

VIDRE EN MESCLES BITUMINOSES EN CALENT

Mar Subarroca Gella, Firtec, SA
Marta Domènech Miquel, Firtec, SA
Aida Garcia Boria, Firtec, SA
Antoni Conejero Cárcerles, Servei Territorial de Carreteres de Girona, 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 ferms sostenibles de la DGIM, l'UTE Firtec, S.A. & Construcciones Rubau, S.A. ha dut a terme la redacció del projecte i l'execució de l'obra "Lot 6. Millora del ferm a la GI-531, del PK 25+090 al 33+093, Sant Aniol de Finestres – les Planes d'Hostoles. El contracte forma part del Pla de Ferms Sostenibles i marcava com aspecte innovador a abordar l'addició de vidre en mescles bituminoses.

Per a la seva execució i a la vista del context s'ha seleccionat l'aplicació d'una mescla bituminosa en calent tipus AC 11 SURF PMB 45/80-65 S en la qual s'ha substituït part de la fracció d'àrid per vidre triturat.

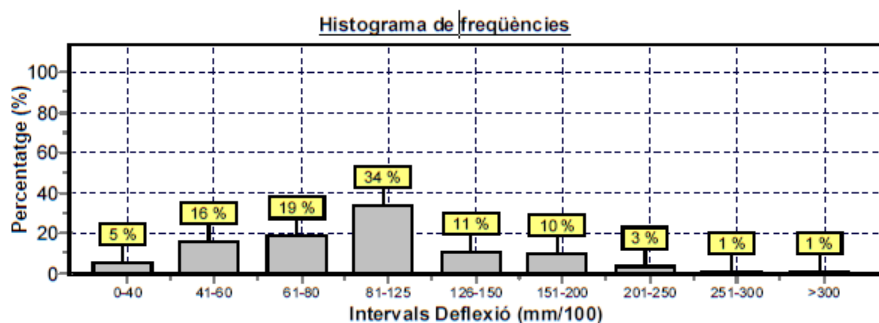
El tram objecte d'estudi és la carretera GI-531, entre els PK 25+090 al PK 33+093, en una longitud de 8.003 m. És una carretera íntegrament interurbana del PK 25+090 fins al PK 32+200. A partir d'aquest punt i fins al PK 33+093, la carretera passa a ser urbana, en els seu pas per les Planes d'Hostoles. És una carretera d'una sola calçada amb dos carrils de circulació (un per sentit). Té un ample mig de 5,50 m, sense vorals.

Es troba en una zona muntanyosa/boscosa, amb terreny accidentat i, per tant, un traçat molt sinuós amb girs de radis petits i pendents elevats. És un terreny humit amb força presència d'aigua en rieres i torrents. En general la carretera està freqüentada per turismes amb presència d'alguns camions tipus tràiler. El volum de trànsit és baix, té categoria de trànsit pesat T 42. La carretera corona a la seva cota màxima al PK 28+060, on hi ha l'accés al restaurant Mas el Siubès. En tot l'àmbit interurbà de l'actuació trobem una àrea de descans al PK 29+200, i un total de cinc entrades residencials/càmpings entre els PK 29+700 i 32+200.

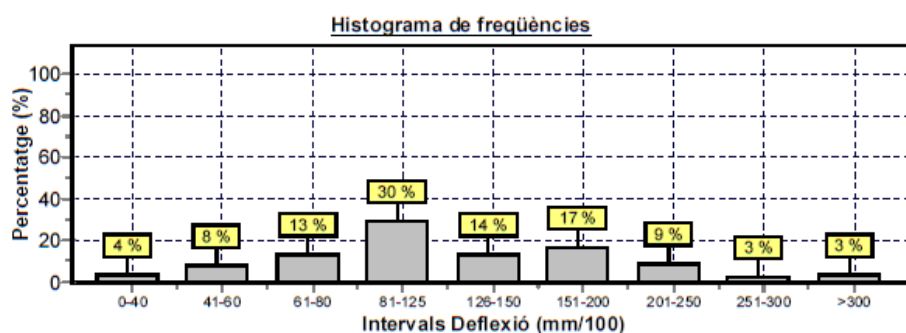
CONTEXT

Per a la definició de la solució s'ha considerat l'estat previ de la via a nivell estructural i en quant a prestacions superficials i de regularitat, els condicionants del plec de prescripcions i altres condicionants ambientals.

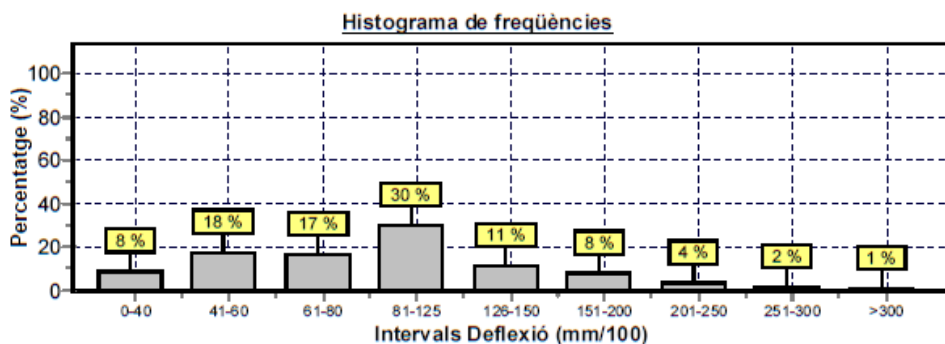
La Direcció General d'Infraestructures de Mobilitat va posar a disposició les següents auscultacions: (1) testimonis de l'abril de 2020, s'observa entre dues i tres capes amb una mitjana de 14,3 cm de gruix; l'estat de les capes inferiors és correcte, no s'observen deformacions puntuals ni assentaments generalitzats. (2) Deflexions amb el deflectògraf Lacroix, de desembre de 2019, resulten una mitjana per la via 1 de 102.99 mm/100 (figura 1a) i 132.19 mm/100 (figura 1b) per la rodada esquerra i dreta respectivament, i per la via 2, una mitjana de 101.66 (figura 1c) i 133.50 mm/100 (figura 1d). Tot i que es registren valors de deflexió patró superiors a 150 mm/100 (taula 3A de 6.3IC) no es consideren valors representatius d'esgotament estructural, degut a l'alt grau de deteriorament de la capa superficial. Segons la taula 2A de la norma 6.3 IC, es considera que el ferm no està esgotat estructuralment, ja que cap dels valors de deflexió supera el valor de 300 mm/100. (3) Coeficient de fregament transversal (CRT) i macrotextura amb SCRIM de maig de 2020, dona una mitjana de les dues vies de 63,3 i 1,21 respectivament. (4) Índex de regularitat internacional (IRI) de desembre de 2019, dona una mitjana de les dues vies de 3,88. No obstant això, els resultats d'IRI i CRT es consideren poc representatius, degut a la sinuositat de la carretera, i invàlids, degut al deteriorament de la capa de rodament.



