

COMPRA PÚBLICA VERDA DE MESCLES BITUMINOSAS ALTAMENT MODIFICADES AMB CAUTXÚ D'NFVU PRETRACTAT, INCORPORAT PER VIA SECA

Jorge Ortiz Ripoll, Arnó Infraestructuras
Rubén Subías Pueyo, Romero Polo
Jaume Carbó Audí, Parma Ingeniería
Emma Montero Mur, Antlia Consultoría
Baltasar Rullan Marques, Servei Territorial de Carreteres de Lleida, del Departament de Territori

RESUM

Les actuacions per a la rehabilitació del ferm de la carretera L-310, entre Tàrrega i Guissona (Lleida), emmarcades dins del programa de compra pública d'innovació, en el pla de fermes sostenibles 2022, de la Generalitat de Catalunya han comprès la redacció del projecte i l'execució de les obres, i conclouran amb la monitorització i el seguiment de l'evolució de l'estat del ferm durant els propers cinc anys. Després d'actuacions prèvies diverses, s'ha posat en obra una capa de trànsit de 3 cm de gruix, de mescla bituminosa tipus BBTM 11 B 50/70, en calent i semicalenta, altament modificada amb cautxú pretractat, procedent de la trituració de pneumàtics al final de la seva vida útil (NFVU), i incorporat per via seca. Amb aquest contracte s'ha posat a punt una nova solució de rehabilitació, adaptada a les necessitats de la xarxa de carreteres de la Generalitat de Catalunya i s'han assajat nous models d'especificacions. També s'ha innovat utilitzant indicadors de servei, estat i gestió en la valoració de les ofertes i per fer el seguiment de les obres, i amb la implantació de la metodologia BIM, segons el Manual BIM de la Generalitat de Catalunya en totes les fases de l'actuació: projecte, construcció, obra executada i operació. Finalment, s'ha redactat un nou plec de prescripcions tècniques per a mescles bituminoses, en calent o semicalentes, d'alta viscositat amb cautxú d'NFVU pretractat incorporat per via seca.

MOTS CLAU

Compra pública verda, mescles bituminoses, cautxú, NFVU, en calent i semicalentes.

1. INTRODUCCIÓ

El pla anomenat de Ferms Sostenibles s'emmarca dins del Programa de compra pública d'innovació de les estratègies de recerca i innovació per a l'especialització intel·ligent a Catalunya, RIS3CAT, aprovat pel Govern de la Generalitat el juny de 2016, que té com a objectiu general impulsar la demanda d'innovació, per part de les administracions públiques catalanes, mitjançant el disseny i l'execució de projectes pilot demostradors i innovadors. Els objectius concrets del pla de ferms sostenibles consisteixen a rehabilitar els ferms i altres elements constitutius de la carretera mitjançant tècniques innovadores, que millorin el comportament i el perfil ambiental de les solucions convencionals. També comprenen l'elaboració de les prescripcions tècniques necessàries per aplicar les experiències innovadores a altres actuacions i la difusió dels resultats obtinguts. Les solucions assajades han estat basades en les propostes rebudes per la Direcció General d'Infraestructures de Mobilitat en una consulta oberta al mercat realitzada el 2017 i resposta per 23 entitats. L'any 2019 es van invertir 2 milions d'euros en els dos primers projectes, adreçats a reduir la temperatura de fabricació de les mescles bituminoses, i a l'any 2021 es van adjudicar 12 noves actuacions, executades el 2022, que han suposat una inversió de 20 milions d'euros. Entre aquestes darreres es troba la que és objecte de divulgació en aquest text, en la que s'ha construït una capa de trànsit amb mescla tipus bituminosa BBTM 11 B, altament modificada amb cautxú procedent de la trituració de pneumàtics al final de la seva vida útil (NFVU), pretractat i incorporat per via seca. La Direcció General d'Infraestructures de Mobilitat també ha innovat fent un seguiment per indicadors, incloent-hi indicadors funcionals, d'afectació al trànsit, disponibilitat de mitjans, control de qualitat i ambientals, i amb la implantació de la metodologia BIM en totes les fases de l'actuació: projecte, construcció, obra executada i operació [1].

La incorporació de cautxú a les mescles bituminoses en calent, a més de servir per reciclar una gran quantitat d'un residu que, alternativament, hauria de conduir-se a abocadors, o bé utilitzar-se en reciclats o aprofitaments de menor valor, és útil per proposar-se diverses millores en els projectes de construcció i conservació de ferms. En primer lloc, incrementa significativament la viscositat del lligant bituminós (fins i tot en un factor de 10 en el cas de les mescles altament modificades), la qual cosa permet fixar una major quantitat de betum sense córrer riscos de patir escurriments durant el transport o la posada en obra. Augmentant la proporció de lligant, s'obtenen mescles bituminoses amb més cohesió, i més resistents a l'acció de l'aigua i a la resta d'agents atmosfèrics, a més de més duradores, perquè l'envelliment a llarg termini del betum està directament relacionat amb el gruix de la pel·lícula de lligant que envolta els àrids [2]. D'altra banda, utilitzant betums més viscosos, s'obtenen capes de trànsit més rígides i resistents a les deformacions permanents, fins i tot després d'augmentar els continguts de betum. A més, la combinació d'elevades proporcions de betum amb cautxú d'NFVU dona lloc a mescles menys fràgils que les mescles convencionals i, per tant, més resistents a la fissuració per fatiga i més capaces d'impedir o limitar l'aparició de fissures per reflexió de les existents en capes inferiors. Expressat d'una altra manera, les mescles bituminoses altament modificades amb cautxú són menys susceptibles a les variacions de temperatura, perquè el seu lligant presenta un interval de plasticitat (diferència entre les temperatures dels punts de reblaniment Anell i Bola i de fragilitat Fraas), superior als típics dels betums convencionals i de molts betums modificats amb polímers [2, 3].

