Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT

Títol

DISSENY I CARACTERITZACIÓ MECÀNICA DE MESCLES BITUMINOSES SEMICALENTES

Autor/a

LLUÍS TORRENTÓ SERRA

Tutor/a

JOSÉ RODRIGO MIRÓ i RECASENS

Departament

INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORT I TERRITORI

Intensificació

Data

JUNY 2009

RESUM

Títol: “Disseny i caracterització mecànica de mescles bituminoses semicalentes.”
Autor: Lluís Torrentó Serra.
Tutor: José Rodrigo Miró Recasens.

En els últims anys el canvi climàtic és un dels temes que més preocupa a la societat actual, i ha derivat en un augment de la conscienciació social per millorar el medi ambient. Aquesta situació va donar lloc a que es crees el Protocol de Kyoto, el qual busca el compromís dels diferents països per reduir les emissions de gasos d’efecte hivernacle, i també al posterior increment de les restriccions i la protecció mediambiental, per part del diferents països que s’hi han anat adherint.

En conseqüència es desenvolupen una sèrie de noves tecnologies dissenyades, principalment, per reduir aquestes emissions i el consum d’energia, com es el cas de les mescles semicalentes que s’estenen i fabriquen a una temperatura inferior (de l’ordre de 20-30ºC) que la temperatura d’estesa i fabricació de les mescles habitualment utilitzades (160ºC), fet que minva molt significativament l’emissió de gasos d’efecte hivernacle per l’estalvi energètic que suposa en la fabricació i menor emissions en l’estesa.

La present tesina pretén comprovar la viabilitat d’utilitzar les mescles bituminoses semicalentes en comptes de les utilitzades habitualment mescles bituminoses “en calent”.

Per això, s’ha escollit de fabricar una mescla semidensa, tipus S-20, de composició fixa, utilitzant tres tipus de lligants: un betum convencional B-60/70, i els altres dos betums són el mateix betum anterior al que se li incorpora additiu tipus TERMOACTIU i additiu tipus CERA. Les provetes amb betum tipus CERA i TEROMACTIU s’han fabricat en intervals de 10ºC des de 110ºC fins a 140ºC i les provetes amb betum convencional B-60/70 s’han fabricat a 155ºC, per a la mescla patró, i també a 140ºC, 130ºC i 120ºC. Les mescles així fabricades s’han assajat a Mòdul Resilient, Tracció Indirecta i amb un nou assaig a tracció directe denominat FÈNIX.

Segons s’extreu dels resultats obtinguts es considera que les mostres fabricades amb betum tipus CERA a temperatures d’entre 120ºC i 140ºC tenen unes propietats mecàniques òptimes comparades amb la mescla patró de referència (S-20 amb B-60/70 a 155ºC), i les mostres fabricades amb betum tipus TERMOACTIU tenen unes propietats mecàniques òptimes a temperatures d’entre 130ºC i 140ºC comparades amb la mescla patró de referència (S-20 amb B-60/70 a 155ºC).

Dels dos additius utilitzats és conclou que el de CERA funciona millor des del punt de vista mecànic ja que s’obtenen resultats superiors que en el cas de les mescles amb betum tipus TERMOACTIU.

Donat que els resultats d’aquesta tesina són satisfactoris s’hauria de continuar estudiant des del punt de vista de la durabilitat i de comportament aquests betums amb additius, i remarcant especialment el cas de la CERA.

EXECUTIVE SUMMARY

Title: "Disseny i caracterització mecànica de mescles bituminoses semicalentes."
Author: Lluís Torrentó Serra.
Teacher: José Rodrigo Miró Recasens.

In recent years, climate change has become one of the most talked about subjects of concern and, as a consequence, there has been a rise in social consciousness for improving the environment. This situation has fostered the creation of Kyoto Protocol, which seeks the commitment of different countries in order to reduce Greenhouse Gas Emission as well as increase restrictions and environmental protection, by those countries which have adhered to it.

Consequently, a number of new technologies have been designed, mainly in order to reduce these emissions and energy consumption, as it is the case for Warm Mix Asphalt which is spread out and produced at a lower temperatures (in the range of 20 to 30 degrees) than typical mix asphalt, which is traditionally extended and produced at temperatures of 160º. This enables Greenhouse Gas Emission to be significantly reduced since it promotes energetic saving in its production and less emissions in its spreading.

This thesis intended to check the viability to use Warm Mix Asphalt instead of the usually used Hot Mix Asphalt.

For this reason, it is chosen to produce semi-dense mix asphalt, type S-20, of fix composition, using three bitumen types: a conventional bitumen B-60/70 and the other two bitumen types are the same bitumen that previous one but incorporating an additive type TERMOACTIU and an additive type CERA, respectively. The test tubes with bitumen type CERA and TERMOACTIU have been made in intervals of 10ºC from 110ºC to 140ºC and the test tubes with conventional bitumen B-60/70 have been made at 155ºC for the standard mix asphalt and, also at 140, 130 and 120ºC. The mix asphalt made in these characteristics then has been assayed in a "Resilent Modul", "Indirect Traction", and the new assay of direct traction named "Fènix".

According to the results, mixed asphalt made with CERA type additive at a temperature between 120 and 140ºC shows good mechanic proprieties compared with mixed asphalt standard of reference (S-20 with B-60/70 at 155ºC). The results also demonstrate that the assays made with bitumen TERMOACTIU at temperatures between 130 and 140ºC have improved mechanics properties compared to standard of reference (S-20 with B-60/70 at 155ºC).

As a conclusion, among the two additives studied, CERA type has the optimal function from the mechanical point of view, because it shows better results than the case of mix asphalt with bitumen TERMOACTIU type.

Given that the results of this thesis are highly satisfactory, the project should be continued to study additive's effect on bitumen, in terms of durability and behaviour, specially focusing on the case of CERA.

ÍNDEX

1. INTRODUCCIÓ 3

1.1. PROBLEMÀTICA ACTUAL 3
1.1.1. Les Mescles bituminoses i el Protocol de Kyoto 5
1.1.2. Solucions per el problema de les MBC 5
1.1.2.1. Mescles Asfàltiques Templades 7
1.1.2.2. Mescles Asfàltiques Semicalentes (WMA) 8
1.2. OBJECTIUS 9

2. MESCLES BITUMINOSES SEMICALENTES 11

2.1. INTRODUCCIÓ 11
2.1.1. Avantatges 11
2.1.2. Desavantatges 14
2.1.3. Riscos 14
2.1.4. Resum Avantatges / Desavantatges 15
2.2. EVOLUCIÓ HISTÒRICA DE LES MESCLES SEMICALENTES 16
2.2.1. Antecedents de l'estudi. Tipus de processos 16
2.2.1.1. Aspha-Min 17
2.2.1.2. WAM-Foam 18
2.2.1.3. Sasobit 19
2.2.1.4. Taula resum processos 20

3. ESTUDI EXPERIMENTAL 21

3.1. INTRODUCCIÓ 21
3.2. MATERIALS UTILITZATS 21
3.2.1. Fus granulomètric 21
3.2.2. Granulometria 22
3.2.3. Àrids Utilitzats 22
3.2.4. % betum, pesos d'àrids 23
3.3. MESCLA OBTINGUDA 24
3.4. PLA DE TREBALLS 24
3.5. METODOLOGIA 25
3.5.1. Introducció 25
3.5.2. Preparació dels àrids 25
3.5.3. Fabricació de les mescles 27
3.5.3.1. Compactació de provetes per impacte 29
3.5.4. Assaig Mòdul Resilient. Descripció i elaboració de l'assaig 31
3.5.4.1. Introducció 31
3.5.4.2. Caracterització de la sol·licitació en paviments 32
3.5.4.3. Amidaments d'esforços i deformacions en casos reals 32
3.5.4.4. Mecanisme de deformació d'un material subjecte a càrrega cíclica 33
3.5.4.5. El concepte de mòdul resilient 34
3.5.4.6. Normes d'assaig utilitzades 36
3.5.4.7. Equip utilitzat per a l'obtenció del mòdul Resilient 37
3.5.4.8. Procediment de l'assaig 40
3.5.5. Tracció indirecta. Descripció i elaboració de l'assaig. 41
3.5.5.1. Avaluació de les propietats mecàniques 41
3.5.5.2. Descripció de l'assaig 42
3.5.5.3. Normes de l'assaig utilitzades 44
3.5.5.4. Procediment de l'assaig 44
3.5.6. Fènix. Descripció i elaboració de l'assaig. 46
3.5.6.1. Introducció i origen de l'assaig Fènix 46
3.5.6.2. Metodologia de l'assaig Fènix 46
3.5.6.3. Aplicacions i Avantatges de l'assaig Fènix 48

3.6. RESULTATS I ANALISIS 49
3.6.1. Densitats 49
3.6.2. Assaig Mòdul Resilient 57
3.6.3. Assaig Tracció Indirecta 61
3.6.4. Assaig Fènix 65

4. CONCLUSIONS 69

4.1. DENSITATS 69
4.2. ASSAIGS MÒDUL RESILIENT 69
4.3. ASSAIGS TRACCIÓ INDIRECTA 70
4.4. ASSAIGS FÈNIX 70
4.5. CONCLUSIONS FINALS 71

Referències Bibliogràfiques 73

ANNEXOS:

Annex 1: Resum de Resultats
Annex 2: Resultats Mòdul resilient
Annex 3: Resultats Tracció Indirecta
Annex 4: Resultats Fènix
Annex 5: Gràfiques de Resultats

1. INTRODUCCIÓ

La present tesina intenta ajudar a comprovar la viabilitat d'utilitzar un tipus de mescles bituminoses anomenades "semicalentes" en comptes de les utilitzades actualment anomenades mescles bituminoses "en calent".

En els últims anys el canvi climàtic és un dels temes que més preocupa a la societat actual, i ha derivat en un augment de la conscienciació social per millorar el medi ambient. Aquesta situació va donar lloc a que es crees el Protocol de Kyoto , el qual busca el compromís dels diferents països per reduir les emissions de gasos d'efecte hivernacle, i també al posterior increment de les restriccions i la protecció mediambiental, per part del diferents països que s'hi han anat adherint.

En conseqüència es desenvolupen una sèrie de noves tecnologies dissenyades, principalment, per reduir aquestes emissions i el consum d'energia, com es el cas de la present, ja que les mescles semicalentes s'estenen i fabriquen a una temperatura inferior (de l'ordre de 20-30ºC) que la temperatura d'estesa i fabricació de les mescles habitualment utilitzades (160ºC) fet que minva molt significativament l'emissió de gasos d'efecte hivernacle per l'estalvi energètic que suposa en la fabricació i menor emissions en l'estesa.

1.1. PROBLEMÀTICA ACTUAL

Arrel de la gran preocupació per limitar les emissions de CO_2 i de Compostos Orgànics Volàtils (COV) a la atmosfera, tal i com va posar de manifest el Protocol de Kyoto, per a poder acomplir amb dit protocol cal desenvolupar noves tecnologies per a reduir aquestes emissions en tots els camps.

S'han estudiat diferents tècniques de pavimentació com són les anomenades "en fred" que han demostrat la seva major eficàcia ecològica en comparació amb les tècniques en calent. Tot i aquest fet, les limitacions en el comportament mecànic per sol·licitacions de trànsit pesat fa que el seu desenvolupament estigui limitat a certes aplicacions de caràcter puntual, per tant, per al que respecte a les pràctiques de pavimentació estàndards el procés més utilitzat que garanteixi la qualitat i durabilitat són les mescles bituminoses en calent.

La fabricació d'una mescla bituminosa en calent consisteix precisament en el mesclat d'àrid i lligant prèviament escalfats a una certa temperatura (al voltant de 160ºC). És important tenir en compte que el lligant precisa ser lo bastant fluid durant la fase de mesclat, extensió i compactació com per permetre una adequada maniobrabilitat de l'aglomerat però, al mateix temps, el lligant ha de ser suficientment rígid com per evitar les deformacions plàstiques durant la seva vida útil. El factor clau per aconseguir questa dualitat es la viscositat del lligant que a temperatures superiores a 100ºC té un comportament de líquid viscós, i a temperatures de servei, compreses entre 0ºC i 60ºC, té un comportament de sòlid visco - elàstic. Aquestes propietats del lligant exigeixen un varem de temperatures que garantitzin el comportament òptim en cada moment.

Tradicionalment el betum i els àrids s'escalfen a temperatures compreses entre 150ºC i 180ºC, per aconseguir dos objectius fonamentals; el primer es el recobriment total dels àrids pel lligant i el segon consisteix en obtenir mescles maniobrables durant el procés d'estesa i compactació a les temperatures d'entre 130ºC a 160ºC. Aquestes temperatures de les que s'està parlant es consideraran molt elevades i amb conseqüències mediambientals importants, com són:

1. Escalfament de l'atmosfera al cremar un combustible fòssil
2. Generació de gasos contaminants de la combustió, entre els que destaquen NO_2, SO_2 i CO_2.
3. Emissió de compostos orgànics volàtils degut a l'escalfament del betum.

Per quantificar la veracitat de les afirmacions anteriors, PROBISA estudia el consum de fuel d'una planta tipus en funció de la temperatura dels àrids. A la següent taula es resumeixen els resultats:

Temperatura dels àrids (ºC)	Consum de fuel (kg fuel/t aglomerat)
140	6.6
160	7.3
180	7.9

Taula 1. Consum energètic d'una planta tipus en funció de la temperatura

A la Taula 1 s'observa que s'obté una reducció del consum si es redueix la temperatura, de manera que es ratifica el fet que a temperatures elevades el consum d'energia es elevat. En termes de pes, un fuel de cadena mitja de 25 carbonis genera de CO_2 unes 3.5 vegades el pes de fuel cremat, per aquesta raó es extremadament important reduir el consum de fuel.

Per una altre costat i referent als COV, la Figura 1 confirma que les temperatures elevades incrementen les emissions de contaminants procedents del betum. Segons s'aprecia a la figura, aquestes emissions tenen un comportament exponencial amb la temperatura del betum.

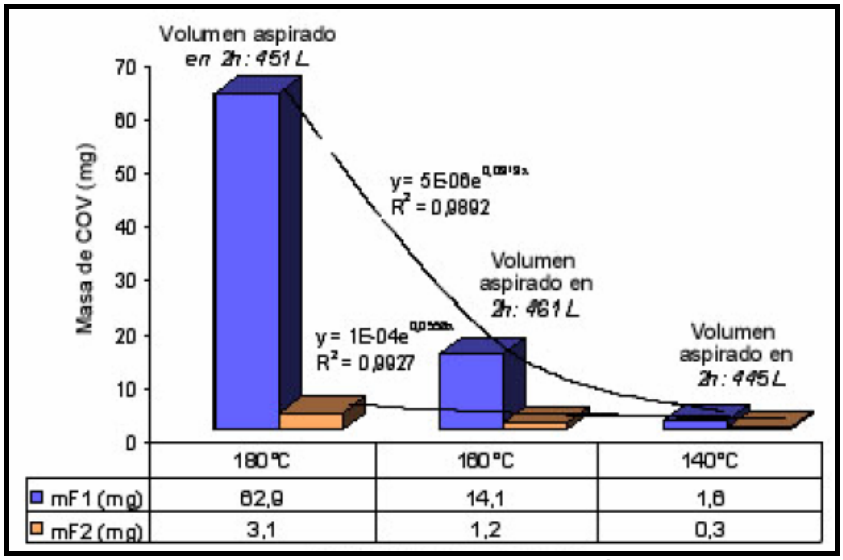


Figura 1. Emissions de COV (en el betum en funció de la temperatura).

Com a conseqüència de tot el que s'ha exposat en aquest apartat, des del punt de vista mediambiental, la tecnologia en calent va en contra de les tendències actuals que exigeixen sobre tot l'eliminació, o al menys la limitació, de les emissions de gasos a la atmosfera. Com a gran paradigma d'aquesta afirmació hi ha el Protocol de Kyoto.

1.1.1. Les Mescles bituminoses i el Protocol de Kyoto

Una unitat d'obra bàsica per la construcció de ferms en carreteres, sobre les que l'aplicació del Protocol de Kyoto ha introduït nous factors a considerar, són les mescles bituminoses.

Els materials bituminosos procedents del refinament del petroli s'han vist afectats, precisament degut a aquest procés industrial, per una regulació que contempla la Directiva Europea 2003/87/CE de Comerç de Drets d'emissions de GEI (Gasos d'efecte Hivernacle), que ho ha considerat com un dels sectors industrials a ser regulats directament. El Primer Pla Nacional de Assignació d'emissions Espanyol 2005-2007 li ha assignat la possibilitat d'emetre gratuïtament fins a 15,250 tones de CO_2 durant aquest període. Tot i que encara no se sap quines seran les emissions assignades per el següent període, 2008-2012, s'espera que siguin menors.

Tot el que sigui sobrepassar aquestes emissions repercutirà directament en els productes del refinament, incloent els materials bituminosos i en conseqüència a la construcció de ferms de carreteres.

A priori, les exigències d'un desenvolupament sostenible amb aquestes noves variables imposaran l'aplicació de noves tècniques que, complint d'entrada amb les necessitats constructives, siguin el més sostenibles des del punt de vista de les seves matèries primes, consum d'energia, generació d'emissions i de residus. Tot i que no cal oblidar el punt de vista econòmic que sempre és decisiu, ja que farà decantar la balança alhora d'escollir una d'aquestes noves tècniques més sostenibles.

Des del punt de vista tècnic, les mescles bituminoses en calent són materials excel·lents per capes base, intermèdies i de rodadura, de fet són les més utilitzades en aquest àmbit excepte per processos molt concrets en els que s'utilitzen les mescles en fred. Tot i això, disten bastant de tenir cura del mediambient, i per tant una solució plausible es tractar d'optimitzar la seva fabricació amb noves tecnologies per intentar millorar-ne l'eficiència energètica i disminuir, en la mesura de lo possible, les emissions de GEI.

1.1.2. Solucions per el problema de les MBC

La conservació del mediambient s'està convertint en el motor de desenvolupament de moltes tècniques que fins el moment eren desconegudes. Com alternativa a les mescles bituminoses en calent es poden considerar les anomenades mescles asfàltiques "templades" i les semicalentes. Com els seus propis noms indiquen, la seva fabricació implica una menor temperatura, el que directament implica un menor consum de combustible (menys cost econòmic a llarg termini) i menors emissions de GEI.

