerTrans

Monografías EnerTrans

Monografía 1: “El sistema español de transporte y sus impactos sobre la sostenibilidad”: José Ignacio Pérez Arriaga, Eduardo Pilo de la Fuente, Ignacio de L. Hierro Ausín

Monografía 2: “Usos de la energía en el transporte”: Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares

Monografía 3: “Modelos de consumos y emisiones: Estado del arte”: Timoteo Martínez Aguado, Aurora Ruiz Rúa, Ana Isabel Muro

Monografía 4: “Análisis de las estadísticas de consumos energéticos y emisiones de CO₂ en el transporte”: Alberto Cillero, Paula Bouzada Outeda

Monografía 5: “Tablas input-output relacionadas con las estadísticas de consumos y emisiones en el transporte”: Timoteo Martínez Aguado, Aurora Ruiz Rúa, Ana Isabel Muro Rodríguez

Monografía 6: “Métrica y estandarización de los consumos y emisiones en el transporte”: Alberto Cillero Hernández, Paula Bouzada Outeda, Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares

Monografía 7: “Incremento de recorrido en el transporte por longitud de caminos, operación y gestión”: Alberto Cillero Hernández, Paula Bouzada Outeda, Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares

Monografía 8: “Flujos del petróleo y del gas natural para el transporte”: José M^a López Martínez, Javier Sánchez Alejo, Álvaro Gómez, Ángel Fernández.

Monografía 9: “Flujos de la energía de la electricidad para el transporte”: Eduardo Pilo de la Fuente, José Ignacio Pérez Arriaga, Ignacio de L. Hierro Ausín, Jesús Jiménez Octavio

Monografía 10: “Consumo de energía y emisiones asociadas a la construcción y mantenimiento de infraestructuras”: Timoteo Martínez Aguado, M^a José Martínez Milán, Ana Isabel Muro Rodríguez

Monografía 11: “Consumo de energía y emisiones asociadas a la construcción y mantenimiento de vehículos”: José M^a López Martínez, Javier Sánchez Alejo

Monografía 12: “Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por coche y camión”: José María López Martínez, Javier Sánchez Alejo

Monografía 13: “Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por autobús y autocar”: Alberto Cillero Hernández, Gustavo Martinelli, Paula Bouzada Outeda

Monografía 14: “Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por avión”: Grupo de investigación en consumo energético del transporte aéreo de la Universidad Autónoma de Madrid

Monografía 15: “Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por barco”: Grupo de investigación del transporte marítimo de la Fundación Universidad de Oviedo

Monografía 16: “Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por ferrocarril”: Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares

Monografía 17: “Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por tubería”: Manuel Cegarra Plané

Monografía 18: “ENERTRANS: Modelo de cálculo y predicción de los consumos energéticos y emisión del sistema de transporte que permita valorar la sensibilidad de los consumos a las decisiones de inversión en infraestructura y de política de transporte”: Grupo de investigación del proyecto Enertrans

Notas técnicas EnerTrans

Nota técnica 1: “Introducción al transporte por tubería”: Manuel Cegarra Plané

Nota técnica 2: “Informe sobre el tráfico internacional y el consumo de carburante en el sector aeronáutico”: Grupo de investigación en consumo energético del transporte aéreo de la Universidad Autónoma de Madrid

Nota técnica 3: “Informe sobre el suministro de combustible en los aeropuertos en España”: Grupo de investigación en consumo energético del transporte aéreo de la Universidad Autónoma de Madrid

Nota técnica 4: “Estudio sobre las variables que influyen en el incremento de recorridos o incidencia del cociente entre trayectoria y desplazamiento en el transporte aéreo”: Grupo de investigación en consumo energético del transporte aéreo de la Universidad Autónoma de Madrid

Nota técnica 5: “Estudio sobre las variables que influyen en el incremento de recorridos o incidencia del cociente entre trayectoria y desplazamiento en el transporte ferroviario”: Alberto García Álvarez, Eduardo Fernández González

Nota técnica 6: “Estudio sobre las variables que influyen en el incremento de recorridos o incidencia del cociente entre trayectoria y desplazamiento en el transporte por tubería”: Manuel Cegarra Plané

Nota técnica 7: “Informe sobre el tráfico español y el consumo de carburante en el sector marítimo”: Grupo de investigación del transporte marítimo de la Fundación Universidad de Oviedo

Nota técnica 8: “Análisis de documentación referida al transporte marítimo”: Grupo de investigación del transporte marítimo de la Fundación Universidad de Oviedo

Nota técnica 9: “Aspectos generales del transporte marítimo”: Grupo de investigación del transporte marítimo de la Fundación Universidad de Oviedo

Nota técnica 10: “Características de la navegación marítima”: Grupo de investigación del transporte marítimo de la Fundación Universidad de Oviedo

Nota técnica 11: “Consumo de los servicios auxiliares en el automóvil”: José M^a López Martínez, Juan José Herrero

Nota técnica 12: “Notas sobre los valores del coeficiente de resistencia a la rodadura”: José M^a López Martínez, Juan José Herrero

Nota técnica 13: “Tipos de aeronaves según su compañía constructora”: Grupo de investigación en consumo energético del transporte aéreo de la Universidad Autónoma de Madrid

