

HERRAMIENTA DE CÁLCULO DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS



ÍNDICE

- **INTRODUCCIÓN** p. 2
- **PLANTEAMIENTO DE LOS ANÁLISIS** p. 3
- **FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA DE CÁLCULO** p. 8
 - **MATERIAS PRIMAS Y SU TRANSPORTE** p. 9
 - **FABRICACIÓN EN CENTRAL** p.11
 - **TRANSPORTE Y PUESTA EN OBRA** p. 13
 - **CÁLCULOS** p. 15
 - **RESULTADOS** p. 16
- **APÉNDICE** p. 18
- **REFERENCIAS** p. 29
- **COMENTARIOS, CONSULTAS y AGRADECIMIENTOS** p. 30

INTRODUCCIÓN

ECCO2 es una herramienta de cálculo diseñada para estimar los efectos de utilizar diferentes fórmulas de trabajo, tipos de áridos, betunes, aditivos, tasas de reciclado, temperaturas de fabricación, combustibles, rendimientos y distancias de transporte, entre otros en los **impactos ambientales de las mezclas bituminosas.**

Se apoya en contabilidades ambientales teóricas, aunque incorpora diversas aproximaciones empíricas, cuya precisión se espera mejorar según se acumulen resultados de sucesivas mediciones efectuadas "in situ".

ECCO2 se ha basado en la **metodología Análisis de Ciclo de Vida** para prevenir que meros desplazamientos de cargas ambientales entre distintas etapas del ciclo de vida o procesos productivos puedan valorarse como mejoras ambientales. En el presente Manual se describen los modelos de cálculo utilizados, las procedencias de los datos, las alternativas que pueden ser objeto de comparación y su definición mediante los formularios de usuario.



PLANTEAMIENTO DE LOS ANÁLISIS

2.1 Objetivo y alcance

En ECCO2 se ha planteado Análisis de Ciclo de Vida (ACV) del tipo denominado “de la cuna a la puerta”, pues **suman a los impactos debidos a la extracción, transformación y transporte de materias primas o secundarias y de los productos energéticos, los de fabricación, transporte y puesta en obra de la mezclas bituminosa.** Por tanto, facilita la comparación directa de alternativas de las que se esperan similares comportamientos en servicio durante una misma vida útil. Bajo la hipótesis indicada, se trata de un planteamiento que no resta valor a las conclusiones que se desprendan de los resultados obtenidos. Naturalmente, introduciendo las correcciones oportunas ECCO2 también puede resultar útil para comparar soluciones con diferentes periodos de proyecto.

En ECCO2 se han considerado procesos externos al sistema del producto, prescindiéndose de su contribución a los ACV los correspondientes a la manufactura de instalaciones, de la central de fabricación de mezclas bituminosas y de la maquinaria y vehículos utilizados en

su producción, transporte y puesta en obra. Tampoco se contabilizan las eventuales aportaciones de procesos vinculados a actividades de mantenimiento, reparación o sustitución de material de desgaste de esos equipos.

Los resultados del Análisis de Ciclo de Vida se obtienen para la unidad funcional una tonelada (1 t) de mezcla bituminosa puesta en obra aunque, como es obvio, pueden referirse también a cualquier otra cantidad o una cierta superficie de pavimento si se cuenta con los datos de densidad y espesor de la capa terminada.

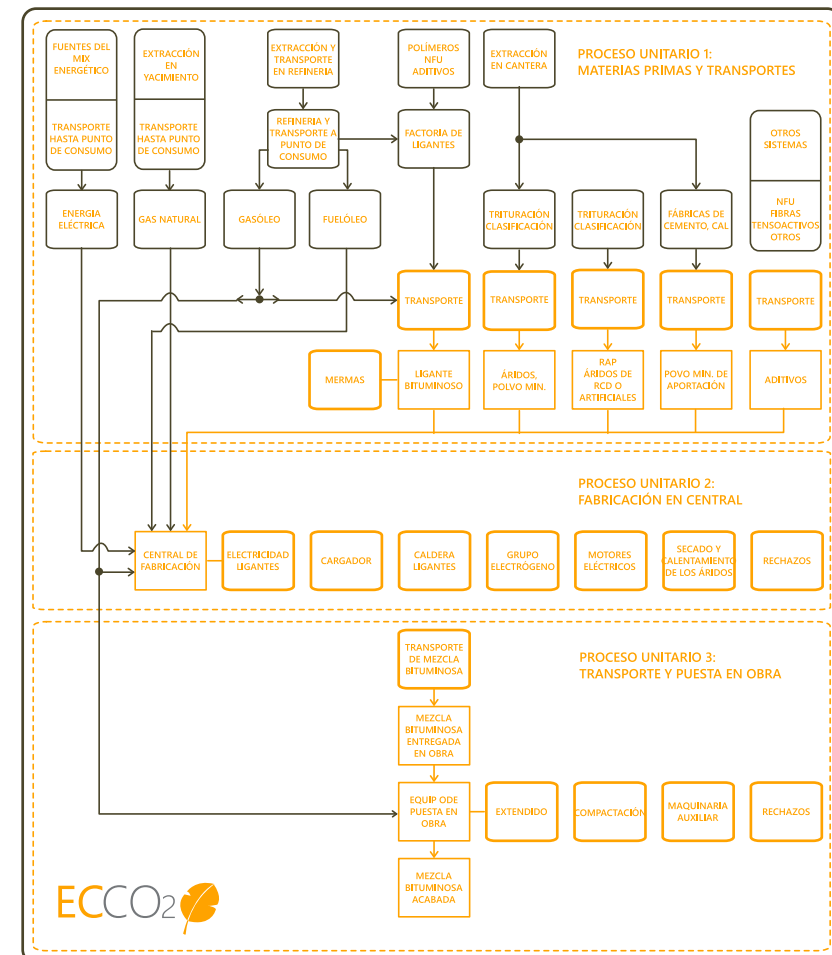
PLANTEAMIENTO DE LOS ANÁLISIS

ANÁLISIS DE INVENTARIO

Siempre que ha sido posible se ha recurrido a bases de datos reconocidas, de acceso público y seleccionadas como las más representativas de los modos de producción que se trata de analizar. También se han efectuado elaboraciones propias (datos obtenidos mediante ajustes, deducciones o suma de datos procedentes de ICV externos).

Las entradas y salidas de cada uno de los subprocesos y de los procesos unitarios considerados se han obtenido mediante modelos de cálculo propios.

A continuación, se muestra el diagrama de flujo que permite identificar los subprocesos que se resuelven mediante la asignación de datos de inventario y los que han requerido desarrollar modelos de cálculo propios. Estos últimos responden a los siguientes planteamientos:



LLEGENDA

- Datos obtenidos o deducidos de ICV externos
- Resultados obtenidos con los modelos de cálculo ECCO2
- Recopilaciones de resultados

PLANTEAMIENTO DE LOS ANÁLISIS

Proceso unitario 1: Materias primas y su transporte

El consumo de cada fracción de árido natural o artificial se obtiene de las respectivas proporciones ponderales establecidas en la dosificación en frío y de las mermas previstas durante las operaciones de transporte y acopio, en su caso, y de las previstas durante la puesta en obra.