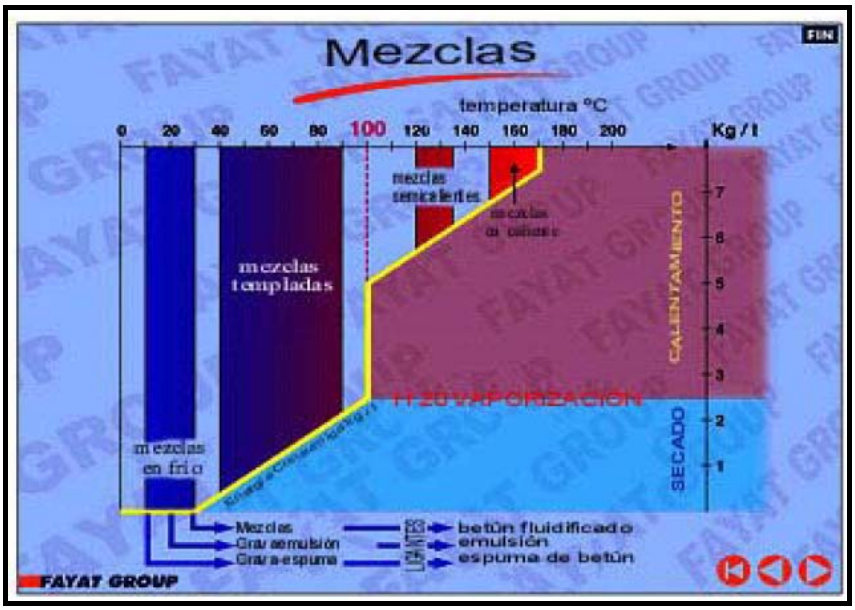


Figura 2. Consum de combustible en una planta en calent en funció de la temperatura

A França es troba la primera experiència sobre la fabricació i posada en obra de les mescles a baixa energia ("Low Energy Asphalt" (LEA)), registrades a Espanya amb el nom de mescles asfàltiques Templades per la seva comercialització. Aquest nom respon a un procés amb emulsió on la temperatura de producció no supera els 100ºC per evitar l'evaporació de l'aigua, fet que suposa un baix consum d'energia. Representa ser una mescla entre les mescles en fred i les MBC, i resulten ser més similars a les primeres a diferència de les semicalentes que tot i trobar-se al mig de les dues són més semblants a les segones.

Les mescles semicalentes són les fabricades a temperatures d'uns 30ºC per sota de les MBC equivalents. Aquestes mescles, a part dels avantatges mediambientals que poden aportar, presenten una major facilitat d'estesa i compactació, fins i tot en condicions climàtiques desfavorables, i una major resistència a l'envelliment.

De forma que avui en dia i a curt mitja termini existeixen dos possibles soluciones al problema mediambiental que generen les mescles bituminoses en calent:

1. Mescles Asfàltiques Templades (LEA)
2. Mescles Asfàltiques Semicalentes ("Warm Mix Asphalt" (WMA))

A continuació s'explica de forma més acurada cada un dels processos que de alguna forma representen una alternativa per solucionar els problemes mediambientals relacionats amb les MBC. L'idea que no s'ha de perdre de vista en cap moment és que per substituir les MBC per qualsevol altre procés, aquest ha de solucionar el problema mediambiental però donant garanties de qualitat i durabilitat iguals que les que proporcionen les MBC i sense representar un cost desproporcionat.

1.1.2.1. Mescles Asfàltiques Templades

El procés de fabricació de les mescles templades es basa en l'eliminació de l'evaporització al final del procés donat que no superen els 100ºC, i consisteix en eliminar l'humitat dels àrids, i utilitzar-la per aconseguir una disminució de la viscositat del lligant mitjançant l'espuma del mateix per tal d'assegurar una adequada envolta dels àrids així com la maniobrabilitat necessària per la seva utilització i posada en obra.

El procediment utilitzat per portar a terme la fabricació de la mescla templada es resumeix a continuació mitjançant la Figura 3:

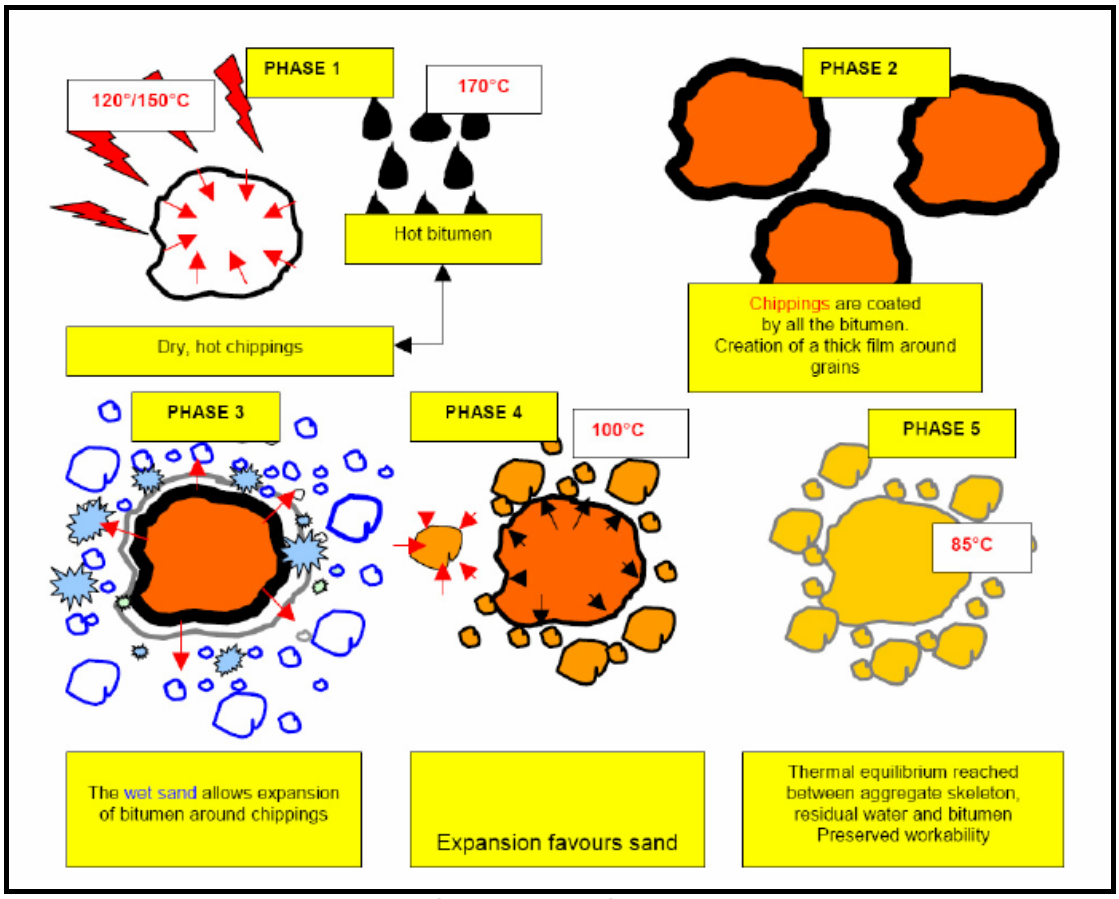


Figura 3. Procés de fabricació de les mescles templades.

El procés s'inicia escalfant l'àrid gros a la temperatura habitualment utilitzada en les mescles en calent ("Hot Mix Asphalt" (HMA)), tal i com s'observa a la Figura 3. Posteriorment es procedeix al recobriment de l'àrid gros per la totalitat del betum, que també s'escalfa a la temperatura habitual. Una vegada aconseguida aquesta envolta de l'àrid gros s'afegeix la sorra que conté els elements fins de l'esquelet mineral amb la humitat que tingui. Per últim se li afegeix una quantitat d'aigua suficient per aconseguir la autoexpansió del betum fet que genera un augment de la superfície específica del lligant i la disminució de la viscositat aparent aconseguint d'aquesta forma el mesclat perfecte dels àrids.

L'intercanvi tèrmic permanent que es produeix en les diferents fases de la operació de mesclat, provoca la condensació de l'aigua residual, que es dispersa en la massa del betum i assegura la maniobrabilitat final de la mescla. La temperatura final de la mescla no supera en cap cas els 100ºC i, en canvi, presenta el mateix aspecte que una mescla convencional.

El resultat de tot aquest procés fa que s'aconsegueixi una mescla que té l'aspecte i les característiques de les mescles en calent ja que:

- La fabricació es pot realitzar tant en plantes contínues com en discontinues.
- Es poden utilitzar els mateixos betums i la mateixa dosificació que en el cas de les mescles convencionals MBC.
- Es pot fabricar tota la gama de mescles en calent.
- El percentatge de betum no es troba limitat.
- Les mescles al finalitzar la seva posada en obra tenen característiques mecàniques pròximes als seus valors definitius, com també passa amb les mescles en calent en el mateix estat de maduració.
- La humitat residual de les mescles és inferior i pròxim al 0.5%.

Amb la fabricació d'una mescla templada s'aconsegueix reduir l'aportació d'energia necessària per obtenir el mesclat i el recobriment pel lligant del conjunt d'elements. Aquesta reducció queda reflectida a la Figura 2, que mostra que el consum de combustible de les LEA oscil·la entre 0.5 i 2.5 kg per tona de mescla, la qual cosa significa que es pot arribar a una reducció de fins a 7 kg per tona, fet que representa una elevada reducció, de més del 50%.

Pel que fa al transport, l'estesa i la compactació es porten a terme utilitzant els mateixos equipaments que en el cas de les mescles convencionals, tot i que cal destacar que la temperatura d'aplicació de la mescla es menor i, en conseqüència es redueix l'emissió de gasos i a la vegada permet que es disminueixi el risc de cremades i la forta sensació de calor, especialment a l'estiu. També cal destacar que l'energia de compactació és superior a la convencional, cosa que significa un augment en el número de passades del compactador i contraresta en part la reducció d'emissió de gasos en el còmput global.

1.1.2.2. Mescles Asfàltiques Semicalentes (WMA)

Es denominen mescles asfàltiques semicalentes a aquelles mescles que, gracies al ús de determinats procediments, poden ser fabricades a temperatures de l'orde de 30ºC per sota de les que els i tocaria en cas de que fossin mescles en calent. Aquest fet es tradueix, tant en la central com en la posada en obra, en una apreciable reducció de emissions de gasos, de fums i d'olors, i al mateix temps en una estesa i compactació més fàcil, també en condiciones climàtiques poc favorables. Si es considera la durabilitat de la mescla es pot veure d'entrada que no queda compromesa, donat que la fabricació es fa a menors temperatures i per tant l'envelliment del lligant serà menor.

Aquestes mescles són fabricades a través de:

- Adició d'hidrocarburs al betum amb la finalitat de reduir la seva viscositat
- Incorporació a la mescla de zeolites sintètiques utilitzant, desprès d'escalfar, l'aigua que conté produint una expansió del lligant.
- Utilització de productes que actuïn com a espumajants del betum
- Utilització en lloc d'un únic betum, dos lligants de diferents viscositats.

Per últim, es important remarcar la reducció en el consum de combustible; tal i com mostra la Figura 2, el consum de les semicalentes (WMA) oscil·la entre 5.5 i 6.5 kg de fuel per tona de mescla, el que significa que es pot arribar a estalviar fins a 2 Kg de per tona si es compara amb les mescles en calent (HMA).

1.2. OBJECTIUS

Un cop vist el plantejament general de la problemàtica existent, aquesta tesina fa un pas més per a intentar consolidar i estudiar el comportament i validesa de l'ús de les mescles bituminoses semicalentes. Motiu que fa que la present tesina es centrarà ja només en aquesta tipologia de mescles.

Per a poder corroborar la viabilitat de les mescles bituminoses semicalentes, es fabricaran mescles amb diversos betums, uns de modificats i un sense modificar (el qual servirà de referència), a diferents temperatures amb un tipus de granulometria i compactació comuns, per a poder ser caracteritzades i comparades posteriorment un cop obtinguts els resultats.

Un cop fabricades totes les provetes es caracteritzaran mitjançant diversos assaigs per a poder comparar-les, bàsicament des del punt de vista mecànic, veient la seva evolució segons la temperatura de fabricació.

Finalment s'estudiaran els resultats comparant-ne les propietats de cada una de les mescles amb un betum modificat i a una temperatura concreta, amb la mescla patró i se'n extrauran conclusions, que es desenvolupen al final de la present tesina.

Per això, s'ha escollit de fabricar una mescla S-20 per a capa intermèdia, de composició fixa, utilitzant tres tipus de lligants: un betum B-60/70; en el segon cas el mateix betum anterior al que se li incorpora additiu tipus TENSOACTIU i en el tercer cas, també el mateix betum al que se li ha incorporat un additiu tipus CERA. Les mescles així fabricades s'assajaran a Mòdul Resilient, Tracció Indirecta i amb l'assaig denominat FÈNIX.

Prèviament es farà uns repàs al concepte i estat actual de les mescles bituminoses semicalentes, i després s'exposarà la metodologia duta a terme així com a les descripcions dels assaigs, tipologia del compactador, procediment..., utilitzats en aquest treball.

2. MESCLES BITUMINOSES SEMICALENTES

2.1. INTRODUCCIÓ

A la present tesina, s'utilitza el terme de "Mescles Semicalentes" (WMA) per referir-se a una tecnologia innovadora que pot substituir a les mescles bituminoses en calent (HMA) conservant les seves qualitats tècniques i reduint les emissions tal i com estableix el Protocol de Kyoto.

La principal idea, tal i com s'ha dit anteriorment, es que les mescles semicalentes permeten reduir la temperatura de producció, estesa i compactació de les mescles bituminoses en calent en 30ºC aproximadament, depenent del tipus de procés utilitzat. Existeixen diferents mètodes que s'engloben sota el terme de WMA amb els que es pot aconseguir aquest efecte, els quals seran exposats en propers apartats.

La conseqüència immediata de produir WMA és la reducció del consum d'energia requerit al realitzar la combustió del fuel, que per a les mescles en calent (HMA) és fa una temperatura al voltant o superior a 160ºC a la planta de producció. Aquestes temperatures tan elevades són necessàries perquè el betum assumeixi una viscositat que permeti el recobriment complet dels àrids, i una bona maniobrabilitat durant l'estesa i compactació.

En canvi amb les WMA és fàcil aconseguir aquests mateixos efectes, donat que a igual temperatura la viscositat és menor que l'obtinguda amb les HMA, així que per obtenir la mateixa viscositat es requereix menor temperatura i, en conseqüència, l'energia necessària és menor. Per tant l'estalvi d'energia ofereix el benefici de reduir les emissions de gasos, fums i olors generats per la combustió de fuel, en la planta de producció i en el lloc de l'estesa, i a més s'estalvien recursos i costos.

Els primers treballs d'investigació es van iniciar a Alemanya i França el 1995, podent assenyalar els avantatges de les WMA en comparació a les HMA, però també els seus desavantatges i riscs. Els beneficis que s'obtenen al treballar amb les mescles semicalentes són bàsicament mediambientals, de tècnica i operacionals, i els desavantatges estan relacionats amb el tema econòmic, tot i que es poden amortitzar a mig - llarg termini.

2.1.1. Avantatges

Els principals avantatges mediambientals relacionats amb l'ús de les mescles semicalentes es resumeixen a continuació:

- **Disminució de les emissions de gasos d'efecte hivernacle** a la planta durant la producció.

En general, les mesures de les emissions de contaminants realitzades en aquests últims anys indiquen que s'expulsen al medi entre un 30% i un 90% menys del que s'emet amb les HMA, depenent de les condicions. Això significa que es poden arribar a reduir les emissions de gasos fins a un 70%, quantitat que no passa desapercebuda. Les reduccions típiques esperades per a cada un dels components que es generen en la combustió del fuel i en l'escalfament del lligant són les següents:

- El CO_2 es redueix entre un 30-40%
- El SO2 es redueix entre un 35%
- El CO es redueix entre un 10-30%
- El NOx es redueix entre un 60-70%
- Els COV es redueixen un 50%
- La quantitat de pols es redueix entre un 20-25%

Per tant la contribució de les WMA als objectius marcats referents a la reducció dels gasos que provoquen l'efecte hivernacle seria molt apreciable, per els diferents països de la UE.

- **Disminució del consum d'energia** mitjançant la reducció de la quantitat de fuel utilitzat per la combustió i, conseqüentment, reducció dels costos de producció.

Els estalvis d'energia registrats durant tots els anys d'experimentació, indiquen que la disminució del consum d'energia en la combustió de les WMA es troba al voltant d'un 20 i un 75% del consum regular de les HMA, dependent de la reducció de temperatura, comparant amb l'equivalent de les HMA.

L'importància econòmica d'aquest benefici és relativa donat que depèn del tipus i cost d'energia que s'utilitzi. En àrees on el cost del combustible es relativament alt, el benefici pot ser un incentiu important, i en àrees on aquest cost sigui baix el benefici seria mínim. En qualsevol cas, existeix un estalvi econòmic en quant a la matèria prima, sigui quina sigui.

Tot i això, la reducció de la quantitat de fuel necessari per la combustió té una conseqüència directa que no depèn de cap factor: es redueixen les emissions de GEI.

Segons els avantatges tècnics, la reducció de la viscositat és fonamental i sobre ella es recolza el pilar de les mescles semicalentes donat que es pot reduir la temperatura de producció (essència de les mescles semicalentes).

- **Reducció de la viscositat de la mescla,** fet que possibilita una millora de l'eficiència i eficàcia de la maniobrabilitat i compactació.

La reducció de la viscositat de la mescla pot ser beneficiós en varis sentits tot i que cada una de les tecnologies de les WMA tingui un efecte diferent sobre aquesta propietat. En general, totes elles poden aportar els següents beneficis:

- Millora de la maniobrabilitat: Normalment la disminució de la viscositat implica una major maniobrabilitat i una mescla menys enganyosa (evita la formació de grums). Aquest benefici és difícil de quantificar.
- Major compactació amb cada passada de la compactadora: Com que la mescla semicalenta, generalment, té menor viscositat, cada passada de la compactadora proporciona major compactació, d'aquesta forma, es redueix el número total de passades necessàries per arribar a la densitat òptima.
- Major maniobrabilitat i major compactació de les mescles més rígides, especialment, les mescles amb betums modificats o les mescles amb un alt percentatge de material reciclat (Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)). La tecnologia de les mescles semicalentes facilita el treball i el compactat d'aquest tipus de mescles a l'obra.
- Major compactació a temperatures menors: amb les mescles semicalentes es pot millorar la compactació en cada passada del compactador, per tant, es pot contrarestar el ràpid procés de refredament que passaria en el cas de ser mescles en calent. D'aquesta forma, compactant el mateix número de vegades que amb les HMA s'aconsegueix una compactació completa abans que finalitzi el refredament de la mescla i es converteixi en una mescla difícil de treballar.
- Major distància entre la planta i l'emplaçament de l'obra. La viscositat es redueix al utilitzar qualsevol procés de les WMA, fet que proporciona major marge de temps per que es produeixi l'enduriment de la mescla, i per tant existeix certa folgança de temps per a poder compensar l'augment de la longitud del trajecte.
- Millora el comportament de les HMA amb un alt percentatge de RAP. L'ús de l'additiu correcte, la quantitat òptima i el grau del lligant adequat poden ser combinats per dissenyar i produir aquest tipus de mescles sense problemes, i obtenir la rigidesa desitjada.