Les mescles bituminoses que incorporen partícules d'NFVU també poden presentar alguns inconvenients. Així, és habitual que introduir cautxú, per qualsevol via, obligui a elevar la temperatura de fabricació de 10°C a 15°C per sobre de les temperatures típiques de la producció convencional, o que la via seca requereixi endarrerir el començament de la posada en obra, fins que es completi la digestió o estabilització volumètrica del sistema cautxú-betum. En tots els casos cal utilitzar dissenys de mescla específics per incrementar els buits en àrids, d'acord amb els volums ocupats per les partícules de cautxú i per un betum dosificat en majors proporcions de les habituals [4]. Tanmateix, tant la necessitat d'elevar la temperatura de fabricació, com la de comptar amb temps d'espera en el cas de la producció per via seca, poden obviar-se utilitzant partícules de cautxú d'NFVU pretractades. És el que s'ha fet en aquest projecte on, gràcies al pretractament del cautxú, fins i tot ha pogut reduir-se la temperatura de fabricació fins a situar-la en el rang propi de les mescles bituminoses semicalentes.

2. DESCRIPCIÓ DE L'ACTUACIÓ

El projecte i les obres de rehabilitació del ferm a la carretera L-310 del PK 0+000 al 18+540 en el tram Tàrrrega-Guissona, amb un pressupost de 4,2 milions d'euros, i designada com a Lot 10 del projecte de Ferms Sostenibles 2021-2022, van ser adjudicats a l'UTE ROMERO POLO-ARNÓ INFRAESTRUCTURAS el 10 de novembre de 2021. El projecte constructiu va ser redactat per PARMA Enginyeria, i ANTLIA va exercir d'assistència tècnica de la direcció d'obra. L'aprovació del projecte es va produir el 27 d'abril de 2022 i les obres van executar-se entre maig i agost del mateix any. Ja en fase d'explotació, es van completar els assaigs d'acceptació (CRT, IRI i Ecodyn), es van validar els indicadors de totes les fases, i es van presentar els darrers lliurables BIM de les fases de construcció i obra executada, a més dels de difusió i la certificació final. Entre els documents presentats en fase d'explotació cal destacar un plec de prescripcions tècniques per a mescles bituminoses d'alta viscositat amb cautxú d'NFVU, redactat per facilitar l'aplicació d'aquesta nova solució de rehabilitació en futures contractacions de compra pública verda.

La carretera L-310 és una via convencional que pertany a la xarxa bàsica secundària, de calçada única i dos carrils de circulació, un per sentit, d'una amplada total de 9 m, comprenent dos carrils de 3,50 m i dos vorals d'1 m. El ferm objecte de rehabilitació és semi-flexible, constituït per capes de mescles bituminoses disposades sobre una capa de base granular. D'acord amb l'estudi de deflexions i els resultats de la inspecció visual, es van projectar cinc tipus d'operacions:

- Rehabilitació estructural mitjançant fresat de 20 cm del ferm existent i reposició amb mescla tipus AC22 base 50/70 S.
- Fresat de 5 cm del paviment existent i reposició amb mescla AC16 bin 50/70 S.
- Recrescut amb 5 cm de capa intermèdia tipus AC 16 bin 50/70 S.
- Microfresat de la superfície existent en aquells trams no afectats per qualsevol de les tres operacions anteriors.
- Estesa d'una nova capa de rodament a tota la longitud del tram, amb barreja bituminosa tipus BBTM 11 B 50/70 altament modificada amb cautxú.

L'estesa de la capa de trànsit innovadora va iniciar-se després de la construcció de dos trams de prova on es van assajar dos tipus de cautxú pretractat, es van verificar les fórmules de treball, es va establir el pla de compactació, i es van determinar la densitat de referència i la prescripció de macrotextura superficial. En el primer tram de prova es va utilitzar àrid gruixut artificial siderúrgic, obtingut de la trituració d'escòries de l'acereria CELSA (Barcelona), i en el segon, com a la resta de l'obra, àrid gruixut natural procedent de la pedrera de gabre La Soriana (Osca) propietat d'ARNÓ.



Fotografies 1 i 2: actuacions prèvies a l'estesa de la nova capa de trànsit. Rehabilitació estructural (esquerra) i estesa de la capa intermèdia (dreta).

En tots els casos, l'àrid fi va procedir de graveres on s'exploten terrasses del riu Noguera Ribagorçana (Lleida). A més, es va construir un tram de referència amb mescla tipus BBTM 11B PMB 45/80-65 que es farà servir per comparar el seu comportament a llarg termini amb el de la capa de trànsit innovadora.

