



DISSENY I EXECUCIÓ D'UN FERM DE LLARGA DURADA EN LES CARRETERES GIP-6042 I GIV-6043. TRAM: PERALADA – CASTELLÓ D'EMPÚRIES

David Almazán Cruzado, Eptisa
Estrella Sanz Yagüe, Eptisa
Beatriz Delgado Gordillo, Eptisa
Manfred L. Bernitz, Eptisa
Miquel Orra Perarnau, Rubau Tarrés
Manel Trill Mollà, Rubau Tarrés
Miquel Ferré Audí, Construccions Fusté
Gonzalo García Crespo, Aleatica
Xavier Blanco Pons, Servei Territorial de Carreteres de Girona, del Departament de Territori

0.- RESUM

El projecte de millora del ferm, que comença en el PK 1+974 de la GIP-6042, just en l'accés al pont ferroviari existent, i finalitza en el PK 0+000 de la GIV-6043, arribant a la primera rotonda de Castelló d'Empúries (Girona), respon a la necessitat de promoure una generació de solucions innovadores i al repte de la gestió sostenible dels ferms de les carreteres de Generalitat de Catalunya, alhora que respon a la necessitat de millorar les característiques estructurals i superficials del ferm d'aquestes carreteres, per aconseguir un ferm de llarga durada.

El projecte s'emmarca dins del Pla de Ferms Sostenibles del 2022. Compra Pública Innovadora, que va ser signada el 25 de juny de 2019 per la Direcció General d'Infraestructures de Mobilitat (d'ara endavant DGIM), del Departament de Territori de la Generalitat de Catalunya.

Aquest article desenvolupa una breu síntesi de les millores aconseguides en la rehabilitació estructural del ferm objecte d'estudi, respecte al seu estat inicial, a partir d'una nova metodologia de treball establerta per la Generalitat de Catalunya, basada en cinc pilars:

1. L'adjudicació al licitador que presenti les millors prestacions del ferm en un determinat any horitzó.
2. L'ús d'una plataforma virtual de treball compartida per tots els agents involucrats.
3. La realització dels treballs (projecte, obra i obra executada) en entorn BIM.
4. L'ús d'eines que permetin avaluar l'anàlisi de cicle de vida de les solucions analitzades.
5. L'ús de les últimes tecnologies innovadores i sostenibles en matèria de pavimentació; en aquest cas, una mescla de tipus *Stone Mastic Asphalt*, de tipus SMA-11, aditivada amb fibres de cel·lulosa i fabricada a baixa temperatura.

Paraules Clau: ferm, sostenible, innovador, SMA, fibres de cel·lulosa, baixa temperatura, BIM, ACV.

1.- CONTEXT, OBJECTIU I ESTAT INICIAL

Les vies GIP-6042 i GIV-6043 pertanyen al tram Peralada - Castelló d'Empúries. Posseeixen calçada única, amb un carril per sentit de circulació, i sense vorals. El tram d'estudi comença en el PK 1+974 de la GIP-6042, just en l'accés al pont ferroviari existent, i finalitza en el PK 0+000 de la GIV-6043, arribant a la primera rotonda de Castelló d'Empúries, completant una extensió total de 5 km.

L'orografia de la zona, en general és sensiblement plana amb un traçat amb pocs revolts, amb excepció dels primers 300 metres, on existeixen revolts de radi molt reduït i elevats pendents, a causa de la necessitat de salvar la línia ferroviària existent; i de la travessia de Vilanova de la Muga, on existeixen guals de reducció de velocitat i revolts de radi reduït, igualment.



Imatge 1. Pla situació

Dades de partida

La categoria de trànsit és T41 (entre 50 i 100 vehicles pesants/dia).

