



## Mescles asfàltiques reciclades amb biolligants rejoyenidors

Marta Domènech Miquel, Sorigué

Núria Querol, Sorigué

Gerard Carlo Cabré, Sorigué

Jordi Janot Feliu, Servei Territorial de Carreteres de Lleida, del Departament de Territori

### Introducció

En el marc del contracte de compra pública d'innovació gestionat per la Generalitat de Catalunya, l'empresa SORIGUÉ S.A. ha dut a terme la redacció del projecte i l'execució de l'obra "Millora del ferm a la L-902 del PK 0+360 al 13+060 tram: Almacelles- límit amb província d'Osca". (Clau SC-CFC-19027.9). El contracte forma part del Pla de Ferms Sostenibles i marcava com aspecte innovador a abordar la consideració de mescles amb biolligant.

La solució s'ha concretat en la fabricació i l'execució d'una mescla bituminosa fabricada en calent contemplat l'addició d'un 20 % de material fresat en la seva composició i la inclusió de biolligants amb propietats rejoyenidores en el lligant d'aportació.

En el present estudi es recullen aspectes relacionats amb la fase de disseny, execució i caracterització de la solució aportada, comparant la mateixa amb la solució de referència considerada.

### Context

El Plec de prescripcions particulars preveia que la mescla innovadora fabricada, a més d'una major sostenibilitat en relació amb les mescles bituminoses convencionals, permetés avançar en l'ús d'additius rejoyenidors d'origen biològic i contemplés la valoració de subproductes.

Al mateix temps definia que per a la formulació, la fabricació, el transport i la posada en obra de les mescles amb biolligants, objecte d'aquest plec, calia tenir en compte les conclusions del projecte d'investigació denominat "*Use of eco-friendly materials for a new concept of Asphalt Pavements for a Sustainable Environment*", finançat per la Comissió Europea i liderat per un consorci d'11 entitats de 5 països de la UE.

En aquest projecte es considerava l'addició d'un biolligant que permetés recuperar les propietats reològiques del lligant final d'una mescla bituminosa en calent, fabricada amb l'addició d'un 20 % de mescla bituminosa reciclada. Fonamentalment, el paper previst per l'addició del biolligant rejoyenidor és el de reducció del mòdul del lligant en condicions de prestació de servei i viscositat del lligant en temperatures de mesclat i compactació.

D'altra banda, el projecte referit considerava l'ús de lignina com a possible agent modificador del lligant. La modificació del betum a base de lignina en substitució de polímers requereix del pas de lligant per molí col·loidal per a la seva incorporació efectiva. En el desenvolupament dels treballs recollits pel projecte d'investigació no es va contemplar la fabricació industrial de la solució, fet que va propiciar que únicament fos prevista la inclusió del biolligant considerant les funcions rejoyenidores que pogués aportar.



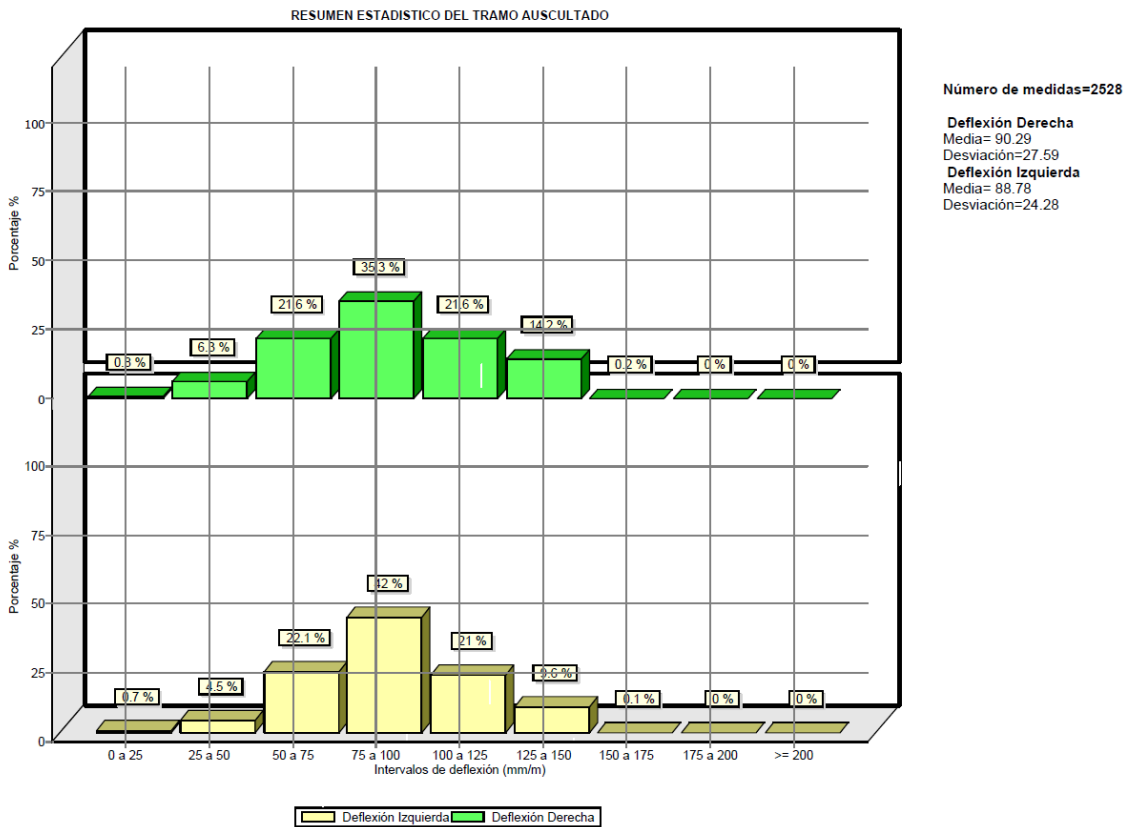
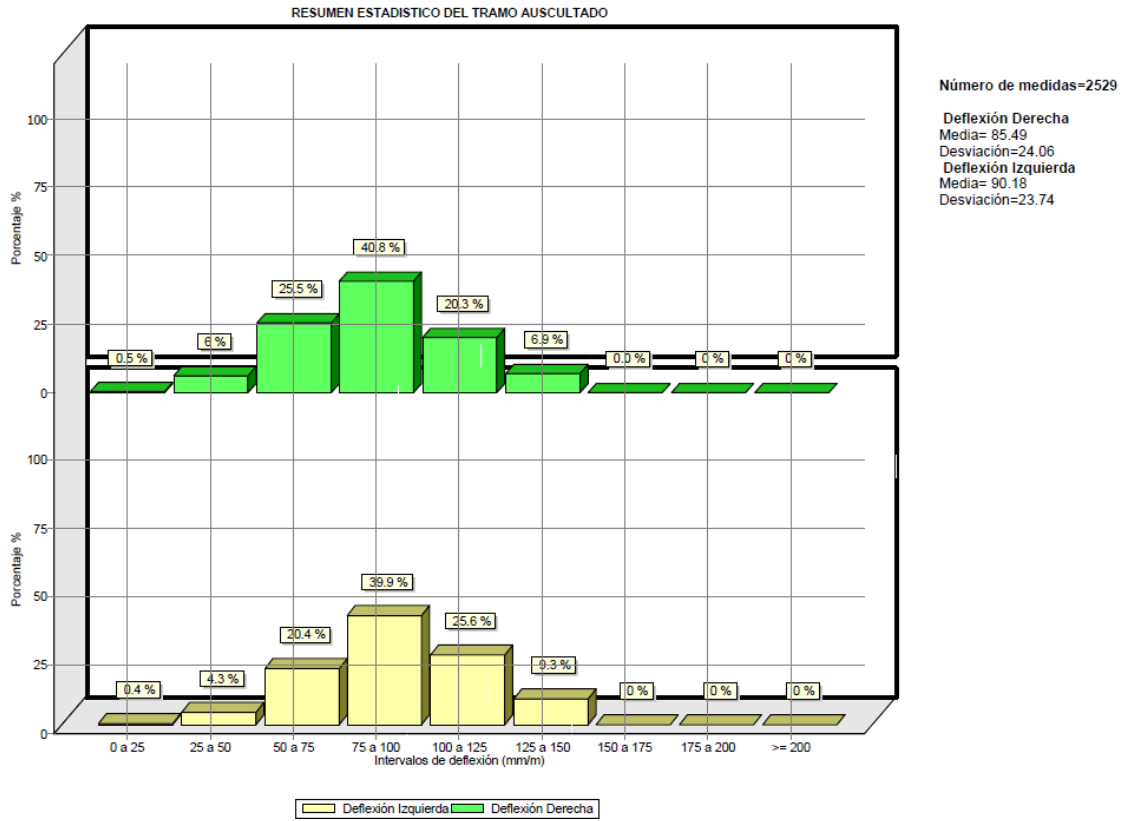
Tenint en compte que els indicadors establerts pel seguiment de la mescla innovadora inclouen l'auscultació i la mesura de prestacions superficials, es va establir com a indispensable que la mescla innovadora fos aplicada en superfície.