Los consumos de betún, emulsión, RAP y resto de adiciones se calculan a partir de las respectivas proporciones ponderales previstas en la fórmula de trabajo.

El consumo de gasóleo correspondiente al transporte de cada materia prima o secundaria es función de la distancia de transporte y de la carga neta y consumo unitario de combustible asignado a los vehículos de transporte, que depende a su vez, del tipo de motorización considerado (convencional, Euro I, II, III, IV ó V).

Proceso unitario 2: Fabricación en central

Los rechazos en la central de fabricación se obtienen por diferencias entre las dosificaciones en frío y en caliente.

Los consumos de energía eléctrica de la red o de gasóleo en grupos electrógenos y calderas, según sea el caso, se deducen las potencias instaladas y de la estimación de horas de funcionamiento de cada equipo. ECCO₂ asigna, por defecto, las potencias correspondientes en función de la capacidad de la central de fabricación y del tipo de fuente considerada.

El consumo de gasóleo de la pala cargadora se deduce de su potencia, horas de utilización y tipo de motor (Stage I, II, IIIA, IIIB, IV y V).

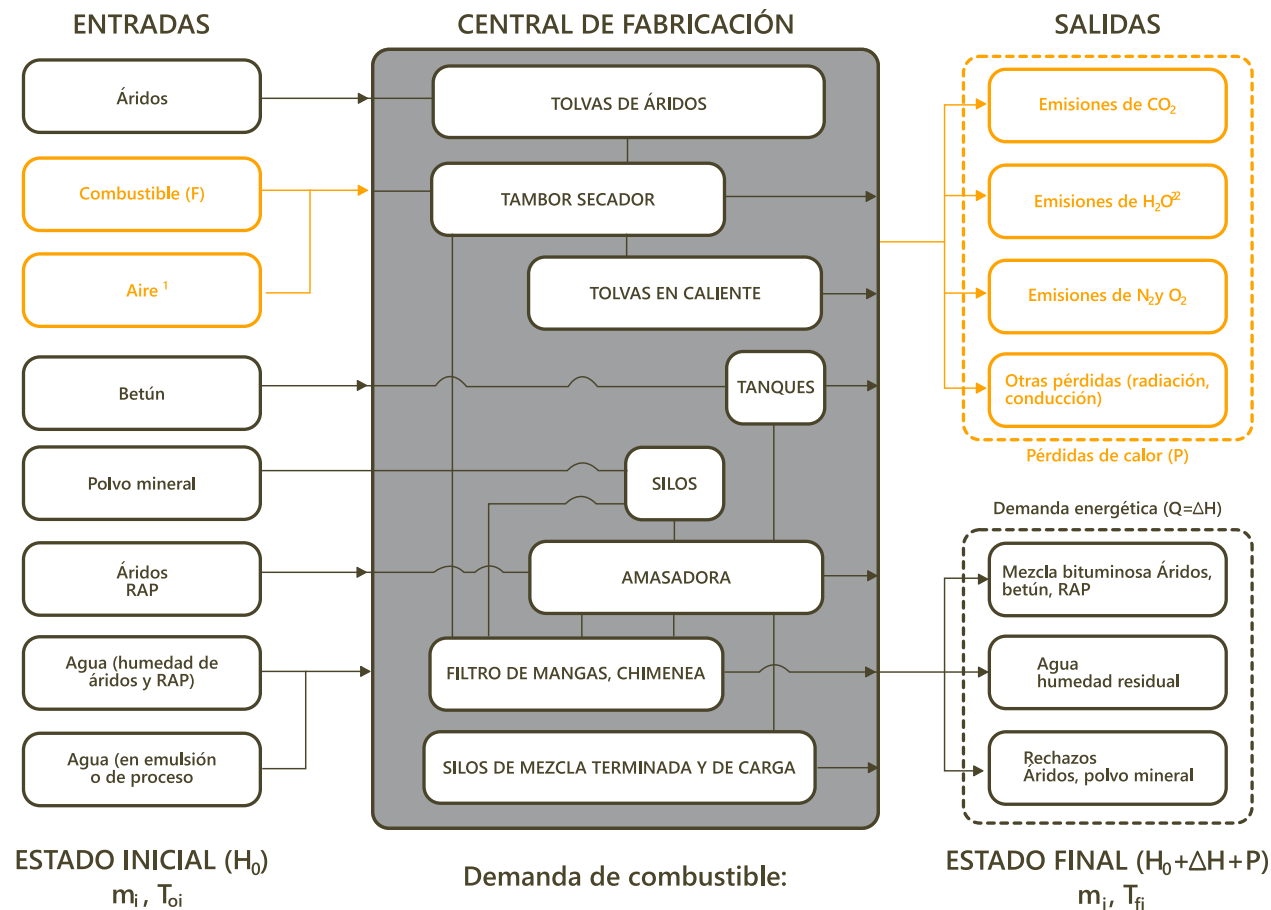
La demanda energética que debe satisfacerse para el secado y calentamiento de los áridos se obtiene de la variación de entalpía de los componentes de la mezcla bituminosa y de las pérdidas de calor calculadas en la chimenea por radiación y conducción debidas al calor invertido en el calentamiento de la propia central.

PLANTEAMIENTO DE LOS ANÁLISIS

El siguiente gráfico ilustra el planteamiento de los balances térmicos desarrollados para obtener la demanda de combustible. Aunque en el interior del recuadro Central de fabricación se han tratado de representar los flujos correspondientes a una cierta tipología de central, tiene en cuenta que, puesto que la entalpía es una función de estado, su variación depende solo de las condiciones iniciales y finales del sistema analizado. La configuración de la central, por tanto, no afecta a la validez del modelo mientras las pérdidas de calor y la humedad residual presente en la mezcla bituminosa a la descarga de la central se estimen con suficiente aproximación.

ECCO₂ contiene una aproximación empírica a las pérdidas de calor por radiación, conducción y calentamiento de la propia central y un modelo para estimar la humedad residual de la mezcla bituminosa en función de la temperatura de fabricación, que completan la información necesaria para calcular la demanda teórica de combustible.

PLANTEAMIENTO DE LOS ANÁLISIS



(1) Aire estequiométrico de la reacción de combustión + aire en exceso + fugas.

(2) Agua producto de la combustión + humedad de los áridos + humedad del RAP + agua de la emulsión de proceso - humedad residual.

(3) PCI_F: Poder calorífico inferior del combustible.

PLANTEAMIENTO DE LOS ANÁLISIS

Proceso unitario 3: transporte y puesta en obra de la mezcla bituminosa.

Como en el transporte de materias primas, el consumo de gasóleo correspondiente al transporte de mezcla bituminosa de central a obra se obtiene de la distancia de transporte, carga neta y consumo unitario de combustible asignado a los vehículos de transporte, que depende a su vez, del tipo de motorización (convencional, Euro I, II, III, IV ó V)

El consumo de gasóleo de los equipos de puesta en obra, como el de la pala cargadora en la central de fabricación, se deduce de sus respectivas horas de utilización, su potencia y tipo de motor (Stage I, II, III A, III B, IV ó V).