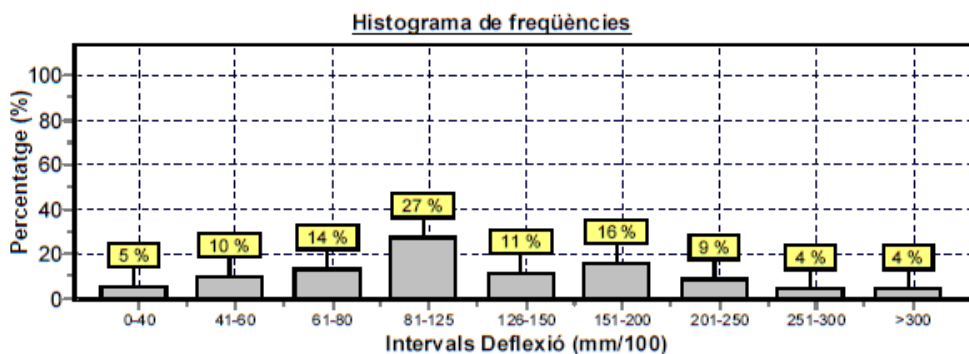
1a



1b



1c



1d

Figura 1: Freqüències dels resultats de deflexions inicials per deflectòmetre Lacroix

En la inspecció visual es determina que es troba un ferm (figura 2) format per mescles bituminoses en calent amb àrids de diferents naturaleses, amb diverses campanyes d'apedaçats i diverses capes de reforç. S'observen fissures superficials, amb zones clivellades i pèrdua de partícules associades a fenòmens de retracció tèrmica per exposició a baixes temperatures en períodes hivernals, excepte en les reparacions més recents. No s'aprecien grans deformacions transversals ni longitudinals ni assentaments puntuals. En general, la carretera presenta un estat estructural correcte i una pobra regularitat superficial.

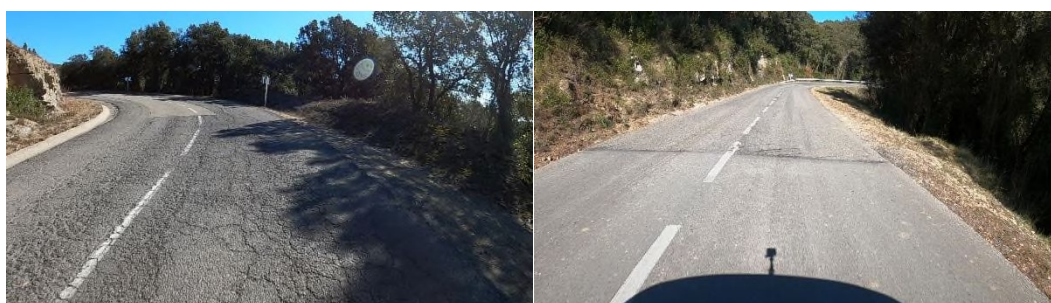


Figura 2: Estat del ferm abans de l'actuació

El plec de prescripcions tècniques particulars (PPTP) indica que es pot utilitzar la calcina de vidre triturat com a fracció d'àrid fi, si no es supera el 15 % en pes de la mescla i és barrejada amb altres àrids. Recomana tenir en compte el pes específic a l'hora de dosificar el betum i matxucar el vidre per tal d'augmentar la durabilitat de la mescla. Pel que fa al disseny, la fabricació, el transport i l'estesa de la mescla indica que es poden aplicar els mateixos mètodes que amb les mescles convencionals, però, es recomana estudiar la pèrdua d'àrids de la mescla.

Amb relació als condicionants ambientals, cal definir la naturalesa dels àrids, la distribució granulomètrica de la mescla i l'espessor de la capa per tal d'oferir unes característiques superficials de resistència al lliscament i drenatge superficials en períodes de pluja i, així, dotar d'una major seguretat els usuaris de la via. Cal també tenir en compte les característiques del màstic i la macrotectura, ja que en temps de fred, el ferm haurà de suportar cicles de gel-desgel, i les sol·licitacions tangencials del ferm que es puguin donar pels vehicles que s'incorporin a la carretera realitzant girs de petit radi.

DESCRIPCIÓ DE LA SOLUCIÓ

Segons els condicionants descrits es defineix com a solució un reciclat en fred amb emulsió (RFE) de 10 cm de gruix de la mescla bituminosa existent, microfresat de fins a 2 cm d'aquesta una vegada executada i estesa de 3 cm d'una mescla bituminosa en calent AC 11 SURF PMB 45/80-65 S amb addició de vidre. L'emulsió utilitzada en l'RFE compta amb l'addició d'additius rejuvenidors.

Tot i que la superfície del projecte és de 39000 m² aproximadament i, per tant, segons el que s'indica en la normativa tècnica aplicable no és imprescindible l'estudi de la viabilitat de tècniques de reciclat, el reciclat en fred amb emulsió es considera la solució òptima pels condicionants ambientals i econòmics. A banda de la innovació que suposa la inclusió d'additius a l'emulsió per rejuvenir el betum residual del fresat, també és innovadora la tipologia del tractament posterior que projecta l'estesa d'una capa de tipus continu en espessor reduïda (3 cm), vs. solucions convencionals d'espessors superiors que exigeix la norma, per capes de rodament per sobre d'actuacions de reciclat; a més de l'addició de vidre amb pols, per tal de complir l'esperit del contracte pel que fa a l'ús de materials procedents del reciclatge.

