

# EINA DE CÀLCUL DE L'IMPACTE AMBIENTAL DE LES MESCLES BITUMINOSES



## SUMARI

- **INTRODUCCIÓ** ..... p. 2
- **PLANTEJAMENT DE LES ANÀLISIS** ..... p. 3
- **FUNCIONAMENTO DE L'EINA DE CàLCUL** ..... p. 8
  - **MATÈRIES PRIMERES I EL SEU TRANSPORT** ..... p. 9
  - **FABRICACIÓ EN CENTRAL** ..... p.11
  - **TRANSPORT I POSADA EN OBRA** ..... p. 13
  - **CÀLCULS** ..... p. 15
  - **RESULTATS** ..... p. 16
- **APÈNDIX** ..... p. 18
- **REFERÈNCIES** ..... p. 29
- **COMENTARIS, CONSULTES I AGRAÏMENTS** ..... p. 30

# INTRODUCCIÓ

**ECCO2 és una eina de càlcul** dissenyada per estimar els efectes d'utilitzar diferents fórmules de treball, tipus d'àrids, betums, aditius, taxes de reciclatge, temperatures de fabricació, combustibles, rendiments i distàncies de transport, entre d'altres en els **impactes ambientals de les mescles bituminoses**. Es recolza en comptabilitats ambientals teòriques, tot i que incorpora diverses aproximacions empíriques, la precisió s'espera millorar segons s'acumulin resultats de successives mesuraments efectuats "in situ".

ECCO2 s'ha basat en la metodologia **Anàlisi de Cicle de Vida** per a evitar que mers desplaçaments de càrregues ambientals entre diferents etapes del cicle de vida o processos productius puguin valorar-se com a millores ambientals. En el present Manual es descriuen els models de càlcul utilitzats, les procedències de les dades, les alternatives que poden ser objecte de comparació i la seva definició mitjançant els formularis d'usuari.



# PLANTEJAMENT DE LES ANÀLISIS

## 2.1 Objectiu i abast

En ECCO2 s'ha plantejat Anàlisi de Cicle de Vida (ACV) del tipus denominat "del bressol a la porta", ja que es **sumen als impactes deguts a l'extracció, transformació i transport de matèries primeres o secundàries i dels productes energètics, els de fabricació, transport i posada en obra de la mescla bituminosa**. Per tant, facilita la comparació directa d'alternatives de les que s'esperen similars comportaments en servei durant una mateixa vida útil. Sota la hipòtesi indicada, es tracta d'un plantejament que no resta valor a les conclusions que es desprenguin dels resultats obtinguts. Naturalment, introduint les correccions oportunes, ECCO2 també pot ser útil per comparar solucions amb diferents períodes de projecte.

En ECCO2 s'han considerat processos externs al sistema del producte, prescindint-de la seva contribució als ACV, els corresponents a la manufactura d'instal·lacions, de la central de fabricació de mescles bituminoses, de la maquinària i dels vehicles utilitzats en la seva producció, transport i posada en obra. Tampoc es comptabilitzen les

eventuals aportacions de processos vinculats a activitats de manteniment, reparació o substitució de material de desgast d'aquests equips.

**Els resultats de l'Anàlisi de Cicle de Vida s'obtenen per la unitat funcional una tona (1 t) de mescla bituminosa posada en obra** encara que, com és obvi, poden referir-se també a qualsevol una altra quantitat, o una certa superfície de paviment si es compta amb les dades de densitat i gruix de la capa acabada.



# PLANTEJAMENT DELS ANÀLISIS

## Procés unitari 1: Matèries primeres i el seu transport

El consum de cada fracció d'àrid natural o artificial s'obté de les respectives proporcions ponderals establertes en la dosificació en fred i de les minves previstes durant les operacions de transport i apilament, si escau, i de les previstes durant la posada en obra.

Els consums de betum, emulsió, RAP i resta d'addicions, es calculen a partir de les respectives proporcions ponderals previstes en la fórmula de treball.

El consum de gasoil corresponent al transport de cada matèria primera o secundària és funció de la distància de transport i de la càrrega neta i consum unitari de combustible assignat als vehicles de transport, que depèn, al seu torn, del tipus de motorització considerat (convencional, Euro I, II, III, IV o V).

## Procés unitari 2: Fabricació en central

Els rebutjos a la central de fabricació s'obtenen per diferències entre les dosificacions en fred i en calent. Els consums d'energia elèctrica de la xarxa, o de gasoil en grups electrògens i calderes, segons sigui el cas, es dedueixen de les potències instal·lades i de l'estimació d'hores de funcionament de cada equip. ECCO<sub>2</sub> assigna, per defecte, les potències corresponents en funció de la capacitat de la central de fabricació i del tipus de font considerada.

El consum de gasoil de la pala carregadora es dedueix de la seva potència, hores d'utilització i tipus de motor (Stage I, II, IIIA, IIIB, IV i V).