No obstant això, l'estat previ de la via i el seu nivell d'esgotament estructural ens induïa a la necessitat d'intervenció en capa de base. La inspecció visual de la carretera indicava que, de manera generalitzada, la capa de rodament es trobava esgotada i presentava graus similars de fissuració, independentment del carril. També s'observaven deformacions geomètriques homogènies, en forma de petits assentaments a les rodes de trànsit a tota la via.



Imatge 1. Detall de l'estat previ de la via

L'avaluació de les deflexions en assaig previ mostra la següent distribució:



Imatge 2. Distribució de deflexions en estudi previ en unitats mm/100



Tot i que de manera general l'aplicació de la norma 6.3 ens indica que a priori no cal una rehabilitació estructural general, la inspecció visual certifica la necessitat d'actuació sobre la totalitat del ferm asfàltic existent, pel seu estat avançat de fissuració. Per a l'estudi de la solució cal tenir en compte que la mateixa norma indica que en els casos d'actuació d'aquesta tipologia que superin els 70.000 m<sup>2</sup> es recomana, entre altres solucions, el reciclatge de la capa deteriorada. Aquesta solució queda recollida a la norma per a categories de trànsit de T2 a T4 amb la condició de disposar sobre el reciclatge d'una capa de mescla bituminosa en calent tipus densa (D) o semidensa (S).

L'estudi previ del ferm posa de manifest que el paviment asfàltic està compost per una única capa, tot i que s'evidencia la presència de tractaments superficials posteriors, executats amb la finalitat de segellar les fissures o corregir les deformacions o irregularitats en el pla de rodament.

### **Definició de la solució**

L'estudi de les diferents alternatives va permetre concloure com a solució més escaient des del punt de vista tècnic, econòmic i ambiental, el reciclat en fred in situ del ferm existent.

Va ésser considerada la previsible afectació per nivells de saturació d'aigua elevats en capes de base per existència de camps en regadiu en el perímetre de la via. Els nivells, doncs, de deflexió previstos, ens conduïen a la definició d'un ferm amb mescles eminentment flexibles.

La capa reciclada seria posteriorment coberta per la mescla innovadora, dissenyada per dotar a la via de prestacions superficials escaients, i per tal de permetre un repartiment de les càrregues puntuals suportades per la capa reciclada.

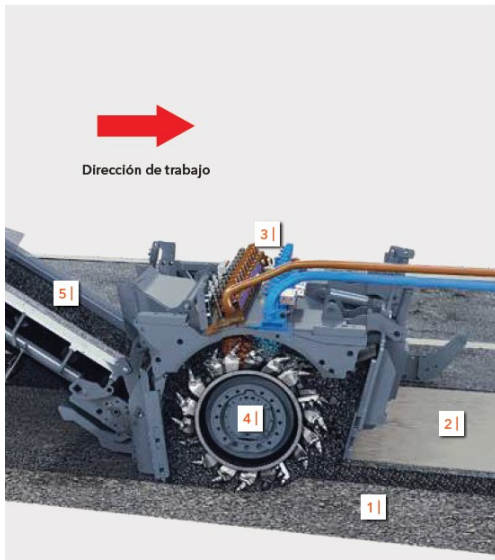
El reciclat in situ de la capa existent permetria el tractament dels 6 cm superficials de la carretera i s'executaria mitjançant la tècnica de reciclat en fred amb emulsió. Per a la seva execució, i també com a innovació, es disposaria d'un equip de reciclat d'última generació (W 240 CRi ) que aportaria importants novetats:

#### **1. Sistema de fresat:**

Els equips habitualment emprats per realitzar tasques de fresat presenten un mecanisme de tambor amb piques que avança en sentit rotatiu, fent avançar la pica de baix cap a dalt en el paviment durant el seu fresat. D'aquesta manera s'aprofita la debilitat provocada per les fissures de la part superior de la capa. Es permet doncs un menor desgast de les piques.

No obstant això, aquesta optimització des del punt de vista de desgast suportat per les piques compromet l'homogeneïtat granulomètrica del material fresat, ja que la mida del material resultat serà diferent en funció de l'estat del ferm i presentarà una mida màxima nominal major que la que seria conferida únicament per l'acció molturadora de la fresadora.

L'equip dissenyat per a la execució del reciclat en fred permet el fresat en sentit invers, atacant el ferm des de la capa superior, i sent la distància entre piques l'element que condiciona pràcticament de manera unívoca la mida del material fresat resultant.



Imatge 3. Detall del sistema de fresat en l'equip

## 2. Estesa de la mescla:

La segona de les variacions rellevants que aporta l'ús d'aquest equip és el sistema d'aplicació de la mescla. En els equips tradicionalment emprats l'estesa de la mescla és realitzada pel mateix equip de reciclat, gràcies a una mestra existent a la part posterior de l'equip.

En aquest cas, la recicladora disposa d'un equip de transferència que transporta la mescla reciclada fins a la sitja d'una estenedora convencional.



Imatge 4. Detall operació de transferència de la mescla reciclada

Aquesta operació permet incloure dues importants variacions respecte a les condicions d'execució convencionals. En primer lloc, permet estendre a tot l'ample de carril, tal i com succeeix habitualment amb mesclures asfàltiques en calent, i l'ample d'estesa no es limita a l'ample permès per la pròpia recicladora, que requereix habitualment la realització de dues passes per carril.

Tot i que es habitual el reciclat amb avenç de dues màquines en paral·lel que evita la formació de junta, l'estesa en aquestes condicions permet un major grau d'homogeneïtzació del material estès i una major planimetria, tant transversal com longitudinal, per l'aportació en una única actuació de tot l'ample del carril i per l'estesa i precompactació de la mescla amb mitjans més potents.

Per tal que la recicladora abordés en una única passada tot l'ample del carril, es va preveure el fresat d'una franja lateral i la deposició d'un cordó sobre el paviment a reciclar just abans del pas





de l'equip. La fabricació de la mescla en un única passada per tot l'ample també millora l'homogeneïtzació de la mescla.

Un altre dels avantatges proporcionats pel sistema va ser l'increment del rendiment en l'execució de la unitat d'obra i, per tant, la reducció d'afectació als usuaris.

D'altra banda, la bona regularitat que previsiblement es podia aconseguir amb aquest equip de nova generació, va permetre el disseny d'una mescla en rodament d'espessor reduïda, aconseguint d'aquesta manera l'encaix tècnic-econòmic de la solució global. Cal recordar que el ferm disposava inicialment d'un gruix d'uns 6 cm d'espessor. L'actuació de reciclat del ferm en aquests 6 cm, considerant el factor d'equivalència previst en la normativa tècnica estatal vigent, representa 4,5 cm i, per tant, l'aplicació de 3 cm de mescla permetia garantir i superar l'espessor de mescla considerada en el disseny inicial amb escreix.

A fi de garantir prestacions adequades en servei pel que fa a textura i coeficient de lliscament, i tenint en compte el requeriment d'inclusió de mescla reciclada en taxa del 20 %, la granulometria considerada fou una mescla tipus AC11 S.

## **Disseny de la mescla**

### **Reciclat en fred amb emulsió**

Per a la correcta execució del reciclat en fred, es fonamental un disseny escaient de la solució, fonamentat en un estudi previ del paviment a reciclar i en la definició d'una formulació adequada de la mescla, tot seleccionant una emulsió compatible.

La caracterització del ferm existent es va realitzar en diverses fases segons el procediment següent:

1. Inspecció visual prèvia per tal de definir trams amb comportament potencialment diferencial.

Aquesta primera inspecció va concloure que el ferm presentava un grau de fissuració molt elevat i generalitzat, especialment intens en la zona de rodada. S'observava una major intensitat de les actuacions de reparació en els primers 3,5 km de la via en el carril dret, amb zones on s'observava despreniment de material.





Imatge 4 i 5. Detall de l'estat inicial del ferm

A més de la inspecció visual a camp, es realitza una anàlisi de les dades prèvies sobre el paviment. Es disposava de fotografies dels testimonis que permetien extreure informació sobre el nombre i tipus de capes i sobre l'espessor de les mateixes. Aquells testimonis que corresponien als punts quilomètrics en els que es va identificar la realització d'actuacions d'intervenció en camp també evidenciaven la presència d'una petita capa superficial. Tot i que el gruix era en general bastant uniforme, destacava la presència d'un testimoni amb gruix considerablement més elevat que la resta.