2.1. Fórmula de treball de la mescla BBTM 11 B 50/70 altament modificada amb cautxú d'NFVU

Un cop completades les actuacions prèvies, es va estendre una capa de trànsit de 3 cm de gruix de mescla BBTM 11B 50/70 altament modificada amb cautxú pretractat. El cautxú utilitzat (fotografia 1) procedeix de la trituració de pneumàtics al final de la seva vida útil a les instal·lacions de RENEAL (Palència), i ha estat sotmès a un tractament que té per objecte eliminar els temps d'espera, des de la fabricació de la mescla fins a l'estabilització del sistema cautxú-betum, típics de la incorporació per via seca. Segons es justifica més endavant, aquest tractament també permet reduir la temperatura de fabricació de la mescla bituminosa en més de 20°C respecte a la barreja de referència, portant-la a rangs propis de les tecnologies semicalentes.

La mescla va ser dissenyada, ja a la fase de projecte, amb els criteris habitualment utilitzats per complir els requisits volumètrics (granulometria, contingut mínim de betum, relació fil·ler/betum, buits, ...), i mecànics (sensibilitat a l'aigua i resistència a la deformació permanent), exigits al PG-3 a les mescles BBTM 11B convencionals, i obtenir una capa de trànsit amb les característiques superficials (macrotextura, CRT, IRI) establertes al plec de prescripcions tècniques particulars del projecte. La consideració de mescla altament modificada amb cautxú es va basar en imposar, com a requisit addicional, un contingut de cautxú igual o superior al 15 % del contingut de betum+cautxú, mentre que en relació al contingut mínim de betum es van respectar les recomanacions de la Guia SIGNUS per a la fabricació i posada en obra de mescles bituminoses amb pols de pneumàtic. Finalment, per no perjudicar el perfil ambiental de la mescla innovadora, es va seleccionar un tipus de cautxú pretractat (TyreXol™) compatible amb una fabricació a temperatures inferiors a la de la mescla de referència (fotografia 3 i taula 2) [3, 4].

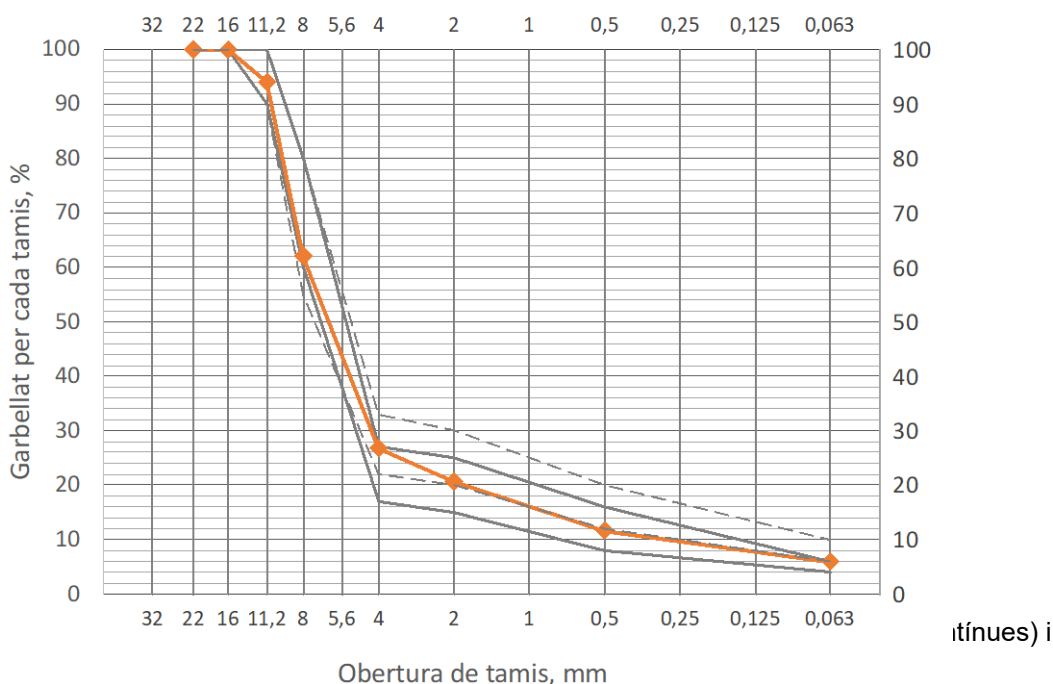


Figura 1

D'aquesta manera es va arribar a una fórmula de treball on la mescla d'àrids presenta la corba granulomètrica mostrada en la figura 1, interior l'àrea comuna als fusos BBTM 11 B i SMA 11, amb un 5,2 % de betum 50/70 i un 0,9 % de cautxú pretractat (ambdues proporcions sobre mescla), i la resta de les propietats indicades en la taula 1.

Taula 1: propietats de la mescla BBTM 11 B 50/70 NFVU dissenyada.