És important remarcar que alguns d'aquests beneficis són auto-excloents uns amb els altres ja que no poden donar-se tots simultàniament. Per exemple, les mescles semicalentes reduiran l'esforç de compactació en cada una de les passades, sempre i quan, les distàncies de transport siguin relativament curtes i la temperatura de la zona sigui l'adient.

- **Reducció de l'envelliment del lligant** degut a la disminució de la temperatura en el procés de fabricació de les WMA.

Per últim i no menys importants les avantatges operacionals, que són aquelles relacionades amb la operativitat de tot allò que involucra la producció, execució i posada en servei.

- **Reducció del desgast de la planta** com a conseqüència de la disminució de la temperatura, en comparació amb les HMA.
- **Disminució del temps de curat,** i per tant, ràpida obertura al trànsit.

2.1.2. Desavantatges

La contrapartida per a l'indústria és el cost afegit que aporten les WMA al incorporar-se al mercat. I l'inversió principal és adaptar les plantes de fabricació de mescles en calent a les modificacions requerides per cada un dels procediments, en el cas de que sigui necessari, de les mescles semicalentes. D'altre banda, el preu per tona de mescla s'incrementa degut a l'incorporació de l'additiu. Tot i això l'adaptació de les instal·lacions és amortitzable a mig - llarg termini, i l'additiu pot ser material de rebuig (un residu).

Segons sembla no existeix cap desavantatge destacable en quant a les propietats mecàniques de les WMA comparades amb les HMA. No obstant, és important remarcar que avui en dia hi ha un desavantatge des del punt de vista econòmic ja que es preveu que serà difícil posar en pràctica l'entrada de les mescles semicalentes com a una tecnologia que substitueixi a les mescles en calent, o que els hi faci de moment la competència. El motiu d'aquesta previsió es degut a la negativa de les constructores (fabricants de mescles) a fer front a una inversió que, a curt termini, no els aportaria cap benefici destacable.

2.1.3. Riscos

Tota nova tecnologia té associada una certa quantitat de riscos, com en el cas de les mescles semicalentes. A continuació es classifiquen els riscos derivats d'aquesta nova tecnologia:

- **Incertesa a llarg termini** : les WMA són relativament noves, ja que les primeres seccions de mostra es varen construir fa només 10 anys. Per un costat, existeix la desconfiança o risc del que passarà a llarg termini, i per un altre costat el bon rendiment d'aquestes seccions i altres, en quant a propietats funcionals i estructurals es refereix, i això fa que de moment hi hagi un cert optimisme.
- **Incertesa en l'ús**: les agències propietàries de cada un dels processos de les WMA tracten amb escepticisme el futur ús d'aquestes, donat que desconeixen el tracte que voldrien les constructores, sabent que qui assumeixen el riscs són les persones que utilitzen, dia a dia, les infraestructures. Tant es així, que les agències haurien de comprometre's a limitar l'ús d'aquestes mescles marcant certes especificacions. Faltaria que l'administració opinés de l'ús d'aquest tipus de mescles per a fer-les estàndard per a certs casos.

2.1.4. Resum Avantatges / Desavantatges

Las mescles semicalentes són una nova tecnologia creada per evitar, dins de les seves possibilitats, el canvi climàtic. L'objectiu principal de dites mescles és el de mantenir o millorar la qualitat de les HMA una vegada es redueixi la temperatura de producció. No obstant existeixen altres objectius, no menys importants, que han de ser perseguits:

- Utilitzar les plantes de HMA existents per les WMA, per disminuir costos d'implantació i producció.
- Utilitzar les especificacions estàndard de les HMA per les WMA, per tal de mantenir-ne les propietats i facilitar la implantació de les WMA.

A continuació es presenta a la taula 2 un resum de tots els avantatges, desavantatges i riscos que suposa treballar amb mescles semicalentes en comptes de mescles en calent:

Avantatges	Mediambientals	Reducció d'emissions de gasos	
		Reducció del consum d'energia	
		Reducció de costos de producció	
	Tècniques	Reducció de la viscositat	Major maniobrabilitat
			Major compactació en cada tongada
			Major maniobrabilitat i major compactació en mescles rígides
			Major compactació a temperatures baixes
			Permet major distància entre planta i obra
			Millora el comportament en les RAP
		Reducció de l'envelliment del lligant	
	Operacionals	Reducció del desgast de la planta	
		Reducció del temps de curat	
		Ràpida obertura al trànsit	
Desavantatges	Econòmiques	Cost de l'inversió inicial	
		Augment del cost per tona (additiu)	
Riscos	D'ús	Incertesa a llarg termini	
		Incertesa en l'ús	

Taula 2: Resum avantatges i desavantatges Mescles Bituminoses Semicalentes.

2.2. EVOLUCIÓ HISTÒRICA DE LES MESCLES SEMICALENTES

Els primers treballs d'investigació que es coneixen sobre les WMA comencen a Europa a l'any 1995, concretament, a Alemanya i França. Els països Europeus són considerats com els pioners en aquest tipus de tecnologia. Va ser al voltant dels anys 1997 i 2001 que es van construir a Europa els primers paviments amb aquesta tecnologia, basats en investigacions i treballs de laboratori realitzats anteriorment.

Al 2002 s'inicià una sèrie d'investigacions per Europa sobre les WMA, patrocinats per "National Asphalt Pavement Association (NAPA)" que emana de l'interès dels EEUU per aquest tipus de mescles. Es llavors que comencen a desenvolupar-se a EEUU i a la CEE nous processos fins al moment desconeguts, basats en additius químics. No obstant, la primera experiència pràctica als EEUU s'ubica a Alabama, data del 2005 i correspon a la segona rehabilitació d'unes pistes de proba, fabricades inicialment amb HMA, sobre les que es realitzen determinats assaigs amb la finalitat de conèixer les propietat d'aquestes mescles.

Anteriorment, al 2004, es va elaborar un projecte de demostració "World of Asphalt Show" el qual va concloure amb uns resultats determinats que van ser exposats, a la resta d'interessats en aquesta nova tecnologia, en una conferència. Aquest mateix any, s'inicià també una investigació en el "National Center for Asphalt Technology (NCAT)" finançada per NAPA, per la "Federal Highway Administration" i, també, per alguns dels proveïdors de les WMA, sobre diferents mètodes per reduir la temperatura de producció, estesa i compactació.

En els següents anys, als estats de Missouri i Wisconsin, es continuen construint pistes de proba, amb diferents processos de les WMA, a partir de les quals s'obtenen resultats importants sobre les mescles semicalentes a camp.

Bibliogràficament, abans del 2007, les WMA eren una tecnologia poc coneguda a la resta del món, ja que es trobava centralitzada a Europa i als Estats Units, a partir de llavors un país asiàtic, concretament Tailàndia, treballant conjuntament amb EEUU, va realitzar varis estudis de laboratori, que donaran les primeres experiències pràctiques en aquest país.

En alguns altres llocs del món també s'han provat les WMA tot i que a menor escala, com són els països de Canada, Sud Àfrica, Mèxic, Xina, Itàlia, Espanya, Noruega, Finlàndia, etc…

2.2.1. Antecedents de l'estudi. Tipus de processos

L'interès per les mescles asfàltiques semicalentes apareix en el moment que es va veure que les restriccions mediambientals van començar a ser més exigents, tal i com s'ha dit anteriorment, i la preocupació perquè les mescles asfàltiques en calent, les mescles per excel·lència, puguin en un futur ajudar a no sobrepassar els límits imposats pel Protocol de Kyoto (1997). És per aquest motiu que al llarg dels deu anys posteriors s'han fet nombrosos projectes i estudis en els que s'analitzen les mescles bituminoses semicalentes, com és el cas de la present tesina.

A continuació s'exposen els productes més freqüentment utilitzats per fabricar mescles semicalentes, els quals han estat desenvolupats amb projectes de camp i se'n han estudiat les seves propietats:

1. Es basa en la addició d'una zeolita (substàncies químiques conegudes per estovar l'aigua) sintètica, anomenada Aspha-Min®, durant el mesclat en la planta per crear un efecte espumós sobre el lligant.
2. Es tracta d'un sistema de dos components anomenats WAM- Foam® (Warm Asphalt Mix Foam) que introdueix un lligant tou i un lligant dur espumós en diferents fases del procés de producció.
3. Utilitza additius orgànics tal com l'anomenat Sasobit®.

Aquestes tecnologies han estat desenvolupades i utilitzades en alguns països Europeus per produir les WMA, tot i que tant l'Aspha-Min® com el Sasobit® també han estat utilitzats als EEUU.

Aquestes tres tecnologies apareixen per permetre la producció de las WMA, reduint la viscositat del lligant a una temperatura donada. A través d'aquesta reducció s'aconsegueix que el lligant recobreixi completament els àrids a menor temperatura que a la que, tradicionalment, requereixen les HMA, i així permetre la seva correcte fabricació, estesa i compactació.

2.2.1.1. Aspha-Min

Aspha-Min és un producte que va començar a desenvolupar-se al 1995 en Mitsubishi Heavy Industries (MHI) i posteriorment al 2001 inicià una corporativa internacional amb EUROVIA de la que formen part nombrosos països d'Europa i Nord Amèrica.

Finalment, al 2006, es crea la companyia de distribució "GmbH" en Hanau (Alemanya) a partir de la qual es comença a comercialitzar aquest producte. En definitiva, Aspha-Min és un producte d' "Eurovia Services GmbH", a Bottrop, Alemanya.

Les zeolites són silicats que tenen grans espais buits a les seves estructures fet que permet que tant cations (sodi, potassi, bari i calci) com molècules, incloent grups de cations com els de l'aigua, s'acomodin al seu interior.

L'ús més conegut de les zeolites és el d'ablenar l'aigua, i és caracteritzen per la seva habilitat per perdre i absorbir aigua sense fer malbé la seva estructura cristal·lina. Aquestes actuen com a sistema d'entrega d'aigua al nou fluid sempre i quan s'utilitzi el calor com a medi per expulsar-la. La quantitat d'aigua interna en una zeolita correspon al 21% del seu pes i s'allibera en el rang de temperatures d'entre 85ºC i 183ºC.

Els beneficis que aporta Aspha-Min a les mescles semicalentes es resumeixen a continuació:

- Compatible amb els tipus de lligant que s'utilitzen normalment.
- Compatible amb els tipus de mescles que s'utilitzen normalment.
- Compatible amb l'ús de RAP.
- Fàcil adició i dosificació.
- Emmagatzematge estable sempre i quan sigui en sec.
- No requereix grans modificacions en la planta d'asfalt, únicament un aparell que permetí afegir el material (Aspha-Min) a la mescladora.

És important tenir en compte que, a més d'aquests beneficis, Aspha-Min aporta els propis de les mescles semicalentes referents a la disminució de gasosos emesos al medi, l'estalvi d'energia i tots aquells que tenen relació amb la reducció de la viscositat.

2.2.1.2. WAM-Foam

Al 1995, Kolo Veidekke i Shell International Petroleum Company van unir les forces per treballar per un mateix objectiu, desenvolupar un procés que produeixi un mescla bituminosa a temperatures més baixes que les temperatures de producció de les HMA, sense sacrificar-ne la qualitat.

Cinc anys més tard l'empresa aconseguia el seu objectiu amb el procés WAM-Foam , considerat com a WMA, basada en la tecnologia d'un betum espumós, ja existent, Kolo Veidekke.

Quan s'utilitzen mescles semicalentes amb WAM-Foam en lloc de mescles tradicionals únicament necessiten ser escalfats a un temperatura que varia entre 100ºC i 130ºC, per aconseguir els mateixos efectes o qualitat que les HMA, i poden ser compactats a una temperatura que ronda els 80 ºC – 100 ºC

La tecnologia que envolta al WAM-Foam recau en utilitzar dos lligants asfàltics separats; un lligant tou i l'altre dur en estat espumós. El tou es mescla amb els àrids a la temperatura de 120ºC, mentre que el lligant dur s'agrega en l'estat espumós en la segona etapa del procés, unint-se amb els àrids ja pre-coberts. El lligant dur és polvoritzat amb una petita quantitat d'aigua freda, fet que indueix la formació d'espuma, d'aquesta forma es garantitza la capacitat de recobriment.

Aquesta combinació de lligants actua per reduir la viscositat de la massa i, així proporciona la treballabilitat necessària que permet reduir la temperatura d'estesa i compactat de la mescla.

Els beneficis que poden aportar WAM-Foam a les mescles semicalentes són els següents:

- Estalvi d'energia, redueix el consum de fuel i, conseqüentment, redueix els costos de producció i les emissions de gasos.
- Reducció de fums que provenen del lligant i, en conseqüència, redueix els riscs per la salut.
- Produeix mescles estables a la hora de ser emmagatzemades, per tant són treballables durant més temps que les HMA.
- Proporciona bona qualitat i un bon funcionament.
- Ràpida obertura al trànsit desprès del compactat.
- Capaç de resistir condicions adverses tant climàtiques com per trànsit elevat.
- Fàcilment manipulable, tant els components com la mescla definitiva, durant la preparació.
- Bona treballabilitat durant la mescla, l'estesa i compactació.

2.2.1.3. Sasobit

Sasobit és un producte de Sasol Wax International AG, és l'únic additiu que aquesta empresa ha estat comercialitzant amb èxit, a Europa i Àsia, des del 1997. No obstant, no va ser fins anys més tard, que els americans van aplicar aquest producte, ja que en vista dels canvis en les qualitats dels seus betums buscaven noves tècniques que garantizessin una solució òptima a aquests canvis, dins d'un mercat competitiu.

Des del 1997, s'han realitzat al voltant de 142 projectes amb un total de 2,716,254 m^2 de paviments, utilitzant Sasobit. Aquests projectes van ser construïts a Àustria, Bèlgica, Xina, Txèquia, Dinamarca, França, Alemanya, Ungria, Itàlia, Malàisia, Països Baixos, Nova Zelanda, Noruega, Rússia, Eslovènia, Sud Àfrica, Suècia, Suïssa, Regne Unit i als Estats Units. Els projectes inclouen diferents granulometries, diferents tipus d'àrids, diferents tipus de mescles i diferents percentatges de Sasobit, entre 0.8 i fins a 4%.

Sasobit és un hidrocarbur de cadena alifàtica llarga (propi d'un compost orgànic on l'estructura és una cadena oberta) produïda per la gasificació del carbó o del gas natural.

Sasobit® és descriu com un "flux d'asfalt millorat" durant el procés de mesclat i les operacions d'estesa i compactació, tot això degut a la seva habilitat per reduir la viscositat del lligant. El punt de fusió és de 102 ºC i és completament soluble en el lligant a temperatures més altes de 120 ºC. Una vegada és dissolt en el betum al moure la mescla, és forma una solució homogènia i, posteriorment, es produeix una reducció marcada en la viscositat del lligant. Aquesta reducció de la viscositat permet que les temperatures de treball es redueixen a un rang de 18 ºC a 54 ºC, fent possible aquest últim valor sempre i quan s'optimitzin els resultats entre la mescla a la planta i l'estesa. Aquesta a la vegada dóna lloc a una reducció significant de les emissions de fums del betum i del CO_2 i, a més, s'aconsegueix un estalvi important d'energia al llarg de les operacions ja comentades.

Els avantatges que pot aportar Sasobit a la mescla o inclús al lligant es resumeixen a continuació:

- Té la capacitat de produir una solució homogènia amb el lligant que es pot emmagatzemar de forma estable durant varies setmanes o mesos.
- Redueix l'oxidació del lligant gràcies a la reducció de la temperatura de producció.
- Aporta múltiples avantatges a la hora de treballar amb mescles reciclades (RAP).
- També, pot incrementar la temperatura més baixa del "PG grading" (interval teòric de temperatura que pot suportar una mescla sense sofrir danys importants) en un valor comprés entre 0 i 3 ºC.

2.2.1.4. Taula resum processos

A continuació es pot observar una taula resum, en la que a part de mencionar el productor, la tecnologia utilitzada i el percentatge d'additiu de cada un dels processos, també s'estima un interval de reduccions de temperatures arribats per cada una de les tecnologies respecte a les mescles en calent. També es mostra la reducció en percentatge de les emissions al medi i en l'estalvi energètic.

Technology	WAM Foam	Aspha-Min®	Sasobit®
Producer	Shell & Kolo-Veidekke, Norway	Eurovia Services GmbH Germany	Sasol Wax GmbH Germany
Technology	2-part process: soft asphalt added first then hard, foamed asphalt	Zeolite (21% water)	Fischer-Tropsch (FT) paraffin wax
Recommended addition rate		0.3% by mix weight	0.8 to 3% by weight of asphalt binder
Advertised mixing temperature reduction[a]	78 - 113°F (43 - 63°C)	54°F (30°C)	32-97°F (18-54°C)
Plant modifications	Yes, for foam	Yes, to add material	Yes and no[d]
Reduced emissions[b]	30-98%	75 – 90%	No information
Reduced energy consumption[c]	30 – 40%	30%	20%

a. Comparat amb la temperatura de producció de les HMA, 160ºC.
b. Es troba a les pàgines web de referència. (Veidekke Group // Asphalt Pavement// Asphalt innovations a MeadWestvaco Business// John Shaw, Sasol Wax (PPT).
c. Es troba a les pàgines web de referència. (Veidekke Group // Asphalt Pavement// Asphalt innovations a MeadWestvaco Business// John Shaw, Sasol Wax (PPT).
d. Les modificacions són necessàries si el Sasobit s'afegeix directament a la mescla, aquestes no són necessàries si el Sasobit s'afegeix al lligant abans.

Taula 3. Resum de Processos actuals, per a les WMA.

3. ESTUDI EXPERIMENTAL

3.1. INTRODUCCIÓ

En aquest capítol es presenta l'estudi experimental que s'ha dut a terme per elaborar aquesta tesina. Per fer aquest estudi ha estat necessari la realització de diferents assaigs en el Laboratori de Camins del Departament d'Infraestructura del Transport i Territori de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Tots aquests treballs realitzats, han estat subjectes a les Normes del Laboratori de Transports (NLT) que es detallaran posteriorment en cada cas.