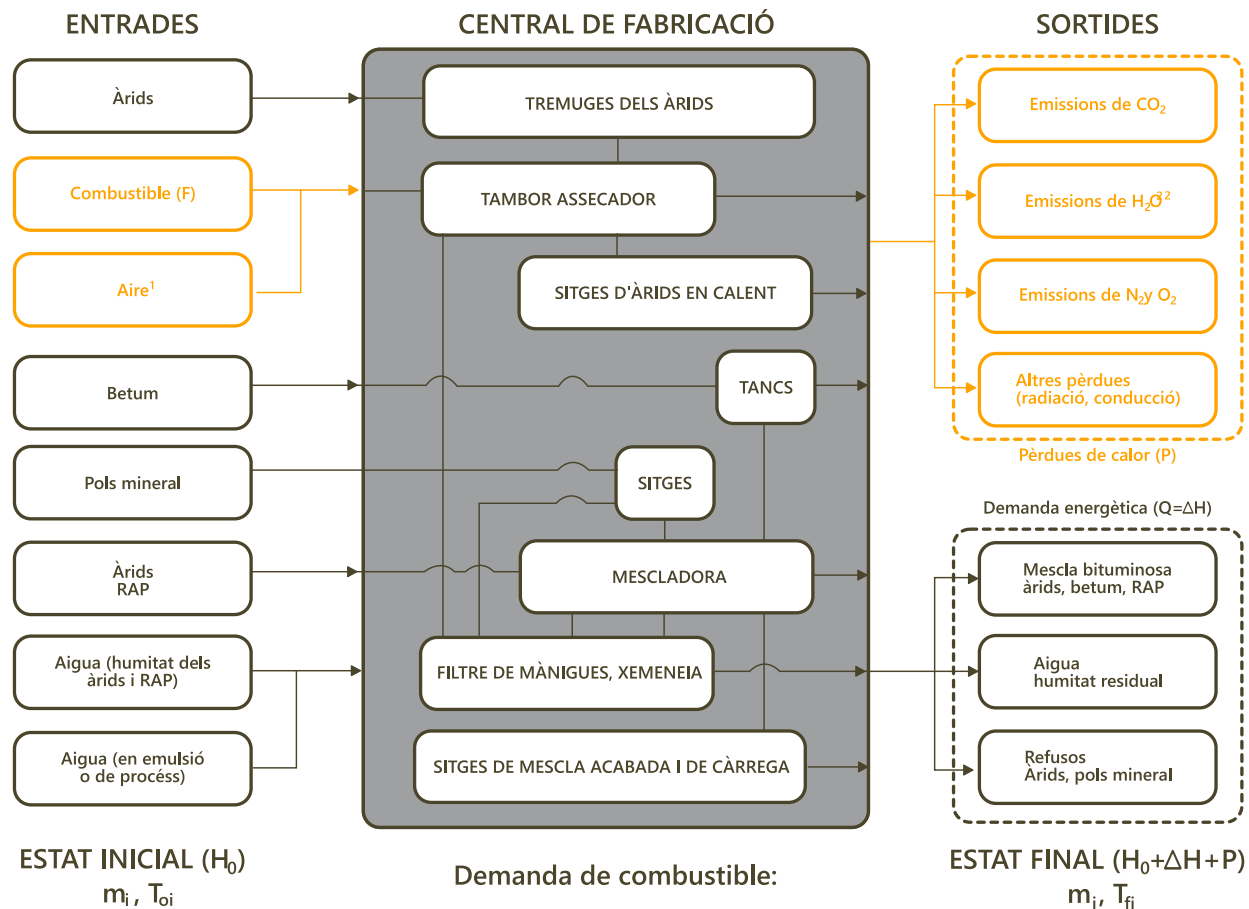
La demanda energètica que ha de satisfer per l'assecat i escalfament dels àrids s'obté de la variació d'entalpia dels components de la mescla bituminosa i de les pèrdues de calor calculades (a la llar de foc, per radiació i conducció, degudes a la calor invertit en l'escalfament de la pròpia central).

## PLANTEJAMENT DELS ANÀLISIS

El següent gràfic il·lustra el plantejament dels balanços tèrmics desenvolupats per obtenir la demanda de combustible. Encara que a l'interior del requadre Central de fabricació s'han tractat de representar els fluxos corresponents a una certa tipologia de central, té en compte que, ja que l'entalpia és una funció d'estat, la seva variació depèn només de les condicions inicials i finals del sistema analitzat. La configuració de la central, doncs, no afecta la validesa del model mentre les pèrdues de calor i la humitat residual present en la mescla bituminosa durant la descàrrega de la central, s'estimen amb suficient aproximació.

ECCO2 conté una aproximació empírica a les pèrdues de calor per radiació, conducció i escalfament de la pròpia central i un model per estimar la humitat residual de la mescla bituminosa en funció de la temperatura de fabricació, que completen la informació necessària per calcular la demanda teòrica de combustible.

# PLANTEJAMENT DELS ANÀLISIS



(1) Aire estequiomètric de la reacció de combustió + aire en excés + fuites.

(2) Aigua producte de la combustió + humitat dels àrids + humitat del RAP + aigua de l'emulsió o de procés - humitat residual.

(3) PCI<sub>F</sub>: Poder calorífic inferior del combustible.



# PLANTEJAMENT DELS ANÀLISIS

## Procés unitari 3: transport i posada en obra de la mescla bituminosa

Com en el transport de matèries primeres, el consum de gasoil corresponent al transport de mescla bituminosa de central a obra s'obté de la distància de transport, càrrega neta i consum unitari de combustible assignat als vehicles de transport, que depèn al seu torn, del tipus de motorització (convencional, Euro I, II, III, IV o V).

El consum de gasoil dels equips de posada en obra, com el la pala carregadora a la central de fabricació, es dedueix de les seves respectives hores d'utilització, la seva potència i tipus de motor (Stage I, II, III A, III B, IV o V).

Les bases de dades d'ECCO<sub>2</sub> també inclouen les calors específiques d'àrids naturals i artificials, betum, aigua líquida i en forma de vapor, oxigen, nitrogen, diòxid de carboni i acer, el poder calorífic inferior (PCI) de gasoil, fueloils i gas natural, les estequiometries de les reaccions de combustió i les proporcions d'aire en excés sobre el estequiomètric típicament utilitzades en les centrals de fabricació, preses de diverses fonts o procedents d'amidaments i estimacions pròpies.

## AVALUACIÓ D'IMPACTE I INTERPRETACIÓ DE RESULTATS

ECCO<sub>2</sub> s'ha configurat per a calcular les següents 8 categories d'impacte: Consum de Matèries Primeres totals, Esgotament de Recursos Abiòtics, Demanda Acumulada d'Energia, Indicador de Canvi Climàtic, Acidificació, Eutrofització, Formació de Oxidants Fotoquímics, i Ús de Residus. Aquesta última s'obté de restar al consum de matèries primes totals la diferència entre residus utilitzats i residus generats i s'ha creat per reconèixer, com a millora ambiental d'interès, la seva eventual reducció. Els factors de caracterització utilitzats en les diferents categories d'impacte s'han pres de TEAM, ADF i IPPC.