Les següents taules mostren un resum dels resultats dels testimonis extrets per la Generalitat de Catalunya, a manera de recerques prèvies:

GIP-6042

Gruix mitjà (mm)	120
Gruix màxim (mm)	151
Gruix mínim (mm)	86

GIV-6043

Gruix mitjà (mm)	92
Gruix màxim (mm)	129
Gruix mínim (mm)	61

L'objectiu principal d'escometre aquestes actuacions és, fonamentalment, el d'aconseguir una rehabilitació del ferm de llarga durada, amb alts estàndards de comoditat i seguretat, i amb tecnologies sostenibles que generin un estalvi del consum energètic i una reducció de les emissions de CO₂ a l'atmosfera, durant el procés.



A manera de resum, les solucions de ferms que es van proposar havien d'assegurar el compliment d'una sèrie de característiques funcionals, les quals es descriuen a continuació sobre la base de la categoria de trànsit calculada, i en el que s'estableix en les Sèries 540 del PG-3 i en el Plec de prescripcions tècniques particulars (PPTP) de la licitació, com:

- o Regularitat superficial (IRI) mitjana requerida durant el període de garantia:
 - IRI ofert en el 100 % del tram amb mescla innovadora $\leq 3,0$ dm/hm.
 - IRI ofert en el 80 % del tram amb mescla innovadora $\leq 2,5$ dm/hm.
 - IRI ofert en el 50 % del tram amb mescla innovadora $\leq 1,8$ dm/hm.
- o macro-textura superficial mitjana:
 - Després de la finalització de les obres $\geq 0,7$ mm.
 - Durant el període de garantia $\geq 0,53$ mm.
- o Resistència al lliscament (CRT) mitjana:
 - Després de la finalització de les obres ≥ 65 %.
 - Durant el període de garantia ≥ 54 %.

El període de garantia ofert és de 5 anys.

Campanya de recerca prèvia realitzada

Per al reconeixement de l'estat del ferm, abans de l'inici de la redacció del projecte, s'han realitzat les recerques següents, per part de la Generalitat de Catalunya:

a. Inspecció visual, realitzada per Eptisa en 2022

La inspecció visual s'ha realitzat mitjançant un inventari de degradacions superficials, realitzat a partir de l'eina P@vement Check, <https://www.youtube.com/watch?v=VncR0-n1jTk&t=2s>, per identificar patologies relacionades amb fallades estructurals.



Imatge 2. Falla superficial de peladures longitudinalment a l'eix.



Imatge 3. Fissures longitudinals ramificades i transversals en població



Imatge 4. Peladures i fissuració en pell de cocodril



Imatge 5. Peladures d'alta severitat fins a formació de sot (esquerra de la imatge).

Durant la inspecció visual es va observar l'existència d'un micro-aglomerat en fred entre les poblacions de Vilanova de la Muga i Castell d'Empúries (GIV-6043 entre els PKs 2+760 i 0+000), que es troba amb un alt grau de deterioració, presentant gran quantitat de peladures i zones discontinües amb fissuració en malla que es reflecteixen des de capes inferiors.

b. Auscultació d'IRI, realitzada per la Generalitat de Catalunya en 2020

Els resultats de l'anàlisi realitzada de l'IRI són els següents:

Llindar	Dades màximes de rodades de 2020
%Long IRI $\geq 1,8$.	100 %
%Long IRI $\geq 2,5$.	100 %
%Long IRI $\geq 2,7$.	100 %
%Long IRI $\geq 3,25$.	95 %
%Long IRI $\geq 4,0$.	88 %
%Long IRI $\geq 5,0$.	84 %
%Long IRI $\geq 6,0$.	48 %