RECICLAT EN FRED AMB EMULSIÓ

Per l'RFE es va definir una única fórmula de treball per facilitar els treballs a l'obra, després de realitzar els estudis següents: (1) caracterització de la granulometria, el contingut de lligant i les seves característiques de penetració i anell i bola de 4 cales de tempteig transversals en tot un carril, (2) càlcul de la humitat òptima mitjançant el Proctor modificat de la mescla dels materials de les diferents cales de tempteig; i (3) estudiar els valors d'immersió –compressió amb una càrrega de compactació de 170kN segons NLT 162 i velocitat de trencament de 5.08 mm/min segons NLT 162 de provetes fabricades al laboratori amb varis continguts de lligant i aigua afegida.

El fresat analitzat contenia entre un 3.5 i 4.3 % de betum s.m. (figura 4) i la granulometria es trobava dins del fus descrit a la figura 3. La humitat òptima, calculada mitjançant assaig Proctor, va ser de 6.4 % amb una densitat màxima de 2.16 g/cm³. La resistència conservada (I+C) va resultar superior a 70 % en tots els casos estudiats.

TAMÍS	31.5	22.4	16	8	4	2	0.5	0.25	0.063
MAX	100	100	97	71	47	28	11	8	2.7
MIN	94	92	85	59	35	22	5	2	0.0

Figura 3: Fus granulomètric del fresat.

L'emulsió utilitzada és del tipus C60B5 REC, es tracta d'una emulsió bituminosa catiònica de ruptura lenta (≥ 170) que inclou agents rejuenidors. Aquesta va ser seleccionada després de l'anàlisi del lligant recuperat del fresat (figura 4). L'emulsió C60B5 REC té una polaritat de les partícules (UNE EN 1430) positiva; un contingut de lligant, tant per contingut d'aigua com per destil·lació, d'entre 58 i 62 %; el contingut d'oli destil·lat és inferior al 2 %; el temps de fluència a 40°C per una obertura de 2 mm (UNE EN 12846) és d'entre 5 i 70 segons; el residu de tamisat segons UNE EN 1429 és inferior a 0.1 %; la tendència a la sedimentació després de 7 dies (UNE EN 12847) és inferior o igual a 10 %; i l'adhesivitat superior al 90 %. El lligant de l'emulsió, després de ser recuperat per evaporació segons norma EN 13074-1, ofereix unes característiques de penetració inferiors a 220 mm i punt de rebliment superior a 38°C.

	C. 1	C. 2	C. 3	C. 4	MITJANA
Contingut de lligant (%)	3.63	3.53	4.28	4.26	3.9
Penetració (mm) UNE EN 1426	9	4	16	13	10.5
Punt de rebliment (°C) UNE EN 1427	81	>90	69	74.6	74.9

Figura 4: Característiques del lligant recuperat del fresat de les 4 cales de tempteig estudiades, per tal de dissenyar la fórmula de treball del reciclat en fred amb emulsió

AC 11 SURF PMB 45/80-65 S VIDRE

Pel que fa a la mescla amb addició de vidre, es tracta d'una mescla convencional tipus AC 11 SURF S amb betum modificat, en la qual s'ha substituït un 5 % s.a. de l'arena calcària per arena de vidre, denominada comercialment pel subministrador, arena de vidre KSP.

El procés d'obtenció de l'arena de vidre utilitzada és fruit d'un projecte d'innovació per tal de valoritzar els residus del procés de reciclatge del vidre. Aquest procés consisteix en la recepció del vidre, pretractament i pas pel molí de trituració del qual s'obté aproximadament un 80 % de vidre pur triturat, destinat principalment a la venda en foses i un 20 % de rebuig primari. Aquest rebuig primari sense cap altre tractament no podia ser usat en la fosa, ja que contenia materials ceràmics que tenen una temperatura de fosa superior a la del vidre i això ocasionava problemes en el procés. En el projecte d'innovació esmentat s'estudia la viabilitat de valoritzar aquest rebuig primari per a la fosa. Es conclou que és apte per al mateix ús que el vidre pur, si es tracta segons un procés previ de purificació a fi de separar les impureses de pols i d'elements fèrrics, un procés d'assecat i un procés de micronitzat. Així doncs, del rebuig primari, s'obté un producte apte per a la fosa i un rebuig secundari que després de diferents processos de separació mecànica i física, assecat i trituració podria utilitzar-se en el sector de la construcció. Aquest rebuig secundari processat és l'arena de vidre KSP.

L'arena de vidre KSP és, segons l'especificació tècnica del productor, d'aspecte sòlid amb estructura vítria, de varis colors i inodora. Composta principalment de SiO₂ (>72%), Na₂O (13 %), CaO (10.5 %), Al₂O₃ (1.8 %), MgO (1.2 %) K₂O (0.8 %), Fe₂O₃ (0.3 %) i altres compostos amb un percentatge inferior a 0.1 % com TiO₂, BaO, SO₃, MnO, Cr₂O₃, NiO i PbO. Té una càrrega orgànica del 2 % i la densitat és de 1.5 g/cm³.

A més de les especificacions descrites, s'ha analitzat el producte al laboratori i s'han realitzat assajos granulomètrics per tal de tantejar la mescla bituminosa. D'aquestes anàlisis es detecta per inspecció visual que existeixen tres tipus de components, majoritàriament partícules de vidre de diferents mides i colors i, com a components minoritaris, partícules de plàstics individuals de color blanc i aglomeracions de cel·lulosa d'aspecte fibrós, que es quantifiquen mitjançant incineració, tamisat i tamisat més flotació, i els resultats obtinguts són 0.63 %, 2 i 2.2 %. Finalment, s'estudia la granulometria abans i després de la incineració i la densitat aparent. Es presenten els resultats a la figura 5.