Els resultats dels càlculs es presenten en forma d'histograma, juntament amb els valors numèrics per procés unitari. Poden comparar-se fins a quatre diferents alternatives de fabricació de forma simultània.

## FUNCIONAMENT DE L'EINA DE CÀLCUL

Mitjançant ECCO<sub>2</sub> s'ha sistematitzat la recopilació de dades, introducció de variables, resolució d'equacions i presentació de resultats de les anàlisis.

En la seva versió actual, ECCO<sub>2</sub> utilitza fins a un total de 92 variables de producció. L'usuari pot assignar valors a 75 d'elles mentre que la resta són variables dependents o són determinades per defecte. En conjunt, permeten distingir els efectes ambientals de temperatura ambient i humitat dels àrids, diferents tipus d'àrids i lligants bituminosos, ús de residus i d'additius, fórmules de treball, fonts d'energia de la central, temperatura de la mescla bituminosa, rendiments de fabricació i posada en obra, composició i característiques dels equips de maquinària i distàncies de transport, entre d'altres.

En la versió d'ECCO<sub>2</sub> actualment disponible al lloc web [www.arno.es](http://www.arno.es) únicament es troba habilitada la categoria d'impacte "Indicador de canvi climàtic" (ICC) o petjada de carboni. S'ha previst incloure la resta de categories en successives versions, on també es poden substituir les prediccions proporcionades pels models de pèrdues de

calor o d'estimació d'humitat residual per dades obtingudes d'amidaments reals.

La introducció de dades s'efectua mitjançant els tres formularis reproduïts en les figures 3, 4 i 5, que combinen llistes desplegable amb cel·les on s'han d'introduir valors numèrics. En obrir-se per primera vegada, cada formulari mostra, en tots els seus camps, seleccions i valors establerts per defecte, amb la finalitat de simplificar la introducció de dades. Un cop iniciats els càlculs, l'usuari pot desplaçar-se entre formularis conservant les dades més recents i guardant dades i resultats en el formulari final si es vol.

# MATÈRIES PRIMERES I EL SEU TRANSPORT

## Matèries primeres i el seu transport



Matèries primeres

Fabricació

Posada en obra

Càlculs

Reiniciar 

### Dosificació en fred

	Naturalesa	Proporció %	Distància
Àrid fi 1	Àrid triturat	40 s/a	5 km
Àrid fi 2	Àrid no triturat	10 s/a	15 km
Àrid gruixut 1	Àrid triturat	20 s/a	60 km
Àrid gruixut 2	Àrid triturat	20 s/a	60 km
Minves en acopis o transport		3 s/a	

### Dosificació en calent

	Naturalesa	Proporció %	Distància
Pols mineral d'aportació	PM calcari	2 s/a	110 km
Aditiu 1	NO	0 s/m	110 km
Aditiu 2	NO	0 s/betum	90 km
RAP	RAP classificat	10 s/m	15 km
Betum en el RAP		4 s/m	
Betum residual en el lligant bituminós		100 s/m	
Proporció de betum total a la mescla		5 s/m	
Betum nou afegit a la mescla	PMB 45/80-65	4.6 s/m	160 km

### Transport de les matèries primeres

	Estàndar del motor	Càrrega neta	Consum (100Km)
Motorització dels vehicles	Euro I	25 t	30.1 l

## MATÈRIES PRIMERES I EL SEU TRANSPORT

Aquest formulari permet considerar en la dosificació en fred la combinació de fins a quatre fraccions d'àrid, en qualsevol proporció (dos d'àrid fi i dues d'àrid gruixut), de diferents naturaleses en el quadre anomenat dosificació en fred. La proporció de pols mineral d'aportació, com la de l'additiu 1, de RAP i de betum total, s'ha d'establir com a proporció sobre barreja al corresponent a la dosificació en calent que completa l'anterior dosificació. A més, s'ha previst la incorporació d'un segon additiu, mesurat en proporció sobre el betum afegit. La fórmula de treball queda totalment descrita quan l'usuari indica el betum present al RAP, si escau, el betum residual contingut en l'emulsió bituminosa i la naturalesa de tots els components de la mescla.

Si les proporcions seleccionades són insuficients per obtenir 1.000 kg de materials per tona de mescla bituminosa, ECCO2 mostra un advertiment que obliga a corregir la dosificació introduïda. També apareix un avís si els materials dosificats sumen més de 1.060 kg per tona de mescla, encara que en aquest cas l'usuari pot cancel·lar l'avís i continuar sense efectuar cap correcció. També apareix un avís quan es selecciona un additiu per

al qual en ECCO2 no es disposa d'Inventari de Cicle de Vida.

Els valors que no poden ser modificats per l'usuari es mostren ombrejats. És el cas del betum residual quan el lligant seleccionat és betum, de la proporció de betum afegit (que ECCO2 calcula per diferència entre el betum total i l'aportat pel RAP), de la càrrega neta per consum unitari dels vehicles de transport. A l'efecte de consum de combustible i emissions de CO<sub>2</sub>, només es fa distinció entre "convencional" i resta d'estàndard europeus de motorització. Les estimacions de consum es refereixen, en tots els casos, a vehicles amb 25t de càrrega neta que realitzen el trajecte d'anada a plena càrrega i el de tornada sense càrrega.