PROPIETAT	UD.	VALOR	ESPECIFICACIÓ	OBSERVACIONS
Contingut de betum, s/m	%	5,2	4,75	Per a àrid 2,65 g/cm ³
Contingut de cautxú NFVU, s/m	%	0,9	-	TyreXol™ MMA30
Buits en mescla (UNE-EN 12697-8)	%	12,1	>12	
Buits en els àrids (UNE-EN 12697-8)	%	24,4	-	
Buits reblerts (UNE-EN 12697-8)	%	48,6	-	
Densitat màxima (UNE-EN 12697-5)	g/cm ₃	2,594	-	
Densitat aparent (UNE-EN 12.697-5)	g/cm ₃	2,280	-	
Resistència def. perman. (UNE-EN 12697-22)	mm	0,07	TE≤0,07	WTS aire, 10 ³ cicles
Sensibilitat a l'aigua (UNE -EN 12697-12)	%	92,2	>90	
Pèrdua de partícules (UNE-EN 12697-17)	%	4,4	<20	Drenants
Escorriment de betum (UNE-EN 12697-18)	%	< 0,1	No	
Relació pols mineral/betum		1,1	1,0 a 1,2	Recomanació
Relació PNFU/(betum + PNFVU)	%	15 %	≥15	Condicció MAVC



Fotografia 3: cautxú pretractat procedent de la trituració d'NFVU TyreXol™.

Taula 2: propietats del cautxú d'NFVU pretractat (TyreXol™).

PROPIETAT	NORMA	VALOR
Grandària màxima de partícula	UNE-EN 14243-2	< 0,8 mm
Contingut de cautxú	-	≥99 %
Humitat	CEN/TS 16916	< 0,3 %
Contingut de materials ferromagnètics	UNE-EN 14243-2	< 1 %
Contingut de fibres tèxtils	UNE-EN 14243-2	< 0,25 %
Densitat aparent	-	0,45-0,48 g/cm ³
Densitat real	-	1,15-1,17 g/cm ³
Superfície específica BET	ISO 9277	0,1651 m ² /g

2.2. Fabricació i posada en obra de la mescla innovadora

La mescla BBTM 11 B 50/70 NFVU fou fabricada en una central discontinua, marca AMMANN-SIM, model SB-280, instal·lada en una gravera pròxima l'aeroport Lleida-Alguaire. La pols d'NFVU es va incorporar per via seca, introduint-se en la mescladora després de pesada i impulsada per aire des de les sitges d'additius secs de la central de fabricació. La posada en obra va realitzar-se amb mitjans convencionals: una estendedora autopropulsada i dos compactadors tàndem (fotografies 4, 5, 6 i 7), sense que fora necessari adoptar pautes diferents de les habituals durant l'estesa i la compactació de les mescles tipus BBTM 11 B elaborades amb betums de penetració o modificats amb polímers.

Taula 3: distribució de les mescles per a la capa de trànsit.

TRAM	PK	DATES	AMIDAMENT	TEMPERATURA
De prova (gabre)	0 al 0+450	17.06.2022	405 t	145 i 160°C
De referència	0+450 al 0+950	17.06.2022	280 t	165°C
De prova (siderúrgic)	0+950 al 1+400	14.06.2022	316 t	165°C
BBTM 11 B NFVU en calent	7+150 al 18+540	14 al 27.07.2022	6.105 t	160°C
BBTM 11 B NFVU semicalenta	1+400 al 7+150	27.7 al 1.08.2022	3.028 t	145°C
SUMA	0 al 18+540	14.06 al 1.08.2022	10.134 t	145 i 165°C



Fotografia 4: central de fabricació de la mescla BBTM 11 B 50/70 NFU.



Fotografies 5 i 6: sitges per incorporar additius secs (esquerra) i descàrrega del cautxú (dreta).



Fotografia 7: posada en obra de la mescla BBTM 11 B 50/70 NFU.

En total, entre els dies 14 de juny i 1 d'agost de 2022, es van posar a l'obra 10.134 t de mescla bituminosa BBTM 11 B, de les quals 3.028 t es van fabricar a baixa temperatura (145°C davant dels 160°C de la producció en calent i 165°C de la mescla de referència). A les temperatures màximes de posada en obra de la mescla bituminosa en calent, les emissions de fums i olors van resultar gairebé imperceptibles, mentre que en el cas de la mescla semicalenta van estar inferiors als límits de percepció. Aquesta absència d'emissions és una important aportació del cautxú pretractat utilitzat ja que, a les temperatures requerides per a la incorporació per via seca d'altres cautxús pretractats o no tractats, és típica la presència d'emissions de fums i olors que incomoden els operaris ocupats a la posada en obra.

2.3. Resultats dels assaigs

El control de qualitat de la mescla bituminosa innovadora es va basar en assaigs granulomètrics, de contingut de betum, mesura de densitats màxima i aparent de provetes compactades amb 50 cops per cara, contingut de buits, sensibilitat a l'aigua, resistència a la deformació permanent i escorriments de lligant, sobre mostres de mescla bituminosa presa a l'obra. Mitjançant testimonis extrets del paviment, es va mesurar la densitat de la capa i el seu grau de compactació, i a la superfície acabada, la

macrotectura, resistència al lliscament i l'índex de regularitat internacional (IRI). Amb caràcter informatiu, també es van realitzar assaigs de resistència a la deformació permanent, mòdul resilient i fatiga a flexo tracció. La qualitat de la unió entre capes bituminoses es va analitzar amb assaigs de tall realitzats sobre testimonis i es va controlar mesurant la dotació superficial dels regs d'adherència. Atesa la impossibilitat de fer-ho mitjançant assaigs de contingut de lligant soluble o per ignició, la dosificació de cautxú es va controlar per pesada directa en bàscula.

A la taula 4 es presenta un resum dels resultats obtinguts amb els assaigs de control d'execució, i es distingeixen els trams construïts amb mescla bituminosa semicalenta de la resta de l'obra. La darrera columna correspon al tram de prova amb la barreja elaborada amb àrid siderúrgic i cautxú pretractat RARX®.