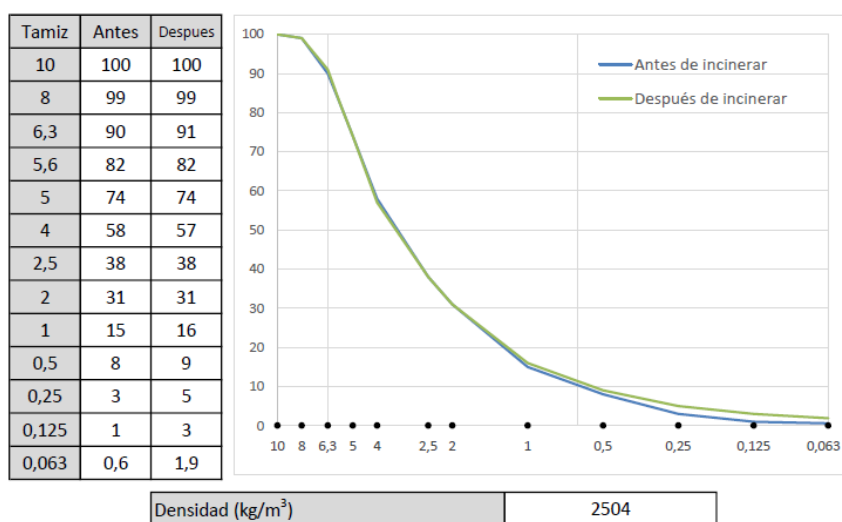


Figura 5: Estudi granulomètric i de densitat de l'arena de vidre KSP, abans del seu ús en mescles bituminoses

La mescla bituminosa està formada per arena calcària, graveta de mida 4/12 granítica i fíl·ler de recuperació que segueixen la granulometria de la figura 6; i un 5.2 %s.m. de betum modificat tipus PMB 45/80-65, que té una penetració d'entre 45 i 80 mm, anell i bola superior a 65°C i un punt de fragilitat Frass inferior o igual a -15°C. Les característiques de buits en mescla, sensibilitat a l'aigua i deformació permanent compleixen les especificacions tècniques de PG3.

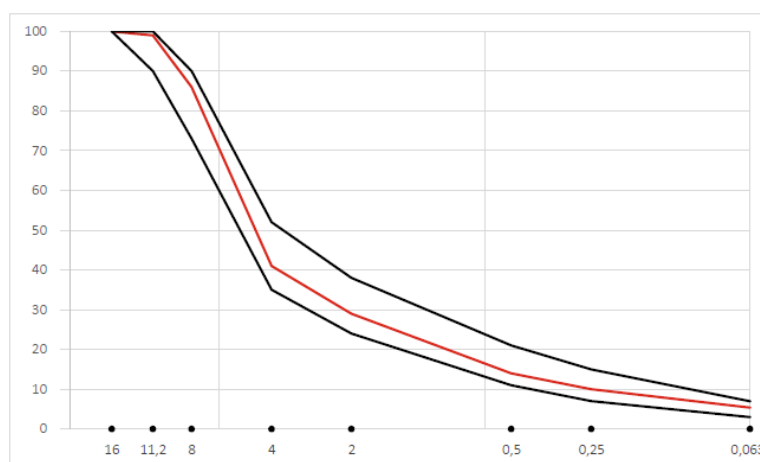


Figura 6: Granulometria i fus requerit per la mescla AC 11 SURF PMB 45/80-65 S VIDRE

No s'estudia la pèrdua de partícules de la mescla en els assajos previs, ja que no es considera un factor rellevant degut a la granulometria contínua, l'elevat contingut de lligant i l'ús de betum modificat. Tot i així, sí que es realitza un estudi de pèrdua de cohesió per l'acció de l'aigua, a fi de comprovar l'adhesivitat àrid-lligant de la mescla, a partir de l'assaig de sensibilitat a l'aigua.

Pel que fa a la fabricació de la mescla, cal tenir en compte, que el vidre no entra al cremador amb la resta d'àrids, a fi d'evitar la fragmentació del vidre i els problemes ambientals i de salut que es podrien ocasionar si la pols de vidre s'absorbís pel filtre de mànigues i acabés a l'ambient.

Per al tram de referència, del PK 32+300 al 33+090 es projecta un fresat i reposició de 10 cm, amb 5 cm d'una capa intermèdia tipus AC 16 BIN 35/50 S i una capa de rodament de 5 cm, també tipus AC 16 SURF 35/50 S, amb un contingut de lligant de 4.7 % i àrids calcaris i porfírics.

VALORACIÓ TÈCNICA

RECICLAT EN FRED AMB EMULSIÓ

Amb relació al reciclat en fred amb emulsió, les actuacions es van realitzar segons el projectat. Per tal de comprovar la idoneïtat del producte es van realitzar controls de granulometria i contingut de lligant tant pel fresat com pel reciclat. Amb els valors de lligant es va poder calcular el lligant residual aportat, és a dir, la diferència de betum entre el fresat i reciclat reportat en percentatge de lligant sobre fresat.

Per al fresat també es va controlar la densitat màxima a partir de l'assaig de Proctor modificat. Aquest va donar una mitjana de densitat màxima de 2.07g/cm³ i 7.5 % d'humitat òptima.

Per l'RFE, a més de la granulometria i el contingut de lligant, es va analitzar (1) la pèrdua de cohesió produïda per l'efecte de l'aigua mitjançant l'assaig d'immersió-compressió segons NLT-162/00. La mitjana dels resultats va ser 79 %, tots aquests per sobre del requisit normatiu de la taula 20.3 de l'article 20 de PG4. (2) La rigidesa de la mescla en testimonis, aplicant la norma

europea 12697-26, annex C, realitzat uns 3 mesos després de l'execució de l'obra. Els resultats obtinguts (figura 7), es troben dins del rang de valors característics per a aquest tipus de mescles, amb una mitjana de 2072 MPa. Les ruptures es van realitzar uns 3 mesos després de l'execució de l'obra. I (3) densitat pel mètode nuclear correlacionant els valors amb els de l'EVIV, el sensor del rodet, que indica la compactació del ferm.