Las bases de datos de ECCO₂ también incluyen los calores específicos de áridos naturales y artificiales, betún, agua líquida y en forma de vapor, oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono y acero, el poder calorífico inferior (PCI) de gasóleo, fuelóleos y gas natural, las estequiometrias de las reacciones de combustión y las proporciones de aire en exceso sobre el estequiométrico

típicamente utilizadas en las centrales de fabricación, tomadas de diversas fuentes o procedentes de mediciones y estimaciones propias.

EVALUACIÓN DE IMPACTO E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

ECCO₂ se ha configurado para calcular las siguientes ocho categorías de impacto: Consumo de Materias Primas Totales, Agotamiento de Recursos Abióticos, Demanda Acumulada de Energía, Indicador de Cambio Climático, Acidificación, Eutrofización, Formación de Oxidantes Fotoquímicos, y Uso de Residuos. Esta última se obtiene de restar al consumo de materias primas totales la diferencia entre residuos utilizados y residuos generados y se ha creado para reconocer su eventual reducción como mejora ambiental de interés. Los factores de caracterización utilizados en las diferentes categorías de impacto se han tomado de TEAM, ADF e IPPC.

Los resultados de los cálculos se presentan en forma de histograma junto con los valores numéricos por proceso unitario. Pueden compararse hasta cuatro distintas alternativas de fabricación de forma simultánea.

FUNCIONAMIENTO DE LA HERRAMIENTA DE CÁLCULO

Mediante ECCO₂ se ha sistematizado la recopilación de datos, introducción de variables, resolución de ecuaciones y presentación de resultados de los análisis.

En su versión actual, ECCO₂ utiliza hasta un total de 92 variables de producción. El usuario puede asignar valores a 75 de ellas mientras que el resto son variables dependientes o se hallan determinadas por defecto. En conjunto, permiten distinguir los efectos ambientales de temperatura ambiente y humedad de los áridos, distintos tipos de áridos y ligantes bituminosos, uso de residuos y de aditivos, fórmulas de trabajo, fuentes de energía de la central, temperatura de la mezcla bituminosa, rendimientos de fabricación y puesta en obra, composición y características de los equipos de maquinaria y distancias de transporte, entre otras.

En la versión de ECCO₂ actualmente disponible en el sitio web www.arno.es únicamente se encuentra habilitada la categoría de impacto "Indicador de cambio climático" (ICC) o huella de carbono. Se ha previsto incluir el resto de categorías en sucesivas versiones, donde también podrán sustituirse las predicciones proporcionadas por los

modelos de pérdidas de calor o de estimación de humedad residual por datos obtenidos de mediciones reales.

La introducción de datos se efectúa mediante los tres formularios reproducidos en a continuación, que combinan listas desplegadas con celdas donde deben introducirse valores numéricos. Al abrirse por primera vez, cada formulario muestra en todos sus campos selecciones y valores establecidos por defecto con el fin de simplificar la introducción de datos. Una vez iniciados los cálculos, el usuario puede desplazarse entre formularios conservando los datos más recientes y guardando datos y resultados si así lo indica en el formulario final.

MATERIAS PRIMAS Y SU TRANSPORTE

Materias primas y su transporte



Materias Primas

Fabricación

Puesta en obra

Cálculos

Reiniciar 

Dosificación en frío

	Naturaleza	Proporción (%)	Distancia
Árido fino 1	Árido triturado	40 s/a	5 km
Árido fino 2	Árido no triturado	10 s/a	15 km
Árido grueso 1	Árido triturado	20 s/a	60 km
Árido grueso 2	Árido triturado	20 s/a	60 km
Mermas en acopios o transporte		3 s/a	

Dosificación en caliente

	Naturaleza	Proporción (%)	Distancia
Polvo mineral de aportación	PM calizo	2 s/a	110 km
Aditivo 1	NO	0 s/m	110 km
Aditivo 2	NO	0 s/betún	90 km
RAP	RAP clasificado	10 s/m	15 km
Betún en el RAP		4 s/m	
Betún residual en el ligante bituminoso		100 s/m	
Proporción del betún total en la mezcla		5 s/m	
Betún nuevo añadido a la mezcla	PMB 45/80-65	4.6 s/m	160 km

Transporte de las materias primas

	Estandar del motor	Carga neta	Consumo (100km)
Motorización de los vehículos	Euro I	25 t	30.1 l

MATERIAS PRIMAS Y SU TRANSPORTE

Este formulario permite considerar en la dosificación en frío la combinación de hasta cuatro fracciones de árido, en cualquier proporción (dos de árido fino y otras dos de árido grueso), de diferentes naturalezas en el cuadro denominado "Dosificación en frío". La proporción de polvo mineral de aportación, como la del aditivo 1, de RAP y de betún total, debe establecerse como proporción sobre mezcla en el correspondiente cuadro denominado "Dosificación en caliente" que completa la anterior dosificación. Además, se ha previsto la incorporación de un segundo aditivo medido en proporción sobre el betún añadido. La fórmula de trabajo queda totalmente descrita cuando el usuario indica el betún presente en el RAP, en su caso, el betún residual contenido en la emulsión bituminosa y la naturaleza de todos los componentes de la mezcla.

Si las proporciones seleccionadas son insuficientes para obtener 1.000 kg de materiales por tonelada de mezcla bituminosa, ECCO2 muestra una advertencia que obliga a corregir la dosificación introducida. También aparece un aviso si los materiales dosificados suman más de 1.060 kg por tonelada de mezcla, aunque en este caso el usuario

puede cancelar el aviso y continuar sin efectuar corrección alguna. Y también aparece un aviso cuando se selecciona un aditivo para el que en ECCO2 no se dispone de Inventario de Ciclo de Vida.

Los valores que no pueden ser modificados por el usuario se muestran sombreados. Es el caso del betún residual cuando el ligante seleccionado es betún; de la proporción de betún añadido, que ECCO2 calcula por diferencia entre el betún total y el aportado por el RAP; de la carga neta y del consumo unitario de los vehículos de transporte. A efectos de consumo de combustible y emisiones de CO2 solo se hace distinción entre "convencional" y resto de estándar europeos de motorización. Las estimaciones de consumo se refieren, en todos los casos, a vehículos con 25 t de carga neta que realizan el trayecto de ida a plena carga y el de regreso sin carga.