Amb la realització d'aquest estudi es pretén veure la viabilitat tècnica de fabricar i utilitzar mescles bituminoses semicalentes, exigint unes propietats i comportament similars als d'una mescla bituminosa en calent. Per dur-ho a terme s'ha triat una mescla bituminosa del tipus S-20, molt utilitzada en capes intermèdies. Pel que fa als àrids es varen considerar àrids de naturalesa calcària i un lligant asfàltic B-60/70, amb diferents additius per a veure la influència de la temperatura de fabricació en les propietats de les mescla, comparant-les amb la mescla patró (sense additius).

3.2. MATERIALS UTILITZATS

És important pel bon desenvolupament del tema objecte d'aquest estudi, un adequat coneixement de cada un dels materials components de la mescla asfàltica utilitzada. Com ja s'ha dit, les mescles bituminoses són materials compostos per una fase sòlida d'àrids i filler, i per una fase de consistència variable d'origen petroquímic, lligants asfàltics, als quals, a vegades se'ls hi sol incorporar additius que millorin les seves propietats mecàniques o que es solen fabricar amb procediments que puguin modificar les seves característiques físico-químiques, com en aquest cas per a fabricar mescles semicalentes.

3.2.1. Fus granulomètric

Per al present estudi s'ha seleccionat el fus granulomètric corresponent a la S-20, igual que en les mescles calentes, tal i com s'exposa a continuació.

La granulometria de la mescla bituminosa utilitzada en aquest estudi és del tipus S-20; definit a l'Ordre Circular 891/2004 on es pot observar el següent fus granulomètric:

Fus granulomètric										
Obertura tamisos UNE-EN933-2 (mm)	**25**	**20**	**12,5**	**8**	**4**	**2**	**0,5**	**0,25**	**0,125**	**0,063**
Mescla S-20	100	95-80	79-64	66-50	50-35	38-24	21-11	15-7	10-5	7-3

Taula 5: Fus granulomètric corresponent a una granulometria S-20 segons l'Ordre Circular 891/2004.

3.2.2. Granulometria

A continuació és presenta la granulometria de treball, corresponent al promig de cada parell de valors contemplats en cada un dels tamisos de la taula anterior:

CEDÀS	% passa	% ret acumulat	% Retingut
25	100	0	0
20	87,5	12,5	12,5
12,5	71,5	28,5	16
8	58	42	13,5
4	42,5	57,5	15,5
2	31	69	11,5
0,5	16	84	15
0,25	11	89	5
0,125	7,5	92,5	3,5
0,063	5	95	2,5
Filler	0	100	5

Taula 6: Granulometria del tipus S-20 emprada per a la realització de l'estudi experimental.

3.2.3. Àrids Utilitzats

El tipus d'àrid utilitzat és de naturalesa calcària i prové de la Cantera Foj, en el terme municipal de Vallirana, a les rodalies de Barcelona. Aquest àrid procedeix de la trituració de pedra de cantera i està exempt de la presència de trossos d'argila, material vegetal o altres matèries, que puguin alterar la seva neteja.

En quant al filler, s'ha afegit un 5% en pes d'un filler procedent de la pols dels mateixos àrids.

3.2.4. % betum, pesos d'àrids

El betum utilitzat per la fabricació de les mescles en el laboratori ha estat un betum de penetració B 60/70, sense additius en el cas de la mescla patró i amb additius en la resta de cassos. El percentatge de lligant que es va posar en tot els cassos va ser del 4,75% en pes. Les especificacions del betum B 60/70 segons l'article 211 del PG-3, i el qual compleix el betum utilitzat en la mescla patró, s'adjunten a la següent taula:

ASSAIG SOBRE EL BETUM ORIGINAL				
Característiques	**Unitats**	**Normativa NLT**	**Betum 60/70**	
			Mínim	**Màxim**
Penetració (25ºC; 100 g; 5 s)	0,1 mm	124	60	70
Índex de Penetració		181	-1	1
Punt de reblaniment anell i bola	ºC	125	48	57
Punt de fragilitat Fraass	ºC	182	-	-8
Ductilitat (5 cm/min) a 25ºC	cm	126	90	-
Solubilitat en toluè	%	130	99,5	-
Contingut en aigua (en volum)	%	123	-	0,2
Punt d'inflamació	ºC	127	235	-
Densitat relativa		122	1	-
RESIDU DESPRÉS DE PELÍCULA FINA				
Variació de massa	%	185	-	0,8
Penetració (25ºC; 100 g; 5 s)	% p.o.	124	50	-
Variació punt reblaniment anell i bola	ºC	125	-	9
Ductilitat (5 cm/min) a 25ºC	cm	126	50	-

Taula 7: Especificacions del betum 60/70 segons PG-3

Els betums utilitzats per a la fabricació de les provetes han estat facilitats per l'empresa Ditecpesa, i són:

Betum B 60/70 sense additius.
Betum B 60/70 amb additiu del tipus TERMOACTIU
Betum B 60/70 amb additiu del tipus CERA

Cal dir que donat que els betums utilitzats estan en fase d'investigació no s'ha facilitat la seva composició, únicament el nom, que indica a mode orientatiu l'origen dels seus additius.

A partir d'aquí, les mescles fabricades amb aquests tipus de Betum es denominaran segons la composició d'aquest; com per exemple les mescles fabricades amb el betum tipus dos s'anomenaran TERMOACTIU

3.3. MESCLA OBTINGUDA

Amb la granulometria descrita en l'apartat 3.2.2, es va elaborar la mescla asfàltica de l'estudi.

Les mescles asfàltiques tipus S-20 són mescles utilitzades normalment com a capes intermèdies amb uns espessors de 5 a 10 cm.

Aquest tipus de mescla necessita una dotació mínima de lligant (% en massa sobre el total de l'àrid sec) del 4% per a intermèdia, però en aquest cas s'ha utilitzat la dotació de 4,75%, essent més que suficient i vàlida.

3.4. PLA DE TREBALLS

L'estudi experimental ha estat determinat mitjançant un pla de treballs plantejat des de bon principi tal i com s'exposarà en aquest apartat.

El plantejament ha estat primerament de fabricar una mescla patró tipus S-20 estàndard, per a que serveixi de base per a la comparació i investigació dels altres dos tipus de mescles amb els seus corresponents betums amb additius, ja que l'objectiu de la present tesina és el de demostrar si és viable l'ús de les mescles bituminoses semicalentes, a partir dels betums facilitats.

Sabent que la temperatura és un factor rellevant, s'ha optat per a plantejar de fabricar totes els tipus de mescla a diverses temperatures; a quatre temperatures diferents per a cada tipus de mescles, amb intervals de 10ºC.

Per tant, per cada un dels tres tipus de betums, anomenats **B-60/70, CERA i TENSOACTIU**, emprats es van fabricar a quatre temperatures diferents.

Es va decidir de realitzar tres tipus d'assaig per comparar els diferents resultats aconseguits, per tant s'han fet tres provetes per a cada assaig, temperatura i tipus de betum.

Els assaigs que es duran a terme i que s'explica el seu procediment en posteriors capítols d'aquesta tesina d'investigació, són l'assaig **Tracció indirecte**, el **Mòdul Resilient** i l'assaig **Fènix**.

En definitiva, i tenint en compte els tres assaigs i totes les sèries en cadascun d'ells, s'han realitzat un total de **108 provetes,** és a dir 9 provetes per cada tipus de betum i temperatura determinada**.**

A la següent taula es pot observar el pla de treballs disposat en un organigrama:

		M.R.	T.I.	Fènix	TOTAL
CERA	T 110ºC	3p	3p	3p	9p
	T 120ºC	3p	3p	3p	9p
	T 130ºC	3p	3p	3p	9p
	T 140ºC	3p	3p	3p	9p
TENSOACTIU	T 110ºC	3p	3p	3p	9p
	T 120ºC	3p	3p	3p	9p
	T 130ºC	3p	3p	3p	9p
	T 140ºC	3p	3p	3p	9p
B-60/70	T 120ºC	3p	3p	3p	9p
	T 130ºC	3p	3p	3p	9p
	T 140ºC	3p	3p	3p	9p
	T 155ºC	3p	3p	3p	9p

Taula 8: Croquis resum del Pla de treballs seguit.

3.5. METODOLOGIA

3.5.1. Introducció

En aquest apartat, s'explicarà la metodologia emprada per cadascun dels tres assaigs fets en el laboratori de Camins.

La metodologia que s'ha utilitzat en la preparació dels àrids i la barreja amb el betum corresponent, és la mateixa per a tots els assaigs. També, a l'hora de compactar les mescles s'ha fet d'igual forma en totes les provetes. En aquest apartat, explicarem tot el procediment en cadascuna de les tasques i en cada assaig.

3.5.2. Preparació dels àrids

En la fabricació de les provetes, s'han preparat els àrids de manera que es disposessin en safates amb els seus respectius pesos.

En aquesta preparació, començarem tamisant- los, ja que arriben al laboratori en uns sacs amb els tamanys 0-5, 5-12,5, 12,5-20, 20-25. A partir d'aquests sacs posem els tamisos UNE a la tamisadora hi anem traiem les fraccions d'àrid retingudes en els tamisos: 20, 12.5, 8, 4, 2, 0.5, 0.25, 0.125 i 0.063 mm.

Una vegada tenim l'àrid tamisat, rentem acuradament les fraccions d'àrid retingudes en el 0.25, 0.125 i el 0.063 mm, per evitar que la pols que porta adherida a la superfície ens alteri els resultats. Posteriorment s'assequen a una estufa a 110ºC durant unes 24 hores, per poder fer les pesades en sec, juntament amb les fraccions que no s'han rentat.

A partir d'aquí, anem pesant els àrids d'acord amb les fraccions que tenim tamisades i els posem a una safata metàl·lica. Per fer les pesades dels àrids de cada proveta, utilitzem una balança de precisió 0.1gr. El procés es fa per acumulació, posant-hi primer les fraccions més gruixudes, d'acord amb la següent taula:

CEDÀS	Passa (%)	Retingut acumulat (%)	Retingut (%)	Pes (g)	Pes retingut (g)
25	100	0	0	0	0
20	87,5	12,5	12,5	150	150
12,5	71,5	28,5	16	192	342
8	58	42	13,5	162	504
4	42,5	57,5	15,5	186	690
2	31	69	11,5	138	828
0,5	16	84	15	180	1008
0,25	11	89	5	60	1068
0,125	7,5	92,5	3,5	42	1110
0,063	5	95	2,5	30	1140
Filler	0	100	5	60	1200

Taula 9: Granulometria emprada per a l'estudi experimental

Podem veure que el pes total dels àrids per a cada proveta serà de 1.200 grams incloent-hi el filler. Per tant, disposem en cada safata tots els àrids corresponent a una proveta a punt per barrejar-ho amb el betum i el filler.

Foto 1: àrids pesats disposats en safates

El filler, no s'hi afegeix dins la mateixa safata que els àrids, es pesa a part per 2 motius:

1. Per millorar la precisió de pesada.
2. Per afegir-ho a part, ja que en el procés de fabricació, primer es barregen els àrids amb el betum, i quan està tot ben mesclat s'hi afegeix el filler.

Respecte al filler, com podem veure en la taula anterior, posarem un 5% de retingut total de l'àrid. Això equival a 60g dels 1.200g totals de la proveta.

A mesura que anem pesant el filler, l'anem posant dins un got de plàstic tal i com reflecteix la fotografia 2:

Foto 2: Filler disposat en gots de plàstic per a la seva pesada.

A partir d'aquí, posem les safates dels àrids a l'estufa perquè s'escalfin a la temperatura de fabricació, ja que hem d'evitar un possible refredament del betum quan el barregem amb l'àrid fred.

3.5.3. Fabricació de les mescles

Abans de començar el procés de fabricació, deixem els motlles unes 12 hores a la temperatura corresponen tal i com marca el pla de treballs segons la sèrie perquè estiguin calents i no refredin el betum durant la mescla. També, dues hores abans de començar, posem el betum B60/70, amb additius o sense depenen de la sèrie, a l'estufa a la mateixa temperatura perquè s'escalfi; no l'hi podem posar gaire temps abans perquè podem tenir problemes d'envelliment prematur del betum.

Posteriorment traiem els àrids de l'estufa i els aboquem a un recipient metàl·lic, posem aquest recipient a sobre un planxa escalfada, i barregem els àrids de manera que es mesclin bé totes les mides. Després ho posem sobre la balança, traiem la mostra de betum del forn i l'hi afegim la quantitat adequada que en aquest cas es correspon al 4,75% en pes, és a dir exactament 57g del betum corresponen segons la sèrie de fabricació que toqui (veure fotografies 3 i 4).

Foto 3 i 4: Escalfament dels àrids i barreja amb el betum calent

Tornem a posar la mostra sobre la planxa i la tornem a barrejar durant aproximadament un minut de tal manera que el betum cobreixi tota la superfície dels àrids. Llavors hi afegim el filler (veure fotografies 3 i 4) i el barregem amb la mescla de manera que quedi homogènia. Aquest fet és important perquè si abans d'afegir el betum posem el filler, aquest, degut a la seva superfície específica, pot absorbir el betum i no permetre que la mescla sigui homogènia.

Foto 5: Barreja dels àrids i el betum fent una mescla homogènia

Mentre mesclem la mostra, traiem el motlle que el tenim dins l'estufa, untem el seu interior amb parafina perquè la mescla no s'aferri i sigui menys dificultós el procés de desemmotllat, el tapem inferiorment amb una base metàl·lica, la qual té gruix diferent que la tapa superior, perquè quan compactem la proveta per les dues cares, identifiquem la que hem posat primer a sota. Posem un paper a la base perquè el material no s'hi enganxi, afegim un collarí al motlle i amb embut hi tirem la mescla.

Una vegada el material està dins el motlle, amb un punxó s'hi dóna 25 cops, 15 a la perifèria i 10 a la part central de la mostra. Finalment s'anivella la capa superior i hi posem un altre paper.

3.5.3.1. Compactació de provetes per impacte

Un cop tenim la mescla posada en el motlle adequadament, agafem el conjunt del motlle i el disposem a la màquina de compactació per impacte (veure fotografies 6 i 7). Li donem 50 cops per la cara superior, girem la proveta vigilant que la part inferior sempre porti una base metàl·lica, ja que la mescla no pot tocar directament la base de la màquina, i li tornem a donar 50 cops més a l'altre cara.

Foto 6 i 7: Equip de compactació per impacte.

Traiem el conjunt a fora, li traiem el collarí i els papers, la numerem i la deixem refredar un mínim de 4 hores abans de desemmotllar (veure fotografia 8).

Foto 8: Motlles un cop compactats en la compactadora d'impacte

Una vegada que les provetes ja s'han refredat, passem a desemmotllar-les. Agafem les provetes juntament amb el collarí i mitjançat un gat hidràulic, de mica en mica, es treu la proveta del motlle. S'observa que depenen de les provetes i el tipus de betum, costa més treure-les del motlle ja que hi queden més o menys enganxades.

Per acabar agafem els motlles i, un per un, amb drap i un dissolvent adequat els deixem ben nets i preparats per a tornar a fabricar.

A partir d'aquí, una vegada desemmotllades, es mira l'altura de cada proveta amb un peu de rei, a tres punts separats, es fa la mitjana entre ells i obtenim el que considerarem l'altura de la proveta (veure fotografia 9).

Foto 9: Amidament de l'altura de la proveta mitjançant peu de rei.

Aquesta forma de procedir i mesurar és vàlida tant per provetes fabricades en el laboratori com per testimonis extrets d'un paviment.

Un cop abans de procedir als assaigs cal mesurar i pesar les provetes per obtenir-ne la densitat i dimensions de cada una.

3.5.4. Assaig Mòdul Resilient. Descripció i elaboració de l'assaig

3.5.4.1. Introducció

Els materials que constitueixen els paviments es veuen sotmesos a cargues dinàmiques de diverses magnituds que li son transmeses pel trànsit.

Per a poder tenir en compte la naturalesa cíclica de les cargues que actuen en els materials que conformen una estructura de paviment, així com el comportament no lineal i resilient dels materials, s'han realitzat varis treballs experimentals, tant en models a escala natural com en mostres de materials provats en el laboratori, obtenint valuosa informació sobre el comportament esforç - deformació dels materials.

Les deformacions resilients o elàstiques són de recuperació instantània i es solen denominar plàstiques a aquelles que resten en el paviment després de ser carregats.

Sota càrrega mòbil la deformació permanent es va acumulant i per cicles intermedis la deformació permanent per cada cicle disminueix, fins que pràcticament desapareix en els cicles finals. La mostra arriba així a un estat tal en que tota la deformació es recuperable; en aquest moment es té un comportament resilient. D'aquí és desprèn el concepte de mòdul resilient, el qual està definit com l'esforç desviador repetit aplicat en compressió triaxial entre la deformació axial recuperable.

Així doncs, el concepte de mòdul resilient està lligat a un procés de càrrega repetida.

Com s'ha observat en els estudis que s'han portat a terme sobre el mòdul resilient, aquest paràmetre no és una propietat constant del material, sinó que depèn de molts factors. Els principals són: número d'aplicacions de l'esforç, tixotropia, magnitud de l'esforç desviador, mètode de compactació i condicions de compactació.

La metodologia actual per disseny de paviments utilitzada per el mètode AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) considera que la propietat fonamental per caracteritzar els materials constitutius de la secció d'una carretera és el paràmetre denominat mòdul resilient.

Es per això que l'especialista encarregat del disseny, construcció i conservació de tals estructures, ha de tenir el coneixement bàsic del que el paràmetre mòdul resilient representa, de la proba del laboratori a partir de la qual s'obté i dels factors que s'ha de considerar per la selecció del valor adequat per l'ús en una determinada metodologia de disseny.

3.5.4.2. Caracterització de la sol·licitació en paviments

El patró d'esforços induïts a una estructura de paviment com a resultat del trànsit de vehicles és molt complex. Un element de paviment està subjecte a pulsacions de càrrega que involucren components d'esforços normals i tallants. La Figura 4 mostra l'esquema d'una secció longitudinal de les capes d'un paviment, sobre la qual una càrrega es mou a velocitat constant. L'estat d'esforços experimentat per el punt P degut a la càrrega en el punt A es pot observar a la Figura 4(a); en aquest punt actuen tant esforços normals com esforços tallants.

Quan la càrrega es mou al punt B, els esforços tallants són nuls i únicament actuen els esforços normals, com es presenta a la Figura 4(b); en aquest punt es té un estat triaxial d'esforços, deguts a que es presenten sols esforços normals. La direcció dels esforços tallants originats en el punt C és contraria a la direcció dels esforços originats en el punt A, com es mostra a la Figura 4(c).