Id	pk	CARRIL	R1	R2	Modul (Mpa)
1	32+250	CI	1297	1426	1362
2	32+150	CD	3773	4638	4206
3	32+070	CI	3390	2802	3096
5	31+800	CI	2284	2183	2234
6	31+600	CD	1416	1381	1399
9	31+800	CD	2445	2329	2387
11	30+600	CD	1917	1744	1831
12	29+600	CI	1400	1227	1314
13	29+610	CD	2657	2566	2612
15	29+950	CD	1932	1980	1956
19	25+100	CI	1067	1060	1064
22	25+900	CI	1492	1315	1404

Figura 7: Resultats de rigidesa en testimonis de reciclat en fred amb emulsió

També es va fer un control de l'emulsió i el betum recuperat d'aquesta per comprovar-ne les característiques.

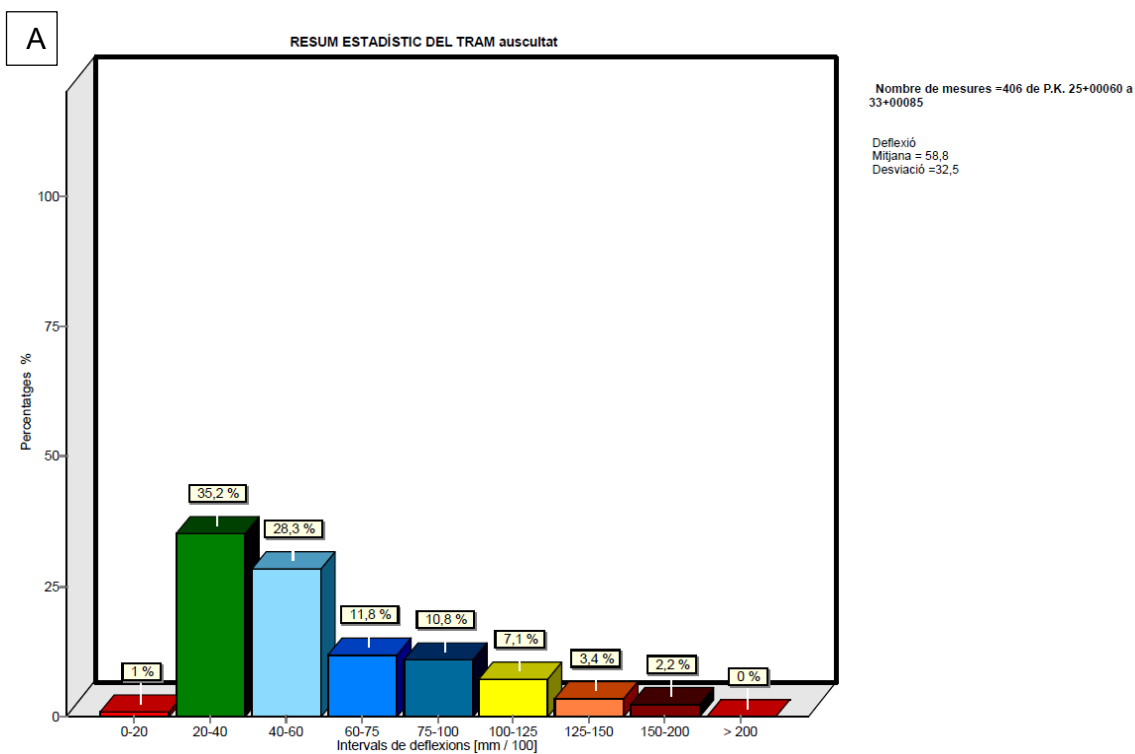
AC 11 SURF PMB 45/80-65 S VIDRE

Per a les actuacions de fabricació i estesa de la mescla amb vidre no hi va haver complicacions no planificades en la fase de projecte. Pel que fa al control de qualitat, es van analitzar els àrids que conformen la mescla, amb els assajos propis d'una mescla bituminosa en calent convencional (granulometria i contingut de lligant, densitat aparent, densitat màxima, contingut de buits, sensibilitat a l'aigua i deformació permanent).

Amb relació a la regularitat superficial, tot i l'espessor de la capa superficial, s'assoleix una significativa millora respecte als resultats obtinguts en l'auscultació realitzada al desembre de 2019, abans de l'actuació. No obstant això, cal fer notar que les dades obtingudes requereixen

d'anàlisi i interpretació, ja que el traçat sinuós de la carretera dificulta la correcta execució de l'assaig.

Com en el cas de l'índex de regularitat, l'estudi i l'anàlisi de les dades reportades per l'assaig de lliscament transversal, ha conclòs que el traçat, pels canvis en la trajectòria imposats a l'equip de mesura i per la velocitat de circulació per sota del valor normatiu, no permeten disposar d'un assaig de referència escaient. Tot i així, avaluant de manera relativa els valors obtinguts abans i després de l'actuació s'observa una millora en les prestacions. Aquest aspecte és confirmat també pels resultats de l'assaig de pèndul TRRL (NLT-175/98), el qual reporta valors de fregament superiors a 74 i amb una mitjana de resultats de 77. L'estudi de la textura superficial del ferm, mitjançant el mètode del cercle d'arena (UNE EN 13036-1) ha estat favorable i supera el requisit ofert. L'avaluació de les deflexions, mitjançant el deflectòmetre d'impacte PRIMAX, es pot observar a la figura 8 a la via 1, després de 406 mesures, dona una mitjana de 58.8 mm/100 i a la via 2, després de 399 mesures, dona 67.5 mm/100 de mitjana.