# FABRICACIÓ EN CENTRAL

## Fabricació a la central



Matèries primeres

**Fabricació**

Posada en obra

Càlculs

Reiniciar 

### Condicions i temps de producció

Altitud msnm	<input type="text" value="&lt;500"/>	Hores de funcionament diari	<input type="text" value="6"/> h
Capacitat	<input type="text" value="220"/> t/h	Funcionament ininterromput	<input type="text" value="2"/> h
Producció mitja diària	<input type="text" value="800"/> t	Actuació sistema escalfament	<input type="text" value="4"/> h/d

### Fonts d'energia i equips

	Font	Model CAT o similar
Creedor de l'assecador	<input type="text" value="Fuel"/>	Pala carregadora <input type="text" value="CAT 950 M"/>
Motors de la central	<input type="text" value="Grup electrogen"/>	Estàndar del motor
Escalfament de lligants	<input type="text" value="Caldera de Fuel"/>	Pala carregadora <input type="text" value="Stage II (Tier 2)"/>
Grup electrogen	<input type="text" value="Gasoil"/>	Grup electrogen <input type="text" value="Convencional"/>

### Humitats i aigua de procés

Selecció \*

Àrid fi 1	<input type="radio"/>	<input type="text" value="2.5"/> % s/a
Àrid fi 2	<input type="radio"/>	<input type="text" value="2.5"/> % s/a
Àrid gruixut 1	<input type="radio"/>	<input type="text" value="1"/> % s/a
Àrid gruixut 2	<input checked="" type="radio"/>	<input type="text" value="1"/> % s/a
RAP	<input type="radio"/>	<input type="text" value="5"/> % s/a
Aigua de procés	<input type="text" value="0"/>	% s/a
Humitat residual	<input type="text" value="0"/>	% s/m

### Temperatures

Ambient	<input type="text" value="20"/> °C
Àrids	<input type="text" value="15"/> °C
RAP	<input type="text" value="15"/> °C
Lligant bituminós	<input type="text" value="150"/> °C
Aigua de procés	<input type="text" value="15"/> °C
Gasos	<input type="text" value="115"/> °C
Mescla bituminosa	<input type="text" value="165"/> °C

\* Selecciona la fracció introduïda en la mescladora, si és el cas, o bé "NO".

## FABRICACIÓ EN CENTRAL

En aquest cas es tracta de definir els aspectes relacionats amb la configuració de la central de fabricació i la seva operació, que exerceixen les grans influències en les emissions de CO<sub>2</sub> en aquest subsistema definit com a procés unitari febrer.

L'elecció entre diferents configuracions i règims d'operació s'efectua indicant la capacitat de la central, la seva producció mitjana diària, hores de funcionament real, nombre d'interrupcions de la producció i el temps d'actuació del sistema d'escalfament de lligants (temps equivalent d'utilització a la seva potència nominal). ECCO<sub>2</sub> assigna valors a la potència dels motors elèctrics i del sistema d'escalfament en funció de la capacitat de la central, segons els establerts a la base de dades que es consideren representatius de les centrals discontinües habituals a Espanya.

En aquest formulari han de seleccionar les diferents fonts energètiques utilitzades i un model de pala carregadora (Caterpillar o equivalent) i l'estàndard europeu (Stage) o nord-americà (Tier) del seu motor.

En relació amb les diferents fraccions d'àrids i RAP, l'usuari ha d'indicar les seves humitats i temperatures en els aplecs de la central. També ha d'introduir valors de temperatura ambient, del lligant bituminós, de fabricació de la mescla bituminosa i, si escau, de l'aigua de procés. La temperatura de sortida de gasos s'ha fixat en 115 ° C. Si es tracta d'una barreja en calent o semicalent (produïda a més de 100 ° C) no es requereix la introducció de més informació.

En el cas de mescles temperades amb betum, es considera que la tecnologia emprada es basa en la espumació induïda del lligant mitjançant aigua provinent de la humitat d'una de les fraccions d'àrid fi o del RAP, mitjançant aigua de procés o sumant les dues opcions. El model de càlcul desenvolupat per calcular l'aigua de procés obté la seva proporció com a diferència entre l'aportada per aquesta via i la que s'estima necessària per provocar l'oportuna espumació del betum per aquest procediment (1,5% s / a). L'usuari ha d'indicar, per tant, quina de les fraccions indicades s'introdueix directament a la mescladora, si escau.

# TRANSPORT I POSADA EN OBRA

## Transport i posada en obra



### Condicions de la posada en obra

Distància de la central a obra  km    Gruix de capa  mm  
 Rendiment diari  t/d    Densitat de la capa compactada  t/m<sup>3</sup>  
 Minves de posada en obra  s/m    Unitat funcional  t

### Equip de posada en obra

	Tipus	Potència	Ús diari
Sitja de transferència	<input type="text" value="ROAD SB2500"/>	233 kW	
Estenedora 1, Vögele o similar	<input type="text" value="SUPER 1900"/>	150 kW	
Estenedora 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 pneumàtics 1	<input type="text" value="24 - 30 t"/>	90 kW	
Compactador de pneumàtics 2	<input type="text" value="NO"/>	- kW	
Compactador de pneumàtics 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
Escombradora Bobcat o similar	<input type="text" value="S 510"/>	36.4 kW	<input type="text" value="4"/> h

### Motorització de vehicles i maquinària

Vehicles de transport     Maquinària

## TRANSPORT I POSADA EN OBRA

Finalment, mitjançant aquest tercer formulari es completa l'entrada de dades necessàries per efectuar els càlculs. L'usuari ha d'indicar la distància de transport des de la central de fabricació fins a l'obra, la composició de l'equip d'estesa i compactació, el rendiment de posada en obra, l'estàndard europeu més representatiu en els motors dels vehicles de transport previstos, l'estàndard europeu o nord-americà dels motors de la maquinària de posada en obra i les hores d'utilització.

L'equip de posada en obra pot constar d'una o dues estenedores; un, dos o tres compactadores tàndem i un o dos compactadores de pneumàtics. Excepte aquests últims, que se seleccionen segons el seu pes operatiu, la resta de màquines es descriuen com a similars a algun dels models més freqüentment utilitzats a Espanya.

A més, hi pot haver una escombradora i una fresadora com maquinària auxiliar, cadascuna amb el seu propi temps mitjà diari de funcionament i diferent de l'indicat per a l'equip de posada en obra.