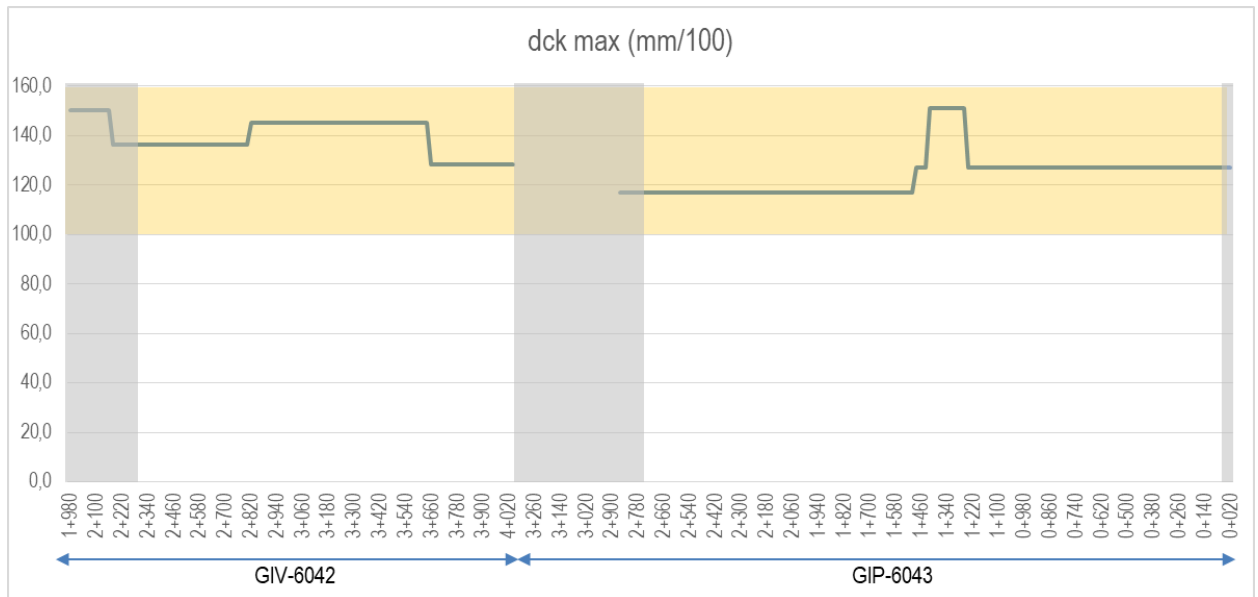
Taula 1. Auscultació de l'IRI l'any 2020.

c. Auscultació estructural, realitzada per la Generalitat de Catalunya en 2020

Respecte a l'estat estructural de totes dues carreteres, en la següent gràfica es mostra, a manera de resum, ombrejat en taronja, el rang de valors de deflexió que requereixen reforç; i en gris,



aquells trams en els quals no és possible recreïxer per tractar-se de zones singulars: el pas per una estructura que salva una línia de ferrocarril i pas per població, respectivament:



Gràfica 1. Rang de deflexions

A la llum dels resultats obtinguts en la fase prèvia de recerca es pot concloure:

1. Totes dues carreteres posseeixen un nivell d'estat de conservació pobre.
2. La regularitat superficial actual de totes dues carreteres està molt allunyada dels objectius oferts, i precisa millores en el 95 % dels trams d'actuació.
3. El ferm presenta en molts trams, de forma general, símptomes d'esgotament estructural, que es verifiquen amb la magnitud de les deflexions registrades en la campanya d'auscultació de 2020.

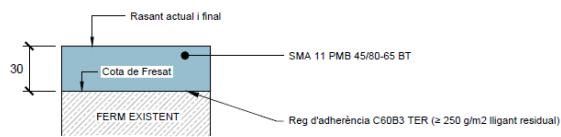
2.- CRITERIS D'ACTUACIÓ I DESCRIPCIÓ DE LES SOLUCIONS

A partir de les anàlisis realitzades, es van establir els següents criteris d'actuació:

