



MESCLES BITUMINOSSES AMB FIBRES DE CEL·LULOSA

Mar Subarroca, FIRTEC, SA

Alfredo Bovis, FIRTEC, SA

José Manuel Pardo Losada, FIRTEC, SA

Oscar Maza Lalueza, Servei Territorial de Carreteres de Barcelona, del Departament de Territori

INTRODUCCIÓ

En el marc del contracte de Compra Pública Innovadora de la RIS3CAT i el PO FEDER 214-2020 desenvolupat dins del Pla sectorial de fermes sostenibles de la DGIM, Firtec S.A. ha dut a terme la redacció del projecte i l'execució de l'obra "Lot 4: Millora del ferm i obres complementàries a la B-430 del P.K. 0+000 al P.K. 4+245. Sallent – Artés. El contracte forma part del Pla de Fermes Sostenibles i marcava com aspecte innovador a abordar mescles amb fibres de cel·lulosa.

En base a l'estat inicial del ferm i els condicionants requerits, es proposa com a mescla innovadora una mescla bituminosa en calent tipus SMA 8 (Stone Màstic Asphalt) de granulometria discontinua i alt contingut en lligant, la qual permetrà aportar excel·lents prestacions mecàniques, millora de la durabilitat, resistència al lliscament i millores en la reducció de soroll de rodament.

La carretera objecte d'aquest contracte correspon a la B-430 amb titularitat de la Generalitat de Catalunya. Es tracta d'una carretera d'una sola calçada amb dos carrils de circulació, un per sentit, amb un traçat molt lineal i poques corbes. S'inicia al polígon industrial de l'Illa, a Cabrianes; creua el riu Llobregat mitjançant un pont; creua el municipi de Cabrianes; passa per la intersecció d'accés a la C-25 i creua una rotonda d'accés a aquesta via, i segueix fins a la rotonda d'accés al municipi d'Artés creuant la Riera Gavarresa. Per tant, aquesta carretera, presenta un tram urbà comprès entre el PK 1+100 i 0+800 i la resta, tram interurbà, amb un volum de trànsit elevat, principalment vehicles pesants i turismes particulars, degut a la situació d'intersecció amb les vies C-16 i C-25.

El traçat té una longitud de 4245 m, disposa d'un ample mig de 6 m, entre 7.2 i 5.2 m., amb seccions que disposen de vorals i altres que no.



CONTEXT

ESTAT PREVI DEL FERM

Per a la definició de la solució es va considerar l'estat previ de la via estructuralment, i en quant a prestacions superficials i de regularitat, els condicionants del plec de prescripcions i altres condicionants ambientals.

La Direcció General d'Infraestructures de Mobilitat va posar a disposició els resultats següents, testimonis del març de 2020, els testimonis presenten entre 2 i 5 capes amb espessors des de 14.5 cm fins a 38.2, la meitat dels quals es troben fracturats; en aquests s'observen mescles molt diferents i amb granulometries de grans dimensions. Estudi de deflexions mitjançant deflectògraf Lacroix del desembre de 2019, en aquest, s'indica un gruix de reforç d'entre 6 i 12 cm. Coeficient de fregament transversal (CRT) i macrotextura, mitjançant SCRIM de maig de 2020 i índex de regularitat internacional (IRI) amb perfilòmetre làser Greenwod de desembre de 2019, dels quals es presenten els resultats a la (figura 1).

Carretera	PK Inici	PK Final	Via	CRT Mig	CRT desv.	Textura Mitja	Textura desv.
B-430	0+000	4+240	V1	57,14	12,79	0,84	0,33
B-430	4+240	0+000	V2	54,80	12,28	0,80	0,33

Carretera_Carril	<1.5	<1.8	<2.0	<2.5	<3.0	<3.5	Mitjana	Desv.
B-430_C1	2	21	23	40	56	73	2,98	1,07
B-430_C2	2	18	29	37	47	67	3,13	1,32

Figura 1: resultats de CRT, textura (a dalt) i IRI (a sota) que presenten l'estat del ferm abans de l'actuació

A més, es va realitzar un estudi visual de l'estat del ferm in situ al gener del 2022. D'aquest estudi es conclou que hi ha a la carretera 8 trams diferenciats per l'estat d'aquesta i les actuacions realitzades. El primer tram, del PK 0+000 al PK 0+714, presenta algunes zones puntuals de fissuració i una patologia associada a fatiga de la capa superficial. El segon tram, del PK 0+714 al PK 0+982, es troba en bon estat degut a la recent execució d'una nova estructura. El tram 3, del PK 0+982 al 1+200, conté un recent fresat i reposició, però sense capa de rodament. El quart i setè tram, del PK 1+200 al 2+550 i del PK 3+286 al PK 4+190 respectivament, presenten una superfície molt deteriorada atribuïble a l'envelliment del paviment. El tram 5, del PK 2+550 al 3+137, presenta també una superfície deteriorada, però menys generalitzada que el tram 4. El tram 6, del PK 3+13 al PK 3+286, conté una rotonda amb alguna fissura puntual. El tram 8, del



PK 4+190 al PK 4+250, també conté una rotonda, la meitat d'aquesta es troba en bon estat i l'altra meitat presenta fissuracions (figura 2).