A la vista d'aquesta informació es va planificar la realització d'una campanya d'extracció de testimonis, per tal de confirmar la informació relativa a gruix i presència d'actuacions de reparació superficial.

2. Valoració del ferm existent a partir de l'anàlisi de testimonis i definició de zones potencialment homogènies.

L'extracció de testimonis va permetre la confirmació de les espessors de la capa existent i la definició de la tipologia de mescla i àrids existents en els diferents trams. En general el material emprat en la construcció del ferm és homogeni en tota la longitud de l'obra, essent una mescla tipus AC16 de granulometria gruixuda i una espessor mitja aproximada de 55 a 65 mm. També es confirma la presència de restes d'abeurada bituminosa aplicada posteriorment en intervencions de correcció de patologies. Destaca igualment la realització d'una actuació en els PK de 0 a 3,5, en la que es pretén la reparació de les deformacions en zona de rodera mitjançant un tractament superficial amb un àrid d'una naturalesa diferent al de la mescla de base.

A la vista d'aquesta informació es defineixen tres zones per a la extracció del material i la definició dels trams homogènies per a l'estudi i la definició de la fórmula de treball del reciclat.

3. Extracció de material del ferm existent per a la seva anàlisi i definició de zones homogènies.

L'extracció del material es realitza mitjançant l'ús de maquinària d'obra, tot cercant les condicions d'execució que permetin disposar d'un material de les característiques el més similar possibles al que serà obtingut durant el procés d'execució de l'obra.



Imatge 6. Detall de l'execució de sondatges en el paviment

El material enretirat va ser homogeneïtzat i reduït, tot garantint la representativitat fins assolir una massa d'assaig que permetés la caracterització. Els assaigs executats inclouen la caracterització de la granulometria del material fresat, la determinació del contingut de lligant del material, i les característiques del lligant recuperat.

Per tal de caracteritzar el lligant recuperat, es va realitzar la seva extracció mitjançant dissolució amb un dissolvent volàtil (Diclorometà) i, posteriorment, es va recuperar el lligant per destil·lació en condicions de baixa pressió per evitar oxidació del lligant.

Les dades assolides pels materials caracteritzats foren els següents:

Garbell	RE 2		Sondatge 1	Sondatge 2	Sondatge 3	Mitjana	Límits
32	100	100	100	100	100	100	+/- 6
22	80	100	100	97	97	98	
16	62	89	98	94	92	95	
8	49	77	78	72	72	74	
4	35	58	48	43	45	45	
2	19	42	30	25	27	27	+/- 3
0,5	2	20	12	8	8	9	
0,25	0	10	6	5	5	5	
0,063	0	3	2,6	1,1	1,1	1,6	+/- 1,5
Contingut de lligant			3,59	3,02	4,42	3,7	*
Penetració			4	7	7	6,0	*
Anell i bola			88,3	82,6	83	84,6	*

Taula 1. Caracterització del material a reciclar





Per tal de valorar l'homogeneïtat del material, es va realitzar, a més, la determinació de la humitat òptima i la densitat Proctor del material fresat. La caracterització d'aquest criteri va dur a la definició de dues seccions corresponents a materials homogenis.

	Sondtge 1	Sondtge 2	Sondtge 3	Mitjana	Límits
Densitat màxima	2,15	2,14	2,04	2,11	
Humitat òptima	6,8	6,5	5,6	6,3	
Humitat amb 3% emulsió	3,3	3,0	2,1	2,8	-1/+0,5
Humitat amb 3,5% emulsió	2,8	2,5	1,6	2,3	-1/+0,5

Taula 2. Caracterització d'humitat òptima i densitat Proctor del material

Per facilitar l'operativa durant l'execució de l'obra, es va tractar de dissenyar una formulació única per al reciclat que permetés obtenir una mescla reciclada adequada, a partir dels materials de les dues naturaleses identificades.

El primer pas per a la determinació de la fórmula de treball fou el disseny de l'emulsió. En conseqüència, es van considerar dos aspectes claus:

- **El grau d'envelliment del lligant recuperat:** els valors de penetració i anell i bola mostraven un elevat grau d'envelliment. L'aportació de lligant d'aportació es realitzaria de manera moderada, ja que una aportació elevada d'emulsió comprometria la sostenibilitat econòmica de la solució i comprometria l'estabilitat del ferm. Es va considerar doncs escaient la inclusió d'agents rejuvenidors en el lligant de l'emulsió que contribuïssin a recuperar l'equilibri del lligant finalment present en la mescla.
- **El sistema d'aplicació innovador de la mescla reciclada:** per les condicions d'execució anteriorment descrites, el temps de mesclat i transport de la mescla fins a la seva sortida per la regla de l'estenedora és superior al característic de solucions convencionals. La solució a aplicar requeria doncs que la mescla reciclada disposés d'un nivell de treballabilitat adequat transcorregut aquest temps de transició. Altrament, la planimetria de la capa i la compactabilitat de la mescla es veurien compromeses.

A més, es va considerar adequada la inclusió d'agents biolligants que contribueixen a l'increment de la cohesió de la mescla final i milloren l'adherència del nou lligant sobre el material granular reciclat.

La fabricació de diferents emulsions bituminoses i el seu tanteig previ, tot fabricant mescla reciclada, va permetre la selecció prèvia d'una emulsió bituminosa a partir de la qual es va passar a la determinació del percentatge d'aportació òptim dels diferents ingredients, a partir de la caracterització amb assaigs mecànics.



L'emulsió seleccionada disposava de les prestacions següents:

Característiques	Unidades	Norma	Especificación		
			Min.	Máx.	
<b>Características de la emulsión</b>					
Polaridad de las Partículas		UNE EN 1430	Positivo		
Contenido de ligante	Por contenido de agua	%	UNE EN 1428	58	62
	Por destilación		UNE EN 1431	58	-
Contenido de aceite destilado	%	UNE EN 1431	-	≤2	
Tiempo de fluencia, 2 mm a 40°C	s	UNE EN 12846	15	70	
Residuo de tamizado	tamiz 0.5 mm	%	UNE EN 1429	-	≤ 0.1
Índice de ruptura	-	UNE EN 13075-1	≥ 170		
Tendencia a la sedimentación (7 días)	%	UNE EN 12847	-	≤10	
Adhesividad	% cubrición	UNE EN 13614	≥90		
<b>Características del ligante recuperado por evaporación (EN 13074-1)</b>					
Penetración	0.1 mm	UNE EN 1426	≤ 220		
Punto de reblandecimiento	°C	UNE EN 1427	≥38		

Taula 2. Característiques de l'emulsió bituminosa per a reciclat en fred in situ

Pel que fa al disseny de la fórmula de treball del reciclat en fred, va tenir-se en compte el següent. La normativa 8/2001 havia estat el marc regulador de l'aplicació de tècniques de reciclat en obres de conservació fins a l'aparició de l'OC 40/2017. Segons la versió 2001, la determinació de la fórmula de treball preveia:

1. Determinació del contingut d'aigua a partir de la dada de % d'humitat òptima establerta mitjançant assaig de Proctor modificat sobre el material fresat
2. Determinació del contingut òptim a partir de l'assaig a immersió compressió de provetes fabricades i assajades segons la norma NLT-162, després d'un període de curat de 3 dies a 50°C, garantint els següents resultats:

TABLA 20.2.- VALORES MÍNIMOS DE RESISTENCIAS EN INMERSIÓN-COMPRESIÓN (NLT-162)

CATEGORÍA DEL TRÁFICO PESADO	EN SECO (MPa)	TRAS INMERSIÓN (MPa)	CONSERVADA (%)
T1 (sólo capas de base) y T2 y (1)	3	2.5	75
T3, T4 y arcenes	2.5	2	70

(1) Vías de servicio no agrícolas de autopistas y autovías interurbanas.

Imatge 7. Detall de requisits exigits en OC8/2001 per a disseny de mesclres RFE

La revisió de l'any 2017 aporta un seguit de canvis en l'annex referent a reciclat de mesclres en fred, i concretament per al disseny implica diferents canvis:

- Compactació de provetes amb compactació giratòria definint el nombre de cicles en funció de la corba del reciclat.
- Curat equivalent a les condicions de la versió anterior.