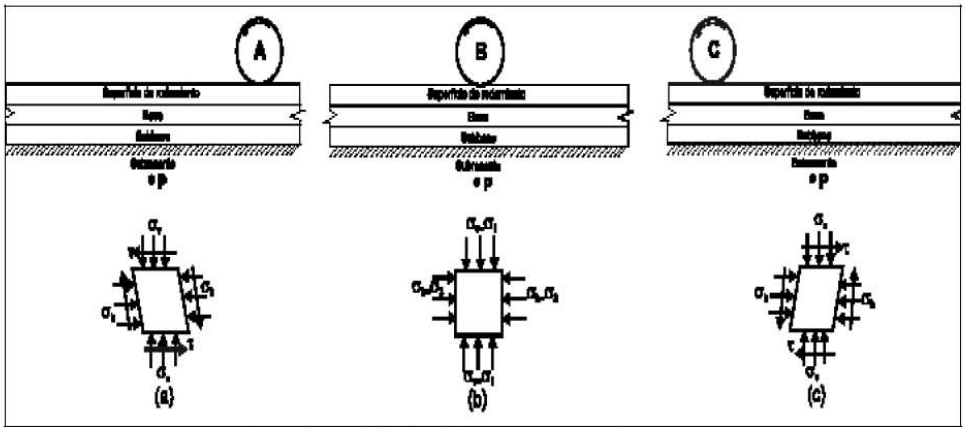


Figura 4: Estat d'esforços en paviments

Al laboratori es realitzen proves triaxials simulant la condició B intentant de simular les condicions més desfavorables. Durant les proves s'ha d'aplicar una pressió de confinament que varií amb l'esforç desviador; tot i així es difícil de simular en el laboratori aquest canvi, de fet el que es fa es mantenir la pressió de confinament constant i aplicar de forma repetida l'esforç desviador.

3.5.4.3. Amidaments d'esforços i deformacions en casos reals

Donada la forma tradicional d'estructuració dels materials que conformen el paviment, la deformabilitat sol créixer cap a baix.

En paviments, les deformacions interessen des de dos punts de vista: per un costat, les deformacions excessives estan associades a estats de falla i per un altre costat es sabut que un paviment deformat pot deixar de complir les seves funcions, independentment de que les deformacions no hagin conduït a un col·lapse estructural pròpiament dit, Rico A. y Del Castillo H.

3.5.4.4. Mecanisme de deformació d'un material subjecte a càrrega cíclica

D'acord amb el disseny estructural del paviment, el tipus i la magnitud de les sol·licitacions, repeticions de carga acumulades, característiques associades al clima i la localització de les diferents capes de material; el comportament d'esforç deformació del sòl pot ser de dos tipus: **resilient i plàstic.**

Les deformacions resilients o elàstiques són de recuperació instantània i les plàstiques són aquelles que resten al paviment després d'acabar la causa deformadora. Sota càrrega mòbil i repetida, la deformació plàstica tendeix a acumular-se i pot arribar a valors inadmissibles. Pel contrari, tot aquest procés sol anar acompanyat d'una densificació dels materials, de forma que el paviment que ha col·lapsat pot ser més resistent que l'original.

A la Figura 5 s'il·lustra el mecanisme pel qual la deformació permanent es va acumulant; s'ha de remarcar el fet que en els cicles intermedis la deformació permanent per cada cicle disminueix, fins que pràcticament desapareixen els cicles finals.

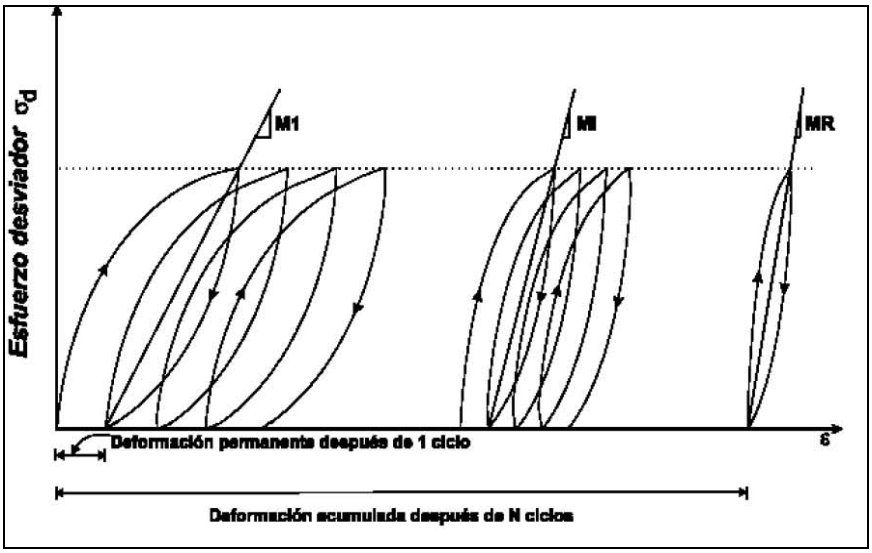


Figura 5: Mecanisme de deformació permanent dels ferms.

La mostra arriba d'aquesta forma a un estat tal que tota la deformació és recuperable, en aquest moment té un comportament resilient (on el mòdul secant és igual al mòdul resilient).

A la Figura 6 es mostra l'acumulació de les deformacions totals i plàstiques durant un cert número de cicles.

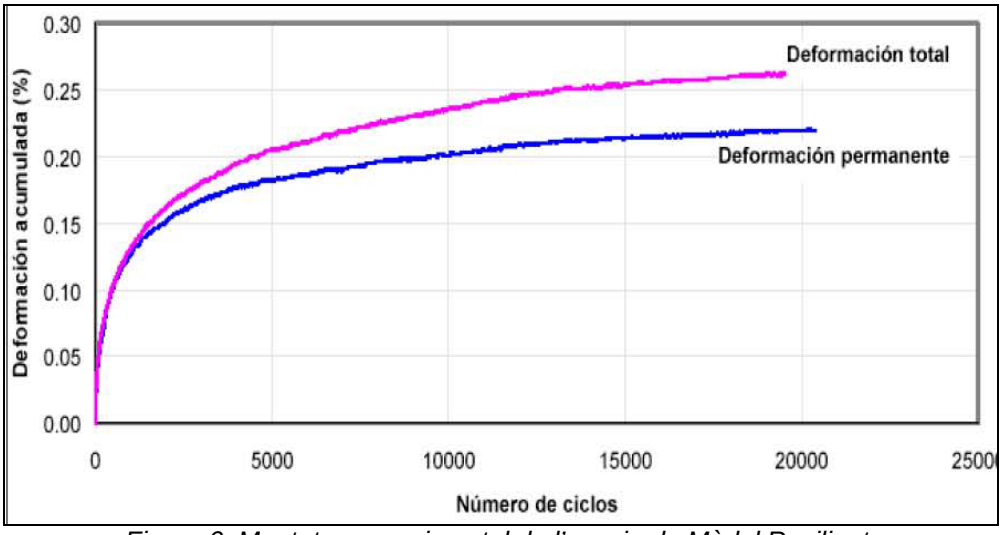


Figura 6: Muntatge experimental de l'assaig de Mòdul Resilient.

La deformació elàstica repetida preocupa sobre tot a materials amb resistència a la tensió -capes asfàltiques o estabilitzades- col·locats a la part superior de l'estructura, en els que es pot arribar a generar una falla de fissura per fatiga si el número de repeticions és important i els materials són susceptibles a aquest efecte.

L'importància que la deformació té en els paviments es deguda a que en els mètodes de disseny actuals la deformabilitat és el punt bàsic a considerar i, de fet, la majoria d'aquests es centren a mantenir-la en límits raonables.

3.5.4.5. El concepte de mòdul resilient

Hveem i Carmany al 1948 reconeixerien que el mòdul dinàmic d'elasticitat per sub-rasants és un paràmetre de gran importància per entendre el fissurament (per fatiga) de les superfícies d'asfalt i que la carga monotònica podria no ser l'adequada per la seva determinació.

El 1955, Hveem desenvolupà el tema "comportament resilient dels paviments". Ell va proposar la prova del estabilitòmetre per caracteritzar les sub-rasants. Seed et al (1955) de la Universitat de Califòrnia van seguir lo establert per Hveem. Desenvoluparen proves de càrrega repetida i introdueixen el terme de resilient.

Aquest terme va ser canviat més tard pel de mòdul resilient, Seed et al (veure ref. Bibliogràfica), el qual va ser definit com a la magnitud de l'esforç desviador repetit en compressió triaxial dividit entre la deformació axial recuperable i es representa de la següent forma:

$$M_r = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\varepsilon_{axial}} = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_{axial}} \qquad (4.1)$$

On :
σ_1= Esforç principal major
σ_3= Esforç principal menor
σ_d= Esforç desviador
ε_{axial} = Deformació recuperable

Durant les proves de cargues repetides s'observa que després d'un cert número de cicles de carga, el mòdul arriba a ser aproximadament constant i la resposta del sòl es pot assumir com elàstica. Al mòdul que es manté constant s'anomena mòdul resilient (Figura 5).

Aquesta definició era emprada per caracteritzar sub-rasants i actualment ha anat diferint i evolucionant per a les mescles bituminoses, però sense perdre'n l'idea original.

El mòdul resilient M_r és la resposta al assaig dinàmic, definit com el quocient entre la tensió desviadora axial repetida σ_d i la deformació axial recuperable ε_a, equació 4.1.

S'obtenen dos valors de mòdul resilient, un instantani i un altre de total, degut a que es registren dos deformacions durant el cicle de càrrega, una al finalitzar la pulsió de carga aplicat - deformació instantània - i l'altre al acabar el període de relaxació - deformació total - i s'utilitzen les equacions 4.2 i 4.3 per el càlcul:

$$E_i = \frac{P(v + 0{,}27)}{t \cdot D_i} \qquad (4.2)$$

$$E_t = \frac{P(v + 0{,}27)}{t \cdot D_t} \qquad (4.3)$$

On:
Ei: mòdul resilient instantani
Et: mòdul resilient total
v: coeficient de Poisson
t: espessor de la proveta
Di: deformació resilient instantània
Dt: deformació resilient total

Es presenta a continuació un esquema de l'assaig de compressió diametral per la determinació del mòdul resilient amb el muntatge de l'aparell de medició de deformació, figura 7, la configuració de la càrrega aplicada i la deformació resultant, figura 8.

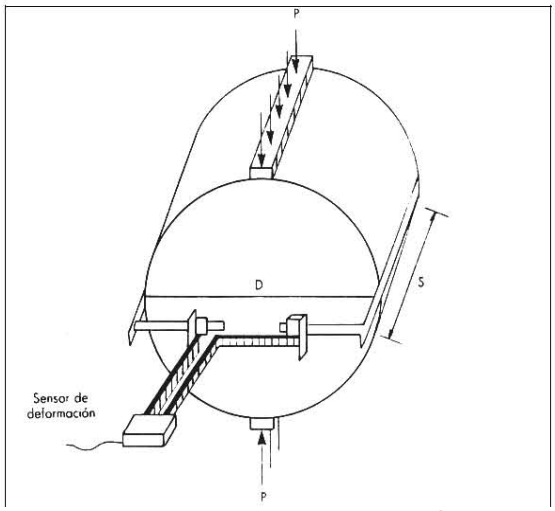


Figura 7: Assaig diametral i muntatge de l'aparell (d:diàmetre, s: espessor, P: càrrega).

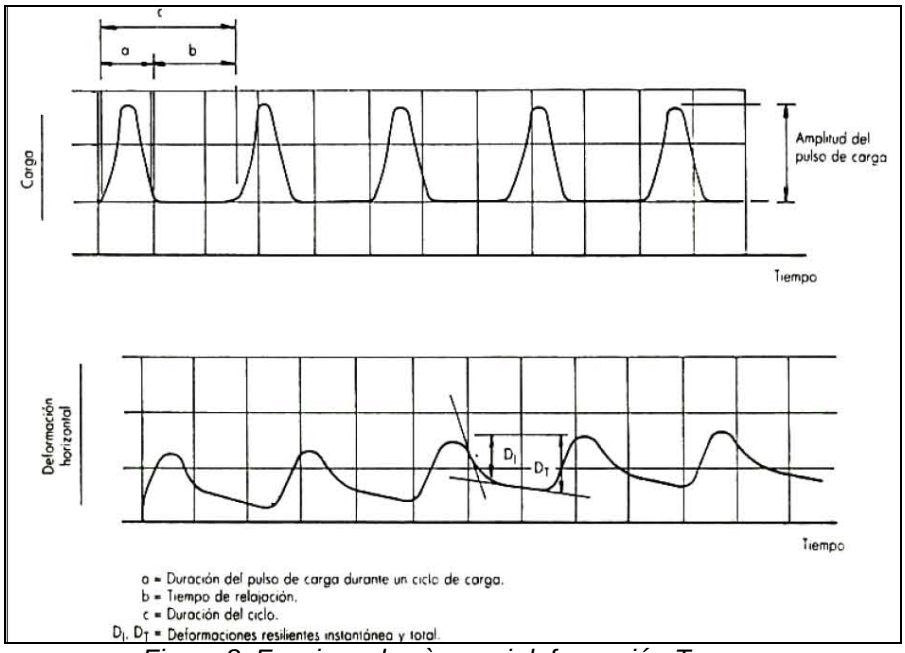


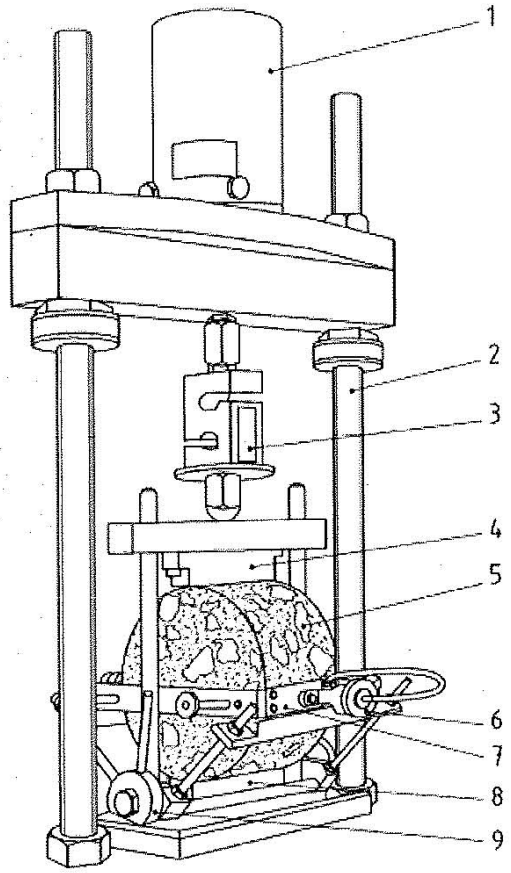
Figura 8: Funcions de càrrega i deformació - Temps.

3.5.4.6. Normes d'assaig utilitzades

Per a realitzar l'assaig de carga dinàmica s'ha utilitzat la Norma d'assaig NLT-360/91 "Determinación del módulo resiliente, en mezclas bituminosas, mediante el ensayo de compresión diametral".

3.5.4.7. Equip utilitzat per a l'obtenció del mòdul Resilient

A la següent figura 9 es pot observar el croquis de l'equip emparat per a la realització de l'assaig:



Leyenda

1 Actuador neumático de carga
2 Estructura de carga de acero
3 Dispositivo de medición de la fuerza
4 Platina superior de carga
5 Probeta
6 Ajuste de LVDT
7 Bastidor de montaje de LVDT
8 Platina inferior de carga
9 Dispositivo de alineación de LVDT

Figura 9: Muntatge experimental de l'assaig de Mòdul Resilient.

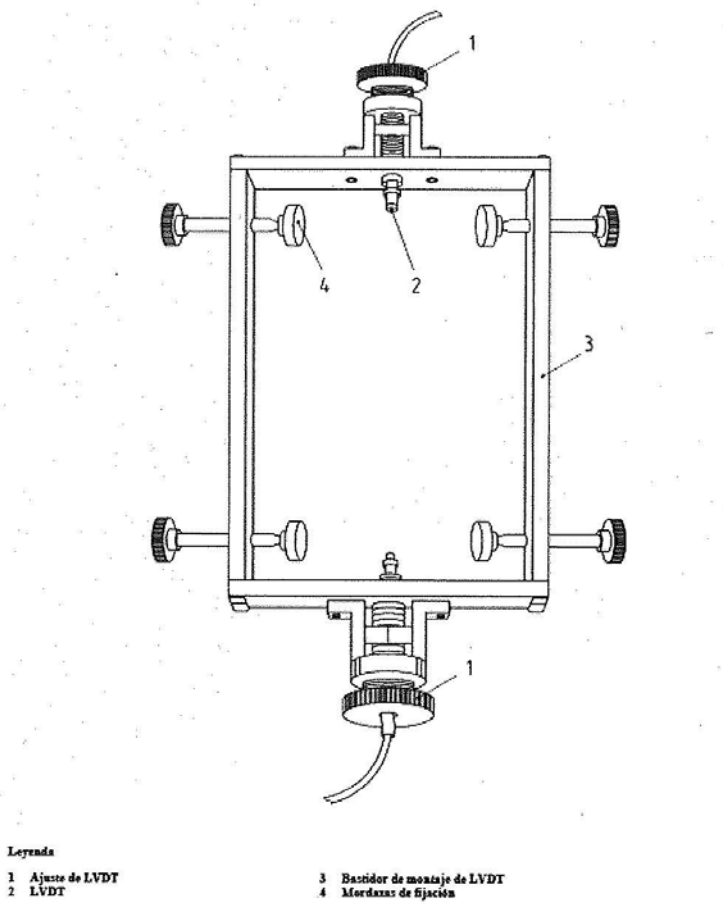


Figura 10: Dispositiu d'amidament de la deformació diametral horitzontal.

Les mostres han de ser cilíndriques de diàmetre pròxim a 101.6mm i la seva altura pot estar compresa entre 50mm i 70mm. Les mostres poden ser fabricades a laboratori o testimonis extrets de l'asfalt; en aquest cas són del laboratori.

A continuació es poden observar dues fotografies amb l'equip que s'ha utilitzat:

Foto 10: Màquina utilitzada per l'assaig Mòdul Resilient.

Foto 11: Equip Mòdul Resilient, Càmera estanca que manté temperatura, ordenador i equip auxiliar.