PK 3+500



PK 4+200

Figura 2: Estat del ferm inicial.

Per altra banda, l'empresa va executar l'extracció de més testimonis en quatre zones diferenciades. D'aquests es conclou que existeix una gran varietat d'espessors de capes i naturalesa petrogràfica dels àrids al llarg de la carretera. Dividit en 4 grans zones, es troba una primera zona que va aproximadament des del PK 0+000 al PK 0+700 amb una capa base de més de 8 cm i intermèdia, de gairebé 9 cm, de naturalesa calcària i una capa de rodament de naturalesa granítica de 5.5 cm d'espessor. Una segona zona més o menys, del PK 0+700 al PK 2+500, travessant el poble de Cabrianes, presenta una capa de rodament de 5.5 cm d'una mescla fina de petrologia granítica, a sota una mescla oberta calcària d'espessor variable d'entre 1.5 i 3.5 cm i per sota *macadam* d'espessor indeterminat. La tercera zona, del PK 2+500 al 3+800 aproximadament, es caracteritza per una capa de rodament tipus AC16 granítica de 5 cm d'espessor, a sota una mescla calcària de 6.3 cm tipus AC 22, per sota una capa de granulometria fina de 4.5 cm d'espessor i a sota tot-u. L'última zona, en la qual s'han extret 4 testimonis, presenta mescles bituminoses de naturalesa poligènica i tot-u a la base; la capa de rodament d'uns 4 cm, té una granulometria fina, la capa intermèdia d'entre 5.5 i 8 cm i la capa base d'entre 3.5 i 8.5 cm són mescles tipus AC 22.

El plec de prescripcions tècniques particulars (PPTP) indica que a fi de formular, fabricar, transportar i estendre les mescles discontinües tipus SMA amb fibres de cel·lulosa, es tindran en compte les conclusions de la investigació "*Mezclas SMA de la família de la norma UNE EN 13108-5 que sean Sostenibles, Medioambientalmente Amigables*", finançada pel *Centro Tecnológico para el Desarrollo Industrial CDTI*, amb fons FEDER de 30 de juny de 2013. Aquesta investigació, amb els objectius d'estudiar i desenvolupar les mescles SMA per al seu ús a Espanya i desenvolupar mescles de la família SMA més sostenibles, i que contribueixin a millorar el medi ambient, conclou que les mescles amb un alt contingut de lligant compensen la seva afectació mediambiental aportant major durabilitat i millorant el comportament, la qual cosa permet reduir l'espessor de la capa; les mescles SMA permeten reduir el soroll de la capa de rodament degut a l'optimització del contingut de buits, textura superficial i rigidesa; les mescles SMA fabricades a menor temperatura suposen una reducció del consum energètic i de les emissions de gasos contaminants a l'atmosfera, i les mescles SMA que incorporen residus com



pols de cautxú NFU i fresat, mantenint les prestacions de la mescla, permeten disminuir el consum de recursos naturals.

Amb aquest tipus de mescles es preveu assolir una major sostenibilitat, una bona estabilitat a altes temperatures, bona flexibilitat a baixes temperatures, elevada resistència al desgast, elevada adhesivitat àrid-betum, bona resistència al lliscament, bon drenatge i, per tant, menys risc d' "aquaplaning", baixa sonoritat, disminució de les fissures, disminució de les exsudacions.

Es considera una via d'ús veïnal amb tràfic d'alguns vehicles pesants, com per vehicles agrícoles i camions de petites indústries. Segons el Pla d'Aforaments de l'any 2020 del Departament de la Vicepresidència i de Polítiques Digitals i Territori s'obté una categoria de trànsit pesat tipus T2 amb una IMDp de 266 vehicles pesats/dia.

Pel que fa al sistema de drenatge superficial, està compost per cunetes de diverses profunditats, executades en terres i en alguns trams, formigonades. No es detecta problemes puntuals de drenatge superficial.

Segons la normativa, la zona de projecte està inclosa en la zona tèrmica estival mitja i la zona pluviomètrica poc plujosa. Més detalladament, la comarca del Bages es caracteritza per altes temperatures a l'estiu, amb màximes superiors als 42°C durant els mesos de juliol i agost.

Amb tots els condicionants descrits anteriorment, es considera que l'esplanada no està esgotada estructuralment ja que cap dels valors de deflexió supera els valors indicats a la taula 2A de la 6.3 – IC per a un trànsit T2. A més, a la inspecció visual no es detecten importants assentaments puntuals ni transversals, més enllà de deformacions de les roderes en alguns punts. Es desestima la proposta de l'informe de deflexions dels trams amb més reforç, especialment entre els PK 1+000 i PK 2+100, on els valors de deflexió patró superen el valor de 100 mm/100 ja que, després de l'assaig i abans de l'execució del projecte hi ha hagut un fresat i una reposició, durant l'anàlisi visual es conclou que aquest tram té un bon aspecte.

DEFINICIÓ DE LA SOLUCIÓ

Tenint en compte les consideracions presentades en l'apartat anterior, es projecta la següent solució.