FABRICACIÓN EN CENTRAL

Fabricación en central



Condiciones y tiempos de producción

Altitud m.s.n.m.	<input type="text" value="<500"/>	Horas de funcionamiento diario	<input type="text" value="6"/> h
Capacidad	<input type="text" value="220"/> t/h	Funcionamiento ininterrumpido	<input type="text" value="2"/> h
Producción media diaria	<input type="text" value="800"/> t	Actuación sistema calentamiento	<input type="text" value="4"/> h/d

Fuentes de energía y equipos

	Fuente		Modelo CAT o similar
Quemador del secadero	<input type="text" value="Fuelóleo"/>	Pala cargadora	<input type="text" value="CAT 950 M"/>
Motores de la central	<input type="text" value="Grupo electrógeno"/>		Estandar del motor
Calentamiento de ligantes	<input type="text" value="Caldera de fuelóleo"/>	Pala cargadora	<input type="text" value="Stage II (Tier 2)"/>
Grupo electrógeno	<input type="text" value="Gasóleo"/>	Grupo electrógeno	<input type="text" value="Convencional"/>

Humedades y agua de proceso		Temperaturas		
	Selección *			
Árido fino 1	<input type="radio"/>	<input type="text" value="2.5"/> % s/a	Ambiente	<input type="text" value="20"/> °C
Árido fino 2	<input type="radio"/>	<input type="text" value="2.5"/> % s/a	Áridos	<input type="text" value="15"/> °C
Árido grueso 1	NO <input checked="" type="radio"/>	<input type="text" value="1"/> % s/a	RAP	<input type="text" value="15"/> °C
Árido grueso 2		<input type="text" value="1"/> % s/a	Ligante bituminoso	<input type="text" value="150"/> °C
RAP	<input type="radio"/>	<input type="text" value="5"/> % s/a	Agua de proceso	<input type="text" value="15"/> °C
Agua de proceso		<input type="text" value="0"/> % s/a	Gases	<input type="text" value="115"/> °C
Humedad residual		<input type="text" value="0"/> % s/m	Mezcla bituminosa	<input type="text" value="165"/> °C

* Seleccionar la fracción introducida directamente en la mezcladora, en su caso, o bien "NO".

FABRICACIÓN EN CENTRAL

En este caso se trata de definir los aspectos relacionados con la configuración de la central de fabricación y su operación, que ejercen las mayores influencias en las emisiones de CO₂ en este subsistema definido como proceso unitario 2.

La elección entre diferentes configuraciones y regímenes de operación se efectúa indicando la capacidad de la central, su producción media diaria, horas de funcionamiento real, número de interrupciones de la producción y el tiempo de actuación del sistema de calentamiento de ligantes (tiempo equivalente de utilización a su potencia nominal). ECCO₂ asigna valores a la potencia de los motores eléctricos y del sistema de calentamiento en función de la capacidad de la central, según los establecidos en su base de datos que se consideran representativos de las centrales discontinuas habituales en España.

En este formulario deben seleccionarse las diferentes fuentes energéticas utilizadas y un modelo de pala cargadora (Caterpillar o equivalente) y el estándar europeo (Stage) o estadounidense (Tier) de su motor.

En relación con las diferentes fracciones de áridos y RAP, el usuario debe indicar sus humedades y temperaturas en los acopios de la central. También debe introducir valores de temperatura ambiente, del ligante bituminoso, de fabricación de la mezcla bituminosa y, en su caso, del agua de proceso. La temperatura de salida de gases se ha fijado en 115° C. Si se trata de una mezcla en caliente o semicalientes (producida a más de 100° C) no se requiere la introducción de más información.

En el caso de mezclas templadas con betún, se considera que la tecnología empleada se basa en la espumación inducida del ligante mediante agua proveniente de la humedad de una de las fracciones de árido fino o del RAP, mediante agua de proceso o sumando ambas opciones. El modelo de cálculo desarrollado para calcular el agua de proceso obtiene su proporción como diferencia entre la aportada por esa vía y la que se estima necesaria para provocar la oportuna espumación del betún por este procedimiento (1,5% s/a). El usuario debe indicar, por tanto, cuál de las fracciones indicadas se introduce directamente en la amasadora, en su caso.

TRANSPORTE Y PUESTA EN OBRA

Transporte y puesta en obra



Materias Primas

Fabricación

Puesta en obra

Cálculos

Reiniciar 

Condiciones de la puesta en obra

Distancia de central a obra km Espesor de capa mm
 Rendimiento diario t/d Densidad de la capa compactada t/m³
 Mermas de puesta en obra s/m Unidad funcional t

Condiciones de la puesta en obra

	Tipo	Potencia	Uso diario	
Silo de transferencia	<input type="text" value="ROAD SB2500"/>	233 kW	<input type="text" value=""/>	
Extendedora 1, Vögele o similar	<input type="text" value="SUPER 1900"/>	150 kW		
Extendedora 2, Vögele o similar	<input type="text" value="NO"/>	- kW		
Compactador tandem 1, Dynapac o similar	<input type="text" value="CC 4200"/>	97 kW		
Compactador tandem 2, Dynapac o similar	<input type="text" value="NO"/>	- kW		<input type="text" value="8"/> h
Compactador tandem 3, Dynapac o similar	<input type="text" value="NO"/>	- kW		
Compactador de neumáticos 1	<input type="text" value="24 - 30 t"/>	90 kW		
Compactador de neumáticos 2	<input type="text" value="NO"/>	- kW		
Compactador de neumáticos 3	<input type="text" value="21 - 24 t"/>	74 kW		
Fresadora, Wirtgen o similar	<input type="text" value="W100 Ri"/>	160 kW		<input type="text" value="2"/> h
Barredora, Bobcat o similar	<input type="text" value="S 510"/>	36.4 kW	<input type="text" value="4"/> h	

Motorización de vehículos y maquinaria

Vehículos de transporte Maquinaria

TRANSPORTE Y PUESTA EN OBRA

Finalmente, mediante este tercer formulario se completa la entrada de datos necesarios para efectuar los cálculos.

El usuario debe indicar la distancia de transporte desde la central de fabricación hasta la obra, la composición del equipo de extendido y compactación, el rendimiento de puesta en obra, el estándar europeo más representativo en los motores de los vehículos de transporte previstos, el estándar europeo o estadounidense de los motores de la maquinaria de puesta en obra y las horas de utilización.

El equipo de puesta en obra puede constar de una o dos extendedoras, uno, dos o tres compactadores tándem, y uno o dos compactadores de neumáticos. Excepto estos últimos que se seleccionan según su peso operativo, el resto de máquinas se describen como similares a los algunos de los modelos más frecuentemente utilizados en España.

Además, puede incluirse una barredora y una fresadora como maquinaria auxiliar, cada una con su propio tiempo medio diario de funcionamiento y distinto del indicado para el equipo de puesta en obra.