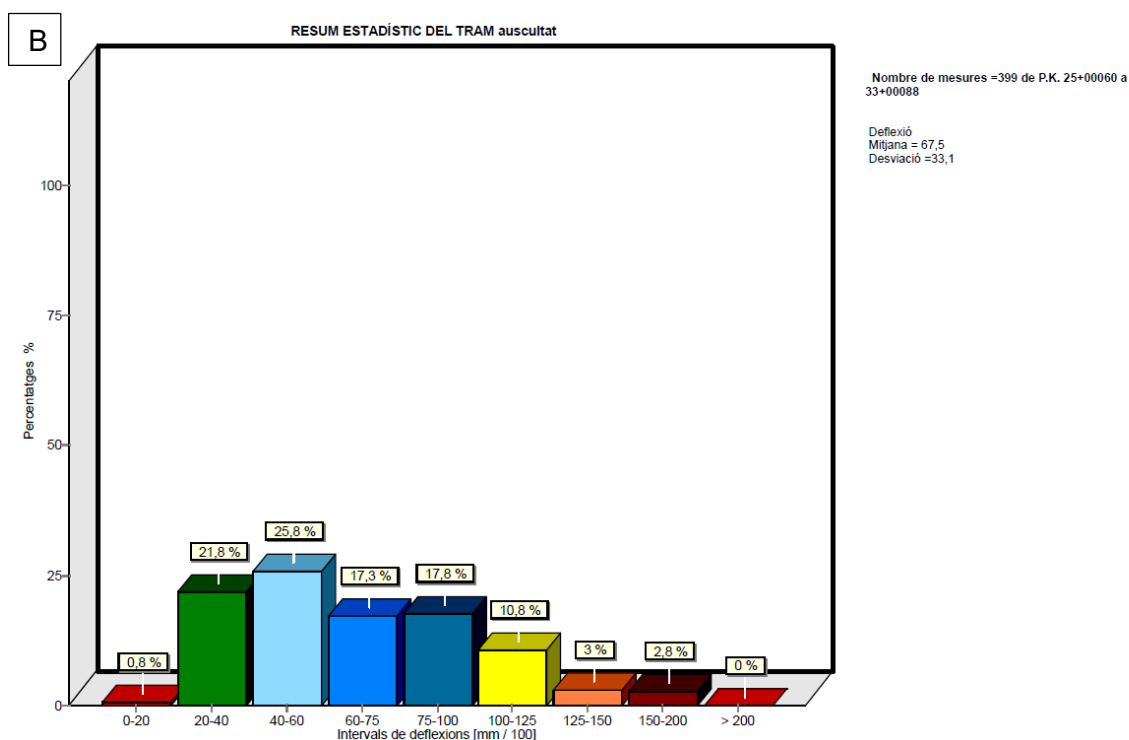


Figura 8: Distribució de les deflexions després de l'actuació en la via 1 (A) i via 2 (B)

Tot i que les condicions de mesura pròpies de l'assaig amb deflectòmetre d'impacte i les corresponents a deflectògraf Lacroix no són equivalents, ja que la freqüència d'aplicació de la càrrega és diferent en els dos mètodes, la "Nota tècnica refundida sobre los factores de corrección de los equipos de auscultación de la deflexión en explanadas, firmes y pavimentos en la red de carreteras del estado, que unifica y anula a las firmadas en 30 de Diciembre de 2008, el 30 de Enero de 2009 y el 23 de Marzo de 2009" considera que no es necessari establir un factor de correcció per fer equivalent a efectes pràctics la informació traslladada per l'equip de referència habitual (Lacroix), respecte al deflectòmetre d'impacte. Si considerem, doncs, comparables i analitzem els resultats de deflectòmetre d'impacte (figura 8) respecte als valors inicials (figura 1) es percep una clara millora, tant en el descens del valor mig de deflexió (d'entre 50-60 mm/100), com en l'homogeneïtat dels valors mesurats.

A més, s'ha realitzat un estudi exhaustiu de la pèrdua de cohesió per l'acció de l'aigua que permet comprovar l'adhesivitat àrid-lligant de la mescla, a partir de l'assaig de sensibilitat a l'aigua, en el qual es determina la resistència a tracció indirecta de provetes sotmeses a un procés d'immersió en aigua i provetes conservades en aire en diferents condicions. L'objectiu d'aquest estudi és determinar els efectes de l'addició de vidre en una mescla i per assolir-lo es comparen els resultats dels assajos de la mescla innovadora (AC 11 SURF PMB 45/80-65 S VIDRE) amb els de la mescla convencional (AC 16 SURF 35/50 S). A més de realitzar l'assaig normatiu (sèrie 1) (EN 12697-12), s'estudia per una banda la sensibilitat en provetes envellides (sèrie 2) i per l'altra allargant el curat en aigua (sèrie 3) (Figura 9).



Figura 9: Provetes ja trencades de l'anàlisi de sensibilitat a l'aigua. A, C i E: mescla AC 11 SURF PMB 45/80-65 S VIDRE; B, D i F: mescla AC 16 SURF 35/50 S; A i B: sèrie 1; C i D: sèrie 2; E i F: sèrie 3

L'envelliment de la mescla bituminosa contribueix al deteriorament del ferm. Aquest es dona per variables intrínseques de la pròpia mescla, com el tipus d'àrids i lligant i el contingut de buits; i variables extrínseques com la temperatura, la humitat i la radiació ultraviolada. Els mecanismes d'envelliment poden ser de tipus químic com la volatilització, l'oxidació i la polimerització que endureixen la mescla, fent-la susceptible d'esquerdar-se, per on entrarà l'aigua donant lloc a pèrdua de cohesió i danys per humitat. L'aigua genera pèrdua d'adherència entre àrid – lligant, això genera una pèrdua de cohesió que al mateix temps farà augmentar la deformació permanent de la mescla. Aquest fenomen, anomenat *stripping* va ser descrit durant la dècada de 1930 i estudiat per molt autors durant aquests anys. Tot i que les causes són molt complexes, es destaca la importància de l'afinitat àrid – lligant i l'edat del paviment.