Per al tram innovador, adequació del ferm existent variable que comprèn 6 cm reciclat en fred amb emulsió, la no actuació o apedaçats puntuals de fresat i reposició de 5 cm amb mescla convencional tipus AC 16 SURF 35/50 S, microfresat en els trams on s'ha executat RFE i, estesa d'una capa de rodament de SMA 8 de 2.5 cm d'espessor. Cal destacar la innovació que suposa la pròpia secció, atès que segons el marc normatiu que suposa l'Ordre circular 6.3 IC, és necessari l'aplicació de mescles tipus AC S o D sobre reciclat en fred i, per tant, l'aplicació de gruixos de com a mínim 5 cm.



Per al tram convencional, fresat i reposició de 5 cm d'espessor amb mescla bituminosa en calent tipus AC 16 SURF 35/50 S.

RECICLAT EN FRED AMB EMULSIÓ

El reciclat en fred amb emulsió permetrà aportar capacitat estructural al ferm, flexibilitat i uniformitat de comportament. A més dels avantatges ambientals que suposa el reaprofitament del 100% del material, la no generació de residus i la baixa despesa energètica, pel fet de no haver d'aportar àrid verge a la solució i la disminució del transport.

Aquest formulat amb un contingut teòric d'emulsió sobre fresat del 3%, de tipus C60B5 REC amb la inclusió d'additius rejuvenidors del betum, permetrà augmentar la vida útil de la capa degut a la millora de l'embolcall de l'àrid amb l'emulsió.

Per tal de dissenyar la mescla es van realitzar un total de 3 cales de tempteig, de les quals es va mesurar la densitat màxima i la humitat òptima mitjançant l'assaig de Proctor modificat (UNE 103501) i, assajos d'immersió – compressió segons NLT 162 amb un 3% d'emulsió i un 2.5% d'aigua total. Amb els resultats obtinguts (figura 3) es va creure oportú dissenyar una sola fórmula de treball a fi de facilitar els treballs a obra.

	CALA TEMPTEIG 1	CALA TEMPTEIG 2	CALA TEMPTEIG 3
Densitat màxima (g/cm ³)	2.14	2.10	2.14
Humitat òptima (%)	6.9	6.8	6.8
Resistència en sec (kPa)	3.18	3.43	3.04
Resistència en humit (kPa)	2.78	2.94	2.45
Resistència conservada (I-C) (%)	87.4	85.7	80.6

Figura 3: Resultats obtinguts dels assajos realitzats per formular el reciclat en fred amb emulsió

SMA 8 SURF PMB 45/80-65

Per a la capa de rodament de la solució innovadora, es va optar per una mescla bituminosa en calent tipus SMA 8, amb addició de fibres de cel·lulosa i alt contingut de lligant modificat amb polímers en un espessor de 2.5 cm. Aquestes mescles tipus *Stone Mastic Asphalt* permeten una dosificació de granulometria discontinua formant un esquelet mineral que aporta suficient estabilitat mecànica per fricció interna, un elevat contingut de lligant i un reduït contingut de buits facilitant la funció impermeable de la capa. A més, l'addició de fibres de cel·lulosa redueix el risc de deformacions plàstiques que podria ocasionar l'elevat contingut de lligant.

El disseny de la mescla es va realitzar seguint la normativa de l'OC 3/2019 *SOBRE MEZCLAS BITUMINOSAS TIPO SMA*. Aquesta conté un 0.3% de fibres de cel·lulosa, arena granítica i calcària a parts iguals, graveta 5/8 de naturalesa poligènica i un 9% de fil·ler de recuperació, que



li confereixen la granulometria teòrica representada a la figura 4. El lligant és modificat, tipus PMB 45/80-65, amb un contingut de 6% s.m.