CÁLCULOS

Cálculo y presentación de resultados



Materias Primas
Fabricación
Puesta en obra
Cálculos
Reiniciar 

Identificación

Denominación de la opción en cálculo

Alcance del estudio

Categoría de impacto	Unidad	Selección
Materias primas totales (M.P.T.)	kg	<input type="checkbox"/>
Agotamiento de recursos abióticos (A.R.A.)	kg Sb eq.	<input type="checkbox"/>
Demanda acumulada de energía (D.A.E.)	MJ	<input type="checkbox"/>
Indicador de cambio climático (I.C.C.)	kg CO ₂ eq.	<input checked="" type="checkbox"/>
Acidificación (ACI)	Mol H ⁺ eq.	<input type="checkbox"/>
Eutrofización (EUT)	g PO ₄ eq.	<input type="checkbox"/>
Formación de oxidantes (F.O.F.)	g etileno eq.	<input type="checkbox"/>
Recuperación de residuos (R.R.)	kg	<input type="checkbox"/>

Presentación de resultados

- Histograma y variables**
 (dos o más categorías)
 Gráfica radial

Calcular y guardar

Guardar configuración

Resultados

Antes de obtener los resultados se recomienda identificar la alternativa en cálculo (Denominación...) e indicar la posición del histograma (Guardar configuración) en que desea verse representada

RESULTADOS

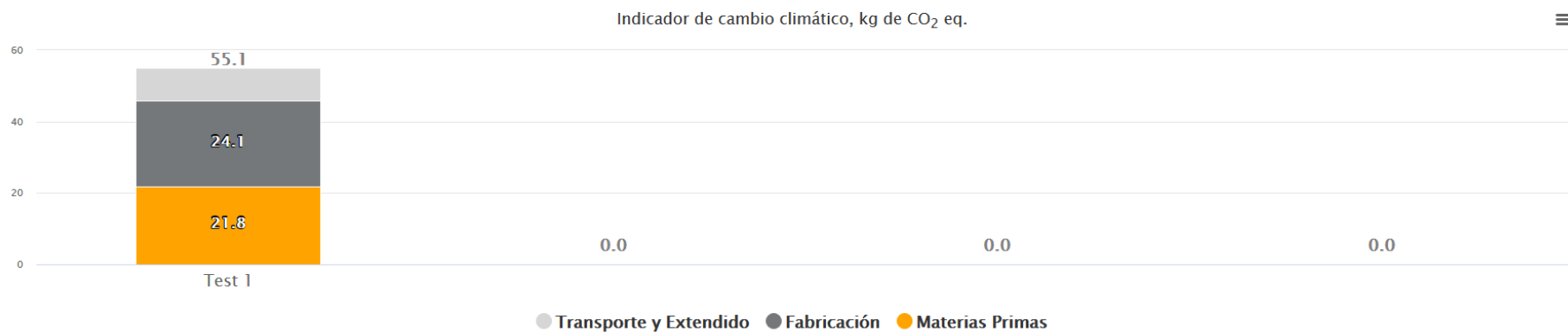
Pueden compararse hasta cuatro alternativas de producción simultáneamente, ordenadas según se haya indicado en el formulario de cálculo: ALTERNATIVA 1, ALTERNATIVA 2, ALTERNATIVA 3 o ALTERNATIVA 4.

Desde esta pantalla puede regresarse a cualquiera de las anteriores para efectuar un nuevo cálculo dirigiéndose únicamente al formulario que requiera ser modificado. ECCO2 conserva todos los valores no modificados y presentará como nueva alternativa en cálculo la obtenida con cualquier modificación parcial.

Resultados y resumen de variables utilizadas en los cálculos



- Materias Primas
- Fabricación
- Puesta en obra
- Resultados
- Imprimir
-  Reinciar 



RESULTADOS

Materias Primas y su transporte		Fabricación en central		Transporte y puesta en obra	
	Test 1		Test 1		Test 1
1 Árido fino 1, proporción (%)	40	1 Altitud snm (m)	<500	1 Distancia central obra	60
2 Árido fino 2, proporción (%)	10	2 Capacidad (t/h)	220	2 Rendimiento diario	800
3 Árido grueso 1, proporción (%)	20	3 Producción diaria (t)	800	3 Mermas de puesta en obra (%)	2.5
4 Árido grueso 2, proporción (%)	20	4 Funcionamiento diario (h)	6	4 Espesor de capa, mm	50
5 Mermas en acopia o transporte, (%)	3	5 Actuación sistema calentamiento (h)	4	5 Densidad de la capa compactada (t/m3)	2.4
6 Árido fino 1, naturaleza	triturado	6 Combustible secadero	Fuelóleo	6 Unidada funcional	1
7 Árido fino 2, naturaleza	no triturado	7 Motores de la central, fuente	Grupo electrógeno	7 Silo de transferencia, tipo	ROAD SB2500
8 Árido grueso 1, naturaleza	triturado	8 Calentamiento de ligantes, sistema	Caldera de fuelóleo	8 Extendedora 1, tipo	SUPER 1900
9 Árido grueso 2, naturaleza	triturado	9 Grupo electrógeno, combustible	Gasóleo	9 Extendedora 2, tipo	NO
10 Árido fino 1, distancia (km)	5	10 Pala cargadora, modelo	CAT 950 M	10 Compactador tandem 1, tipo	CC 4200
11 Árido fino 2, distancia (km)	15	11 Paga crédito	Stage II (Tier 2)	11 Compactador tandem 2, tipo	NO
12 Árido grueso 1, distancia, (km)	60	12 Grupo electrogeno, motor	Convencional	12 Compactador tandem 3, tipo	NO
13 Árido grueso 2, distancia (km)	60	13 Árido fino 1, humedad (%)	2.5	13 Compactador de neumáticos 1, tipo	24 - 30 t
14 Polvo mineral, proporción (%)	2	14 Árido fino 2, humedad (%)	2.5	14 Compactador de neumáticos 2, tipo	NO
15 Aditivo 1, proporción (%)	0	15 Árido grueso 1, humedad (%)	1	15 Fresadora, tipo	W100 Ri
16 Aditivo 2, proporción (%)	0	16 Árido grueso 2, humedad (%)	1	16 Barredora, tipo	S 510
17 RAP, proporción (%)	10	17 RAP, humedad (%)	5	17 Equipo de extendido (h)	8
18 Betún contenido RAP (%)	4	18 Agua de proceso (%)	0	18 Fresadora, tiempo (h)	2
19 Betún residual ligante bituminoso (%)	100	19 Humedad residual (%)	0	19 Barredora, tiempo (h)	4
20 Betún total en la mezcla (%)	4.6	20 Fracción a la mezcladora	Ninguna	20 Vehículos, motor	Euro II
21 Betún nuevo en la mezcla (%)	5	21 Temperatura ambiente (°C)	20	21 Maquinaria, motor	Stage II (Tier 2)
22 Polvo mineral, naturaleza	calizo	22 Temperatura de los áridos	15		
23 Aditivo 1, naturaleza	NO	23 Temperatura RAP	15		
24 Aditivo 2, naturaleza	NO	24 Temperatura ligante bituminoso	150		
25 RAP, naturaleza	RAP clasificado	25 Temperatura agua de proceso	15		
26 Betún nuevo, naturaleza	PMB 45/80-65	26 Temperatura de gases	115		
27 Polvos mineral, distancia (km)	110	27 Temperatura de la mezcla bituminosa	165		
28 Aditivo 1, distancia (km)	110				
29 Aditivo 2, distancia (km)	90				
30 RAP, distancia (km)	15				
31 Betún nuevo, distancia (km)	160				
32 Vehículos, carga neta (t)	24				
33 Vehículos, estandar motor	Euro I				
34 Vehículos, consumo (l/100 km)	30.1				

APÉNDICE

Tabla A1: Procedencia de los Datos de Inventarios de Ciclo de Vida utilizados.