1. En aquells trams amb presència de fissuració en pell de cocodril o micro-aglomerat en fred amb alta densitat i severitat de peladures, o deflexions majors o iguals de 150 mm/100, es va realitzar un sanejament del ferm actual, mitjançant fresat i reposició amb una mescla de tipus AC 22 BIN B50/70 S, amb 5 cm de gruix.
2. En aquells trams, sense degradacions superficials de caràcter estructural, amb valors d'IRI majors o iguals de 3,25 dm/hm o valors de deflexió compresos entre 100 i 149 mm/100, es va dur a terme una capa intermèdia de 6 cm de gruix amb AC 22 BIN B50/70 S.
3. En aquells trams, sense degradacions superficials de caràcter estructural, amb valors d'IRI menors de 3,25 dm/hm o valors de deflexió menors de 100 mm/100, es va dur a terme una capa de rodadura d'altres prestacions de 3 cm de gruix amb SMA 11 PMB 45/80-65 BT (a baixa temperatura), amb fibres de cel·lulosa.
4. El tram de referència, a efectes comparatius, es va realitzar mitjançant una capa de rodadura d'AC 16 SURF 50/70 S i 4 cm de gruix.

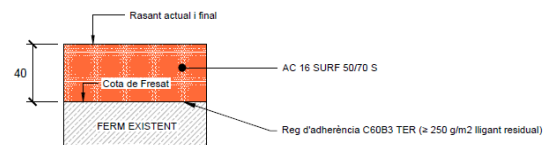
A continuació, es mostra una sèrie d'imatges on apareixen els diferents tractaments:

TRACTAMENT A
FRESAT I REPOSICIÓ 30mm AMB SOLUCIÓ INNOVADORA



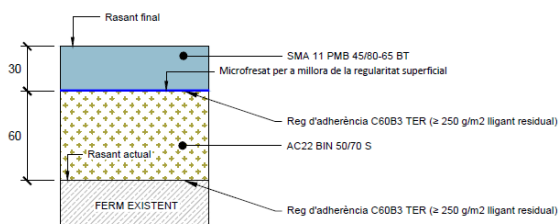
Imatge 6. Tractament A

TRACTAMENT B
FRESAT I REPOSICIÓ 40mm AMB SOLUCIÓ CONVENCIONAL



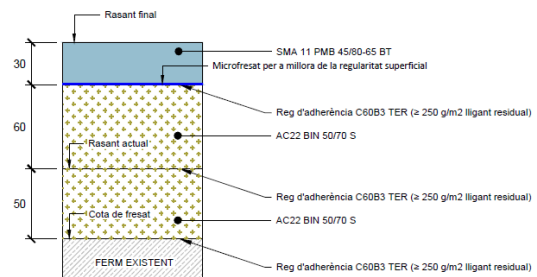
Imatge 7. Tractament B

TRACTAMENT C
REFORÇ 90mm AMB SOLUCIÓ INNOVADORA



Imatge 8. Tractament C

TRACTAMENT D
SANEJO I REFORÇ 90mm AMB SOLUCIÓ INNOVADORA



Imatge 9. Tractament D

RESULTATS DE LA FASE D'OBRA

A continuació, es presenta una breu síntesi dels resultats obtinguts en la fase de construcció i els primers mesos de l'obra executada, discriminats per capa i/o tram singular, és a dir, es passa revista a la capa intermèdia o de regularització, al tram de referència, constituït per la mescla convencional, a efectes comparatius, el tram de prova de la mescla innovadora i el tram complet de la pròpia mescla innovadora.

2.1 TRAM DE PROVA AMB SOLUCIÓ INNOVADORA

Abans d'iniciar-se la posada en obra, es va realitzar un control de l'aptitud dels materials constituents de la mescla innovadora (àrids, fil·ler, betum, fibres i emulsió) i, posteriorment, es va preparar una fórmula de treball.

L'execució d'un tram de prova, té com a objectiu, la comprovació de la fórmula de treball a escala real i, a més, definir el tren de compactació, verificar les temperatures de fabricació, estesa i compactació, el gruix de la capa i la macro-textura final.

Els resultats mitjans registrats després de l'execució del tram de prova de l'SMA 11 SURF 45/80-65 BT amb fibres de cel·lulosa es mostren en la taula 2.