# CÀLCULS

## Càlcul i presentació de resultats



Matèries primeres

Fabricació

Posada en obra

**Càlculs**

Reiniciar 

### Identificació

Denominació de la opció en càlcul

Test 1

### Abast de l'estudi

Categoria d'impacte	Unitat	Selecció
Matèries primeres totals (MPT)	kg	<input type="checkbox"/>
Esgotament de recursos abiòtics (RABT)	kg Sb eq.	<input type="checkbox"/>
Demanda acumulada d'energia (DEA)	MJ	<input type="checkbox"/>
<b>Indicador de canvi climàtic (ICC)</b>	<b>kg CO<sub>2</sub> eq.</b>	<input checked="" type="checkbox"/>
Acidificació (ACD)	Mol H <sup>+</sup> eq.	<input type="checkbox"/>
Eutrofització (EUT)	g PO <sub>4</sub> eq.	<input type="checkbox"/>
Formació d'oxidants fotoquímics (FOF)	g etileno eq.	<input type="checkbox"/>
Recuperació de residus (MPT-RES)	kg	<input type="checkbox"/>

### Presentació de resultats

Histograma i variables

(dos o mes categories)

Gràfica radial

### Calcular y guardar

Guardar configuració Alternativa 1 ▾

**Resultats**

Abans d'obtenir els resultats es recomana identificar l'alternativa que s'està calculant al quadre "Identificació" i indicar la posició en la qual apareixerà a l'histograma en el quadre "Calcular i guardar".

# RESULTATS

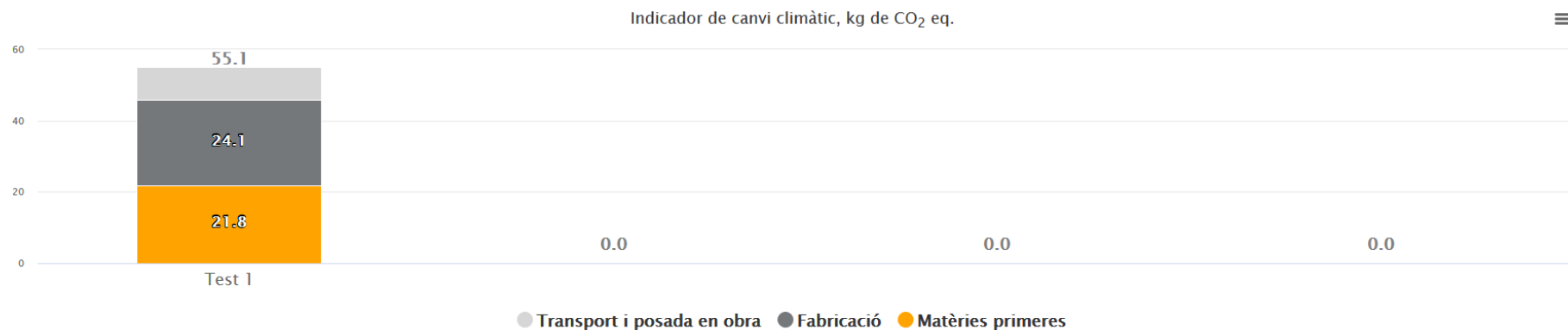
Poden comparar-se fins a quatre alternatives de producció simultàniament, ordenades segons s'hagi indicat en el formulari de càlcul.

Des d'aquesta pantalla es pot tornar a qualsevol de les anteriors per efectuar un nou càlcul. No cal passar per tots els formularis i es pot anar únicament al que requereixi ser modificat. ECCO2 conservarà tots els valors no modificats i presentarà com a nova alternativa en càlcul l'obtinguda amb qualsevol modificació parcial.

## Resultats i resum de variables utilitzades en els càlculs



- Matèries primeres
- Fabricació
- Posada en obra
- Resultats**
- Imprimir
-  Reinicier 



# RESULTATS

Matèries primeres i el seu transport		Fabricació en central		Transport i posada en obra	
	Test 1		Test 1		Test 1
1 Àrid fi 1, proporció (%)	40	1 Altitud snm (m)	<500	1 Distància central obra	60
2 Àrid fi 2, proporció (%)	10	2 Capacitat (t/h)	220	2 Rendiment diari	800
3 Àrid gruix 1, proporció (%)	20	3 Producció diària (t)	800	3 Minves de posada en obra (%)	2.5
4 Àrid gruixut 2, proporció (%)	20	4 Funcionament diari (h)	6	4 Espessor de capa, mm	50
5 Minves a apilament o transport, (%)	3	5 Actuació sistema escalfament (h)	4	5 Densitat de la capa compactada (t/m3)	2.4
6 Àrid fi 1, natura	triturat	6 Combutible assecador	Fuel	6 Unitat funcional	1
7 Àrid fi 2, natura	no triturat	7 Motors de la central, font	Grup electrogen	7 Silo de transferència, tipus	ROAD SB2500
8 Àrid gruix 1, natura	triturat	8 Escalfament de lligants, sistema	Caldera de Fuel	8 Estenedora 1, tipus	SUPER 1900
9 Àrid gruixut 2, natura	triturat	9 Grup electrogen, combustible	Gasoil	9 Estenedora 2, tipus	NO
10 Àrid fi 1, distància (km)	5	10 Pala carregadora, model	CAT 950 M	10 Compactador tàndem 1, tipus	CC 4200
11 Àrid fi 2, distància (km)	15	11 Paga crèdit	Stage II (Tier 2)	11 Compactador tàndem 2, tipus	NO
12 Àrid gruix 1, distància, (km)	60	12 Grup electrogen, motor	Convencional	12 Compactador tàndem 3, tipus	NO
13 Àrid gruixut 2, distància (km)	60	13 Àrid fino1, humitat (%)	2.5	13 Compactador de pneumàtics 1, tipus	24 - 30 t
14 Pols mineral, proporció (%)	2	14 Àrid fi 2, humitat (%)	2.5	14 Compactador de pneumàtics 2, tipus	NO
15 Additiu 1, proporció (%)	0	15 Àrid grueso1, humitat (%)	1	15 Fresadora, tipus	W100 Ri
16 Additiu 2, proporció (%)	0	16 Àrid gruixut 2, humitat (%)	1	16 Barredora, tipus	S 510
17 RAP, proporció (%)	10	17 RAP, humitat (%)	5	17 Equip d'estès (h)	8
18 Betum contingut RAP (%)	4	18 Aigua de procés (%)	0	18 Fresadora, temps (h)	2
19 Betum residual lligant bituminós (%)	100	19 Humitat residual (%)	0	19 Barredora, temps (h)	4
20 Betum total en la barreja (%)	4.6	20 Fracció a la mescladora	Cap	20 Vehicls, motor	Euro II
21 Betum nou en la barreja (%)	5	21 Temperatura ambient (°C)	20	21 Maquinària, motor	Stage II (Tier 2)
22 Pols mineral, naturalesa	calcari	22 Temperatura dels àrids	15		
23 Additiu 1, natura	NO	23 Temperatura RAP	15		
24 Additiu 2, natura	NO	24 Temperatura lligant bituminós	150		
25 RAP, natura	RAP classificat	25 Temperatura aigua de procés	15		
26 Betum nou, natura	PMB 45/80-65	26 Temperatura de gasos	115		
27 Pols mineral, distància (km)	110	27 Temperatura de la mescla bituminosa	165		
28 Additiu 1, distància (km)	110				
29 Additiu 2, distància (km)	90				
30 RAP, distància (km)	15				
31 Betum nou, distància (km)	160				
32 Vehicls, càrrega neta (t)	24				
33 Vehicls, estàndard motor	Euro I				
34 Vehicls, consum (l/100 km)	30.1				