3.5.4.8. Procediment de l'assaig

El procediment de l'assaig consisteix a aplicar una pulsió de càrrega de forma semisenoidal seguida d'un període de repòs com es pot observar a la següent figura i registrar la deformació horitzontal que sofreix la mostra.

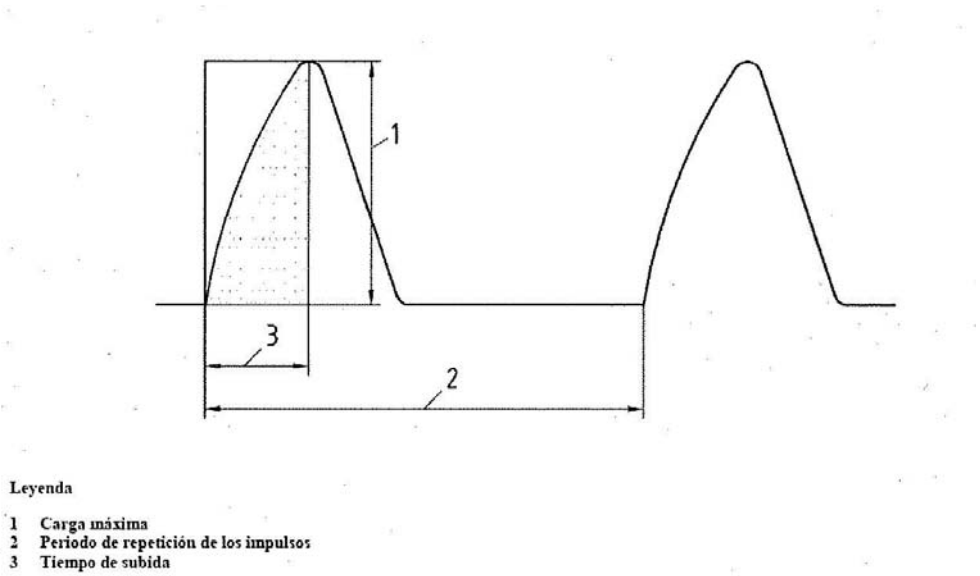


Figura 11. Forma d'impuls de càrrega, mostrant el temps de pujada i càrrega màxima.

Amb els valors registrats i utilitzant la equació 4.8 és possible determinar el mòdul de rigidesa o resilient del material que té la mostra assajada.

$$S_m = \frac{F(v + 0{,}27)}{z \cdot h} \qquad \text{eq: 4.8}$$

On:
Sm= Mòdul de Rigidesa o Resilient.
F = Valor màxim de la càrrega aplicada
v: coeficient de Poisson
h = Espessor de la càrrega
z = Amplitud de la deformació horitzontal

Sobre cada mostra s'apliquen un total de 10 pulsacions de càrrega, 5 al llarg d'un diàmetre i 5 més a l'altre després de fer una rotació a la mostra de 90º. Per tant en total s'obtenen 10 valors per al mòdul de rigidesa i es considera com a resultat final el promig d'aquests valors.

Aquest assaig és tractat informàticament de tal forma que s'obtenen les gràfiques de cada pulsació i els resultats esmentats. A l'**Annex 2 Resultats Mòdul Resilient** es poden observar els resultats finals per a cada una de les mostres assajades.

3.5.5. Tracció indirecta. Descripció i elaboració de l'assaig.

3.5.5.1. Avaluació de les propietats mecàniques

Per conèixer el deteriorament que es produeix en una capa de ferm quan està sotmès al pas de càrregues i als agents climàtics, és necessari conèixer els paràmetres que caracteritzen a la mescla bituminosa i definir els seus límits de fallida, tant per fatiga, com per fissuració tèrmica o deformació plàstica. Per tant, és important saber quin assaig cal utilitzar per caracteritzar a la mescla i quin anàlisi s'ha de realitzar a partir de les dades obtingues.

L'elecció del tipus d'assaig per determinar les característiques d'una mescla resultarà d'un balanç entre la precisió obtinguda amb el mateix i la factibilitat de la seva utilització, amb la finalitat d'obtenir un model tant representatiu com sigui possible, però a la vegada de fàcil aplicació considerant la disponibilitat de temps, de recursos econòmics i d'equipaments.

Seria ideal comptar amb un assaig capaç d'intuir un estat de tensions a les provetes, similar al que es produeix a la capa real. Roque i Buttlar (veure ref.) esquematitzen a la figura 12 l'estat de tensions provocat per una càrrega simple en l'estructura d'un ferm, on es distingeixen quatre casos:

1. Compressió triaxial en superfície i immediatament sota de la roda.
2. Tracció longitudinal i transversal combinat amb compressió vertical a la part inferior de la capa bituminosa sota de la roda.
3. Tracció longitudinal o transversal en la superfície a una certa distància de la càrrega.
4. Compressió longitudinal o transversal en el fons de la capa bituminosa a una certa distància de la càrrega.

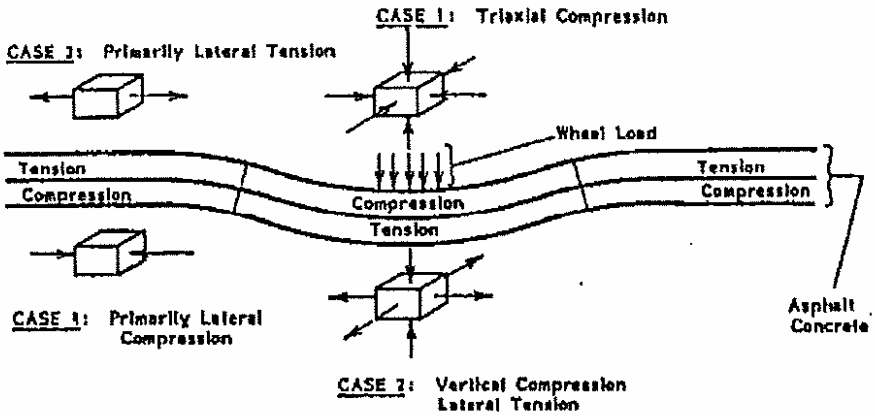


Figura 12: Estat de tensions en un paviment sota càrrega simple.

Existeixen assaigs que representen cada un d'aquests quatre estats, però no hi ha cap que els reuneixi a tots. Tanmateix tampoc és necessari analitzar totes les situacions, doncs l'experiència ja ha determinat que la zona més crítica de tensions es produeix a la fibra inferior de la capa bituminosa sota de la càrrega.

Tal com es descriu en l'apartat següent, l'assaig de tracció indirecta reprodueix l'estat de tensió crítica per una mescla bituminosa i la proposta de la present tesina consisteix en la seva utilització per a determinar les característiques necessàries de resistència a tracció en el cas d'una mescla bituminosa en calent o semicalenta.

A continuació es presenta una descripció de l'assaig de tracció indirecta, l'enumeració de les normes i finalment per el procediment de l'assaig.

3.5.5.2. Descripció de l'assaig

L'assaig de tracció indirecte reprodueix l'estat de tensions en la fibra inferior de la capa asfàltica o zona de tracció. És un mètode senzill i pràctic per caracteritzar les propietats de la mescla bituminosa o avaluar les fallades causades per tensions de tracció.

Aquest assaig consisteix en deformar per compressió diametral a una proveta cilíndrica situada horitzontalment entre els plats d'una premsa de manera que els esforços aplicats a la proveta es troben sobre dos generatrius oposades al llarg del pla diametral vertical figura 13 a. Aquesta configuració de càrrega, que pot ésser senzilla o repetida, desenvolupa una tensió de tracció uniforme perpendicular a la direcció de la càrrega aplicada i al llarg del pla vertical diametral, que finalment provoca la fallida de la mostra per fractura al llarg del diàmetre vertical figura 13 b.

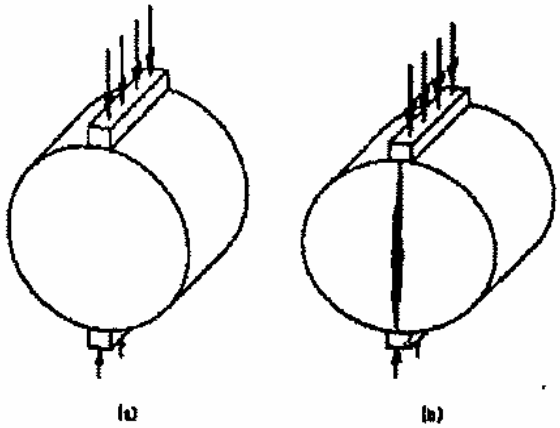


Figura 13: a) configuració de la càrrega i b) trencament de l'assaig de tracció indirecte

El paràmetre a mesurar és la carrega de ruptura de la proveta (figura 14). També opcionalment es pot determinar el desplaçament vertical i la deformació horitzontal del diàmetre de la proveta durant la realització de l'assaig si es disposa dels sistemes necessaris per mesurar-los. El procediment s'utilitza tant per provetes del material fabricades en laboratori com pels testimonis extrets del paviment. Aquest assaig té moltes avantatges, la més obvia és la simplicitat del seu procediment.

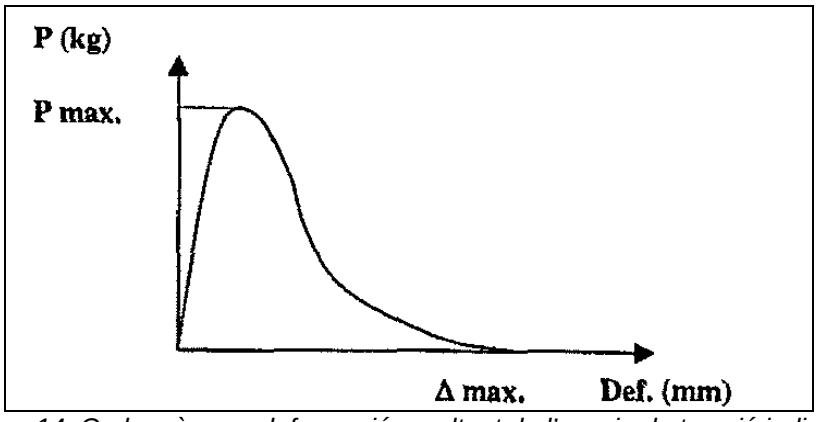


Figura 14: Corba càrrega-deformació resultant de l'assaig de tracció indirecte

Abans de 1965, l'assaig de tracció indirecta s'utilitzava per mesurar la resistència a tracció del formigó. Des de fa anys, també s'utilitza en mescles bituminoses, des dels projectes d'investigació desenvolupats a la Universitat de Texas, Austin, USA, i patrocinats pel Departament de Carreteres i Transport Públic de Texas. Els resultats d'aquests estudis permeteren concloure que aquest assaig era el mètode més pràctic perquè determinats organismes estatals, com el departament de carreteres, l'utilitzessin per la dosificació i la caracterització de mescles en laboratori. Segons Thomas Kennedy (veure ref.), les raons bàsiques són:

- L'assaig és relativament senzill.
- La ruptura no esta sèriament afectada per les condicions de superfície.
- La ruptura s'inicia en una regió relativament uniforme de tensions de tracció.
- El coeficient de variació dels resultats de l'assaig és relativament baix comparat amb altres mètodes.
- L'assaig es pot utilitzar sota càrrega estàtica i càrrega repetida.
- Dóna informació sobre propietats elàstiques resilients, de fissuració tèrmica, de fissuració per fatiga, de deformació permanent i es pot utilitzar per avaluar l'efecte de la humitat en mescles bituminoses.

3.5.5.3. Normes de l'assaig utilitzades

Per realitzar l'assaig a càrrega estàtica, s'ha utilitzat la Norma de assaig NLT-346/90 "Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mescles bituminosas" És important mencionar que la premsa utilitzada per l'assaig Marshall, descrita en la Norma NLT-159/86 és adequada per utilitzar-se en aquest assaig.

3.5.5.4. Procediment de l'assaig

Primer de tot, el que fem es mantenir les provetes per assajar-les en un recinte termostàtic durant un mínim de 6 hores. Aquest, ha de ser capaç de mantenir les provetes durant l'assaig a una temperatura de 15 ± 1ºC, que serà la nostra temperatura d'assaig.

Foto 12: Recinte termostàtic on es disposen les provetes a una temperatura de 5ºC.

Un cop ja han agafat la temperatura de 15ºC, s'agafen les provetes una per una, es posen a la premsa a una temperatura de 15ºC, amb dues generatrius oposades en contacte amb els plats (tal i com es pot veure a la fotografia 13), apliquem tensió i anem trencant les provetes.

Per trencar les provetes, utilitzem una premsa de compressió mecànica o hidràulica, que per complir la normativa espanyola NLT-346/90 ha de proporcionar durant l'aplicació de la càrrega, una velocitat uniforme de desplaçament del sistema de càrrega de 0.85 ± 0.02 mm/s i una càrrega mínima de 100 kN.

En el Laboratori de Camins hem utilitzat la mateixa premsa que per l'assaig Marshall, una premsa MTS accionada hidràulicament per un motor d'injecció d'oli. La premsa que s'utilitza està controlada electrònicament; el Testar és l'aparell electrònic que permet controlar i mesurar les tensions i deformacions que s'apliquen a les provetes. La premsa està complementada amb suport informàtic que permet tractar les dades a temps real, doncs les dades tensió i deformació són emmagatzemades i s'incorporen a un full de càlcul, això ens permet dibuixar les gràfiques tensió-deformació.

Foto 13: Premsa on es trenca la proveta a tracció indirecta

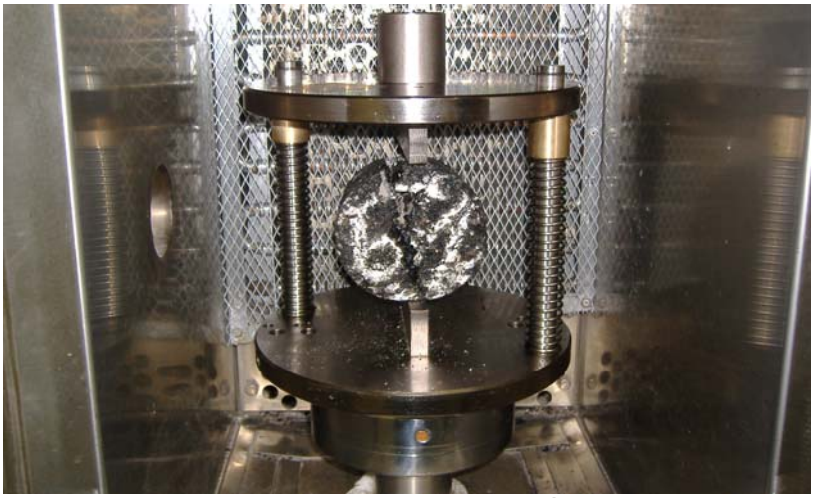


Foto 14: Proveta trencada a tracció indirecta.

Els resultats referents a aquest assaig és poden observar a l'**Annex 3 Resultats Tracció Indirecte**, on també es poden observar les gràfiques Tensió - deformació de cada una de les mostres assajades.

3.5.6. Fènix. Descripció i elaboració de l'assaig.

3.5.6.1. Introducció i origen de l'assaig Fènix

El laboratori de la Universitat de Camins, Canals i Ports de la UPC (Universitat Politècnica de Catalunya), va desenvolupar l'assaig Fènix, amb l'objectiu d'obtenir més informació sobre la tenacitat dels materials bituminosos, i dins del marc del Projecte Fènix (d'aquí en prové el nom).

Donat que es preveu que la xarxa de carreteres actual s'incrementi de forma substancial i davant d'una situació social que reclama una major seguretat en el transport i un desenvolupament de l'activitat productiva amb unes pràctiques més amigables amb el medi ambient es va concebre el Projecte Fènix, "Investigación estratégica en carreteras más seguras y sostenibles", el qual representa el major esforç en I+D realitzat a Europa en l'àrea de la pavimentació de carreteres.

El líder del projecte es la "Agrupación de Investigación Estratégica Proyecto Fénix A.I.E." composta per sis socis industrials procedents del sector de la construcció i de la pavimentació (Sacyr, Elsan Pacsa, Pavasal, Sorigué, Collosa y Serviá Cantó), un soci industrial fabricant de maquinària de producció de mescla bituminosa (Intrame) i un laboratori privat altament especialitzat (CIESM). Hi ha tres socis més: un fabricant de betum (Repsol YPF), un distribuïdor de betum (Ditecpesa) i l'institut d'investigació del sector assegurador espanyol per la millora de la Seguritat Vial (Centro Zaragoza).

En el projecte participen quinze organismes públics d'investigació (OPI's) procedents de vuit universitats (Huelva, Catalunya, Madrid, Castilla la Mancha, València i Cantabria), cinc centres tecnològics procedents de Andalusia, Extremadura, Castilla-León i el País Basc, un institut d'investigació del CSIC de Catalunya i el laboratori del transport del CEDEX.

Per tant aquest assaig, es a dir el seu desenvolupament, s'engloba dins del projecte Fènix.(veure altres ref.), i s'ha elaborat i concebut en el departament d'Infrastructura del Transport i del Territori (ITT) de la UPC.

3.5.6.2. Metodologia de l'assaig Fènix

La metodologia de l'assaig Fènix consisteix en sotmetre una proveta Marshall (o un testimoni) partida pel mig a un esforç de tracció directe.

Per a realitzar l'assaig es poden utilitzar tant en provetes fabricades a laboratori tipus Marshall com testimonis. En aquest cas s'han fet servir provetes Marshall, que segueixen el procediment de fabricació i compactació del mateix mètode Marshall que s'ha explicat en apartats anteriors.

Llavors la proveta o testimoni es secciona pel mig i se li fa una petit tall a la part central i posteriorment mitjançant l'ús d'una resina Epoxi es fixa a les dues seccions (plaques d'acer) de cara plana separades per el petit tall, tal i com es pot veure a la fotografia 15.

Foto 15: Mostra preparada per assaig Fènix.

Aquestes a la vegada són fixades a dos perns, un cop s'asseca la resina, es a dir als suports de la premsa hidràulica del laboratori que permet la rotació respecte ells mateixos (Veure fotografia 16).

L'assaig consisteix en sotmetre les provetes semicirculars a un assaig simple de tracció directe a una temperatura de 20ºC. Per a la realització de l'assaig s'utilitza un premsa MTS que disposa de càmera capaç d'assolir i controlar dita temperatura amb una precisió de +-1ºC.

Foto 16. Premsa amb la proveta, dins de càmera que controla la temperatura.

L'assaig es realitza mitjançant el control de desplaçament del pistó, aplicant un desplaçament a una velocitat constant de 1mm/min fins a arribar al trencament total de la proveta.