Assajos	Valor mitjà
Betum s/m (%)	6,09
Fibres (%)	0,3
Dens. máx (kg/m ³)	2471
Dens. ap. (kg/m ³)	2344
Buits s/m (%)	5,1
Buits s/a (%)	19

Assajos	Valor mitjà
Escorriment (%)	0,14
ITSR (%)	92
WTSair	0,05
Temperatura estesa (°C)	130
Temperatura compactació (°C)	120
Compactació (%)	99 %
Profunditat mitjana de la textura (mm)	1,62
Gruix de testimoni capa de rodadura (cm)	3

Taula 2. Resultats mitjans dels assajos realitzats en el tram de prova amb solució innovadora

2.2 CAPA INTERMÈDIA O DE REGULARITZACIÓ

Per aconseguir els objectius de millora estructural i de regularitat superficial es dissenya i executa una mescla bituminosa semidensa en calent de tipus AC 22 BIN 50/70 S, com a capa intermèdia.

Els resultats mitjans dels assajos efectuats es mostren en la taula 3.

Assajos	Valor mitjà
Betum s/m (%)	4,65
Dens. máx (kg/m ³)	2511
Dens. ap. (kg/m ³)	2390
Buits s/m (%)	4,79
Buits s/a (%)	15,58
ITSR (%)	86,67
Temperatura estesa (°C)	162,75
Temperatura compactació (°C)	150,00
Estabilitat Marshall (KN)	16,13
Deformabilitat Marshall (mm)	2,78
Compactació (%)	>98
Gruix de testimoni de capa de rodadura (cm)	6,3

Taula 3. Resultats mitjans d'assajos realitzats sobre la capa intermèdia o regularització.

2.3 TRAM DE REFERÈNCIA CONVENCIONAL

Per al tram de referència es va dissenyar i executar una mescla bituminosa semidensa, convencional, de tipus AC 16 SURF 50/70, com a capa de trànsit.

L'objectiu d'aquesta capa és la comparativa de resultats respecte a la solució innovadora, en termes de prestacions superficials i d'implicacions ambientals.

Els resultats mitjans dels assajos efectuats es mostren en la taula 4.

Assajos	Valor mitjà
Betum s/m (%)	4,72

Assajos	Valor mitjà
Dens. máx (kg/m ³)	2481
Dens. ap. (kg/m ³)	2353
Buits s/m (%)	5,2
Buits s/a (%)	16
Temperatura estesa (°C)	167
Temperatura compactació (°C)	150
Estabilitat Marshall (KN)	15,2
Deformabilitat Marshall (mm)	2,7
Compactació (%)	>98
Profunditat mitjana de la textura (mm)	0,84
Gruix de testimoni de capa de rodadura (cm)	4,3

Taula 4. Resultats mitjans d'assajos realitzats en el tram de referència

2.4 CAPA DE RODADURA INNOVADORA

El disseny i l'execució d'una mescla bituminosa de tipus SMA 11 SURF 45/80-65 BT amb fibres de cel·lulosa permet obtenir una capa de trànsit de llarga durada i altes prestacions (major resistència a la fissuració, major resistència a fatiga, major resistència a deformacions plàstiques i major resistència a envelliment).

Els resultats mitjans dels assajos efectuats es mostren en la taula 5.

Assajos	Valor mitjà
Betum s/m (%)	5,83
Fibres (%)	0,3
Relació fíl·ler/betum	1,22
Dens. máx (kg/m ³)	2456
Dens. ap. (kg/m ³)	2336
Buits s/m (%)	4,85
Buits s/a (%)	18,08
Escorriment (%)	0,14
ITSR (%)	92
WTS air (mm)	0,05
Temperatura estès (°C)	141,00
Temperatura compactació (°C)	125,00
Compactació (%)	98
Profunditat mitjana de la textura (mm)	1,22
Resistència al lliscament (%) - TRRL	78
Gruix de testimoni de capa de rodadura (cm)	3,2

Taula 5. Resultats mitjans d'assajos realitzats sobre l'en capa innovadora



2.5 DISCUSSIÓ

A efectes comparatius, es pot observar que la solució innovadora posseeix un contingut de betum significativament major que el de la solució convencional, la qual cosa li confereix major capacitat per suportar les traccions generades pel trànsit i, per tant, major durabilitat.