PRODUCTO	FUENTES DE LOS DATOS DE INVENTARIO
Áridos clasificados	ECOINVENT [1] y EPLCA [2]
Áridos triturados	ECOINVENT [1] y EPLCA [2]
Áridos reciclados	CAVIT 2002 [1]
Áridos siderúrgicos	CAVIT 2002 [1]
RAP sin tratamiento	Solo impactos asociados a su transporte
RAP solo clasificado	Elaboración propia a partir de datos de ECOINVENT y Stripple [3]
RAP triturado y clasificado	Elaboración propia, a partir de datos de ECOINVENT
Betún de penetración ⁴ , t	EUROBITUME [4]
Betunes modificados con polímeros	EUROBITUME para PMB 45/80-65. Elaboraciones propias basadas en EUROBITUME para otros betunes modificados.
Betunes mejorados con caucho	Elaboraciones propias basadas en EUROBITUME
Betunes modificados con caucho	Elaboraciones propias basadas en EUROBITUME
Betunes de alta viscosidad con caucho	Elaboraciones propias basadas en EUROBITUME
Emulsiones	EUROBITUME

PRODUCTO	FUENTES DE LOS DATOS DE INVENTARIO
Emulsiones modificadas	EUROBITUME y elaboración propia
Cemento	EPLCA
Cal viva	EPLCA
Hidróxido cálcico	Elaboración propia basada en Cal viva de EPLCA
Fibras de celulosa	Shen y Patel [5]
Zeolitas sintéticas	Fawer [6]
Polvo de NFU	Solo impactos asociados a su transporte
Gasóleo calderas	ENERTRANS [7], Inventarios Nacionales del MITECO, CORINAE, CONCAWE, IPPC y EPA [8], y elaboraciones propias.
Gasóleos vehículos de carretera	ENERTRANS, EMEP-EEA [9]
Gasóleos maquinaria de obra, grupos.	ENERTRANS, NRMM [10]
Fuelóleo ⁵	ENERTRANS, Inventarios Nacionales del MITECO, CORINAE y EPA [8], y elaboraciones propias.
Gas natural ⁵	ENERTRANS, Inventarios Nacionales del MITECO, CORINAE y EPA, y elaboraciones propias.
Energía eléctrica ⁵	MINETUR [7], EURELECTRIC [8], y elaboraciones propias

APÉNDICE

Tabla A2: Modelos de cálculo para obtener entradas y salidas en los PU1, PU2, PU3

PU 1: APROVISIONAMIENTO Y TRANSPORTE DE MATERIAS PRIMAS	
Consumos de áridos clasificados, de machaqueo, RAP y polvo mineral (mi, kg)	$m_i = 1000p_i(1-b_i)(1+\mu)(1+\varepsilon)$
Consumos RAP, fibras, CaO, Ca(OH) ₂ , zeolitas naturales/sintéticas, NFU. (mi, kg)	$m_i = 1000p_i(1+\varepsilon)$
Consumos de activantes, surfactantes, reductores de viscosidad (mi, kg)	$m_i = 1000pb_i(1+\vartheta)$
Consumo ligante bituminoso (m ₉ , kg)	$m_9 = 1000\frac{p_9}{b_r}(1+\varepsilon)$
Consumo de gasóleo en el transporte de materias primas (g ₁ , l)	$g_1 = 8 \cdot 10^{-4} c_t \sum_{i=1}^9 m_i d_i$
Residuos generados en los subprocesos anteriores (r ₁ , kg)	$r_1 = \mu(1+\varepsilon) \sum_{i=1}^4 m_i$

APÉNDICE

Tabla A2: Modelos de cálculo para obtener entradas y salidas en los PU1, PU2, PU3

PU 2: FABRICACIÓN EN CENTRAL	
Consumo de combustible en la central de fabricación (f, kg)	$f = \frac{1}{PC_f} (\Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 + L)$
Variación de entalpía de los componentes de la mezcla bituminosa (DH1, kJ)	$\Delta H_1 = \frac{1}{1+\mu} \sum_{i=1}^4 m_i (T_{MB} - T_i) CE_i + \sum_{i=5}^9 (T_{MB} - T_i) CE_i$
Variación de entalpía del agua introducida con los componentes de la mezcla bituminosa (DH2, kJ)	$\Delta H_2 = \left(\frac{1}{1+\mu} \sum_{i=1}^4 m_i w_i (T_e - T_i) + \sum_{i=5}^9 m_i w_i (T_e - T_i) + 1000 \cdot w_{10} (T_e - T_{10}) \right) CE_w$
Energía de cambio de estado del agua (DH2, kJ)	$\Delta H_3 = \left(\frac{1}{1+\mu} \sum_{i=1}^4 m_i w_i + \sum_{i=5}^9 m_i w_i + 1000 (w_{10} - w_r) \right) E_w$
Agua de proceso en mezclas templadas con betún (w10, %)	$w_{10} = 1000 \cdot (1,5 (1 - b_n) - w_{11})$ $w_{11} = 1000 (1 - \mu) m_1 w_1 \text{ ó}$ $w_{11} = 1000 (1 - \mu) m_2 w_2 \text{ ó}$ $w_{11} = 1000 m_8 w_8 *$
Humedad residual, mezclas bituminosas con betún, TMB $\geq 140^\circ$ C, (wres, %)	$w_r = 0$
Humedad residual, mezclas bituminosas con betún, TMB $< 140^\circ$ C, (wres, %)	$w_r = 0,5 - \frac{T_{MB} - 90}{100}$
Humedad residual, mezclas bituminosas con emulsión (wres, %)	$w_r = 1,0 - \frac{T_{MB} - 90}{100}$

*Según el material seleccionado para su introducción directa en la amasadora de la central

APÉNDICE

Tabla A2: Modelos de cálculo para obtener entradas y salidas en los PU1, PU2, PU3

PU 2: FABRICACIÓN EN CENTRAL	
Pérdidas de calor (L, kJ)	$L = L_1 + L_2 + L_3 + L_4$
Pérdidas de calor en los humos, por el vapor de agua producido por los componentes de la mezcla y agua de proceso (L1, kJ)	$L_1 = \left(\frac{1}{1+\mu} \sum_{i=1}^4 m_i w_i + \sum_{i=5}^9 m_i w_i + 1000 (w_{10} - w_i) \cdot (T_h - T_i) \right) CE_v$
Pérdidas de calor en los humos, productos de la combustión (L2, kJ)	$L_2 = (f + (1+\alpha) a_{es} \cdot (1+\varphi)) (T_h - T_o) CE_o$
Pérdidas de calor por radiación y conducción (L3, kJ)	$L_3 = k_1 t (T_1^4 - T_o^4) + k_2 t (T_2^4 - T_o^4)$
Energía invertida en calentamiento de elementos de la central (L4, kJ)	$L_4 = \frac{n_2+1}{n_1} m_i (T_3 - T_o) CE_o$
Consumo de energía eléctrica de la red (Ee, kJ)	$E_e = \frac{3600}{n_2} (P_1 h_1 - P_2 h_2)$
Consumo de combustible en la caldera de aceite térmico (g2c, l)	$g_{2c} = \frac{1}{n_2} P_3 h_3 c_3$
Consumo de gasóleo en grupo electrógeno y pala cargadora (g2, l)	$g_2 = \frac{1}{n_2} P_4 h_4 c_4 + P_5 h_5 c_5$
Residuos generados en el proceso unitario 2 (r2, kg)	$r_2 = \frac{1}{1+\varepsilon} \left(\sum (m_i + m_j + m_k) - 1000 \right)$