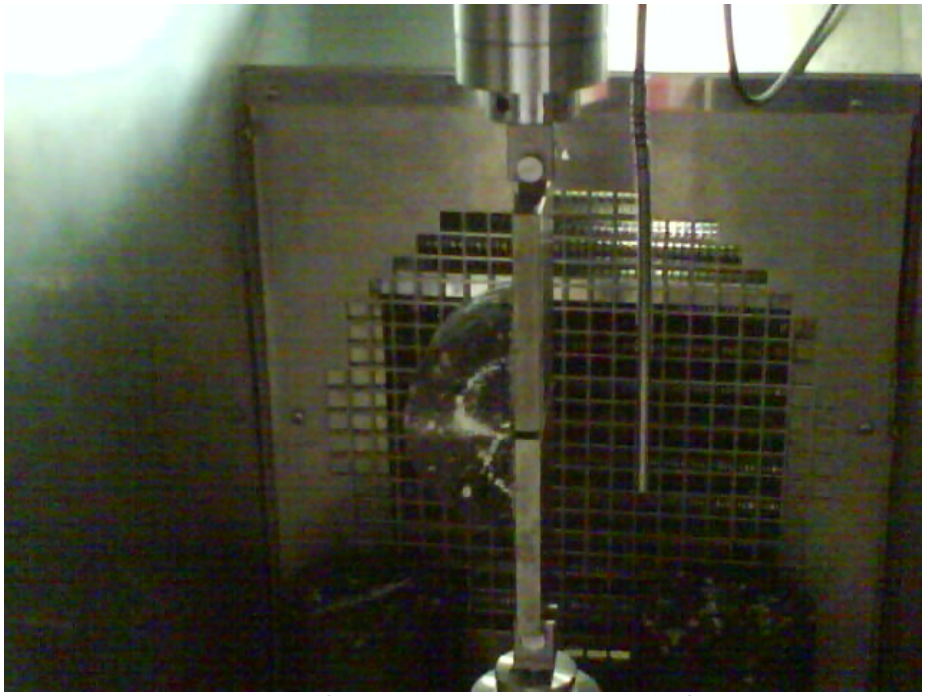


Foto 17: Detall Pistó i proveta. Durant la realització de l'assaig.

Una vegada registrades les dades per l'equip informàtic que controla la premsa es procedeix a representar les càrregues que s'han registrat en funció del seu desplaçament per a poder calcular el valor de l'energia de fractura (Gf), mitjançant el càlcul del treball total de fractura (Wt) dividit per l'àrea de fractura teòrica (Alig) (que és l'altura promig multiplicat per l'amplada, en la ranura de la proveta)

3.5.6.3. Aplicacions i Avantatges de l'assaig Fènix

La seva aplicació és en l'assaig de mescles bituminoses, ja sigui de testimonis o de provetes de laboratori, per a poder estudiar-ne les seves propietats mecàniques, en concret aprofundir sobre la tenacitat, i poder comparar-les amb altres mostres d'igual o diferents característiques.

Un dels principals avantatges d'aquest assaig és que simula el mecanisme de fissuració de les mescles bituminoses, mitjançant el seu principal mode de propagació de la fissura quan són sol·licitades mitjançant esforços tèrmics i sol·licitacions de trànsit, tal i com els passa durant la seva vida en servei. Una altre gran avantatge és la facilitat per realitzar l'assaig, tant en provetes Marshall com per a testimonis que s'hagin extret.

3.6. RESULTATS I ANALISIS

En aquest apartat, disposarem tots els resultats que s'han obtingut per a cada assaig i també els disposarem en forma de gràfic per a una millor comprensió de les dades.

Però abans d'entrar en els assaigs, s'estudiarà primer la densitat obtinguda per a cada proveta. Tenint en compte el tipus de Betum i Temperatura a la qual s'ha fabricat, els quals formaran series de 9 provetes, tal i com s'ha exposat al pla de treballs.

3.6.1. Densitats

Les densitats obtingudes tenint en compte que totes les provetes s'han fabricat amb la mateixa granulometria i seguint el mateix procediment, però a temperatures diferents i amb betums diferents, varia en funció d'aquests.

A les següents taules es poden observar els resultats obtinguts: densitats, mides i pesos per a cada una de les provetes:

CERA 110º

Nº proveta	H1	H2	H3	HM	P sec	P Submergit	P sss	Densitat
1	65,7	66	65,9	65,9	1247,2	733,6	1250	2,415
2	65,1	65,2	65,6	65,3	1248,4	734,6	1251,2	2,417
3	65,3	65,4	65,3	65,3	1246,4	733,3	1248,8	2,418
4	64,6	64,2	65	64,6	1246,3	734,9	1248,1	2,428
5	64,3	65,2	65,1	64,9	1249,9	736,7	1251,5	2,428
6	65,5	65	65,2	65,2	1249,8	735,8	1251,4	2,424
7	66,2	65,8	66	66,0	1249,4	736,6	1251,8	2,425
8	64,6	65,1	65,3	65,0	1244,5	732,9	1248,1	2,416
9	65,2	65,6	66	65,6	1256,1	738,5	1259,1	2,413
				65,3			Mitja	**2,420**
							Desviació	0,006

CERA 120º

Nº proveta	H1	H2	H3	HM	P sec	P Submergit	P sss	Densitat
19	63,9	64,1	65	64,3	1244,8	735,4	1246,8	2,434
20	63,7	64,2	64,4	64,1	1243,6	736,4	1245,3	2,444
21	64,2	64,7	63,9	64,3	1242,8	737,8	1245,2	2,449
22	63,5	63,6	63,7	63,6	1239,6	736,3	1241	2,456
23	64,3	64,6	63,9	64,3	1255,6	744,8	1256,9	2,452
24	63,5	63,6	63,8	63,6	1245,6	739,2	1247	2,453
25	64,3	64,8	64,5	64,5	1249,1	741,2	1251,3	2,449
26	64,3	64,7	64,8	64,6	1248	739,2	1249,9	2,444
27	64,5	64,9	64,9	64,8	1243,2	736,5	1246	2,440
				64,2			Mitja	**2,447**
							Desviació	0,007

CERA 130º

Nº probeta	H1	H2	H3	HM	P sec	P Submergit	P sss	Densitat
1	64,4	64,1	65	64,5	1242,4	735	1244,2	2,440
2	64,5	63,7	63,5	63,9	1244,3	737,3	1245,3	2,449
3	64,2	64,2	63,9	64,1	1243,2	735,7	1245,4	2,439
4	66	66	65,7	65,9	1247,2	740,3	1250,6	2,444
5	64	64,5	63,9	64,1	1243,8	738	1245,2	2,452
6	67,3	67,4	67,1	67,3	1257,4	734,7	1260,8	2,390
7	64,1	64,4	64,6	64,4	1248,5	738,6	1250,2	2,440
8	64	64	63,5	63,8	1242,8	737,1	1244,9	2,447
9	64,7	64,7	65	64,8	1251,7	740,6	1253,5	2,440
				64,8			Mitja	**2,438**
							Desviació	0,019

CERA 140º

Nº probeta	H1	H2	H3	HM	P sec	P Submergit	P sss	Densitat
10	64	64,4	64,3	64,2	1241,5	734,4	1242,7	2,442
11	64	64,1	64,2	64,1	1249,5	740,3	1250,4	2,450
12	63,9	64,6	64,1	64,2	1244,8	737,5	1246,2	2,447
13	64,7	65	64,6	64,8	1243,7	736,5	1245,4	2,444
14	64,6	64,7	64,6	64,6	1251,5	742,7	1252,7	2,454
15	64	64,2	64,3	64,2	1245,8	739,2	1247,1	2,453
16	63,9	64,2	64,7	64,3	1250,5	742,4	1251,9	2,454
17	65	64,8	64,5	64,8	1242,8	736,9	1245,1	2,445
18	64,6	64,6	64,1	64,4	1241,5	736,1	1243,1	2,449
				64,4			Mitja	**2,449**
							Desviació	0,004

TERM 110º

Nº probeta	H1	H2	H3	HM	P sec	P Submergit	P sss	Densitat
1	64,8	65,2	65,4	65,1	1240	731,6	1242,4	2,428
2	64,5	64,3	64,6	64,5	1246,1	736	1249,1	2,429
3	64,8	65,7	65,1	65,2	1247,1	736,3	1250,2	2,427
4	65	65	65,3	65,1	1245,4	732,9	1248,9	2,414
5	65,5	65	65,5	65,3	1244,4	730,6	1247,3	2,408
6	65,3	65,4	65,1	65,3	1254,7	738,8	1257,3	2,420
7	65,6	65,4	65,9	65,6	1249,3	735,3	1253,7	2,410
8	65,9	65,9	66	65,9	1248,3	731,7	1252,5	2,397
9	66,4	66,4	66,2	66,3	1248,6	732,8	1254,5	2,393
				65,4			Mitja	**2,414**
							Desviació	0,013

TERM 120º

Nº probeta	H1	H2	H3	HM	P sec	P Submergit	P sss	Densitat
10	64,35	64,1	64,9	64,5	1248,5	739,3	1250,1	2,444
11	64,58	65,1	65,4	65,0	1259,5	745,2	1262	2,437
12	64,8	64,35	64,2	64,5	1241,2	733,7	1242,8	2,438
13	64,9	64,8	64,6	64,8	1248	736,6	1249,7	2,432
14	64,4	64,5	64,8	64,6	1248,1	738	1249,7	2,439
15	64,55	64,5	64,2	64,4	1242,4	734,7	1244,2	2,438
16	64,1	64	64,3	64,1	1240,6	732,9	1242,2	2,436
17	65,3	65,8	65,1	65,4	1261	745,8	1262,5	2,440
18	64,5	64,6	64,1	64,4	1246,7	736,9	1248,3	2,438
				64,6			Mitja	**2,438**
							Desviació	0,003

TERM 130º

Nº probeta	H1	H2	H3	HM	P sec	P Submergit	P sss	Densitat
1	63,8	63,6	63,3	63,6	1239,1	735,3	1241	2,450
2	63,1	63,3	63,3	63,2	1244	737,3	1245,1	2,450
3	64,4	64	64,6	64,3	1240,9	735	1242,6	2,445
4	63,8	63,5	63,7	63,7	1240,2	735	1241,4	2,449
5	64,5	64,6	64,6	64,6	1256	745,1	1257,5	2,451
6	64,5	65	65,1	64,9	1251,7	740,1	1253,5	2,438
7	65,8	66,1	65,7	65,9	1245,1	728,8	1247,6	2,400
8	64,35	64,15	63,55	64,0	1243,8	736,8	1245,4	2,446
9	67	66,35	66,3	66,6	1244,6	726	1247,2	2,388
				64,5			Mitja	**2,441**
							Desviació	0,017

TERM 140º

Nº probeta	H1	H2	H3	HM	P sec	P Submergit	P sss	Densitat
19	64,1	64,3	64,5	64,3	1241,4	734,8	1242,7	2,444
20	63,8	64,3	63,5	63,9	1239,5	734,5	1241,1	2,447
21	63,7	63,8	63,9	63,8	1240,7	735,8	1241,9	2,451
22	67	67,2	67,6	67,3	1245,6	733,6	1248,6	2,419
23	64,1	64,2	64,4	64,2	1255,8	746,2	1256,7	2,460
24	64,2	64,3	64,6	64,4	1247,9	740,4	1249,3	2,452
25	64,1	64,2	63,7	64,0	1238,9	733,5	1240,6	2,443
26	64,8	64,4	64,6	64,6	1250,4	742	1251,8	2,453
27	63,1	63,3	63,7	63,4	1245	739,2	1246,2	2,456
				64,4			Mitja	**2,451**
							Desviació	0,006

B-60/70 120º

Nº probeta	H1	H2	H3	HM	P sec	P Submergit	P sss	Densitat
1	64,6	64,1	64,2	64,3	1241,6	733,6	1247,9	2,414
2	65	64,8	65	64,9	1248,1	737,2	1251,7	2,426
3	65	64,4	64,9	64,8	1251,5	740,8	1253,7	2,440
4	65,3	65,3	65,1	65,2	1247,5	737,5	1252	2,425
5	64,7	64,9	65,2	64,9	1251,4	737,4	1253,3	2,426
6	64,8	64,5	65,1	64,8	1249	739,9	1251,2	2,443
7	64,4	64,2	64,4	64,3	1245,3	736,6	1247,4	2,438
8	64,9	65,3	65	65,1	1250	740,3	1251,8	2,444
9	63,6	63,3	64,2	63,7	1244,6	737,4	1245,8	2,448
				64,7			Mitja	**2,434**
							Desviació	0,011

B-60/70 130º

Nº probeta	H1	H2	H3	HM	P sec	P Submergit	P sss	Densitat
1	64,3	64,4	64,6	64,4	1251,8	740,7	1253,5	2,441
2	63,8	63,5	64	63,8	1244,4	736,3	1245,9	2,442
3	64,3	64,2	64	64,2	1247,2	739,1	1249,2	2,445
4	64,7	64,2	64,1	64,3	1244,8	738,6	1247,4	2,447
5	63,6	63,1	63,3	63,3	1241,7	735,7	1243,1	2,447
6	65	65	64,7	64,9	1258,7	745,3	1260,8	2,442
7	64,3	64,7	64,4	64,5	1250,1	740,2	1251,7	2,444
8	65,1	64,6	65,3	65,0	1246,3	734,7	1248,6	2,425
9	64,1	64,2	64,3	64,2	1245,4	738,9	1247,6	2,448
				64,3			Mitja	**2,442**
							Desviació	0,007

B-60/70 140º

Nº probeta	H1	H2	H3	HM	P sec	P Submergit	P sss	Densitat
10	63,9	64,1	64,1	64,0	1248,3	739,8	1249,7	2,448
11	63,9	63,9	64,5	64,1	1248,1	741,8	1249,8	2,457
12	64,2	64,1	63,8	64,0	1244,6	738,7	1246,3	2,452
13	64,2	63,9	64,6	64,2	1247,4	739,9	1248,6	2,452
14	63,6	63,5	63,8	63,6	1243,7	739,3	1245,1	2,459
15	64,5	64,6	64,2	64,4	1242,9	738,7	1244,8	2,456
16	64	64,1	64,1	64,1	1243,3	738,9	1244,8	2,458
17	64,8	64,6	63,6	64,3	1251,1	742,4	1252,6	2,452
18	64,3	64,5	63,9	64,2	1249,5	742,4	1251,6	2,454
				64,1			Mitja	**2,454**
							Desviació	0,003

B-60/70 155º

Nº probeta	H1	H2	H3	HM	P sec	P Submergit	P sss	Densitat
1	63,6	63,7	63	63,4	1240,6	736,5	1241,7	2,456
2	63,25	62,9	63,5	63,2	1243	738,3	1243,9	2,458
3	64,4	63,9	63,8	64,0	1251,7	744,2	1252,9	2,461
4	63,8	63,6	63,5	63,6	1241,6	737,3	1243,3	2,454
5	63,9	63,4	63,4	63,6	1245	738,5	1246,2	2,452
6	63,7	63,7	64	63,8	1241,5	736,7	1242,6	2,454
7	63,7	63,8	64	63,8	1242,8	738,2	1244,3	2,456
8	63,8	63,2	63,9	63,6	1243,5	737,3	1244,5	2,452
9	63,3	63,1	63,5	63,3	1231,7	731,2	1233,1	2,454
				63,6			Mitja	**2,455**
							Desviació	0,003

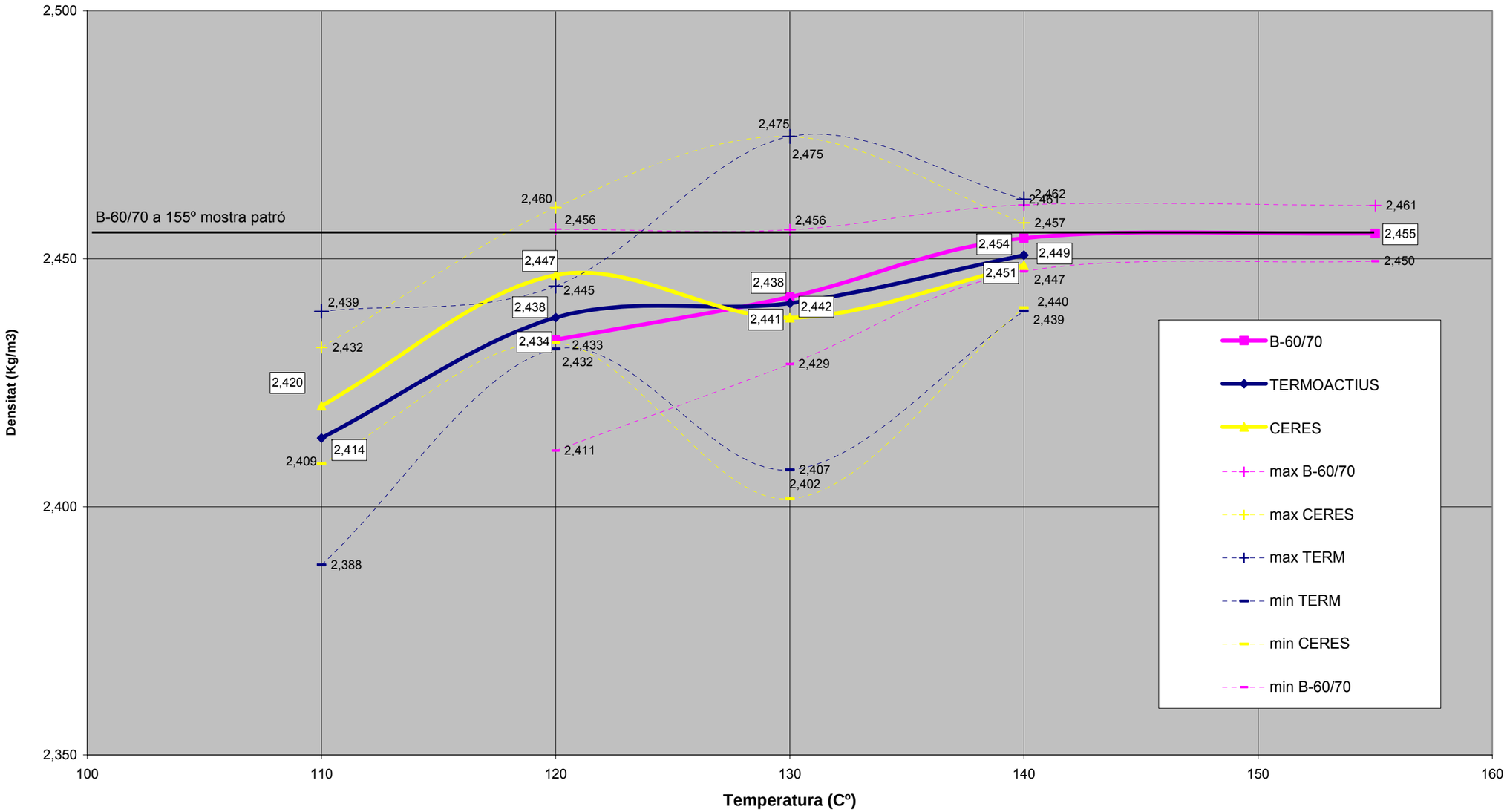
On:
H1: Alçada en vertical mm.
H1: Alçada en vertical mm.
H1: Alçada en vertical mm.
HM: Alçada promig de les alçades en vertical H1 H2 i H3 en mm.
Psec: Pes en sec de la mostra. En g.
P Submergit: Pes submergit en g.
P sss: Pes submergit i assecat, en g.
Densitat: Extreta de dividir el P sec entre la diferencia del Psss i el P Submergit.