Així doncs, es fabriquen al laboratori les dues mescles i es fan tres sèries de 10 provetes de cada una de les mescles. Totes aquestes tenen un diàmetre de 100 mm i es compacten a 50 cops per cara amb una compactadora d'impacte. En la sèrie 1, es realitza el curat normatiu, és a dir, primerament se submergeixen la meitat de les provetes en aigua i es fa el buit durant 30 minuts, a continuació es deixen, submergides en aigua també, durant 3 dies a 40°C, finalment, es deixen en aigua a 15°C durant un dia. L'altra meitat de les provetes es deixen a l'aire a temperatura ambient durant els tres dies i després en aigua a 15°C durant un dia. En la sèrie 2, es fabriquen les provetes i s'envelleixen dins del motlle abans de començar el procés de curat. L'envelliment

de les provetes es realitza segons el mètode LINK, desenvolupat per Sholz (1995), el qual implica sotmetre les provetes durant 120 h a 85+/-1°C. En la sèrie 3, el procés de curat del grup de provetes humides s'allarga fins a 7 dies, mantenint la temperatura normativa de 40°C.

	Condicions	Mescla	Provetes	Densitat (kg/m ³)	ITS (kPa)	SENSIBILITAT (%)	Tipus ruptura
SÈRIE 1	Assaig normatiu EN 12697-12	AC 11 VIDRE	P humit	2237,9	2311,9	91,4	RECTE
			P sec	2223,4	2528,3		
		AC 16	P humit	2299	2483,4	87,1	RECTE
			P sec	2293	3103,9		
SÈRIE 2	Envelliment de provetes (85°C - 120h)	AC 11 VIDRE	P humit	2264,1	2404,5	85,7	RECTE
			P sec	2273,8	2805,9		
		AC 16	P humit	2277	2672	86,5	RECTE
			P sec	2293	3088		
SÈRIE 3	Allargament de curat en aigua (7 dies)	AC 11 VIDRE	P humit	2258,8	1981,7	75,1	RECTE
			P sec	2254,1	2639,1		
		AC 16	P humit	2308	2162,1	67,1	RECTE
			P sec	2320	3223,3		

Figura 10: Resultats de l'anàlisi de la sensibilitat a l'aigua

A la figura 10 es mostren els resultats obtinguts de l'anàlisi. Tant per a la mescla innovadora com a la mescla convencional, els resultats obtinguts de l'assaig normatiu (sèrie 1) i l'assaig després d'envellir les provetes (sèrie 2) assoleixen els requisits normatius de PG3. L'envelliment de les provetes, provoca una disminució de la sensibilitat d'un 5 % aproximadament, respecte a l'assaig normatiu, de la mescla amb vidre, i és gairebé imperceptible en la mescla convencional. L'allargament del curat en aigua implica una disminució d'entre 15-20 % de la sensibilitat.

Excepte en la sèrie 2, en la qual els valors són similars, els resultats són més favorables per la mescla amb vidre que per la mescla convencional. Aquest fet, pot ser degut primerament pel tipus i la quantitat de betum, l'AC 11 VIDRE porta betum modificat i un 0.5 % més de lligant sobre mostra respecte a la mescla amb betum convencional. Per altra banda, cal tenir en compte el contingut de buits en mescla que es relaciona amb la permeabilitat d'aquesta i, per tant, amb la sensibilitat a l'aigua. A major contingut de buits, major permeabilitat, (Arambula *et al.*, 2007) i, per tant, és esperable un resultat de sensibilitat a l'aigua (ITSR) inferior. La mitjana dels resultats de buits en mescla del control de qualitat segons UNE EN 12697-6, pel mètode SSD en provetes compactades a 75 cops per cara ha donat 4.3 % en la mescla innovadora i 5.3 % en la mescla convencional. Així doncs, el contingut de buits també explica els valors més favorables de la mescla amb vidre.

En conseqüència, amb aquesta comparativa, es denota que la mescla fabricada amb aportació de vidre no evidencia una pèrdua de cohesió per acció de l'aigua, ni a l'adhesivitat àrid – lligant respecte a la mescla de referència. Altres factors com la major dotació de lligant de la mescla i l'ús de betum modificat semblen haver pal·liat amb escreix l'efecte de reducció d'afinitat documentat en la bibliografia (*“User guidelines for waste and byproduct materials in pavement construction. Waste glass”. Publication number FHWA-RD-97-148*). No obstant això, considerant els valors de sensibilitat a l'aigua obtinguts per a la mescla amb vidre i comparant-los amb els valors característics d'una mescla igual sense addició de vidre de la base de dades del grup, és a dir, una mescla tipus AC 11 SURF PMB 45/80-65 S, no s'aprecia ni millora ni empitjorament de les propietats. En definitiva, els resultats de la mescla AC 11 SURF PMB 45/80-65 S amb i sense vidre són similars i més favorables que la mescla de referència AC 16 SURF 35/50 S.

VALORACIÓ AMBIENTAL

A continuació es descriu la petjada de carboni que ha generat el desenvolupament d'aquesta actuació, tant pel tram de referència que inclou fresat i reposició de 10 cm d'una mescla convencional, com pel tram innovador que inclou 10 cm de reciclat en fred amb emulsió, fresat d'encaixos i microfresat, i 3 cm de mescla tipus AC 11 SURF PMB 45/80-65 S amb addició de vidre. En l'estudi es té en compte les subunitats d'extracció de matèries primeres i el transport d'aquestes a planta, fabricació de la mescla bituminosa, el transport de la mescla de planta a l'obra i el transport del fresat d'obra a planta i l'estesa de la mescla bituminosa. No es considera l'energia ni el CO₂eq associat a la realització d'activitats de manteniment, ni la retirada de la capa, ni gestió dels residus generats. Els càlculs s'han realitzat a partir dels factors d'emissió proporcionats pel grup de treball d'emissions creat en el marc de les obres de CPI.

S'emet en total 342.249,53 kg CO₂eq en tota l'obra, essent un 15 % el tram convencional i l'altre 85 % el tram innovador. En valors absoluts, les emissions associades al tram innovador són molt més elevades degut a la superfície d'actuació, que és unes 10 vegades superior respecte al tram de referència. És per això que s'analitza i es comparen les emissions per metre quadrat (figura 11).