# APÈNDIX

**Taula A1:** Procedència de les Dades d'Inventaris de Cicle de Vida utilitzats.

PRODUCTE	FONTS DE LES DADES D'INVENTARI
Àrids classificats	ECOINVENT [1] y EPLCA [2]
Àrids triturats	ECOINVENT [1] y EPLCA [2]
Àrids reciclats	CAVIT 2002 [1]
Àrids siderúrgics	CAVIT 2002 [1]
RAP sense tractament	Només impactes associats al seu transport
RAP classificat	Elaboració pròpia a partir de dades d'ECOINVENT i Stripple [3]
RAP triturat i classificat	Elaboració pròpia a partir de dades d'ECOINVENT
Betum de penetració, <sup>4</sup> t	EUROBITUME [4]
Betums modificats amb polímers	EUROBITUME per PMB 45/80-65. Elaboracions pròpies basades en EUROBITUME per altres betums modificats.
Betums millorats amb cautxú	Elaboracions pròpies basades en EUROBITUME
Betums modificats amb cautxú	Elaboracions pròpies basades en EUROBITUME
Betums d'alta viscositat amb cautxú	Elaboracions pròpies basades en EUROBITUME
Emulsions	EUROBITUME

PRODUCTE	FONTS DE LES DADES D'INVENTARI
Emulsions modificades	EUROBITUME i elaboració pròpia
Ciment	EPLCA
Calç viva	EPLCA
Hidròxid càlcic	Elaboració pròpia basada en Calç viva d'EPLCA
Fibres de cel·lulosa	Shen i Patel [5]
Zeolites sintètiques	Fawer [6]
Pols de NFU	Només impactes associats al seu transport
Gasoil calderes	ENERTRANS [7], Inventaris Nacionals del MITECO, CORINAE, CONCAWE, IPPC i EPA [8] i elaboracions pròpies.
Gasoil vehicles de carretera	ENERTRANS, EMEP-EEA [9]
Gasoil maquinària d'obra, grups.	ENERTRANS, NRMM [10]
Fuel <sup>5</sup>	ENERTRANS, Inventaris Nacionals del MITECO, CORINAE i EPA [8] i elaboracions pròpies.
Gas natural <sup>5</sup>	ENERTRANS, Inventaris Nacionals del MITECO, CORINAE i EPA, i elaboracions pròpies.
Energia elèctrica <sup>5</sup>	MINETUR [7] , EURELECTRIC [8] i elaboracions pròpies

# APÈNDIX

**Taula A2:** Models de càlcul per obtenir entrades i sortides en els PU1, PU2, PU3

<b>PU 1: APROVISIONAMENT I TRANSPORT DE MATÈRIES PRIMERES</b>	
Consums d'àrids classificats, de trituració, RAP i pols mineral (mi, kg)	$m_i = 1000p_i(1-b_t)(1+\mu)(1+\varepsilon)$
Consums RAP, fibres, CaO, Ca(OH) <sub>2</sub> , zeolites naturals/sintètiques, NFU. (mi, kg)	$m_i = 1000p_i(1+\varepsilon)$
Consums d'activants, surfactants, reductors de viscositat (mi, kg)	$m_i = 1000p_i(1+\varepsilon)$
Consum lligant bituminós (m9, kg)	$m_9 = 1000 \frac{p_9}{b_t}(1+\varepsilon)$
Consum de gasoil en el transport de matèries primeres (g1, l)	$g_1 = 8 \cdot 10^{-4} c_t \sum_{i=1}^9 m_i d_i$
Residus generats en els subprocessos anteriors (r1, kg)	$r_1 = \mu(1+\varepsilon) \sum_{i=1}^4 m_i$