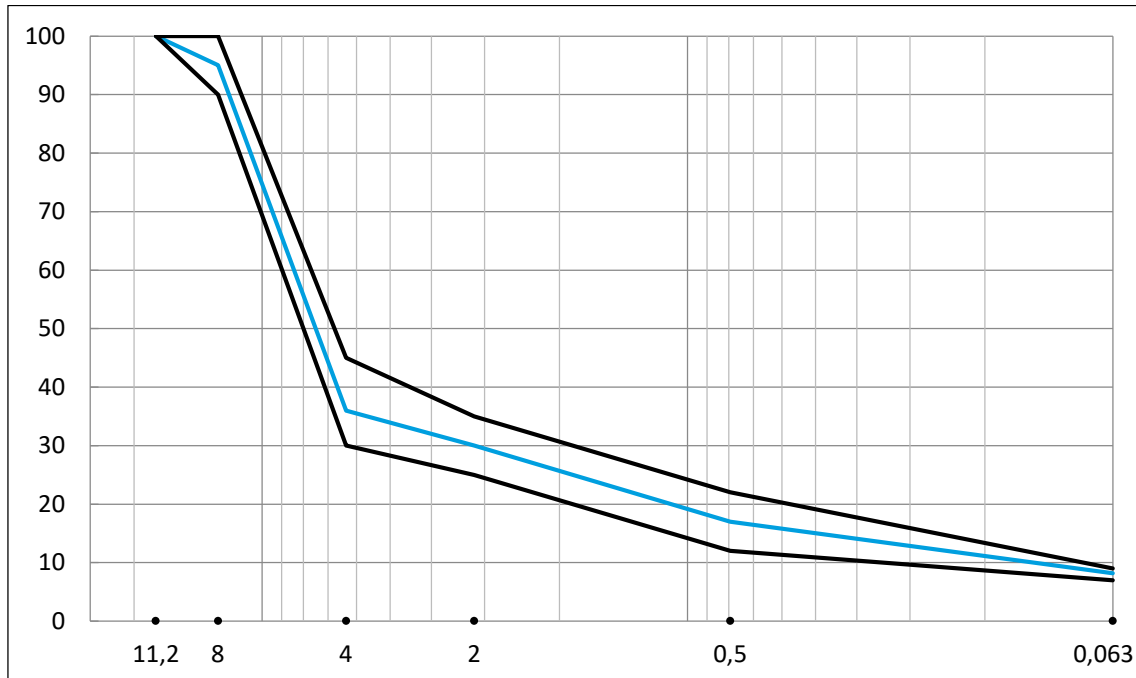


Figura 4: Granulometria teòrica de la SMA 8

VALORACIÓ TÈCNICA

Un cop executats els treballs previs, l'estesa de la capa de rodament de la solució innovadora va tenir lloc els dies 20, 21 i 22 de juliol com estava projectat. Els assajos de caracterització de la mescla van permetre el control d'aquesta amb resultats favorables (figura 5).

Assaig		Mitja	MIN	MAX
Granulometria	11.2	100	100	100
	8	94	90	100
	4	38	30	45
	2	30	25	35
	0.5	17	12	22
	0.063	7.6	7	9
Contingut de lligant (% s.m.)		6.09	5.7	6.3
Densitat aparent (g/cm ³)		2.333		
Densitat màxima (g/cm ³)		2.449		
Buits en mescla (%)		4.7	4	6
Escorriment de lligant		0.11		0.3
Sensibilitat a l'aigua (%)		96	90	



Deformació permanent (mm/1000 cicles)	0.04		0.07
---------------------------------------	-------------	--	------

Figura 5: resultats del control de qualitat de la mescla innovadora.

També es va realitzar un control sobre la pèrdua de cohesió de la mescla per acció de l'aigua segons la norma UNE-EN 12697-12, obtenint valors superiors a 90%, amb una mitja d'ITSR 96%. I un parell de controls de deformació permanent, segons UNE-EN 12697-22, en provetes fabricades al laboratori amb una espessor de 2.5 cm, resultant 0.02 i 0.05 mm després de 10³ cicles.

Sobre la unitat acabada es van realitzar auscultacions per tal d'avaluar les prestacions finals de la mescla.

Pel que fa l'Índex de regularitat internacional (IRI), exceptuant un parell de trams que coincideixen amb una rotonda, la qual cosa impedeix assolir les condicions d'assaig, es compleix el valor ofert en tots els punts auscultats i la mitjana millora en un 15% aquest valor. A més, s'aconsegueix millorar la regularitat respecte a l'estudiada abans de l'actuació (figura 1) en un 25-30%.

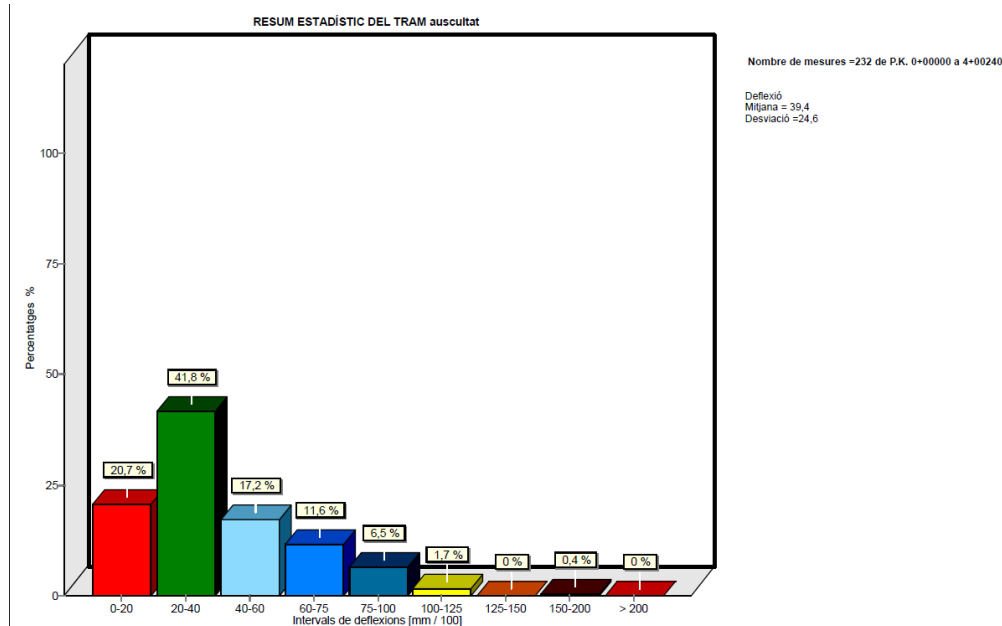
El coeficient de fregament transversal (CRT) mitjançant equip SCRIM, mesurat 3 mesos després de la finalització de l'estesa de la mescla innovadora compleix el valor ofert i les prescripcions de l'*Ordre circular 3/2019 sobre mezclas bituminosas tipo SMA*.