Els valors d'adherència entre l'àrid i el lligant en condicions d'humitat són molt majors en el cas de la solució innovadora que en la convencional, tornant a evidenciar de nou la seva major capacitat durable en el temps.

Pel que fa a les prestacions superficials, els valors de textura superficial i resistència al lliscament de la rodadura innovadora (encara que d'aquest últim paràmetre no es posseeixen dades de la solució convencional), són molt superiors als de la mescla clàssica, la qual cosa es manifesta en un major nivell de seguretat per a l'usuari.

En termes ambientals, també és bastant evident la diferència de temperatures de fabricació, estesa i compactació entre totes dues mescles. La solució innovadora precisa per a la seva fabricació de l'ordre de 40°C menys que la convencional, la qual cosa genera una considerable reducció d'emissions de CO₂.

3.- CRITERIS DE RECEPCIÓ

Regularitat superficial

Una vegada acabada l'obra, es van poder quantificar els resultats obtinguts mitjançant l'Índex de regularitat internacional (IRI), el qual permet determinar la regularitat i comoditat en la conducció. Per això, es van realitzar campanyes d'auscultació en els anys 2020 (abans de l'execució de les obres) i 2022 (després de l'execució de les obres), mitjançant l'ús d'un perfilòmetre làser Greenwood LP-24, equip acceptat pel Ministeri de Foment per mesurar l'IRI en la xarxa de carreteres de la Direcció General de Carreteres.

Analitzant la taula 6. Evolució d'IRI mitjà, en 2022, després de l'execució de les obres, s'observa una reducció dràstica del resultat mitjà de l'IRI, respecte als assajos realitzats en la fase d'estudi del projecte en 2020.

IRI (dm/hm) MIG		
TRAM	2022	2020
GIP-6042 - PK 2+300 A PK 4+050	1,08	4,29
GIP-6042 PK 4+050 A PK 2+300	1,3	4,83
GIV-6043 PK 0+000 A PK 2+860	1,1	6,17
GIV-6043 PK 2+860 A PK 0+000	1,01	6,14

Taula 6. Evolució d'IRI mitjà comparant les campanyes de 2020 i 2022

A la llum d'aquests resultats obtinguts és obvi que la qualitat de l'execució ha complert amb escriuix les expectatives en aquesta etapa, s'obté una millora considerable l'any 2022.

Profunditat mitjana de la textura

Pel que fa a les prestacions superficials, els valors de textura superficial, obtinguts mitjançant l'assaig del cercle de la sorra, 1,22 mm, són molt superiors als de la mescla clàssica, 0,84 mm, la qual cosa redunda en un major nivell de seguretat per a l'usuari.

Resistència al lliscament

La resistència al lliscament de la capa de trànsit innovadora, per la seva part (encara que d'aquest paràmetre no es posseeixen dades de la solució convencional), obtinguda a partir del Pèndol TRRL, ha registrat resultats mitjans molt prometedors, 78 %, per a quan es realitzi la campanya d'auscultació mitjançant SCRIM, per a la determinació del CRT.

Gruixos de mescla innovadora

Els gruixos de la mescla innovadora són lleugerament majors de 3 cm segons els testimonis extrets, mentre que en els de la mescla convencional es va obtenir una mitjana de 4,3 cm, també lleugerament superiors als mínims requerits. Si bé el consum de matèries primeres de la solució innovadora és considerablement menor que el de la solució convencional, amb el conseqüent estalvi energètic que això suposa.

4.- MILLORES AMBIENTALS

En els apartats anteriors ja s'han esmentat les millores ambientals que la solució innovadora ofereix davant de les convencionals.