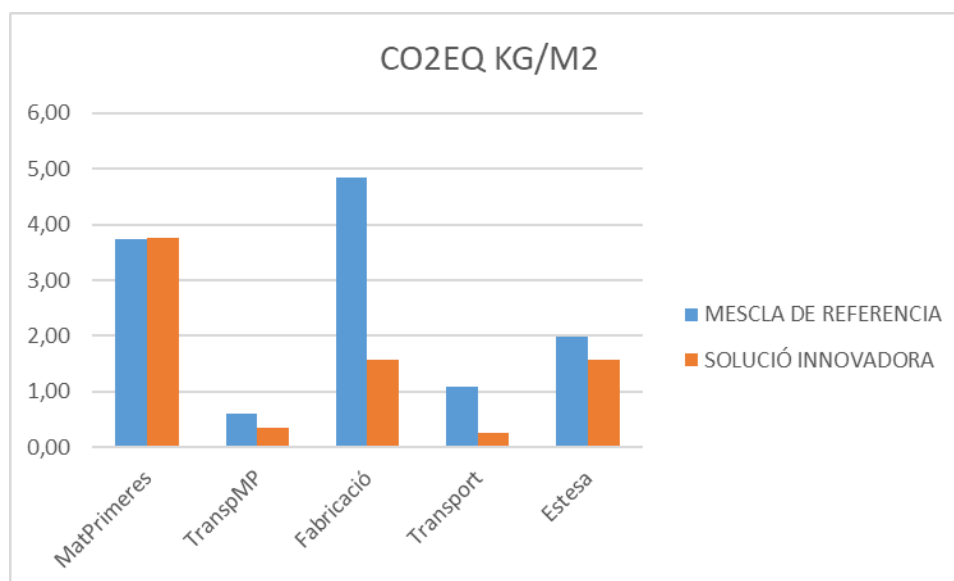


Figura 11: Comparació de les emissions de CO₂eq en kg/m² mescla entre la solució innovadora i la solució de referència

La mescla de referència suma un total de 12.26 kg de CO₂eq/m² i la mescla innovadora 7.54 kg de CO₂eq/m². En totes les subunitats estudiades, excepte l'extracció de matèries primeres, la solució innovadora és més favorable. Pel que fa a l'extracció de matèries primeres, sembla que la solució innovadora hauria de tenir un valor desfavorable, degut al contingut de lligant més elevat de la capa de rodament i al fet que es tracta de betum modificat, que té un factor d'emissió força superior al d'un betum convencional; però, l'actuació de reciclat en fred amb emulsió, en el qual només es contempla la fabricació de l'emulsió, fa que els valors obtinguts siguin equiparables en les dues solucions. En el cas de la fabricació, és més favorable la solució innovadora per l'espessor de la capa de rodament, però a efectes d'emissions per tona de mescla, el valor seria el mateix donat que les mescles han estat fabricades a la mateixa planta, amb la mateixa temperatura i humitat dels àrids. Pel que fa al transport de la mescla, la mescla convencional és desfavorable degut al retorn del fresat a planta. Finalment, l'estesa és relativament similar en les dues solucions, tot i la diferència d'espessors, ja que es contemplen rendiments similars de 300 t/dia; aquest fet es deu a la poca superfície d'actuació que contempla la mescla convencional. Així doncs, amb aquestes condicions, tenint en compte una mateixa superfície, s'estalviaria un 38,5 %.

Amb la finalitat de fer una comparativa millor, es realitza el mateix càlcul contemplant un rendiment d'estesa de la capa de rodament de la mescla convencional de 500 t/dia respecte a l'estesa de la mescla innovadora a 300 t/dia. En aquest cas, l'estesa de la solució innovadora seria desfavorable, 0,3 kg CO₂eq/m² superior a l'estesa de la mescla convencional. I, en total, tenint en compte una mateixa superfície, es reduiria l'estalvi fins a un 34.7 %.

Cal tenir en compte que en aquest estudi no es considera la petjada associada a la gestió del fresat com a residu a l'abocador, per tant, la solució innovadora seria encara més favorable. D'altra banda, el factor d'emissió utilitzat per al vidre com a matèria primera és el mateix que el

del fresat processat, ja que no es disposa d'aquesta dada i seria la dada més pròxima pel fet de ser un residu.

A banda de la petjada de carboni, cal destacar l'estalvi de recursos naturals gràcies principalment a l'actuació de reciclat en fred amb emulsió, en la qual s'estalvia el 100 % de l'àrid i part del lligant respecte a una mescla bituminosa en calent i, també, l'estalvi menys significatiu que suposa l'ús d'un residu com el vidre.

CONCLUSIONS

L'execució de l'obra ha permès testar en condicions reals l'execució d'una mescla bituminosa en calent d'espessor reduïda amb addició de vidre. Els resultats contemplats fins a la data evidencien l'assoliment dels objectius i 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 la 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.

Per tal de dissenyar la mescla innovadora amb addició de vidre, ha estat necessari caracteritzar el vidre com qualsevol matèria primera que conforma la mescla. Això, combinat amb el fet d'utilitzar betum modificat i en un contingut elevat, ha permès obtenir uns resultats de caracterització de la mescla favorables i complir amb les prestacions requerides, tot i l'addició de vidre.

La pèrdua de cohesió per l'acció de l'aigua de la mescla amb addició de vidre, analitzada mitjançant l'assaig de sensibilitat a l'aigua, és més favorable que la mescla convencional. Aquests resultats s'atribueixen al tipus de betum, la major quantitat d'aquest i un contingut de buits menor.

Els càlculs realitzats de petjada de carboni, indiquen un estalvi d'un 38.5 % de les emissions de CO₂eq de l'aplicació de 10 cm d'RFE i 3 cm d'AC 11 SURF BM3C S VIDRE respecte al fresat i reposició de 10 cm d'AC 16 SURF 35/50 S.