L'estudi de la textura de la mescla, pel mètode volumètric segons UNE 13036-1, reflecteix l'assoliment del valor ofert, amb una mitja de 0.9 mm amb valors superiors a 0.7 mm i de fins a 1 mm, i una millora de les prestacions respecte a la mescla de la capa de rodament convencional executada en el tram de referència de la mateixa obra, que ha donat una mitja de 0.7 mm.

La resistència al lliscament estudiada mitjançant pèndul TRRL segons NLT-175, ha donat valors superiors a 63 i una mitja de 66%.

Finalment, l'estudi de deflexions, mitjançant deflectògraf d'impacte indica una mitjana de 39.4 mm/100 per a la via 1 i 36.9 mm/100 per a la via 2 (figura 6).

A



B

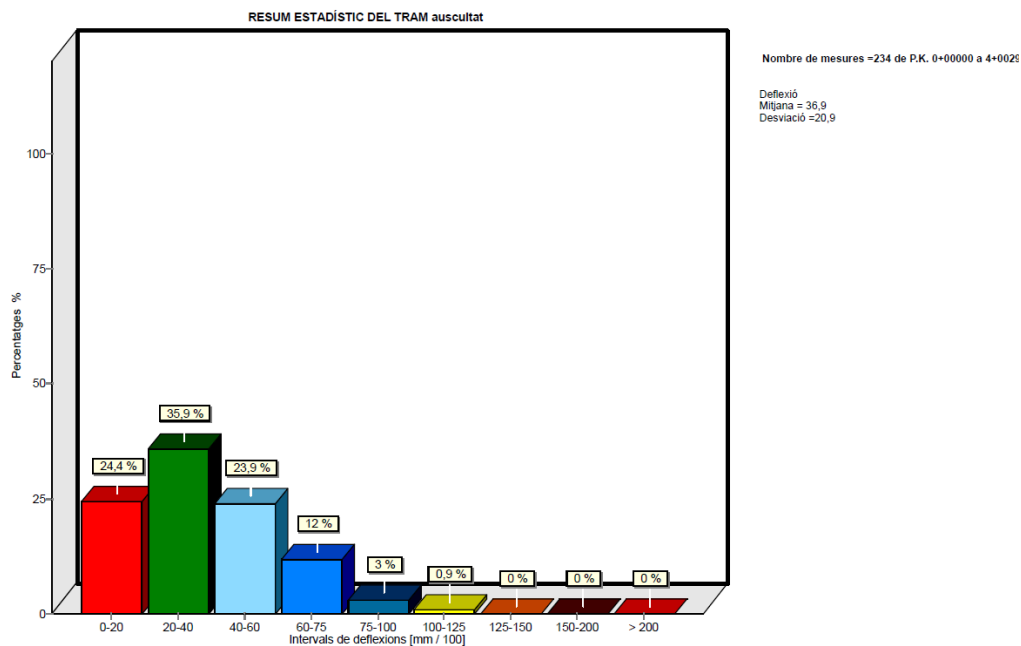


Figura 6: Resultats de deflexions després de l'actuació mitjançant deflectòmetre d'impacte

A més dels assajos propis del control de qualitat i unitat acabada, s'ha realitzat un estudi del comportament de les mescles bituminoses en quant a resistència i deformació a diferents temperatures mitjançant assaig FÈNIX de la mescla innovadora SMA 8 i la mescla convencional AC 16 SURF 35/50 S.

L'assaig Fènix, desenvolupat per la Universitat Politècnica de Catalunya i normalitzat pel CEDEX a través de la norma NLT 383/20, mesura l'esforç a tracció directa aplicat per produir la seva

ruptura, amb l'objectiu de valorar la resistència a la fissuració de les mescles bituminoses a diferents temperatures i els efectes de l'envelliment durant la seva vida útil. Amb aquest assaig s'obtenen les característiques mecàniques de la proveta i permet determinar la capacitat del lligant a mantenir la resistència de la mescla mentre es deforma.

L'assaig determina la resistència, tenacitat i energia de ruptura de les mescles bituminoses aplicant un esforç a tracció directe sobre provetes semicilíndriques amb una fissura induïda, a una velocitat constant i una temperatura determinada (-5, 5 i 20°C). A més, el control sobre provetes de mescla fabricada a laboratori, mescla fabricada a planta i testimonis d'obra, permet comparar les característiques de la mescla projectada amb la mescla construïda, amb la qual cosa es poden comprovar les condicions d'estesa i fabricació.