# APÈNDIX

**Taula A2:** Models de càlcul per obtenir entrades i sortides en els PU1, PU2, PU3

<b>PU 2: FABRICACIÓ EN CENTRAL</b>	
Consum de combustible en la central de fabricació (f, kg)	$f = \frac{1}{PC_f} (\Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 + L)$
Variació d'entalpia dels components de la mescla bituminosa (DH1, kJ)	$\Delta H_1 = \frac{1}{1+\mu} \sum_{i=1}^4 m_i (T_{MB} - T_i) CE_i + \sum_{i=5}^9 (T_{MB} - T_i) CE_i$
Variació d'entalpia de l'aigua introduïda amb els components de la mescla bituminosa (DH2, kJ)	$\Delta H_2 = \left( \frac{1}{1+\mu} \sum_{i=1}^4 m_i w_i (T_e - T_i) + \sum_{i=5}^9 m_i w_i (T_e - T_i) + 1000 \cdot w_{10} (T_e - T_{10}) \right) CE_w$
Energia de canvi d'estat de l'aigua (DH2, kJ)	$\Delta H_3 = \left( \frac{1}{1+\mu} \sum_{i=1}^4 m_i w_i + \sum_{i=5}^9 m_i w_i + 1000 (w_{10} - w_r) \right) E_w$
Aigua de procés en mescles temperades amb betum (w10, %)	$w_{10} = 1000 \cdot (1,5 (1 - b_n) - w_{11})$ $w_{11} = 1000 (1 - \mu) m_1 w_1 \text{ ó}$ $w_{11} = 1000 (1 - \mu) m_2 w_2 \text{ ó}$ $w_{11} = 1000 m_8 w_8 *$
Humitat residual, mescles bituminoses amb betum, TMB $\geq 140^\circ$ C, (wres, %)	$w_r = 0$
Humitat residual, mescles bituminoses amb betum, TMB $< 140^\circ$ C, (wres, %)	$w_r = 0,5 - \frac{T_{MB} - 90}{100}$
Humitat residual, mescles bituminoses amb emulsió (wres, %)	$w_r = 1,0 - \frac{T_{MB} - 90}{100}$

\*Segons el material seleccionat per la seva introducció directa en la mescladora de la central

# APÈNDIX

**Taula A2:** Models de càlcul per obtenir entrades i sortides en els PU1, PU2, PU3

PU 2: FABRICACIÓ EN CENTRAL	
Pèrdues de calor (L, kJ)	$L = L_1 + L_2 + L_3 + L_4$
Pèrdues de calor en els fums, pel vapor d'aigua produït pels components de la mescla i aigua de procés (L1, kJ)	$L_1 = \left(\frac{1}{1+\mu} \sum_{i=1}^4 m_i w_i + \sum_{i=5}^9 m_i w_i + 1000(w_{10} - w_i) \cdot (T_n - T_o)\right) CE_o$
Pèrdues de calor en els fums, productes de la combustió (L2, kJ)	$L_2 = (f + (1+\alpha) a_{es} \cdot (1+\varphi))(T_n - T_o) CE_o$
Pèrdues de calor per radiació i conducció (L3, kJ)	$L_3 = k_1 t (T_1^4 - T_o^4) + k_2 t (T_2^4 - T_o^4)$
Energia invertida en escalfament d'elements de la central (L4, kJ)	$L_4 = \frac{n_2+1}{n_1} m_i (T_3 - T_o) CE_o$
Consum d'energia elèctrica de la xarxa (Ee, kJ)	$E_e = \frac{3600}{n_2} (P_1 h_1 - P_2 h_2)$
Consum de combustible en la caldera d'oli tèrmic (g2c, l)	$g_{2c} = \frac{1}{n_2} P_3 h_3 c_3$
Consum de gasoil en grup electrògen i pala carregadora (g2, l)	$g_2 = \frac{1}{n_2} P_4 h_4 c_4 + P_5 h_5 c_5$
Residus generats en el procés unitari 2 (r2, kg)	$r_2 = \frac{1}{1+\varepsilon} (\sum (m_i + m_j + m_k) - 1000$

# APÈNDIX

**Taula A2:** Models de càlcul per obtenir entrades i sortides en els PU1, PU2, PU3

<b>PU 3: TRANSPORT I POSADA EN OBRA DE LA MESCLA BITUMINOSA</b>	
Consum de gasoil total (g3, l)	$g_3 = g_{31} + g_{32} + g_{33}$
Consum de gasoil en el transport de mescla bituminosa (g31, l)	$g_{31} = 0,8(1 + \varepsilon) c_t d$
Consum de gasoil de la maquinària d'estès i compactació (g32, l)	$g_{32} = \frac{C_m}{n_3} \sum_{i=6}^{14} P_i h_i$
Consum de gasoil de l'equip de fresat i escombrat (g33, l)	$g_{33} = \frac{C_m}{n_3} \sum_{i=15}^{16} P_i h_i$
Residus generats en els subprocessos anteriors (r3, kg)	$r_2 = 1000 \varepsilon$



# APÈNDIX

Taula A3: Símbols i valors utilitzats

SÍMBOL	DESCRIPCIÓ	OBSERVACIONS
$p_1, p_2, p_3, p_4$	Proporcions ponderals de quatre fraccions d'àrids , sobre massa d'àrids.	Variables independents
$p_5$	Proporció ponderal de pols mineral d'aportació, sobre massa d'àrids.	Variables independents
$b_t$	Betum total present en la mescla bituminosa, expressat com a proporció ponderal sobre mescla.	Variable independent
$\mu$	Proporció ponderal de minves produïdes durant el transport o en els aplecs d'àrids.	Variable independent
$\varepsilon$	Proporció ponderal de pèrdues de mescla bituminosa en retallades, juntes i sobrants de posada en obra.	Variable independent
$b_n$	Betum nou introduït en la mescla bituminosa, expressat com a proporció ponderal sobre mescla.	Variable dependent
$b_r$	Betum residual en el nou lligant bituminós expressat com a percentatge ponderal sobre la massa de betum nou	Variable dependent
$p_6, p_8$	Proporcions ponderals de RAP i aditiu sobre massa de mescla.	Variables independents
$p_7$	Proporció d'aditiu surfactant o modificador de viscositat sobre massa de betum nou.	Variable dependent
$p_9$	Betum nouo introduït en la mescla bituminosa, expressado com a proporció ponderal sobre mescla.	Variable dependent
$c_t$	Consum mitjà de gasoil dels vehicles de transport, mesurat en l/100 km	Variable dependent, funció de la classe Euro.
$d_i$	Distància de transport fins la central de fabricació d'àrids, pols mineral, aditius i lligant bituminós	Variables independents
$PCI_f$	Poder calorífic inferior (kJ/kg)	Variable dependent. Funció del combustible