Tabla 4: resultats dels assaigs de control de qualitat.

Propietat	Norma	MB en calent	MB semicalenta	MB siderúrgica
Contingut de betum	UNE-EN 12697-1	5,18 %	5,01 %	5,11 %
Contingut de cautxú	-	0,9 %	0,9 %	0,86 %
Densitat màxima	UNE-EN 12697-5	2,613 g/cm ³	2,603 g/cm ³	2,988 g/cm ³
Densitat aparent	UNE-EN 14243-6 B	2,323 g/cm ³	2,288 g/cm ³	2,520 g/cm ³
Buits a l'aire	UNE-EN 14243-8	11,1 %	12,1 %	15,7 %
Buits en els àrids	UNE-EN 12697-8	22,8 %	23,2 %	28,2 %
Buits reblerts	UNE-EN 12697-8	51,7 %	47,9 %	44,4 %
Escorriment	UNE-EN 12697- 18	0 %	0 %	0 %
Resistència conservada	UNE-EN 12697- 12	90,3 %	91,6 %	93,5 %
Densitat ap. de testimonis	UNE-EN 12697-6	2,318 g/cm ³	2,281 g/cm ³	2,525 g/cm ³
Grau de compactació	-	99,8 %	99,7 %	100,2 %
Macrotectura	UNE-EN 13036-1	1,5 mm	1,5 mm	1,5 mm
CRT	UNE 41201 IN	60,6	59,7	63,9

Tabla 5: Índex de Regularitat Internacional (NLT-330).

Carril	Mitjana	Desviació típica
Dret	0,99	0,20
Esquerre	0,87	0,22

Taula 6: resultats dels assaigs de caràcter informatiu .

Propietat	Norma	BBTM 11 B 50/70 NFVU
Mòdul resilient	UNE-EN 12697- 26 C	5457 MPa
Llei de fatiga (20 °C, 30 Hz): $\ln \varepsilon_0 = A + B \cdot \ln N_f$	UNE-EN 12697- 24	A=6,7886 B=-0,1032

En la taula 5 es mostra l'índex de regularitat internacional (IRI) obtingut i en la taula 6 els resultats de mòdul resilient i vida a fatiga.

2.4. Anàlisi dels resultats dels assaigs

Els resultats dels assaigs de control d'execució es van considerar satisfactoris i prou propers als previstos per a la fórmula de treball. És destacable la similitud dels resultats obtinguts amb les mescles bituminoses fabricades a 160°C i 145°C, en particular quant al grau de compactació assolit a l'obra. Així, amb el cautxú pretractat utilitzat no només no hi ha hagut necessitat d'incrementar la temperatura de fabricació respecte a la mescla de referència (165°C), sinó que ha pogut reduir-se fins a rangs propis de les tecnologies semicalentes, cosa que constitueix una interessantíssima novetat tècnica. Al mateix temps, l'ús de TyreXol™ ha permès eliminar els tres inconvenients més grans associats a la incorporació de cautxú per via seca a les mescles bituminoses en calent: la necessitat d'incrementar les temperatures de fabricació, les emissions de fums i olors, i els temps d'espera entre la fabricació i la posada en obra de la mescla, requerits per a la digestió del cautxú (és a dir, l'estabilització volumètrica del sistema cautxú-betum). El seguiment que s'efectuarà durant els propers anys haurà de servir per observar fins a quin punt les similituds trobades entre les mescles en calent i semicalenta condueix a un mateix comportament al llarg de la vida en servei.

També es van obtenir excel·lents resultats en aspectes més independents de la temperatura de fabricació: coeficient de fregament transversal (CRT) i índex de regularitat internacional (IRI), segons mostren les taules 4 i 5. D'acord amb allò establert al Plec de prescripcions tècniques del projecte, l'especificació sobre el CRT no és aplicable mentre persisteixi la pel·lícula de betum que recobreix les cares dels àrids exposades superficialment i, atesa la dotació i naturalesa del lligant utilitzat, és natural que això requereixi més temps que els dos mesos previstos al PG-3. En tot cas, el primer CRT mesurat ja supera el llindar mínim ofert a la licitació per al període de garantia.

Amb els assaigs informatius s'ha mesurat un mòdul resilient més proper al d'una mescla contínua que al de una discontinua convencional, sens dubte, a causa de l'augment de viscositat propiciat per l'addició de cautxú, i s'ha obtingut una llei de fatiga que, al gràfic de la figura 2, ha estat comparada amb la prevista a la Instrucció de carreteres 6.3 IC (per a mescles bituminoses contínues) i amb les trobades per Marrón et al. (2017) per a mescles tipus BBTM 11 B [5]. La mescla innovadora mostra menor vida a fatiga quan la deformació és superior a 250 µm/m, d'acord amb la resposta que cal esperar, per part de les mescles bituminoses de més viscositat o més rígides, en assaigs a deformació controlada. Atès que aquest tipus de capes rarament es troben sol·licitades a flexo-tracció, no s'ha de relacionar aquesta menor vida a fatiga amb cap mecanisme de fallada.