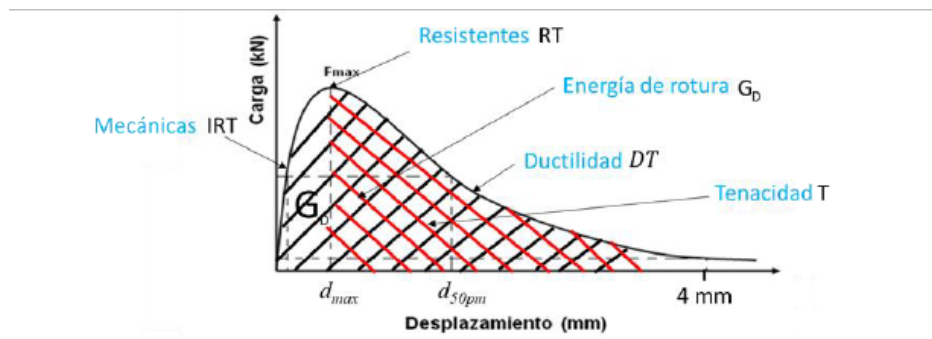


Figura 7: Exemple de gràfic que s'obté del trencament de la proveta en l'assaig Fènix. FONT: Nota tècnica NT 01/2022

A la corba càrrega – desplaçament, s'observa inicialment, un augment gairebé lineal de l'esforç aplicat i depèn de la rigidesa de la mescla. La pendent d'aquesta corba entre el 25 i 50% de la càrrega màxima dividit per la superfície transversal de càrrega, és l'índex de rigidesa a tracció (IRT), en MPa/mm. La resistència màxima (Fmax) que pot llegir-se al punt d'inflexió de la corba càrrega – desplaçament, està associada a la cohesió proporcionada pel màstic.

L'energia dissipada (GD) en J/m², que correspon a la integral sota la corba càrrega – desplaçament respecte la superfície de fractura, té en compte tot el procés de trencament del material després de la càrrega màxima, és a dir, representa la resposta dúctil del material. Així doncs, a major energia dissipada, major és la resistència a la fissuració de la mescla (Nota tècnica NT 01/2022).

Segons l'annex de la Nota tècnica NT 01/2022, els valors obtinguts de l'assaig dependran fortament del contingut i el tipus de lligant utilitzat. El tipus i contingut de betum influeix en la tenacitat i ductilitat, de manera que un elevat contingut de lligant augmenta la ductilitat i la tenacitat, i l'ús de betums modificats augmenta la tenacitat de les mescles. Per altra banda, el tipus de mescla afecta a l'índex de rigidesa de manera que les mescles tipus dens o semidensa (AC D i AC S) són més rígides i trenquen més fràgilment que les mescles tipus BBTM B amb un alt contingut de buits que són més dúctils i flexibles.



Per a la valoració del comportament de la mescla en relació a la mescla de referència s'ha realitzat la caracterització d'aquesta a partir de mescla fabricada en laboratori i a partir de mescla fabricada per central durant la fabricació de la mescla durant l'execució de l'obra. Aquesta caracterització ha estat realitzada en el marc dels treballs de posada a punt de l'assaig per part del laboratori de Sorigué, d'acord amb els procediments definits en les tasques de validació de la metodologia empreses pel sector de fabricació de mescles en l'àmbit nacional.

La caracterització de les mescles ha estat realitzada a 20 i 5 graus.

Segons allò establert en la norma, han estat definits els paràmetres:

- Indicador de rigidesa a tracció (IRT)
- Energia total de ruptura
- Tenacitat
- Indicador de tenacitat
- Desplaçament corresponent al 50% de la carga màxima en fase de ruptura
- Carga màxima en ruptura
- Resistència a tracció
- Desplaçament a càrrega màxima
- Desplaçament a tenacitat

Es presenten a continuació els resultats de l'assaig, les mescles fabricades en laboratori a 20 i 5°C:

MESCLA	T ^a	IRT	GD	TENACITAT	IT	D ₅₀	F _{max}	RT	DT
AC16	20	8,81E-02	4,57E-07	3,77E-07	3,46E-07	0,18	0,86	0,29	0,92
AC16	5	1,29E+00	6,14E-07	4,06E-07	8,08E-08	0,27	2,58	0,90	0,20
SMA8	20	4,63E-01	5,61E-07	4,56E-07	4,10E-07	0,16	0,93	0,32	0,90
SMA8	5	1,21E+00	8,48E-07	5,19E-07	1,61E-07	0,55	2,41	0,82	0,31

Figura 8. Resultats d'assaig fènix per mescles innovadora i de referència fabricades en laboratori

Amb aquests resultats, podem observar:

-L'índex de rigidesa a tracció és superior per a la mescla de referència respecte a la innovadora quant aquesta s'avalua a 20 i a 5°C.

-En canvi, l'energia dissipada mostra valors superiors per a la mescla innovadora a ambdues temperatures, evidenciant una major ductilitat.

-La tenacitat i l'indicador de tenacitat de la mescla és també superior per a la mescla innovadora en les dues temperatures d'assaig.

-La D₅₀, és a dir la meitat del desplaçament que provoca la ruptura de la mescla és molt similar, i fins i tot lleugerament superior per a la mescla AC16, però a temperatures reduïdes, les



prestacions dúctils del betum modificat de la mescla innovadora permeten observar una major flexibilitat en la mescla innovadora.

-Els valors de tensió màxima són similars per a ambdues mescles, a ambdues temperatures, i els valors de resistència a tracció, que tenen en compte la superfície sobre la que s'aplica la càrrega, es comporten de manera similar.

-El valor de desplaçament a tenacitat marca un valor similar a temperatures de 20°C i superiors per a la mescla innovadora a 5°C

Podem concloure, doncs, que la mescla innovadora tendeix a reportar una major ductilitat respecte a la mescla de referència especialment, quan s'avalua a baixes temperatures.