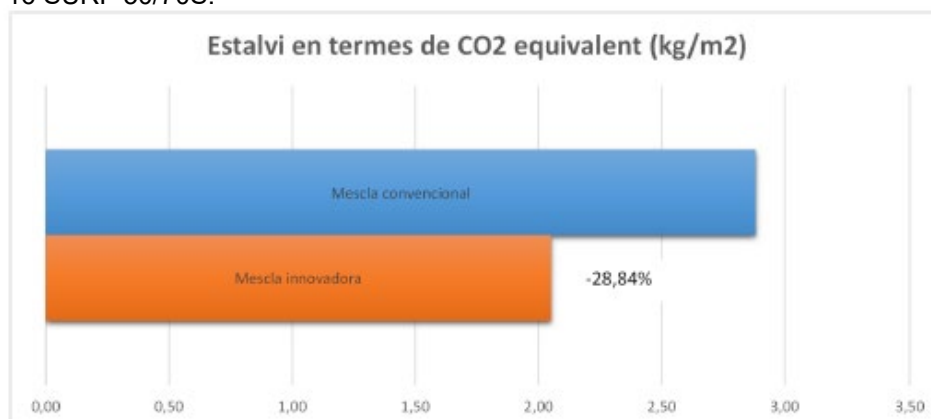
No obstant això, i dins del context dels contractes de compra pública innovadora, es va realitzar una anàlisi del cicle de vida de detall, que permetia comparar totes dues solucions, des de dues òptiques: la demanda acumulada d'energia i les emissions de CO₂. Aquest estudi es va realitzar, mitjançant l'ús del programari SEVE i a partir de les bases de dades predefinides de comú acord amb els fabricants, per la Generalitat de Catalunya.

En primer lloc, val la pena destacar el menor consum de matèries primeres d'origen natural que es requereix en la solució innovadora, respecte a la convencional, com són els àrids, que es redueix considerablement, ja que el gruix de la mescla innovadora és un 25 % inferior a la solució clàssica.

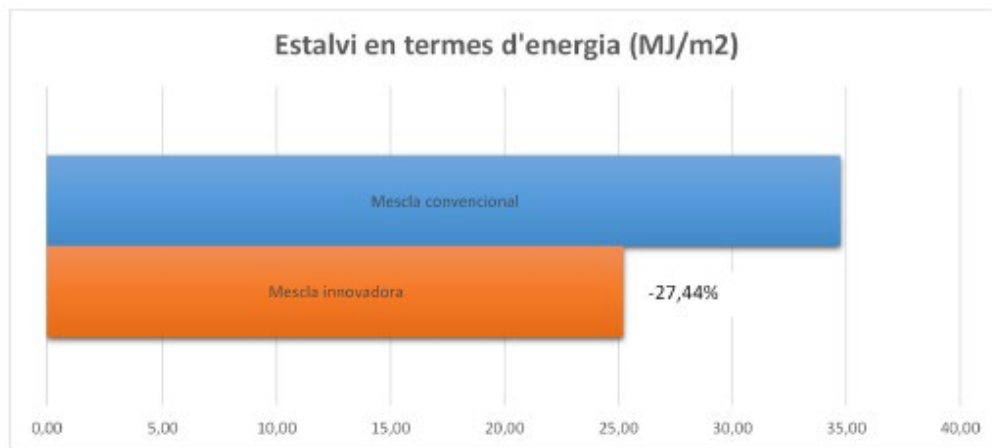
En segon lloc, la fabricació de mescles a baixa temperatura, per sota dels 140°C, permeten reduir d'una manera molt significativa la demanda d'energia requerida durant l'escalfament dels àrids i de la mescla en general, a més de reduir les emissions de CO₂ eq a l'atmosfera, respecte a una solució clàssica.

En tercer lloc, i atès que la solució innovadora posseeix característiques de llarga durada, els costos associats a conservació i manteniment es veuran reduïts dràsticament en el futur, la qual cosa fa novament que es tracti d'una solució mediambientalment més sostenible.

En els gràfics següents es representen els estalvis en termes de CO₂eq i demanda d'energia de la mescla innovadora respecte a la convencional, tenint en compte només la fabricació, el transport i la posada en obra de les capes de rodadura comparades: SMA 11 SURF 45/80-65 BT vs AC 16 SURF 50/70S.