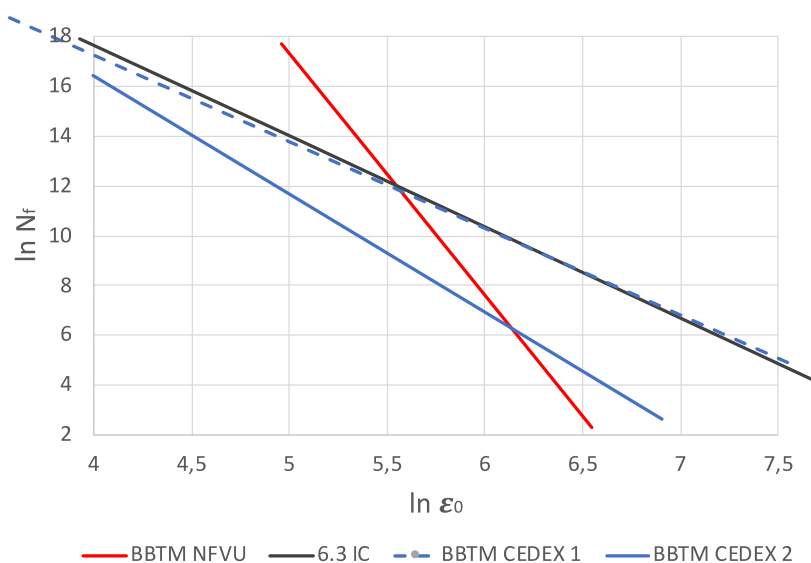


Figura 2: comparació de la llei de fatiga de la mescla innovadora.



Fotografia 8: aspecte actual de la superfície de la capa de trànsit.

3. SEGUIMENT PER INDICADORS, TRAÇABILITAT I METODOLOGIA BIM

3.1. Seguiment per indicadors i traçabilitat

El desenvolupament dels treballs ha estat avaluat mitjançant els indicadors de servei, d'estat i de gestió utilitzats a la licitació per a l'avaluació de les ofertes presentades i, si escau, com a referència per al càlcul de les penalitzacions per incompliment. Tots els indicadors estan integrats al BIM, i es mantenen i han estat mantinguts actualitzats permanentment pel contractista, que també és responsable d'analitzar-ne l'evolució.

Segons va establir el Plec de clàusules administratives del projecte, s'han fet servir tres tipus d'indicadors, referits als aspectes que s'indiquen a continuació:

- Indicadors de servei: durada de les prestacions funcionals, superfície, temps i horari d'afectació a la carretera durant l'execució de les obres, i emissions de CO₂ i CO₂eq en la fabricació, el transport i la posada en obra de les barreges bituminoses.
- Indicadors d'estat: valors mínims d'IRI, macrotextura i CRT durant el període de garantia, nombre de paràmetres específics considerats en la formulació de la mescla barrejada, demanda energètica i consum de combustible en la fabricació, el transport i la posada en obra de totes les mescles bituminoses, composició de l'equip de treball (personal propi i actors complementaris), mitjans materials disponibles i campanyes d'auscultació addicionals.
- Indicadors de gestió: abast dels drets de propietat, superfícies tractades en àmbits urbans i interurbans, creació de la plataforma de treballs compartida, entrega d'informes d'IRI, CRT i de composició de les mescles bituminoses.

A més, s'ha comptat amb dos grups d'indicadors, proposats pel contractista, per avaluar l'organització dels equips de personal i maquinària, els terminis d'execució o l'adopció de mesures de seguretat, entre altres aspectes, així com l'eficiència en la gestió de les obres. A títol d'exemple, a la figura 3 es mostren els resultats relacionats amb les emissions de gasos amb efecte hivernacle (GEH) de les mescles bituminoses de referència i BBTM 11 B en calent (160°C) i semicalenta (145°C).

El protocol de traçabilitat ha estat desenvolupat pel contractista, en el qual es van establir els procediments i els registres necessaris per garantir el seguiment, l'evolució i el destí dels materials emprats en la construcció del ferm, així com dels residus generats durant el desenvolupament de les activitats, i el manteniment dels indicadors.

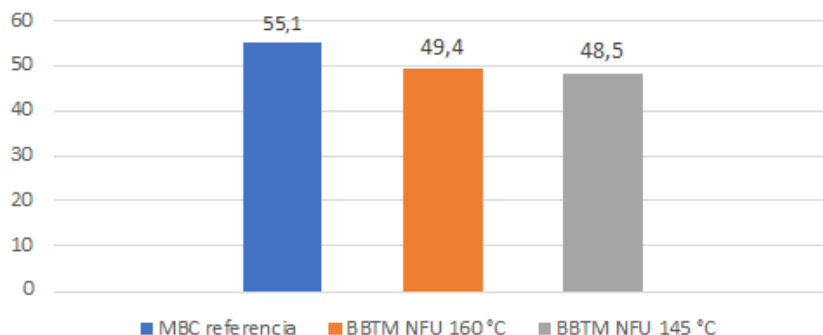


Figura 3: emissions de GEH de les mescles bituminoses de referència i innovadores en calent i semicalenta (kg de CO₂eq/t).