D'altra banda, l'avaluació de la comparativa entre el comportament de la mescla fabricada en laboratori i mescla innovadora ens mostra el següent:

T ^a	FABRICACIÓ	IRT	GD	TENACITAT	IT	D ₅₀	F _{max}	RT	DT
20	PLANTA	0,76	8,45E-07	6,59E-07	4,51E-07	0,21	1,52	0,54	0,68
20	LAB	0,46	5,61E-07	4,56E-07	4,10E-07	0,16	0,93	0,32	0,90
5	PLANTA	1,47	5,93E-07	3,21E-07	3,33E-08	0,28	2,93	1,07	0,11
5	LAB	1,21	8,47E-07	5,19E-07	1,61E-07	0,55	2,41	0,82	0,31

Figura 9. Resultats Fènix per a mescla innovadora a 20 i 5°C per a mescla fabricada en laboratori i en planta.

La comparativa mostra en general una major rigidització i una menor ductilitat de la mescla fabricada en planta, degut possiblement a processos d'envelliment més marcats en aquest sistema de fabricació i pel reescalfament imposat a la mescla per a la confecció de les provetes, en el cas de la mescla fabricada en planta.

Per avaluar la sensibilitat tèrmica de la ductilitat de la mescla, disposem dels següents resultats:

T ^a	IRT	GD	TENACITAT	IT	D ₅₀	F _{max}	RT	DT
20	0,76	8,46E-07	6,59E-07	4,51E-07	0,21	1,52	0,54	0,68
5	1,47	5,94E-07	3,22E-07	3,33E-08	0,28	2,93	1,07	0,11
-5	1,91	3,66E-07	6,21E-08	2,55E-09	0,28	3,82	1,34	0,04

Figura 10. Resultats Fènix per a mescla innovadora fabricada a planta 20, 5 i -5°C

S'observa una marcada tendència a la rigidització de la mescla en la mesura en la que es redueix la temperatura d'assaig. Els valors, però, de 5 a -5°C marquen una menor variació que en el pas de 20 a 5°C en els paràmetres DT i RT, emprats amb freqüència com els millors indicadors de tenacitat.



VALORACIÓ AMBIENTAL

Per tal d'analitzar la idoneïtat ambiental de la mescla innovadora s'ha realitzat un estudi de petjada de carboni en tota l'actuació realitzada a la B-430, la qual cosa ha permès comparar la solució convencional, fresat i reposició de 5 cm d'AC 16 SURF 35/50 S, amb la solució innovadora, apedaçats de 5 cm d'AC 16 SURF 35/50 S, reciclat en fred amb emulsió de 6 cm, microfresat i estesa d'una capa de 2.5 cm de SMA 8, amb fibres de cel·lulosa i alt contingut de lligant.

L'abast de l'estudi contempla la quantificació de les emissions de CO₂ equivalent associades a l'extracció de les matèries primeres i transport d'aquestes, fabricació de la mescla, transport a obra i estesa. No es considera la petjada associada a la realització d'activitats de manteniment, ni a la retirada de la capa, ni tampoc a la gestió dels residus generats.

Per realitzar l'estudi, s'han registrat diàriament les hores de maquinària a obra, les tones de mescla esteses, la temperatura de la mescla en la fabricació i la humitat dels àrids. La quantitat de matèries primeres s'ha calculat a partir de la fórmula de treball i per als transports s'han consultat les distàncies als mapes. Tots aquests valors registrats s'han multiplicat pels factors d'equivalència consensuats en el grup de treball, constituït en el marc de l'àrea col·laborativa de la Direcció General d'Infraestructures de Mobilitat.

A la taula següent es mostren els resultats de petjada de carboni per m² d'actuació.

EMISSIONS CO ₂ EQ (Kg/m ²)						
	Mat. Primeres	Transport MP	Fabricació	Transport	Estesa	TOTAL
MESCLA REFERÈNCIA	1,87	0,28	1,81	0,97	1,17	6,10
FRESAT	0,00	0,00	0,00	0,48	0,70	1,18
REPOSICIÓ AC 16	1,87	0,28	1,81	0,48	0,47	4,92
SOLUCIÓ INNOVADORA	3,44	0,59	1,22	0,48	0,65	6,38
RECICLAT EN FRED	1,04	0,01	0,00	0,00	0,31	1,36
FRESAT	0,00	0,00	0,00	0,08	0,11	0,19
MICROFRESAT	0,00	0,00	0,00	0,07	0,05	0,11
REPOSICIÓ AC 16	0,32	0,05	0,30	0,08	0,09	0,84
SMA 8	2,09	0,53	0,91	0,26	0,10	3,88

Figura 11: emissions de CO₂eq per m² d'actuació

La mescla de referència inclou les activitats de fresat i reposició amb mescla convencional amb espessor de 5 cm i un rendiment de 300t/dia. La solució innovadora inclou les activitats d'apedaçats (fresat i reposició 5 cm, i un rendiment de 300t/dia), reciclat en fred amb emulsió de 6 cm amb un rendiment de 700t/dia i estesa de SMA 8 de 2.5 cm amb un rendiment de 500t/dia.



Tot i no poder comparar-se les dues actuacions, ja que no són equivalents estructuralment, l'actuació del tram de referència és més favorable que l'actuació del tram innovador per una petita diferència de 0.28 kg CO₂eq/m², gairebé un 5%.