-Trencament amb tracció indirecta a 15°C segons norma 12697-12, requerint els següents resultats:

**TABLA 20.3 VALORES MINIMOS DE RESISTENCIA EN EL ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA (norma UNE-EN 12697-12)**

CATEGORIA DEL TRÁFICO PESADO	RESISTENCIA MEDIA (MPa) (**)		RELACIÓN DE RESISTENCIA (ITSR) (%)
	SECA (ITS <sub>d</sub> )	HÚMEDA (ITS <sub>w</sub> )	
T1 (CAPAS DE BASE) T2 Y (*)	1,7	1,3	75
T3, T4 Y ARCENES	1,2	0,9	70

(\*) Vías de servicio no agrícolas de autopistas y autovías interurbanas.

(\*\*) Sobre un número de probetas no inferior a tres (≥ 3) para cada tipo de resistencia.

Imatge 8. Detall de requisits exigits en OC40/2017 per a disseny de mesclres RFE

Des de l'aparició de la revisió de l'any 2017 es van realitzar nombrosos contrastos dels dos sistemes de disseny, per part de diferents laboratoris de les organitzacions que fabriquen, executen o controlen la qualitat de reciclats en fred. Aquests estudis van revelar que en cap cas era possible assolir els valors mínims de resistència requerits en la taula 20.3 per part de mesclres que s'ajustin a la definició de mesclres reciclades en fred, segons els paràmetres establerts per la mateixa normativa.

En conseqüència, des de l'Associació Tècnica d'Emulsions Bituminoses es va constituir un grup de treball, coordinat per Sorigué, per elaborar una proposta sectorial consensuada per a la revisió de la metodologia, i que pogués ser d'utilitat per a la revisió de la normativa.

A data d'avui, s'han realitzat tasques de contrast entre laboratoris per a diferents mesclres reciclades, per tal de validar la proposta elaborada i s'ha traslladat proposta sectorial per a la revisió de la normativa. Mentrestant, i per a l'execució del projecte, es va mantenir el mètode de disseny contemplat en versió de l'any 2001 de l'ordre circular.

Per a la validació de la fórmula de treball va ser caracteritzada la resistència conservada de la mescla amb diferents continguts d'emulsió, considerant el contingut òptim el 3,3 % d'emulsió aportada sobre àrid.

Els resultats de resistència assolits per als materials de les tres procedències van ser els següents:

	Sondtge 1	Sondtge 2	Sondtge 3	Límits	Límits
Densitat S.S.S.	2288	2264	2299		
Densitat Geom.	2284	2253	2303		
Resistència sec	3,23	3,36	3,46	2,5 ó 3	2,5 ó 3
Resistència humit	2,62	2,71	3,25	2 ó 2,5	2 ó 2,5
Resistència conservada	81,2	80,7	93,9	70 ó 75	70 ó 75

Taula 3. Valors de resistència seca, humida i conservada per a la formula de treball verificada

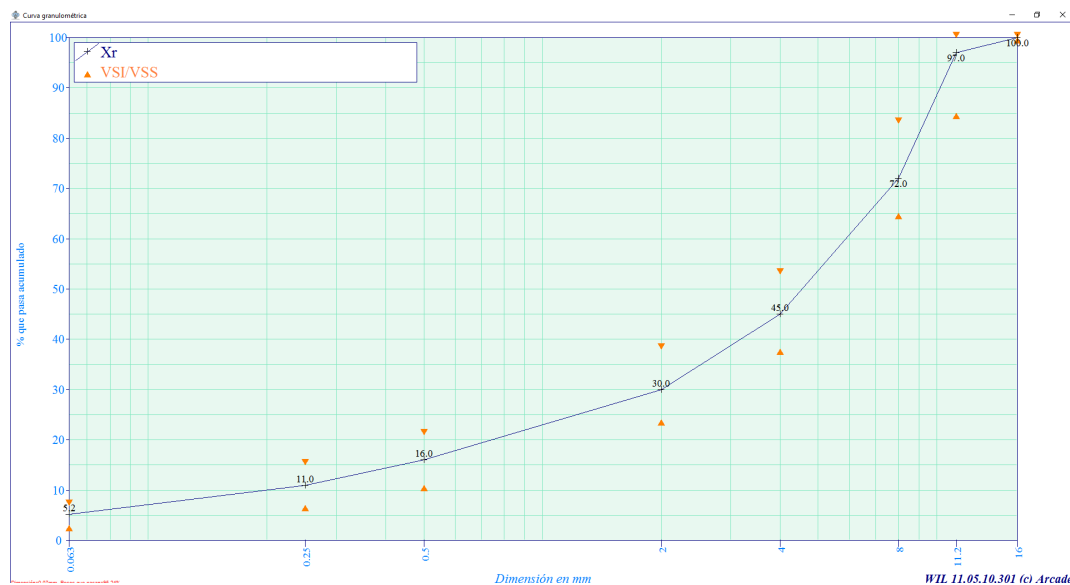
Es va considerar, doncs, una única fórmula de treball per a l'execució de la unitat.

## AC 11S 50/70 REJUV R20

La mescla seleccionada per a la execució de mescla de rodament, quant a granulometria, va tenir en compte les limitacions següents:

- Requeria disposar d'una taxa del 20 % de reciclat: la inclusió d'aquesta taxa ens conduïa a l'aplicació d'una capa de granulometria preferentment contínua i no excessivament exigent pel que fa als requisits granulomètrics i de forma de les partícules
- Les prestacions requerides com a capa de rodament, que exigien garantir uns requeriments mínims pel que fa a coeficient de lliscament i grau de macrotectura, i que van conduir a la selecció d'una mescla tipus S
- Les limitacions associades a l'extensió en una capa d'espessor reduïda, que van condicionar la selecció d'una capa amb mida màxima nominal 11 mm

La granulometria seleccionada no està inclosa en el catàleg de mescles recollides pel capítol 542 de PG3, però si formava part de les mescles incloses en el catàleg propi de Sorigué. Es presenta tot seguit el fus granulomètric característic de la mescla.



Imatge 9. Fus granulomètric i granulometria objectiu de la mescla AC11S

Un element diferencial respecte al disseny tradicional de mescles bituminoses va ésser la necessitat de seleccionar i caracteritzar el fresat a emprar. Per a la seva preparació, va considerar-se que la utilització del material estava prevista en capa de rodament. També la mida màxima nominal de la capa a fabricar fou un factor rellevant. Les característiques requerides per als àrids a emprar van demandar la necessitat de garantir la procedència de capes de rodament per a la mescla asfàltica a reciclar i, per tant, la selecció de l'origen del fresat. D'altra banda, la preparació del material es va fer tot desgranant i garbellant el material, assegurant una mida màxima inferior a 11 mm.

També va ser recuperat i caracteritzat el lligant del material a reciclar, per tal de definir la dosificació escaient de biolligant rejuvenidor.

Com a biolligant rejuvenidor, van ser considerades dues solucions que denominarem 1 i 2. La primera d'elles considerava l'addició del biolligant en les instal·lacions de Sorigué sobre un betum comercial. La segona contemplava l'ús d'un betum amb biolligant rejuvenidor desenvolupat i comercialitzat per Repsol, específicament per a l'execució d'aquesta obra.





Per a la validació del producte i la determinació de dotació es van realitzar proves sobre els lligants a recuperar, a addicionar i sobre la mescla final de lligants després de ser sotmesos a envelliment accelerat:

BIOLLIGANT 1	PEN (dmm)	A&B(° C)	VISCOSITAT (mPas)						
			150° C	155° C	160° C	165° C	170° C	175° C	180° C
<b>BETUM ORIGINAL</b>									
B50/ 70	55	50,7	252	208	179	140	119	101	85
B50/ 70+Bvell+ BIOLLIGANT 1	48	51,2	359	246	191	156	133	111	94
Bvell	12	77,8							
Bvell+ BIOLLIGANT 1	25	67,4							
<b>BETUM ENVELLIT RTFOT</b>									
B50/ 70	31	58							
B50/ 70+Bvell+ BIOLLIGANT 1	33	57,8							
<b>BETUM ENVELLIT RTFOT + PAV</b>									
B50/ 70	20	65							
B50/ 70+Bvell+ BIOLLIGANT 1	23	66							

BIOLLIGANT 2	PEN (dmm)	A&B(° C)	VISCOSITAT (mPas)						
			150° C	155° C	160° C	165° C	170° C	175° C	180° C
<b>BETUM ORIGINAL</b>									
B50/ 70 BIO 2	65	48,3	199	163	138	113	98	79	73
B50/ 70 BIO 2+Bvell	50	51,3	226	185	153	125	105	89	78
<b>BETUM ENVELLIT RTFOT</b>									
B50/ 70	31	58							
B50/ 70 BIO 2+Bvell	30	58,8							
<b>BETUM ENVELLIT RTFOT + PAV</b>									
B50/ 70	20	65							
B50/ 70 BIO 2+Bvell	24	65,8							

Imatge 10 i 11. Resultats de caracterització del betum additivat i mescla de betums amb biolligant 1 i 2

Els resultats van evidenciar un comportament molt similar per part dels dos lligants, quant a la modificació reològica a efectes de mòdul i viscositat a temperatures de prestació de servei mitjanes i elevades, i també en temperatures de fabricació i estesa.