3.2. Metodologia BIM

El Plec de clàusules administratives de la licitació, per procediment obert del contracte de projecte i execució d'obres PTOP-2022-3 (per al conjunt dels 12 lots), va establir l'obligatorietat d'aplicar la metodologia BIM, a fi de posar-la a punt per al projecte, l'execució i l'operació de les actuacions de rehabilitació de fermes de la Generalitat de Catalunya. La descripció dels requisits concrets quant a l'entorn comú de dades i en relació amb el pla d'execució BIM (PEB) desenvolupat a cada lot es troba al Plec de prescripcions tècniques particulars del Pla sectorial de Fermes Sostenibles on, entre altres especificacions, s'estableix que el PEB ha de complir les directrius del Manual BIM de la Generalitat de Catalunya.

El PEB desenvolupat en aquest cas s'ha basat en un modelatge geomètric, o representació gràfica dels elements constructius involucrats en l'actuació, i un modelatge no geomètric mitjançant el qual es va definir la informació que inclou cada objecte del model BIM, tots dos permanentment actualitzats i disponibles per a tots els agents intervinents a les diferents fases de l'actuació (projecte, construcció, obra executada, operació). El model geomètric permet generar vistes en planta del conjunt de l'actuació, del ferm (fresat i reposició, capa intermèdia, microfresats, capa de trànsit, ...), conté les diferents seccions transversals, la representació en planta de la senyalització i seguretat viària, i vistes 3D del conjunt de l'actuació. El modelatge no geomètric comprèn la resta dels lliurables BIM establerts al PEB i compartits en una plataforma col·laborativa desenvolupada a aquest efecte en l'aplicació *Teams* de Microsoft: dates d'execució, resultats dels assaigs de control de qualitat, fotografies, vídeo, seguiment d'indicadors, actes de reunions, etc. [6].

Concretament, el desenvolupament del model BIM d'aquest projecte es va planificar en tres fases:

1. Amb la redacció del projecte es van estudiar, modelar i parametritzar totes les actuacions previstes.
2. Durant l'execució de les obres es va continuar desenvolupant el model, completant-se la descripció dels treballs d'acord amb la parametrització realitzada. Les activitats de supervisió, els registres de traçabilitat, la divisió per lots i el control dimensional i temporal de les unitats d'obra s'han basat en el model desenvolupat en aquesta fase.
3. Un cop executades les obres s'han incorporat els registres dels controls de recepció, a més d'elements i sistemes de l'entorn que no han estat objecte del projecte, però poden resultar d'utilitat en les fases d'exploació i manteniment.

El model BIM també inclou una valoració ambiental de les mescles bituminoses, orientada especialment a comparar el perfil ambiental de la barreja innovadora amb la barreja de referència, o materials i procediments constructius alternatius.

Es considera que la metodologia BIM utilitzada ha servit per assegurar la qualitat de l'actuació i per generar una informació completa, precisa i ben estructurada, amb el format adequat per ser utilitzada amb total garantia en la presa de decisions al llarg de tot el procés constructiu. A més, ha permès crear un model viu, apte per afegir, modificar o ampliar, en qualsevol moment, tota la informació paramètrica o geomètrica que conté.



Figura 4: un objecte BIM.

4. COMPRA PÚBLICA VERDA

Entre els objectius del present projecte de compra pública d'innovació es troba també facilitar que les mescles bituminoses d'alta viscositat amb cautxú d'NFVU formin part del catàleg de solucions disponibles per part dels projectistes en futurs contractes de compra pública verda de la Generalitat. L'experiència obtinguda en aquesta ocasió ha de servir per posar a punt licitacions on es tinguin en compte criteris ambientals que afavoreixin l'aplicació de les alternatives de rehabilitació més respectuoses amb el medi ambient. Amb aquest mateix objectiu, també ha donat peu a redactar noves especificacions tècniques o a modificar les existents, i a la inclusió de noves unitats al banc de preus de la Direcció General d'Infraestructures de Mobilitat de la Generalitat de Catalunya.

4.1. Noves licitacions

Les dotze actuacions dutes a terme a la segona fase del Pla de Ferms Sostenibles han propiciat la creació d'un grup de treball on s'ha posat a punt una metodologia comuna per calcular els principals impactes ambientals de la producció i posada en obra dels diferents tipus de mescles bituminoses utilitzats. Amb això s'espera millorar la qualitat i l'objectivitat de les valoracions dels criteris d'adjudicació avaluable mitjançant fórmules, a les properes licitacions de contractes de compra pública verda.

4.2. Especificacions tècniques per a mescles bituminoses d'alta viscositat amb cautxú

D'acord amb les obligacions contractuals, un cop finalitzades les obres, el contractista ha redactat un plec de prescripcions tècniques per a l'aplicació de mescles bituminoses d'alta viscositat amb cautxú d'NFVU pretractat en futurs contractes de compra pública verda. El plec proposat, basat en l'estructura i els continguts dels articles 542, 543 i 544 del PG-3, conté tres tipus de prescripcions:

- Noves prescripcions dirigides a establir els requisits que ha de satisfer el cautxú pretractat quant a les propietats físiques i sobre les condicions de transport, emmagatzematge, recepció i identificació.
- Prescripcions que tenen per objecte la definició i el camp d'aplicació de les mescles bituminoses d'alta viscositat amb cautxú.
- Finalment, prescripcions que són el resultat de modificar les actualment vigents al PG-3, per prevenir l'adopció de mesures que puguin causar impactes ambientals innecessaris o comprometre l'eficiència dels processos productius, contravenint el primer objectiu de qualsevol projecte de compra pública verda.