La solució innovadora és desfavorable en les subunitats d'extracció de matèries primeres i transport d'aquestes (figura 12). Aquest fet, es deu a l'elevat contingut de lligant de la mescla i l'ús de betum modificat, que té un factor d'emissió molt més alt (465kg CO₂eq/t) que el betum convencional (272 kg CO₂eq/t). A més, les fibres de cel·lulosa, tot i usar-se en petites proporcions, tenen un elevat impacte pel que fa a emissions de CO₂eq. En quant al transport de matèries primeres, l'execució de la mescla SMA 8 és desavantatjosa degut a la llarga distància que cal recórrer per a l'aprovisionament de l'àrid de mida poc localitzable al mercat.

En canvi, en les subunitats de fabricació, transport de la mescla i estesa, la mescla innovadora és avantatjosa (figura 12). Aquest fet es deu, per una banda, a l'actuació de reciclat en fred amb emulsió que representa una solució clarament favorable respecte a un fresat i reposició, ja que no s'imputen emissions ni de fabricació ni de transport de mescla i, per altra banda, a la menor temperatura de fabricació i la reduïda espessor de la mescla SMA 8 respecte a una mescla convencional.

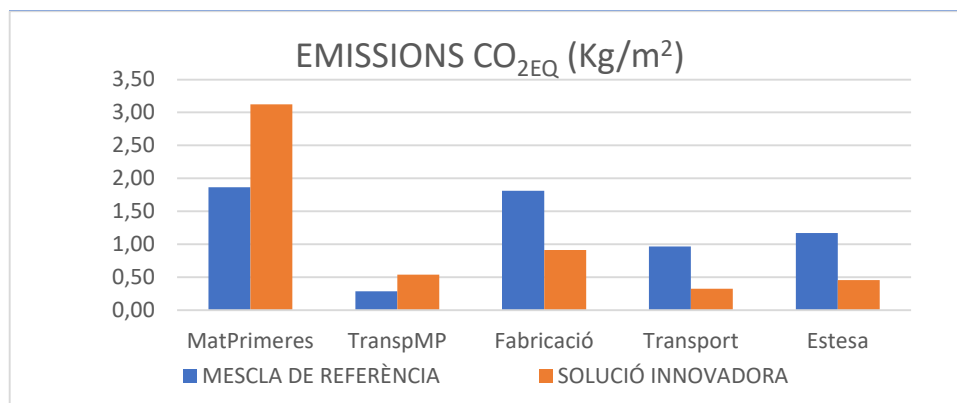


Figura 12: Comparativa d'emissions de CO₂eq per m² de la mescla de referència vs. mescla innovadora

Realitzant la comparativa equiparant les dues solucions estructuralment, és a dir, comptant per a la mescla de referència un fresat i reposició de 7 cm, resulta favorable la solució innovadora per a 1.4kg CO₂eq/m². D'aquesta manera, la solució innovadora hauria suposat un estalvi del 18% de les emissions de CO₂eq.

Per millorar la comparativa seria bo, afegir i comptabilitzar les emissions associades al manteniment de la carretera, d'aquesta manera l'SMA, seria més favorable gràcies a la millora de la durabilitat i la major resistència a la fissuració per fatiga que suposen aquestes mescles respecte a una mescla convencional.

A més de l'anàlisi d'emissions de diòxid de carboni equivalent, cal tenir en compte que la solució innovadora és avantatjosa ambientalment, ja que l'ús de reciclat en fred amb emulsió permet reaprofitar la totalitat del material existent i, per tant, reduir el consum de recursos naturals, la



despesa energètica i la generació de residus. També és avantatjosa per la llarga vida útil que suposa la mescla SMA 8 respecte a una mescla convencional, i per la reducció d'emissions, recursos i energia que suposa la reducció d'espessor de la capa.

CONCLUSIONS

L'execució de l'obra ha permès testar en condicions reals l'execució d'una mescla bituminosa en calent tipus SMA, amb fibres de cel·lulosa i alt contingut de lligant sobre una capa de reciclat en fred amb emulsió, testant una solució innovadora, tant pel que fa a l'aplicació de la capa de rodament en sí com per la definició de la secció, a la vista de les prestacions estructurals d'aquesta. Els resultats contemplats fins a la data evidencien l'assoliment dels objectius i els requeriments del plec de prescripcions.

L'aplicació del reciclat en fred aporta capacitat estructural al ferm, garanteix uniformitat de comportament i flexibilitat; millora del mòdul de deformació ja que no hi ha un sobreescalfament del lligant; a més dels avantatges ambientals com el reaprofitament de la totalitat del material existent i, per tant, la no generació de residus; la baixa despesa energètica i baixa petjada de carboni, ja que s'estalvia en l'extracció i transport de l'àrid. Finalment, l'emulsió utilitzada en l'RFE permet allargar la vida útil degut a la millora de l'embolcall de l'àrid amb l'emulsió donada pel rejuvenidor d'origen vegetal.

D'altra banda, l'ús de la mescla innovadora SMA ha permès dotar en capa de rodament d'una capa amb major ductilitat respecte a la solució de referència, fet que fa preveure l'aparició retardada de fenòmens de fissuració en la via.