Gràfica 2. Estalvi en termes de CO₂ eq comparant la solució convencional amb la innovadora

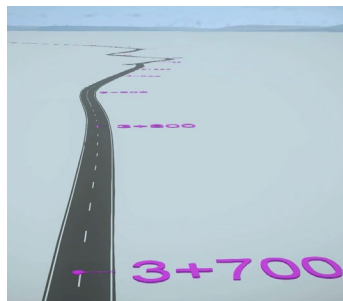


Gràfica 3. Estalvi en termes de demanda d'energia, comparant la solució convencional amb la innovadora

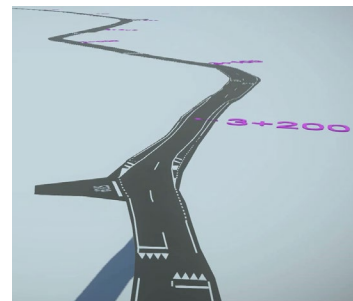
5.- BIM

La base de la digitalització i la innovació en la construcció és la implantació la metodologia BIM en totes les seves fases: projecte, obra i obra executada.

Un dels objectius perseguits en aquest tipus de contractes va ser la necessitat de desplegar un entorn de treball col·laboratiu per a la correcta elaboració del projecte i gestió de l'obra, de manera que els models BIM desenvolupats centralitzessin tota la informació des de la fase de disseny, per a anar actualitzant-los posteriorment en les següents fases, d'obra i obra executada, fins al final del procés.



Imatge 10. Recorregut virtual PK 3+700



Imatge 11. Recorregut virtual 3+200

El model d'informació es va ordenar d'acord amb una estructura de carpetes preestablerta en fases inicials, el màster de les quals es va materialitzar en un pla d'execució BIM (PEB).

Els models BIM duts a terme (model d'obra lineal, model de fermes i model d'elements funcionals), es van realitzar mitjançant el programari d'Autodesk Revit, que és la plataforma de referència per al desenvolupament del projecte i la coordinació posterior mitjançant Autodesk Navisworks.

Durant el transcurs del projecte, es va emprar el programari de plataforma compartida col·laborativa Microsoft Teams per mantenir en contacte els diferents agents involucrats, amb la finalitat de seguir en temps real l'avanç de les tasques en curs i mantenir actualitzats tots els fitxers que es van incorporar al model BIM.



6.- CONCLUSIONS

Els 5 km d'extensió, que conformen els trams objecte d'actuació de les carreteres GIP-6042 i GIV-6043, que es trobaven en un estat de conservació pobre en 2021, han experimentat un canvi substancial, pel que fa a les prestacions per als usuaris.

Arran dels resultats obtinguts durant el procés, s'ha pogut verificar que després de les obres de millora del ferm, la circulació per aquestes carreteres és molt més còmoda i segura i els costos de conservació i manteniment es reduiran significativament, perquè s'ha dissenyat un ferm de llarga durada.

Durant la construcció s'han generat importants avantatges ambientals, com ara les menors emissions de CO₂ a l'atmosfera o la reducció de la demanda d'energia durant la fabricació de la solució innovadora, sense oblidar els estalvis generats en l'ús de recursos naturals.

En estar tots els processos degudament modelitzats en entorn BIM són accessibles per a tots els gestors autoritzats i aptes per realitzar qualsevol consulta en el futur d'As Built, i de programació de plans de manteniment.

7.- BIBLIOGRAFIA

- [1] Generalitat de Catalunya. <http://territori.gencat.cat>. Compra Pública Innovadora
- [2] Instrucció 6.3-IC de Rehabilitación de Firmes (2003). Dirección General de Carreteras del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.
- [3] Plec de Prescripcions Tècniques Generals de Carreteres i Ponts, PG-3, de la Direcció General de Carreteres del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.
- [4] Factors d'emissió. Registre de la petjada de carboni, compensació i projecte d'absorció de diòxid de carboni. Oficina Espanyola del Canvi Climàtic. Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. Versió 15. Juny 2020