La taula 7 mostra els requisits principals establerts amb el primer grup de prescripcions. En el segon grup s'ha obert el camp d'aplicació del cautxú pretractat a qualsevol dels tipus de mescles bituminoses previstos als articles 542, 543 i 544 del PG-3, per a les mateixes capes i categories de trànsit pesant. A més, s'admet que les mescles d'alta viscositat amb cautxú elaborades amb betums convencionals puguin substituir les produïdes amb betums modificats amb polímers.

Taula 7: requisits exigits al cautxú d'NFVU pretractat.

PROPIETAT	NORMA	VALOR
Grandària màxima de partícula	UNE-EN 14243-2	< 1,0 mm
Humitat	CEN/TS 16916	< 0,3 %
Contingut de materials ferromagnètics	UNE-EN 14243-2	< 1 %
Contingut de fibres tèxtils	UNE-EN 14243-2	< 0,25 %
Densitat real	-	1,00-1,25 g/cm ³
Superfície específica BET	ISO 9277	> 0,12m ² /g

Les principals modificacions destinades a protegir els objectius de la compra pública verda, recollides en el tercer grup de prescripcions (numerades segons apareixen en els articles 542, 543 i 544 del PG-3) són les següents:

2.3.1. Característiques generals

Es corregeix la prescripció sobre l'equivalent de sorra de l'àrid combinat, considerant suficient complir el valor de blau de metilè especificat, és a dir, eliminant-se, el requisit *i simultàniament, l'equivalent de sorra (Annex A de la norma UNE-EN 933-8) haurà de ser superior a 45 (SE_d>45)*, atesa la naturalesa fonamental de l'assaig de blau de metilè davant del caràcter molt més empíric del segon.

2.3.2.2 Procedència de l'àrid gruixut

Se suprimeix el requisit referit a *una única procedència i naturalesa de l'àrid gruixut* per no introduir barreres a la reutilització de mescles bituminoses o a l'ús d'àrids artificials, ni descartar mescles d'àrids de qualitat suficient.

2.3.3. Àrid fi

Es defineix l'àrid fi com la part de l'àrid total garbellada pel tamís 2 mm suprimint-se la frase *i retinguda pel tamís 0,063 mm* per prevenir que els fins de la sorra tinguin consideració d'un material diferent sobre el qual s'han d'establir especificacions particulars que dificultin el seu aprofitament i per ajustar-se a la definició de la normativa UNE (UNE-EN 13043).

2.3.4 Pols mineral d'aportació

Es modifica el títol original d'aquest epígraf (*Pols mineral*) perquè aquí es referirà només a la pols mineral d'aportació, atès que la pols mineral de recuperació es troba sota control mitjançant les prescripcions establertes sobre l'àrid fi de què forma part i no requereix satisfer-ne d'altres.

2.3.4.2 Procedència (de la pols mineral)

Se suprimeix la referència als *preceptius sistemes d'extracció de la central de fabricació* dient, en el seu lloc, *sistemes de control d'emissions de partícules de la central de fabricació*, per descriure més correctament els equips de retenció de fins amb què compten les centrals de fabricació, i evitar interpretacions que puguin donar lloc a usos ineficients.

S'eliminen les proporcions de pols mineral d'aportació establertes a la taula 6. Només es permetrà utilitzar pols mineral d'aportació quan no es puguin complir els requisits establerts sobre la mescla bituminosa acabada, utilitzant pols mineral de recuperació o quan sigui necessari introduir-lo per assolir la proporció total de pols mineral prevista a la fórmula de treball.

Especificacions de la unitat acabada

S'eliminen les prescripcions de macrotextura superficial i resistència al lliscament, perquè suposen introduir greus riscos de sobre-especificació. En particular, es considera que el valor del CRT no és adequat com a criteri d'acceptació o rebuig a causa de la seva elevada variació estacional, baixes repetibilitat i reproductibilitat, i perquè fins que no desapareix la pel·lícula de lligant que recobreix les cares dels àrids superficialment exposades no es pot relacionar completament amb el CPA dels àrids. El temps necessari perquè això passi pot ser molt superior als dos mesos previstos al PG-3, particularment en capes de trànsit elaborades amb elevades proporcions de betum, quan s'utilitzen betums modificats amb polímers i en carreteres de baixa intensitat de trànsit.



Fotografia 9: imatge de l'obra acabada.

REFERÈNCIES

1. Gómez, A. (2021): *Ferms sostenibles 2022*. Reunió celebrada el 22 de octubre de 2021 mitjançant la plataforma col·laborativa de comunicació.
2. Kandhal, P. S. i Chakarabarty, S. (1996): *Effect of Asphalt Film Thickness on Short- and Long-Term Aging of Asphalt Paving Mixtures*. National Center for Asphalt Technology. NCAT Report 96-01
3. Gallego, J i Saiz, L. (2017): *Guía para la fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas con polvo de neumáticos*. SIGNUS, Sistema colectivo de gestión de neumáticos fuera de uso.
4. CEDEX (2007): *Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Ministerio de Fomento, Madrid, 2007.
5. Marrón, J.O.; García Carretero, J. y Jiménez, R. (2017): *Estudio de los coeficientes de fatiga obtenidos según norma UNE-EN 12167-24 Anexo D*. CEDEX. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Madrid, marzo de 2017.
6. NC (2019): *Manual de BIM*. Generalitat de Catalunya