Una vegada definida la formulació del lligant a addicionar, es van realitzar assaigs de prestacions de la mescla, tot validant característiques volumètriques i sensibilitat a l'aigua i la deformació permanent. Els resultats assolits per ambdós lligants van permetre garantir el compliment de les característiques següents:

CARACTERÍSTIQUES DE LA MESCLA	UNIDADES
_ Densitat aparent provetes (UNE EN 12697-6. SSD)	2371 kg/m <sup>3</sup>
_ Buits en mescla (UNE EN 12697-8)	5,0 %
_ Buits en àrid (UNE EN 12697-8)	16,8 %
_ Buits reblerts en àrid (UNE EN 12697-8)	70,5 %
_ Sensibilitat a l'aigua (UNE EN 12697-12)	>85 %
_ Assaig de pista (UNE EN 12697-22)	<0,07 mm/1000cicles

Imatge 12. Característiques garantides per a la mescla AC11S

## Valoració tècnica de la solució



## Reciclat en fred amb emulsió

L'execució de les actuacions es va realitzar segons allò projectat. Únicament cal esmentar que a fi de garantir una major estabilitat en curtes edats i considerant que la treballabilitat de la mescla ho permetia, es va realitzar un ajust en la formulació de l'emulsió del reciclat després del primer dia d'execució, que revisava la formulació del betum a emulsionar.

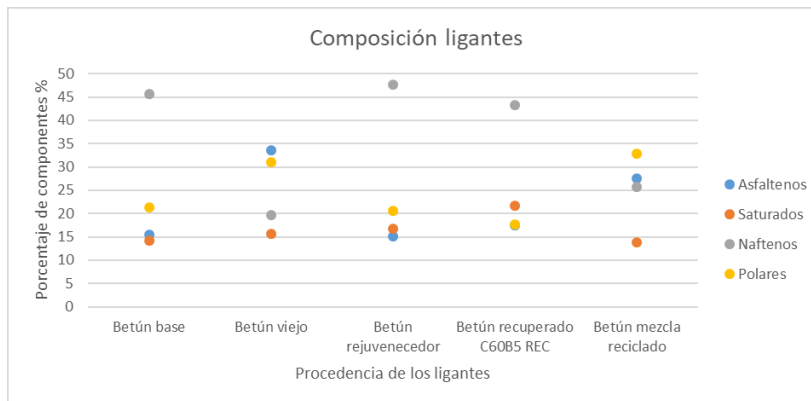
La mescla reciclada era oberta al tràfic a les poques hores de la seva execució, mantenint solament tancat el tram en execució durant la mitja jornada en curs.

Els controls executats van permetre assegurar la correcta dosificació i homogeneïtat en prestacions de la mescla executada.

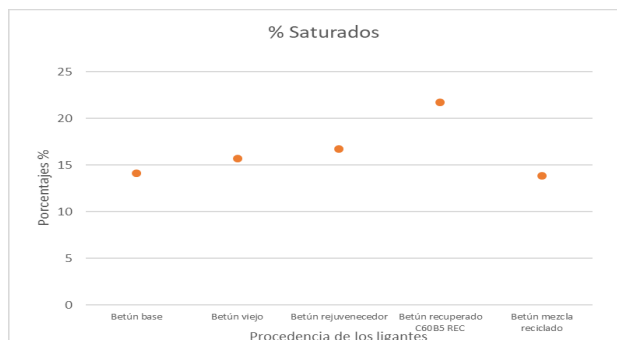
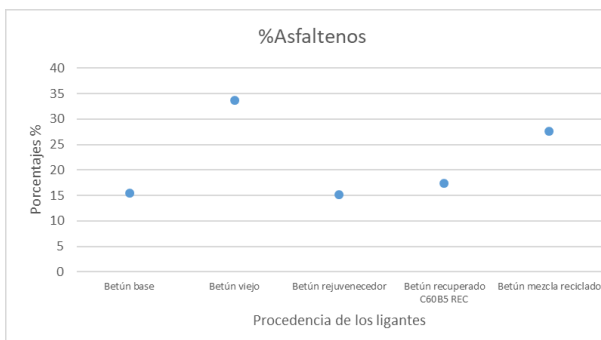
Per tal d'avaluar les prestacions de l'agent rejuvenidor sobre la mescla finalment fabricada, es van realitzar assaigs de caracterització sobre el lligant recuperat de la mescla reciclada per part del laboratori de Repsol. Es presenten tot seguit els resultats assolits:

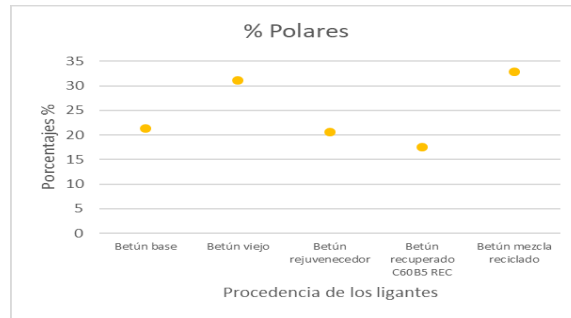
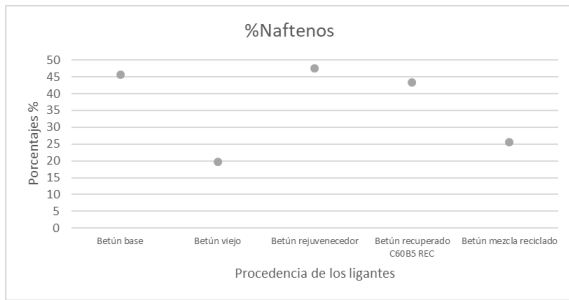
Tipo de muestra	Penetración	AyB	Composició SARA			
			Asfaltenos	Saturados	Naftenos	Polares
Ligante envejecido de muestras de RAP	4/7	88,2 /82,6	40/36,4	8,1/10,2	22,4/19,6	30/33,8
Ligante envejecido muestra análisis			33,6	15,7	19,6	31,1
Betún base	210	38,6	15,5	14,1	45,7	21,3
Betún + rejuvenecedor			15,1	16,7	47,6	20,6
Ligante extraído de la emulsió			17,4	21,7	43,3	17,6
Ligante extraído de la mezcla de reciclado nueva			27,6	13,8	25,6	32,9

Taula 4. Composició dels lligants de la mescla a reciclar, el lligant aportat en forma betum i emulsió, i la mescla reciclada



Imatge 13. Representació del repartiment en diferents fraccions per als diferents betums





Imatge 14, 15, 16 i 17. Presència d'asfaltens, saturats, naftens (aromàtics) i polars (resines) per als diferents betums

La recuperació de les 4 fases del betum es va realitzar mitjançant cromatografia de líquids.

A partir de les dades extretes es realitza valoració de l'índex de durabilitat, entès com el grau d'envelliment del lligant, que s'avalua per a la relació ponderal d'asfaltens i saturats en relació al conjunt de naftens i polars.

LLIGANT	ÍNDEX DE DURABILITAT
LLIGANT DE MESCLA ORIGINAL	0,97
LLIGANT EXTRET DE LA MESCLA REICLADA	0,71

Taula 5. Índex de durabilitat del lligant de la mescla original i reciclada

Els resultats assolits mostren un nivell d'envelliment considerable en el betum característic de la mescla reciclable i una important reducció després de la intervenció de reciclat.

Pel que fa a les prestacions mecàniques, es esperable l'evolució de les característiques mecàniques de la capa al tractar-se d'una mescla fabricada amb emulsió de betum, i especialment per ser un reciclat en fred, considerant necessari un llarg període de temps perquè tingui lloc l'equilibri entre els lligants que componen la mescla.

Per a aquest fet, es preveu la realització de campanyes de mesura de deflexions en seqüència durant els anys posteriors a l'execució de l'obra a través de deflectòmetre d'impacte. Les dades reportades permetran, mitjançant càlcul invers, l'estimació dels valors de rigidesa de la mescla reciclada.