# APÈNDIX

Taula A3: Símbols i valors utilitzats

SÍMBOL	DESCRIPCIÓ	OBSERVACIONS
$T_{MB}$	Temperatura de descàrrega de la mescla bituminosa	Variable independent
$T_i$	Temperatures inicials dels components de la mescla bituminosa.	Variables independents
$T_a$	Temperatura ambient	Variable independent
$T_e$	Temperatura mitja a la qual es produeix l'evaporació de l'aigua .	Variable independent. Valor per defecte $T_e=90^\circ \text{C}$
$T_h$	Temperatura de sortida de fums.	Variable independent. Valor per defecte $T_e=135^\circ \text{C}$
$T_1$	Temperatura interior a efecte de càlcul de pèrdues per radiació i conducció.	Variable independent. Valor per defecte $T_1=T_{MB}$
$T_2$	Temperatura exterior a efecte de càlculs de pèrdues per radiació i conducció.	Variable independent. Valor per defecte $T_2=T_a$
$CE_i, CE_w, CE_v, E_w$	Constants calòriques	Segons taula A.3
$w_i$	Humitats dels components de la mescla bituminosa en percentatge de les respectives masses seques	Variables independents
$a$	Proporció d'aire en excés sobre el estequiomètric	Variable independent. Valors per defecte, taula A.4
$a_{es}$	Aire estequiomètric de la reacció de combustió	Variable dependent. Segons taula A.5
$j$	Fuites d'aire, proporció ponderal sobre aire estequiomètric + aire en excés sobre el estequiomètric	Variable independent. Valor per defecte $j=5\%$
$k_1$	Coefficient que expressa la proporció de calor perdut per radiació	Variable independent. Valor per defecte $k_1=0$
$k_2$	Coefficient de pèrdues de calor per conducció que agrupa els efectes de conductivitat del material i superfície i gruix de transmissió.	Variable independent. Valor per defecte $k_2=0,00075 \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$
$m_c$	Massa d'acer equivalent emprada per a calcular la energia invertida en escalfar la central cada operació d'arrancada.	Variable independent. Per defecte, valors taula A.6
$d$	Distància de transport de mescla de central a obra	Variable independent

# APÈNDIX

Taula A3: Símbols i valors utilitzats

SÍMBOL	DESCRIPCIÓ	OBSERVACIONS
$P_1$	Potència dels motors elèctrics de la central	Variable independent. Per defecte, valors taula A.6
$P_2$	Potència del sistema d'escalfament elèctric	Variable independent. Per defecte, valors taula A.6
$P_3$	Potència de la caldera de fluid tèrmic	Variable independent. Per defecte, valors taula A.6
$P_4$	Potència del grup electrògen	Variable independent. Per defecte, valors taula A.6
$P_5$	Potència de la pala carregadora	Funció del model seleccionat
$P_i$	Potència de les màquines d'estès i compactació ( $i=6$ a $14$ )	Funció del model seleccionat
$P_i$	Potència de les màquines de fresat i escombrat ( $i=15$ a $16$ )	Funció del model seleccionat
$h_1$	Hores diàries de funcionament de la central de fabricació	Variable independent
$h_2$	Hores diàries de funcionament del sistema elèctric d'escalfament de lligants	Variable independent
$h_3$	Hores diàries de funcionament de la caldera de fluid tèrmic	Variable independent
$h_4$	Hores diàries de funcionament del grup electrògen	Variable independent, per defecte, $h_3=h_1$
$h_5$	Hores diàries de funcionament de la pala carregadora	Variable independent, per defecte, $h_5=h_1$
$h_i$	Hores diàries de funcionament de l'equip d'estès i compactació ( $i=6$ a $14$ )	Variables independents, per defecte, $h_6=h_7=\dots=h_{14}$
$h_i$	Hores diàries de funcionament de l'equip fresat i escombrat ( $i=15$ a $16$ )	Variables independents
$n_1$	Producció diària de la central de fabricació (t)	Variable independent
$n_2$	Aturades diàries de la central (ud)	Variable independent
$n_3$	Producció diària de l'equip de posada en obra (t)	Variable independent

# APÈNDIX

Taula A4: Constants calòriques considerades

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	$\text{kJ}/\text{k}\cdot^\circ\text{K}$

# APÈNDIX

**Taula A5:** Valors de les variables  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$  i  $m_c$  assignades per defecte

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

# APÈNDIX

**Taula A6:** Poder calorífic inferior (PCI) i valors d'aire estequiomètric ( $a_{es}$ ), composició dels gasos de combustió i aire en excés sobre estequiomètric ( $\alpha$ ), assignats per defecte

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

## REFERÈNCIES

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.

## ACCÉS, COMENTARIS I CONSULTES

Es pot accedir a ECCO2 des del web d'ARNÓ [www.arno.es](http://www.arno.es) i també mitjançant l'enllaç directe <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](mailto:ecco2@arno.es).

## AGRAÏMENTS

ARNÓ va iniciar el 2017 un projecte de recerca denominat ASFALTMIN (mescles asfàltiques de mínimes emissions i demanda energètica) amb l'ajuda de CDTI (Centre per al Desenvolupament Tecnològic i Industrial del Ministeri d'Economia i Competitivitat). El present estudi, juntament amb el desenvolupament de l'eina de càlcul ECCO2, ha constituït la seva primera activitat. Els autors volen agrair a CDTI l'ajuda prestada.



# EINA DE CÀLCUL DE L'IMPACTE AMBIENTAL DE LES MESCLES BITUMINOSES



[www.arno.es](http://www.arno.es)  
Tel. (+34) 973 243 262

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

SEU SOCIAL, PARC DE  
MAQUINÀRIA I TALLERS  
Carretera de Tamarite, 3-13  
25120-ALFARRÀS (Lleida)

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