APÉNDICE

Tabla A2: Modelos de cálculo para obtener entradas y salidas en los PU1, PU2, PU3

PU 3: TRANSPORTE Y PUESTA EN OBRA DE LA MEZCLA BITUMINOSA	
Consumo de gasóleo total (g3, l)	$g_3 = g_{31} + g_{32} + g_{33}$
Consumo de gasóleo en el transporte de mezcla bituminosa (g31, l)	$g_{31} = 0,8(1 + \varepsilon) c_t d$
Consumo de gasóleo de la maquinaria de extendido y compactación (g32, l)	$g_{32} = \frac{C_m}{n_3} \sum_{i=6}^{14} P_i h_i$
Consumo de gasóleo del equipo de fresado y barrido (g33, l)	$g_{33} = \frac{C_m}{n_3} \sum_{i=15}^{16} P_i h_i$
Residuos generados en los subprocesos anteriores (r3, kg)	$r_2 = 1000 \varepsilon$

APÉNDICE

Tabla A3: Símbolos y valores utilizados

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	OBSERVACIONES
p_1, p_2, p_3, p_4	Proporciones ponderales de cuatro fracciones de áridos , sobre masa de áridos.	VARIABLES INDEPENDIENTES
p_5	Proporción ponderal de polvo mineral de aportación, sobre masa de áridos.	VARIABLES INDEPENDIENTES
b_t	Betún total presente en la mezcla bituminosa, expresado como proporción ponderal sobre mezcla.	VARIABLE INDEPENDIENTE
μ	Proporción ponderal de mermas producidas durante el transporte o en los acopios de áridos.	VARIABLE INDEPENDIENTE
ε	Proporción ponderal de pérdidas de mezcla bituminosa en recortes, juntas y sobrantes de puesta en obra.	VARIABLE INDEPENDIENTE
b_n	Betún nuevo introducido en la mezcla bituminosa, expresado como proporción ponderal sobre mezcla.	VARIABLE DEPENDIENTE
b_r	Betún residual en el nuevo ligante bituminoso expresado como porcentaje ponderal sobre la masa de betún nuevo	VARIABLE DEPENDIENTE
p_6, p_8	Proporciones ponderales de RAP y aditivo, sobre masa de mezcla.	VARIABLES INDEPENDIENTES
p_7	Proporción de aditivo surfactante o modificador de viscosidad sobre masa de betún nuevo.	VARIABLE DEPENDIENTE
p_9	Betún nuevo introducido en la mezcla bituminosa, expresado como proporción ponderal sobre mezcla.	VARIABLE DEPENDIENTE
c_t	Consumo medio de gasóleo de los vehículos de transporte, medido en l/100 km	VARIABLE DEPENDIENTE, FUNCIÓN DE LA CLASE EURO.
d_i	Distancia de transporte hasta la central de fabricación de áridos, polvo mineral, aditivos y ligante bituminoso	VARIABLES INDEPENDIENTES
PCI_f	Poder calorífico inferior (kJ/kg)	VARIABLE DEPENDIENTE. FUNCIÓN DEL COMBUSTIBLE

APÉNDICE

Tabla A3: Símbolos y valores utilizados

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	OBSERVACIONES
T_{MB}	Temperatura de descarga de la mezcla bituminosa	Variable independiente
T_i	Temperaturas iniciales de los componentes de la mezcla bituminosa.	Variabes independientes
T_a	Temperatura ambiente	Variable independiente
T_e	Temperatura media a la que se produce la evaporación del agua .	Variable independiente. Valor por defecto $T_e=90^\circ\text{C}$
T_h	Temperatura de salida de humos.	Variable independiente. Valor por defecto $T_e=135^\circ\text{C}$
T_1	Temperatura interior a efecto de cálculos de pérdidas por radiación y conducción.	Variable independiente. Valor por defecto $T_1=T_{MB}$
T_2	Temperatura exterior a efecto de cálculos de pérdidas por radiación y conducción.	Variable independiente. Valor por defecto $T_2=T_a$
CE_i, CE_w, CE_v, E_w	Constantes calóricas	Según tabla A.3
w_i	Humedades de los componentes de la mezcla bituminosa, en porcentaje de las respectivas masas secas	Variabes independientes
a	Proporción de aire en exceso sobre el estequiométrico	Variable independiente. Valores por defecto, tabla A.4
a_{es}	Aire estequiométrico de la reacción de combustión	Variable dependiente. Según tabla A.5
j	Fugas de aire, proporción ponderal sobre aire estequiométrico + aire en exceso sobre el estequiométrico	Variable independiente. Valor por defecto $j=5\%$
k_1	Coefficiente que expresa la proporción de calor perdido por radiación	Variable independiente. Valor por defecto $k_1=0$
k_2	Coefficiente de pérdidas de calor por conducción que agrupa los efectos de conductividad del material, y superficie y espesor de transmisión.	Variable independiente. Valor por defecto $k_2=0,00075\text{ }^\circ\text{K}^{-1}$
m_c	Masa de acero equivalente empleada para calcular la energía invertida en calentar la central cada operación de arranque	Variable independiente. Por defecto, valores tabla A.6
d	Distancia de transporte de mezcla de central a obra	Variable independiente

APÉNDICE

Tabla A3: Símbolos y valores utilizados

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	OBSERVACIONES
P_1	Potencia de los motores eléctricos de la central	Variable independiente. Por defecto, valores tabla A.6
P_2	Potencia del sistema de calentamiento eléctrico	Variable independiente. Por defecto, valores tabla A.6
P_3	Potencia de la caldera de fluido térmico	Variable independiente. Por defecto, valores tabla A.6
P_4	Potencia del grupo electrógeno	Variable independiente. Por defecto, valores tabla A.6
P_5	Potencia de la pala cargadora	Función del modelo seleccionado
P_i	Potencia de las máquinas de extendido y compactación ($i=6$ a 14)	Función del modelo seleccionado
P_i	Potencia de las máquinas de fresado y barrido ($i=16$ a 16)	Función del modelo seleccionado
h_1	Horas diarias de funcionamiento de la central de fabricación	Variable independiente
h_2	Horas diarias de funcionamiento del sistema eléctrico de calentamiento de ligantes	Variable independiente
h_3	Horas diarias de funcionamiento de la caldera de fluido térmico	Variable independiente
h_4	Horas diarias de funcionamiento del grupo electrógeno	Variable independiente, por defecto, $h_3=h_4$
h_5	Horas diarias de funcionamiento de la pala cargadora	Variable independiente, por defecto, $h_5=h_4$
h_i	Horas diarias de funcionamiento del equipo de extendido y compactación ($i=6$ a 14)	Variables independientes, por defecto, $h_6=h_7=\dots=h_{14}$
h_i	Horas diarias de funcionamiento del equipo fresado y barrido ($i=15$ a 16)	Variables independientes
n_1	Producción diaria de la central de fabricación (t)	Variable independiente
n_2	Paralizaciones diarias de la central (ud)	Variable independiente
n_3	Producción diaria del equipo de puesta en obra (t)	Variable independiente