Mentre, van ser extrets testimonis sobre els quals es va realitzar mesura del mòdul de rigidesa, assolint els següents resultats transcorregut un mes des de l'execució:



Id	pk	CARRIL	R1	R2	Modul (Mpa)
1	0+800	CD	2518	2454	2486
2	0+850	CI	2246	2412	2329
3	0+950	CD	2180	2060	2120

Id	pk	CARRIL	R1	R2	Modul (Mpa)
4	1+050	CI	1816	2228	2022
5	1+100	CD	2750	3186	2968
6	1+150	CI	3120	3313	3217

Taula 6 i 7. Mòduls de rigidesa de la mescla reciclada després de 30 dies de maduració mesurada sobre testimonis

Els valors es troben dins del rang de valors característics per a aquest tipus de mescles.

#### AC11 SURF 50/70 REJUV R20

Com en el cas de la mescla reciclada, el pla de control va garantir la correcta fabricació i estesa de la mescla asfàltica, a fi d'assegurar el compliment de les prestacions indicades en la fórmula de treball.

Adicionalment, es van realitzar assaigs de caracterització dels components recuperats de les mescles reciclades, a fi d'identificar el grau d'envelliment de la mescla final i comparar l'efecte dels agents rejuvenidors entre aquests i en relació amb la mescla de referència.

Els betums asfàltics estan constituïts principalment per una mescla de molècules d'alt pes molecular, de naturalesa principalment hidrocarbonada, amb petites proporcions de heteroàtoms de S, O, N i petites quantitats d'àtoms metàl·lics (V, Ni, Fe, Ca, Mg). Aquesta mescla d'hidrocarburs es pot agrupar principalment en quatre grups funcionals: saturats, aromàtics, resines i asfaltens. Per tal de mantenir una estructura correcta del betum s'ha de mantenir una relació adequada entre els diferents grups.

Els betums additivats amb rejuvenidors són lligants especials desenvolupats amb l'objectiu de regenerar els components que ha perdut el betum com a conseqüència de l'envelliment. Es tracta bàsicament de restablir les proporcions òptimes entre saturats, aromàtics, resines i asfaltens, per aconseguir una estructura correcta i assegurar un bon comportament del lligant en carretera. És a dir, el lligant rejuvenit s'encarrega de retornar al betum les característiques, tant físiques com químiques, que tenia originalment i havia perdut durant el procés d'envelliment, aconseguint una estructura òptima i assegurant, d'aquesta manera, un bon comportament en carretera.

Els betums asfàltics presenten una gran resistència a l'envelliment, com a conseqüència de la seva naturalesa principalment hidrocarbonada de baixa reactivitat, però, durant la manipulació i període en servei estan sotmesos a una sèrie de factors i agents externs que originen canvis en la seva composició i repercuteixen negativament sobre les seves propietats.

La consistència de les propietats del betum i la seva dependència amb la temperatura ve determinada pel seu contingut en asfaltens i maltens (saturats, resines i aromàtics). La naturalesa

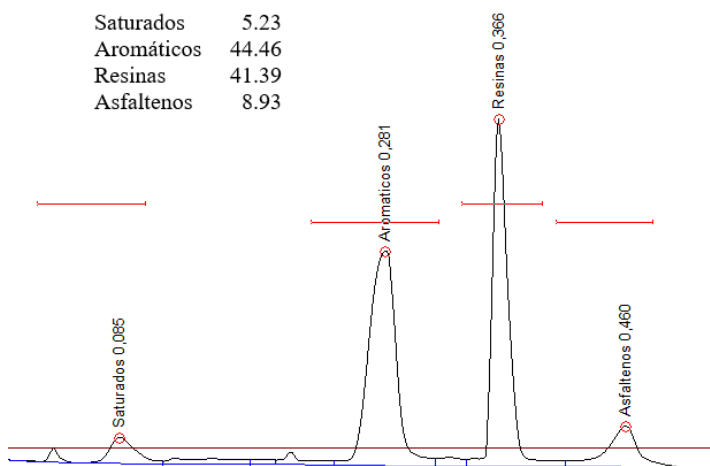




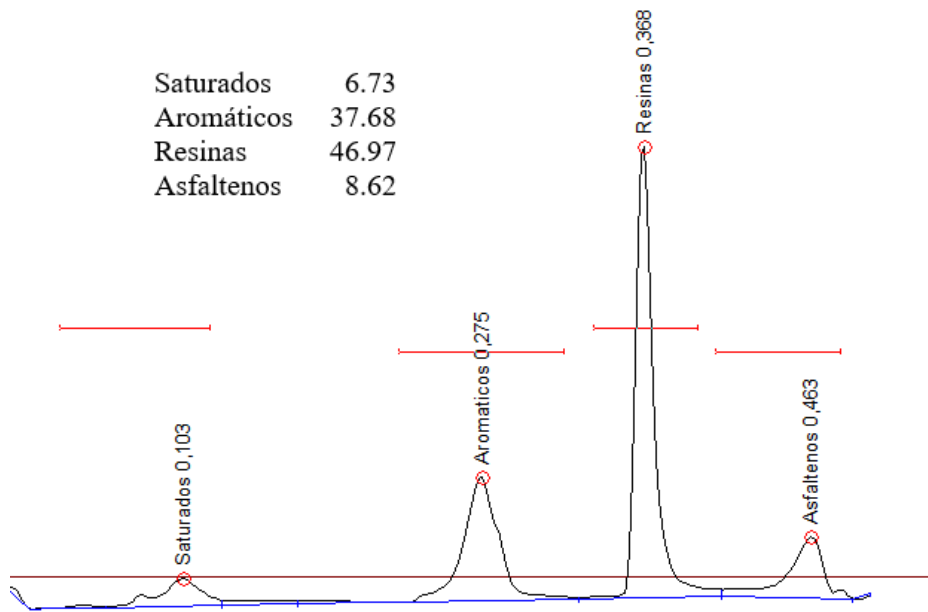
dels canvis observats en la composició del betum durant l'envelliment explica perquè la penetració disminueix i la viscositat i temperatura d'A&B augmenten. Després de l'oxidació moltes de les interaccions polar-polar condueixen a la formació de cadenes, provocant un augment de la viscositat i major índex d'envelliment a través de processos de polimerització o condensació.

Les principals causes d'envelliment d'un betum són la pèrdua de volàtils (saturats i aromàtics) i l'oxidació de certes molècules amb la conseqüent formació de dobles enllaços i molècules aromàtiques (resines i asfaltens). L'oxidació del betum es produeix en dues etapes: en primer lloc, trobem l'envelliment produït durant el transport en cisternes i l'emmagatzematge on la principal causa és la temperatura. Posteriorment, durant el procés de mesclat, a més a més de les altes temperatures, hi ha fenòmens d'oxidació per la presència d'oxigen, així com processos d'adsorció molecular per part dels àrids. En segon lloc, durant la vida en servei del paviment, on el betum es degrada per les fortes sol·licitacions del tràfic (fatiga a causa de les càrregues), les variacions de temperatura (fatiga tèrmica), la presència d'aigua, etc. A més a més els paviments estan sotmesos a agents ambientals i als vessament de lubricants i carburants dels vehicles que poden accelerar els fenòmens d'oxidació.

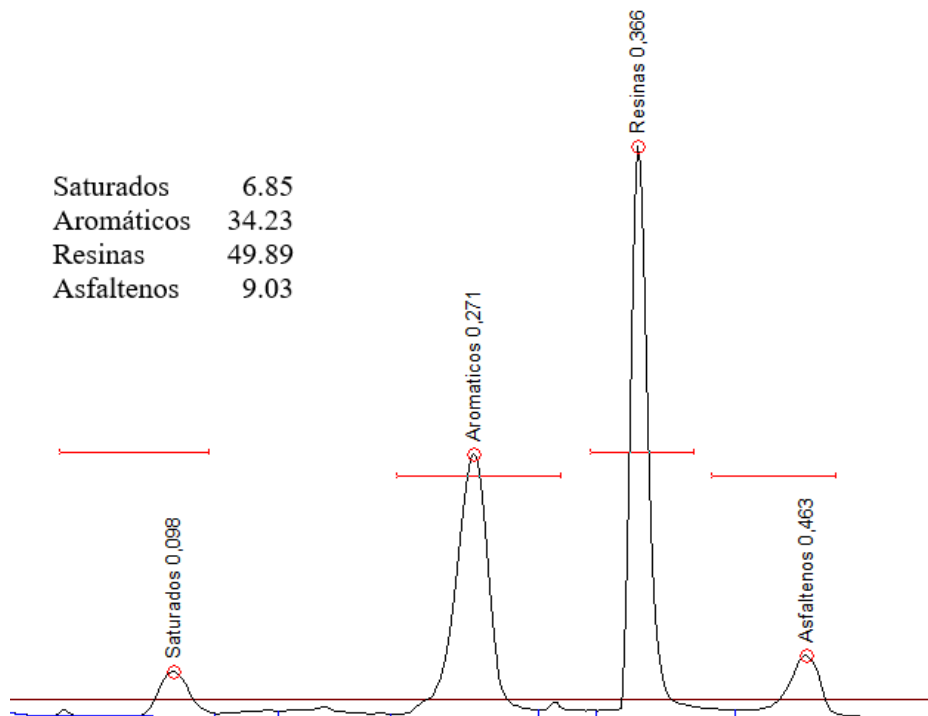
Per a la caracterització, es va procedir a la separació de les fraccions utilitzant el mètode de determinació de la composició química del betum asfàltic, que consisteix en la separació cromatogràfica en capa fina (TLC: Thin Layer Chromatography) en diferents fraccions de: saturats, aromàtics, resines i asfaltens, a través d'un detector de ionització de flama (FID: *Flame Ionization Detection*). Els resultats assolits van ser els següents:



Imatge 18. Cromatograma de lligant recuperat de la mescla de referència



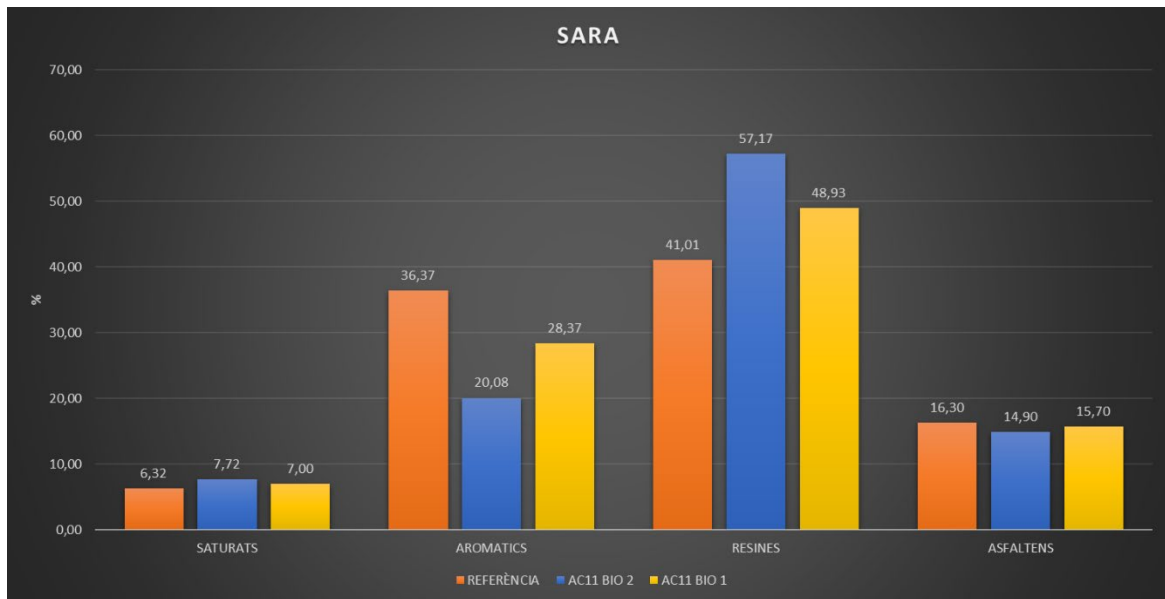
Imatge 19. Cromatograma de lligant recuperat de mescla de innovadora amb biolligant tipus 1



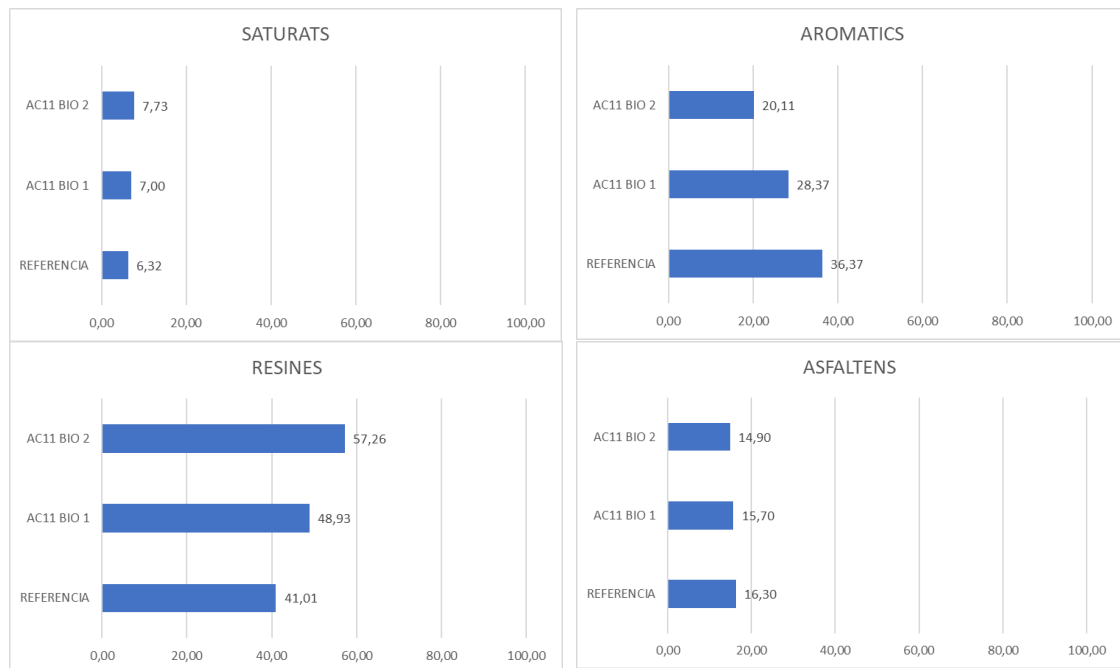
Imatge 20 . Cromatograma de lligant recuperat de mescla de innovadora amb biolligant tipus 2

A la vista dels resultats obtinguts i l'elevat % de resines mesurades en els lligants, es va considerar escaient fer una precipitació prèvia d'asfaltens per a la separació de les fases.

Els resultats assolits en aquest cas van evidenciar una redistribució de % entre aquests dos components:



Imatge 21 . Representació de la composició dels diferents grups per als diferents lligants caracteritzats



Imatge 22, 23, 24 i 25. Presència d'asfaltens, saturats, resines i aromàtics per als diferents betums

L'índex de durabilitat estimat per a les diferents mesclades ens mostra un valor equivalent per a les tres solucions de 0,29.

Els components saturats, que són les fraccions més volàtils del betum, es reconstitueixen de tal manera que és possible arribar o fins i tot superar els valors de referència. Cabria esperar, que en una mescla amb presència de betum envellit provinent del RAP, els components saturats disminuïssin, si no hi ha cap acció rejuvenidora. En aquest cas, gràcies a la solució emprada



s'aconsegueix mantenir el % de saturats per a la solució AC11BIO 1 i fins i tot superar la de referència, per a la solució AC11 BIO 2.

L'acció del lligant rejuvenidor es pot veure també reflectida en l'augment de la quantitat d'aromàtics. Per a una mescla asfàltica amb RAP hem d'esperar que la quantitat d'aromàtics disminueixi significativament, ara bé, tot i que no ha estat possible arribar al % d'aromàtics de la mescla de referència, obtenint una quantitat inferior en ambdós casos, la solució AC11BIO 1 representa una millor alternativa com a rejuvenidor, ja que el % d'aromàtics regenerats és pràcticament igual a la de referència, i la solució AC11BIO2 es queda molt pròxima a la mescla de referència.

Pel que fa a resines, s'ha aconseguit superar el % de la mescla de referència en ambdós casos. Un augment de la quantitat de resines, a igual Íd, es tradueix en una millor peptització dels asfaltens, protegint-los per a l'envelliment. En aquest cas, la solució AC11BIO2 representa una alternativa millor com resistència a l'envelliment.

Finalment, pel que fa als asfaltens, cabria esperar-ne un augment significatiu en el cas de mescles que continguin betum vell provinent del RAP, en cas de no emprar cap agent rejuvenidor. Els resultats obtinguts mostren que la quantitat d'asfaltens obtinguda és molt pròxima a la de la mescla de referència, on les diferències obtingudes poden correspondre a la variabilitat del contingut de RAP en les mostres.