APÉNDICE

Tabla A4: Constantes calóricas consideradas

SÍMBOL	MAGNITUD	VALOR	UD
CE_W	Calor específica de l'aigua, fase líquida	4,184	$\text{kJ}/\text{k}\cdot^\circ\text{K}$
CE_V	Calor específica de l'aigua, fase vapor	2,032	$\text{kJ}/\text{k}\cdot^\circ\text{K}$
E_W	Energia de canvi d'estat de l'aigua	2,25	$\text{MJ}/\text{k}\cdot^\circ\text{K}$
$CE_{1-5(n)}$	Calor específica d'àrids naturals reciclats	0,835	$\text{kJ}/\text{k}\cdot^\circ\text{K}$
$CE_{1-4(s)}$	Calor específica d'àrids siderúrgics	0,78	$\text{kJ}/\text{k}\cdot^\circ\text{K}$
CE_b	Calor específica del betum	2,093	$\text{kJ}/\text{k}\cdot^\circ\text{K}$
CE_a	Calor específica de l'aire	1,012	$\text{kJ}/\text{k}\cdot^\circ\text{K}$
CE_{CO_2}	Calor específica del CO_2	0,839	$\text{kJ}/\text{k}\cdot^\circ\text{K}$
CE_{N_2}	Calor específica del N_2	1,04	$\text{kJ}/\text{k}\cdot^\circ\text{K}$
CE_S	Calor específica de l'acer	0,447	$\text{kJ}/\text{k}\cdot^\circ\text{K}$

APÉNDICE

Tabla A5: Valores de las variables P_1 , P_2 , P_3 , P_4 y m_c asignados por defecto

CAPACITAT	POTÈNCIA ELÈCTRICA		CALDERA FL.	GRUP	MASSA D'ACER
	MOTORS, P_1	ESCALFAM. P_2	TÈRMIC., P_3	ELECTRÒG., P_4	EQUIVAL., m_c
160 t/h	200 kW	180 kW	400 kW	400 kW	80.000 kg
180 t/h	240 kW	180 kW	480 kW	480 kW	90.000 kg
200 t/h	280 kW	240 kW	560 kW	560 kW	100.000 kg
220 t/h	320 kW	240 kW	640 kW	640 kW	110.000 kg
250 t/h	360 kW	280 kW	720 kW	720 kW	125.000 kg
280 t/h	400 kW	280 kW	800 kW	800 kW	140.000 kg
300 t/h	440 kW	320 kW	880 kW	880 kW	150.000 kg
360 t/h	480 kW	320 kW	960 kW	960 kW	180.000 kg

APÉNDICE

Tabla A6: Poder calorífico inferior (PCI) y valores de, aire estequiométrico (a_{es}), composición de los gases de combustión y aire en exceso sobre estequiométrico (α), asignados por defecto

COMBUSTIBLE	PCI (MJ/kg)	a_{es} (kg/kg)	CO ₂	H ₂ O	N ₂	α
Fuelóleo	40,5	13,31	21,70%	6,50%	71,80%	50%
Gasóleo	42,2	14,98	20,79%	7,45%	71,76%	30%
Gas Natural	48,28	16,37	15,02%	11,81%	73,17%	20%

REFERENCIAS

1. Blengini, G.; Garbarino, E.; Zavaglia,, K.; Sustainability evaluation of natural and recycled aggregates through Life Cycle Assessment. Journal of Cleaner Production, 2012.
2. EPLCA, European reference Life Cycle Database. Joint Research Centre. European Commission.
3. Stripple, H.; TRIPPLE, H. Life Cycle Assessment of Road. A pilot study for inventory analysis. Second revised edition. Report from IVL Swedish Environmental Research Institute. March 2001, Gothenburg, Sweden.
4. Blomberg, T., et al. (2012). Life Cycle Inventory: Bitumen (2nd Edition). EUROBITUMEN, European Bitumen Association.
5. Shen, L.; Patel, M.; Life Cycle Assessment of man-made cellulose fibres. Lenzinger Berichte 88 (2010) 1-59.
6. Fawer, M.; Postlethwaite, D.; Klüppel, H.; Life Cycle Inventory for the production of zeolite A for detergents. The International Journal of Life Cycle Assessment 3 (2), 1998.
7. DGA; Guía para la aplicación de una valoración ambiental de las alternativas disponibles en los proyectos de construcción y conservación de carreteras de acuerdo con la estrategia aragonesa de cambio climático y energías limpias. Dirección General de Calidad Ambiental. Gobierno de Aragón. 2016.
8. JA Guía de apoyo para la notificación de las emisiones en las centrales térmicas y otras instalaciones de combustión de la Junta de Andalucía. Diciembre 2018.
9. EMEP/EEA; Air pollutant emission inventory guidebook 2016. Update Jul. 2018. European Environment Agency.
10. NRMM Non-Road mobile machinery emissions. European Commission, NRMM Regulation
11. Ortiz, J.; Crisén, X.; Temperaturas, consumos energéticos y emisiones de mezclas bituminosas en caliente, semicalientes y templadas. XIII Jornada Nacional de ASEFMA. Madrid, mayo de 2018.
12. Antón, M. A.; Utilización del Análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament de Projectes d'Enginyeria, 2004.
13. NAPA; The fundamentals of the operation and maintenance of the exhaust gas system in a hot mix asphalt facility. National Asphalt Pavement Association (NAPA). IS 52, 1987.

ACCESO, COMENTARIOS Y CONSULTAS

Puede accederse a ECCO2 desde la web de ARNÓ www.arno.es, y también mediante el enlace <http://www.arno.es/ecco2/>

Cualquier sugerencia, indicación o consulta relacionada con su funcionamiento y utilización puede efectuarse en dirección de correo electrónico: ecco2@arno.es.

AGRADECIMIENTOS

ARNÓ inició en 2017 un proyecto de investigación denominado ASFALTMIN (Mezclas Asfálticas de mínimas emisiones y demanda energética), con la ayuda de CDTI, Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial del Ministerio de Economía y Competitividad. El presente estudio, junto con el desarrollo de la herramienta de cálculo ECCO2 ha constituido su primera actividad. Los autores desean agradecer a CDTI la ayuda prestada.

HERRAMIENTA DE CÁLCULO DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS



www.arno.es
Tel. (+34) 973 243 262

SEDE CENTRAL
Pl. de l'Ensenyança, 1
25002-LLEIDA

SEDE SOCIAL, PARQUE DE
MAQUINARIA Y TALLERES
Carretera de Tamarite, 3-13
25120-ALFARRÀS (Lleida)

DELEGACIÓN BARCELONA
DELEGACIÓ BARCELONA
C. Nicaragua, 48, 4º, dpcho. 2-3 i 4-3
08029 BARCELONA