Quant a prestacions finals de la mescla, des del punt de vista mecànic, es va avaluar sobre testimonis la rigidesa de la mescla fabricada obtenint els següents resultats:

Id	pk	CARRIL	TIPO LIGANTE	R1	R2	Modul (Mpa)
1	1+600	CD	REPSOL	3225	3326	<b>3276</b>
2	1+950	CD	REPSOL	3386	3759	<b>3573</b>
3	2+200	CI	REPSOL	3210	3443	<b>3327</b>
4	2+900	CI	SORIGUÉ	2820	2865	<b>2843</b>
5	3+350	CD	SORIGUÉ	3182	3397	<b>3290</b>
6	3+500	CD	SORIGUÉ	4695	4577	<b>4636</b>
7	4+000	CD	SORIGUÉ	2841	2886	<b>2864</b>
8	4+350	CI	SORIGUÉ	3207	3195	<b>3201</b>
9	4+600	CI	SORIGUÉ	3105	3641	<b>3373</b>
10	9+800	CD	SORIGUÉ	3740	3520	<b>3630</b>
11	10+150	CI	SORIGUÉ	2875	2920	<b>2898</b>
12	10+750	CD	SORIGUÉ	3103	3305	<b>3204</b>
13	11+280	CI	SORIGUÉ	2973	3040	<b>3007</b>
14	11+700	CD	SORIGUÉ	3358	3304	<b>3331</b>
15	13+300	CI	SORIGUÉ	2870	2950	<b>2910</b>

Taula 8. Valors de mòdul de rigidesa sobre testimonis de capa AC11S REJUV R20

Els valors característics de la mescla de referència reportaven valors de resistència superiors i amb valors característics de mescles bituminoses en calent. Tot i que la caracterització del lligant residual final de la mescla mostra característiques equivalents al lligant, tant des del punt de vista de prestacions como per les característiques fonamentals avaluades a partir del seu cromatograma, és previsible que l'equilibri efectiu entre lligant i rejuvenidor requereixi un temps de maduració, durant el qual s'identifiqui l'evolució pel que fa al mòdul de la mescla. També cal esperar, però, afectació per la mida màxima nominal de la mescla, d'espessor reduïda respecte a la mescla de referència. Cal considerar, això no obstant, una major aportació d'aquesta mescla a les prestacions superficials de la secció innovadora, ja que la definició de la secció fa preveure unes prestacions estructurals adequades per a la via i superiors a les previstes en el disseny inicial.

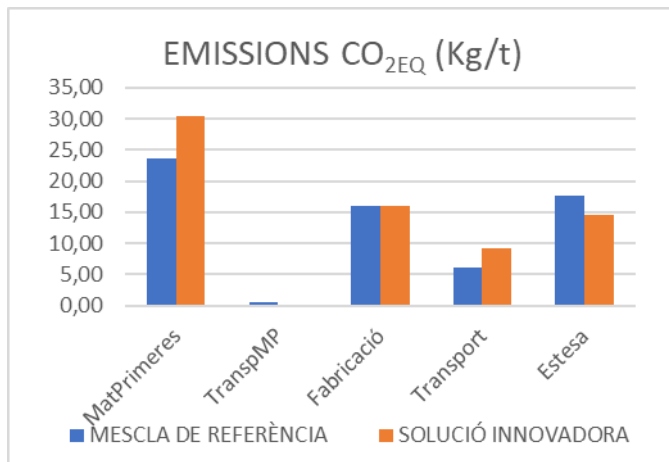
Id	pk	CARRIL	R1	R2	Modul (Mpa)
1	0+800	CD	6480	6245	6363
2	0+850	CI	5740	6109	5925
3	0+950	CD	6340	6847	6594

Taula 9. Valors de mòdul de rigidesa sobre testimonis de mescla de referència

Quant a prestacions superficials, han estat assolits els objectius definits en els indicadors de prestacions finals pel que fa a textura i fregament, i queda pendent l'auscultació després del període preceptiu d'apertura al tràfic per a l'assaig de CRT. Els valors de l'índex de regularitat superficial han millorat també els valors oferts en el corresponent indicador (<2).

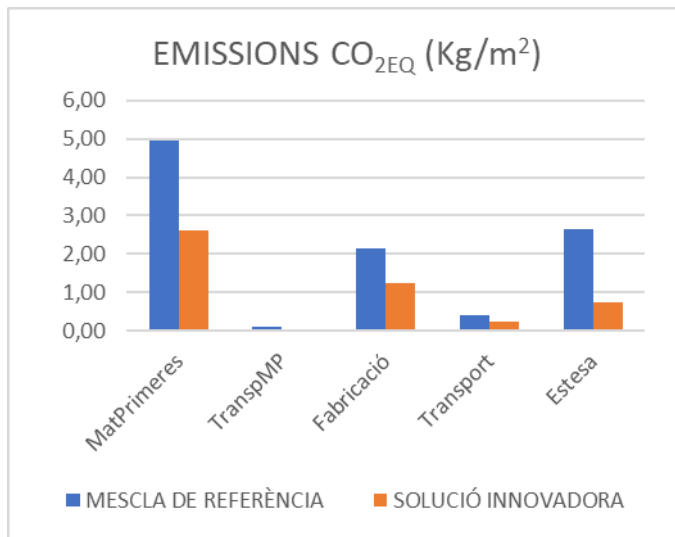
## Valoració ambiental de la solució

La valoració del comportament ambiental de la solució es va realitzar en fase de projecte, tot comparant la solució innovadora i la de referència, i va ser revisat posteriorment a partir de les dades de consum i hores de maquinària realment emprades, obtenint els resultats següents:



Imatge 26. Comparativa en emissions de CO<sub>2</sub> de la solució innovadora en front de la convencional

Considerant l'aportació a la petjada de carboni associada al transport i dotació de lligant addicional prevista en la solució innovadora respecte a la de referència, la valoració final no és clarament favorable. A fi de fer una correcta interpretació de la contribució que representa la inclusió de fresat i biolligant, hauria de ser comparada una mescla d'igual composició volumètrica, o si més no, amb el mateix esquelet granular. Altrament, l'anàlisi podria realitzar-se des d'un altre punt de vista; cal considerar que l'espessor de la capa innovadora és substancialment inferior a la de referència i, per tant, l'estimació de la petjada de carboni comparada si la unitat avaluada són els m<sup>2</sup> intervinguts seria clarament favorable a la mescla innovadora.



Imatge 27. Comparativa en emissions de CO<sub>2</sub> de la solució innovadora en front de la convencional per m<sup>2</sup> de superfície intervinguda

Un altre aspecte a considerar és que en l'estimació de la petjada equivalent a l'ús del fresat, no es considera el cost ambiental de gestió de residu en l'abocador, ja que no es contempla la fase del final de vida útil de les solucions. Cal preveure, doncs, un impacte ambiental a efectes reals més favorables a la solució innovadora pel que fa a l'efecte sobre la seva petjada de carboni.

Si avaluem ambientalment l'impacte del reciclat en fred amb emulsió com a solució per al tractament de la capa base esgotada, si observem un elevat impacte en la reducció de la petjada de carboni respecte a la solució convencional que suposa el fresat i reposició de la capa existent. Concretament, si contrastem la petjada de carboni de la solució innovador aplicada (reciclat i rodadura tipus AC11S), respecte a un fresat i reposició de prestacions estructurals equivalents (fresat de 7,5 cm i reposició de 7,5 cm) obtenim el següent balanç:

	Kg CO <sub>2</sub> eq totals
SOLUCIÓ DE REFERÈNCIA	727.229,6
SOLUCIÓ INNOVADORA	471.454,7
ESTALVI	255.774,9 (35,2 %)

Taula 10. Petjada de carboni de la solució innovadora i la solució convencional alternativa per a les diferents fases de l'actuació

## Conclusions

L'execució de l'obra ha permès testar en condicions reals la fabricació d'una mescla reciclada en calent amb una taxa del 20 % de reciclat amb addició de dos tipus de biolligants i executar amb èxit la rehabilitació de la via. A més, la solució ha inclòs l'execució d'un reciclat en fred amb emulsió in situ del ferm existent, emprant un equip de nova generació i el disseny d'una emulsió específica, que han permès l'execució amb una mínima afectació a l'usuari i una millora en la capacitat portant de la via respecte a les de disseny inicial.



L'estudi ha permès la verificació de l'acció dels agents rejuvenidors sobre el lligant de la mescla final, valorant des del punt de vista de les seves propietats fonamentals, la intervenció sobre el reequilibrament en la composició del betum asfàltic.

Ambdues solucions s'han mostrat com a opcions vàlides i desitjables des del punt de vista tècnic i ambiental.