Per a cada sèrie s'ha calculat la Mitja i la Desviació estàndard per a poder comparar-les.

Cal indicar que els valors que estan marcats en vermell no s'ha tingut en compte alhora de fer la mitja i la desviació de cada una de les sèries ja que es consideren erronis, i desvirtuarien els càlculs.

En cas de que disposem tots aquests valors en una gràfica en funció de la temperatura i tipus de Betum, quedaria de la següent forma:

PROVETES MARSHALL A COMPACTACIÓ PER GOLPEIG (50cops)



La mescla patró B-60/70 a 155º dóna una major densitat comparada amb les obtingudes per les mescles amb additius en tot el camp de temperatures estudiat.
La mescla amb additiu de CERA es comporta similar que el TERMOACTIU, (dintre del mateix interval de confiança).
Les mescles amb additius tenen un comportament similar que la mescla patró, és a dir segueixen la mateixa corba Temperatura – Densitat.

3.6.2. Assaig Mòdul Resilient

A continuació s'exposa una taula resum dels resultats obtinguts de les diferents probetes assajades a mòdul Resilent, per el qual s'ha realitzat tal i com s'exposa en apartats anteriors a una temperatura de 20ºC.

S'han realitzat tres assaig per cada betum i temperatura. Es a dir s'ha assajat tres provetes de cada sèrie.

Els resultats obtinguts en cada una de les mescles és el següent:

CERA 110º

Nº proveta	Mòdul Resilient (Mpa)
1	4102
4	4614
7	4025
Mitja	**4247**
Desviació	320,15

TERM 110º

Nº proveta	Mòdul Resilient (Mpa)
1	3581
4	3539
7	3628
Mitja	**3583**
Desviació	44,52

CERA 120º

Nº proveta	Mòdul Resilient (Mpa)
19	4874
22	5183
25	4957
Mitja	**5005**
Desviació	159,92

TERM 120º

Nº proveta	Mòdul Resilient (Mpa)
10	3820
13	3945
16	3346
Mitja	**3583**
Desviació	88,39

CERA 130º

Nº proveta	Mòdul Resilient (Mpa)
1	5452
4	5443
7	6419
Mitja	**5448**
Desviació	6,36

TERM 130º

Nº proveta	Mòdul Resilient (Mpa)
1	4118
4	3647
7	4148
Mitja	**4133**
Desviació	21,21

CERA 140º

Nº proveta	Mòdul Resilient (Mpa)
10	5661
13	5674
16	5512
Mitja	**5616**
Desviació	90,01

TERM 140º

Nº proveta	Mòdul Resilient (Mpa)
19	4778
22	3781
25	4517
Mitja	**4648**
Desviació	184,55

B-60/70 120º

Nº proveta	Mòdul Resilient (Mpa)
1	4053
4	3423
7	3602
Mitja	**3513**
Desviació	126,57

B-60/70 130º

Nº proveta	Mòdul Resilient (Mpa)
1	3663
4	3782
7	3550
Mitja	**3665**
Desviació	116,01

B-60/70 140º

Nº proveta	Mòdul Resilient (Mpa)
10	4360
13	4280
16	3911
Mitja	**4184**
Desviació	239,50

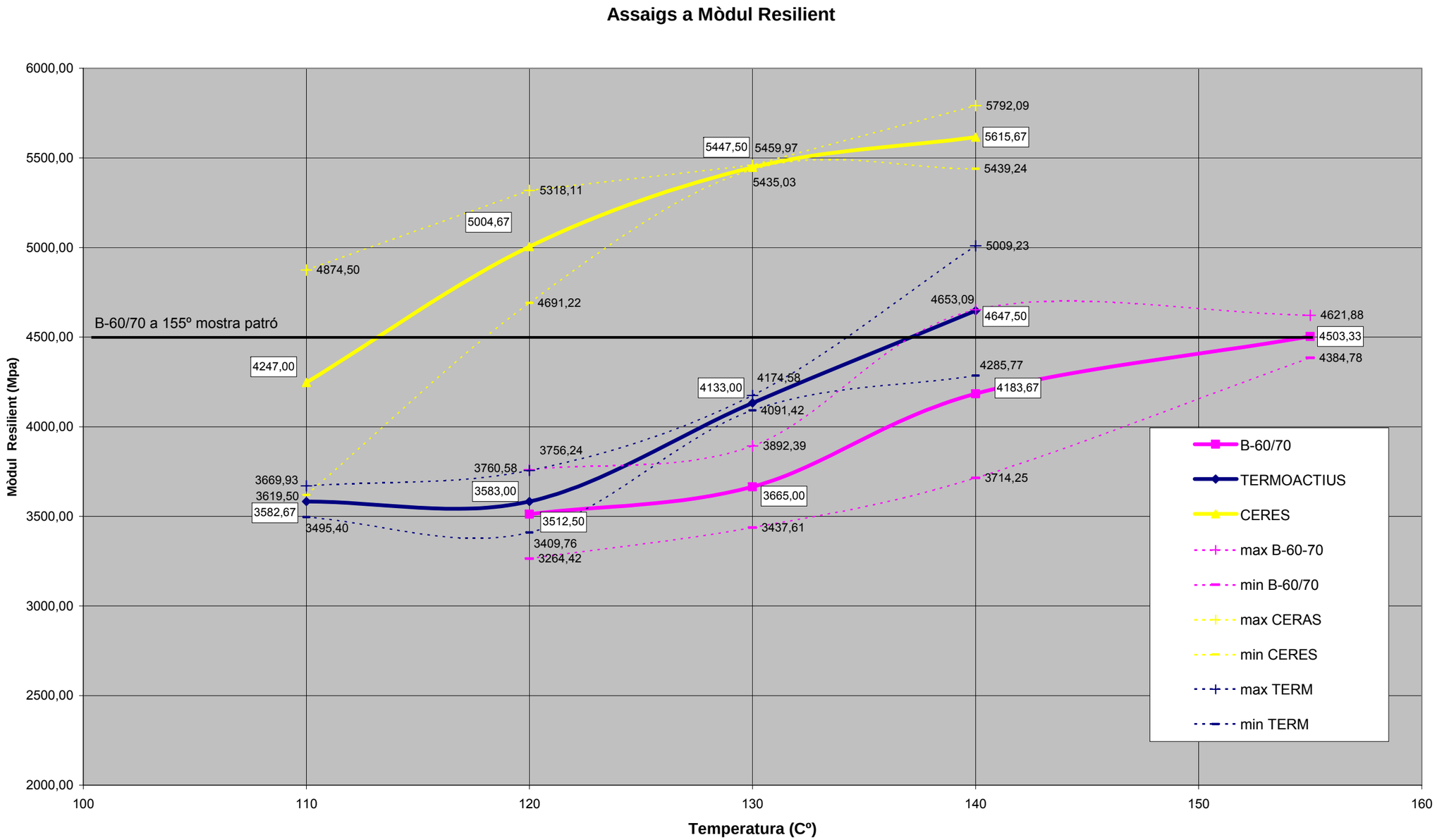
B-60/70 155º

Nº proveta	Mòdul Resilient (Mpa)
1	4550
4	4525
7	4435
Mitja	**4503**
Desviació	60,48

Les dades que apareixen en vermell són resultats fora de l'usual segons el tractament estadístic de les mateixes, i per tant no s'han inclòs en tractament de les dades (mitja i desviació estàndard).

Cal indicar que els assaigs complets es poden observar a l'Annex 2 Assaig Modul Resilient.

Si disposem les dades en forma de gràfic:



Si comparem el mòdul obtingut en la mescla patró (B-60/70 a 155º) amb els mòduls obtinguts per a les CERES es pot observar que aquests resultats són superiors a partir de 120ºC.
I també succeeix el mateix en el cas del TERMOACTIU, però sols per a la temperatura de 140ºC en que s'obté un valor superior a la de mescla patró(B-60/70 a 155ºC).
Si comparem els resultats de la CERES i el TERMOACTIU es pot observar que a igual temperatura sempre per a les CERES s'obté un resultat molt superior.

3.6.3. Assaig Tracció Indirecta

L'assaig de tracció indirecte és va realitzar a 6 provetes de cada una de les sèries segons temperatura i betum utilitzats en la fabricació de les mateixes. Cal dir que d'aquestes provetes 3 de cada sèrie varen ser assajades abans per l'assaig de Mòdul Resilient o de Rigidesa, donat que aquest assaig no es destructiu, i tampoc minva les propietats de les provetes tal i com es va poder comprovar posteriorment amb el present assaig.

A continuació es poden observar els resultats obtinguts, agrupats per cada sèrie:

CERA 110º

Nº probeta	Trac. Indirecte(kp)
1	2064
2	2193
4	2279
5	2284
7	2240
8	2385
Mitja	**2241**
Desviació	107,20

CERA 130º

Nº probeta	Trac. Indirecte(kp)
1	2645
2	2569
4	2430
5	2790
7	2573
8	2544
Mitja	**2592**
Desviació	119,57

CERA 120º

Nº probeta	Trac. Indirecte(kp)
19	2734
20	2401
22	2602
23	2628
25	2627
26	2559
Mitja	**2592**
Desviació	109,93

CERA 140º

Nº probeta	Trac. Indirecte(kp)
10	2652
11	2918
13	2645
14	2733
16	2824
17	2584
Mitja	**2726**
Desviació	125,62

TERM 110º

Nº probeta	Trac. Indirecte(kp)
1	2402
2	2309
4	2115
5	2047
7	2226
8	2071
Mitja	**2195**
Desviació	141,84

TERM 130º

Nº probeta	Trac. Indirecte(kp)
1	2621
2	2653
4	2516
5	2600
7	2375
8	2596
Mitja	**2560**
Desviació	101,41

TERM 120º

Nº probeta	Trac. Indirecte(kp)
10	2340
11	2523
13	2418
14	2485
16	2481
17	2489
Mitja	**2456**
Desviació	66,31

TERM 140º

Nº probeta	Trac. Indirecte(kp)
19	2440
20	2566
22	2276
23	2609
25	2545
26	2489
Mitja	**2530**
Desviació	66,15

B-60/70 120º

Nº probeta	Trac. Indirecte (kp)
1	2662
2	2283
4	2264
5	2272
7	2312
8	0
Mitja	**2283**
Desviació	21,31

B-60/70 140º

Nº probeta	Trac. Indirecte (kp)
10	2573
11	2541
13	2636
14	2489
16	2490
17	2541
Mitja	**2545**
Desviació	55,16

B-60/70 130º

Nº probeta	Trac. Indirecte (kp)
1	2668
2	2605
4	2469
5	2370
7	2571
8	2380
Mitja	**2479**
Desviació	107,29

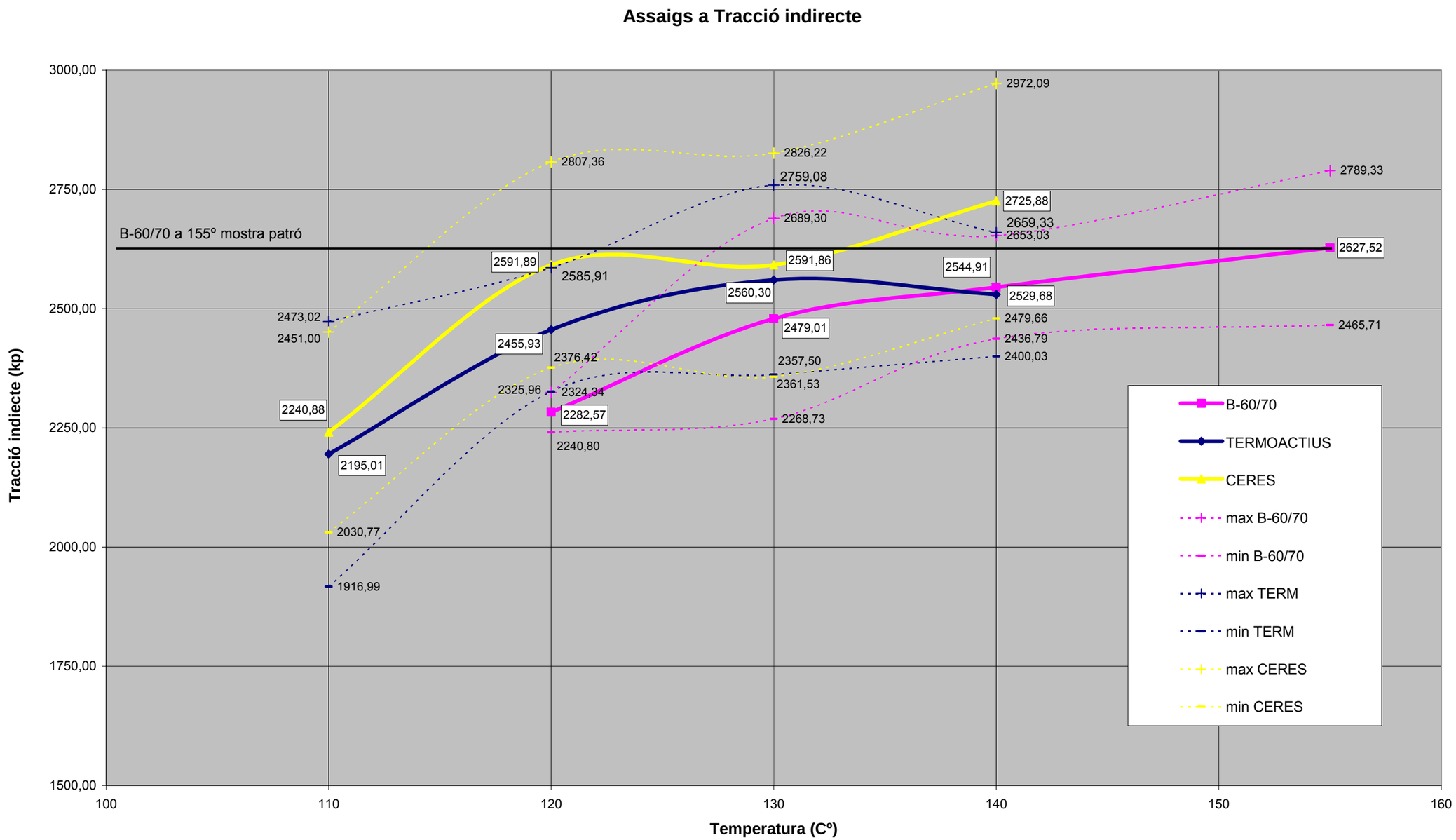
B-60/70 155º

Nº probeta	Trac. Indirecte (kp)
1	2663
2	2715
4	2477
5	2642
7	2669
8	2600
Mitja	**2628**
Desviació	82,55

Cal esmentar que els resultats en color vermell han estat descartats, ja que es consideren fora dels intervals raonables respecte als altres valors.

Cal indicar que els resultats complets es poden observar a l'Annex 3 Assaig Tracció Indirecte.

Si disposem les dades en forma de gràfic:



Si comparem el resultat de la mescla patró (B-60/70 a 155º) amb els resultats per a la CERES, aquests són similars o superiors en l'interval de 120 a 140ºC.
De la mateixa forma succeeix en el cas de TERMOACTIU si les comparem amb la mescla patró, l'únic que aquest interval òptim és de 130 a 140ºC.
Per a les mescles de CERES s'obtenen uns millors resultats respecte als dels TEROMACTIUS per a qualsevol temperatura donada.

3.6.4. Assaig Fènix

L'assaig Fènix s'ha realitzat a tres probetes de cada una de les sèries de temperatura i tipus de betum.

Cal dir que únicament s'ha efectuat l'assaig a una de les dues parts de cada proveta i l'altre meitat s'ha reservat per si els resultats eren erronis, cosa que no ha succeït.

Per tant a la següent taula es poden observar els resultats obtinguts per aquestes provetes:

CERA 110º

Nº probeta	Fènix Tensió max(Mpa)
3	0,1564
6	0,2041
9	0,2021
Mitja	**0,1875**
Desviació	0,027

CERA 130º

Nº probeta	Fenix Tensió max(Mpa)
3	0,2122
6	0,1627
9	0,1890
Mitja	**0,2006**
Desviació	0,016

CERA 120º

Nº probeta	Fènix Tensió max(Mpa)
21	0,1957
24	0,2187
27	0,2103
Mitja	**0,2082**
Desviació	0,012

CERA 140º

Nº probeta	Fènix Tensió max(Mpa)
12	0,2198
15	0,1988
18	0,1994
Mitja	**0,2060**
Desviació	0,012

TERM 110º

Nº probeta	Fènix Tensió max(Mpa)
3	0,1360
6	0,1368
9	0,1252
Mitja	**0,1327**
Desviació	0,006

TERM 130º

Nº probeta	Fènix Tensió max(Mpa)
3	0,1875
6	0,1782
9	0,1416
Mitja	**0,1828**
Desviació	0,007

TERM 120º

Nº probeta	Fènix Tensió max(Mpa)
12	0,1596
15	0,1591
18	0,1674
Mitja	**0,1621**
Desviació	0,005

TERM 140º

Nº probeta	Fènix Tensió max(Mpa)
21	0,1641
24	0,1814
27	0,1663
Mitja	**0,1706**
Desviació	0,009

B-60/70 120º

Nº probeta	Fènix Tensió max(Mpa)
3	0,1555
6	0,1322
9	0,1563
Mitja	**0,1480**
Desviació	0,014

B-60/70 140º

Nº probeta	Fènix Tensió max(Mpa)
12	0,1689
15	0,1754
18	0,1671
Mitja	**0,1705**
Desviació	0,004

B-60/70 130º

Nº probeta	Fènix Tensió max(Mpa)
3	0,1606
6	0,1497
9	0,1700
Mitja	**0,1601**
Desviació	0,010

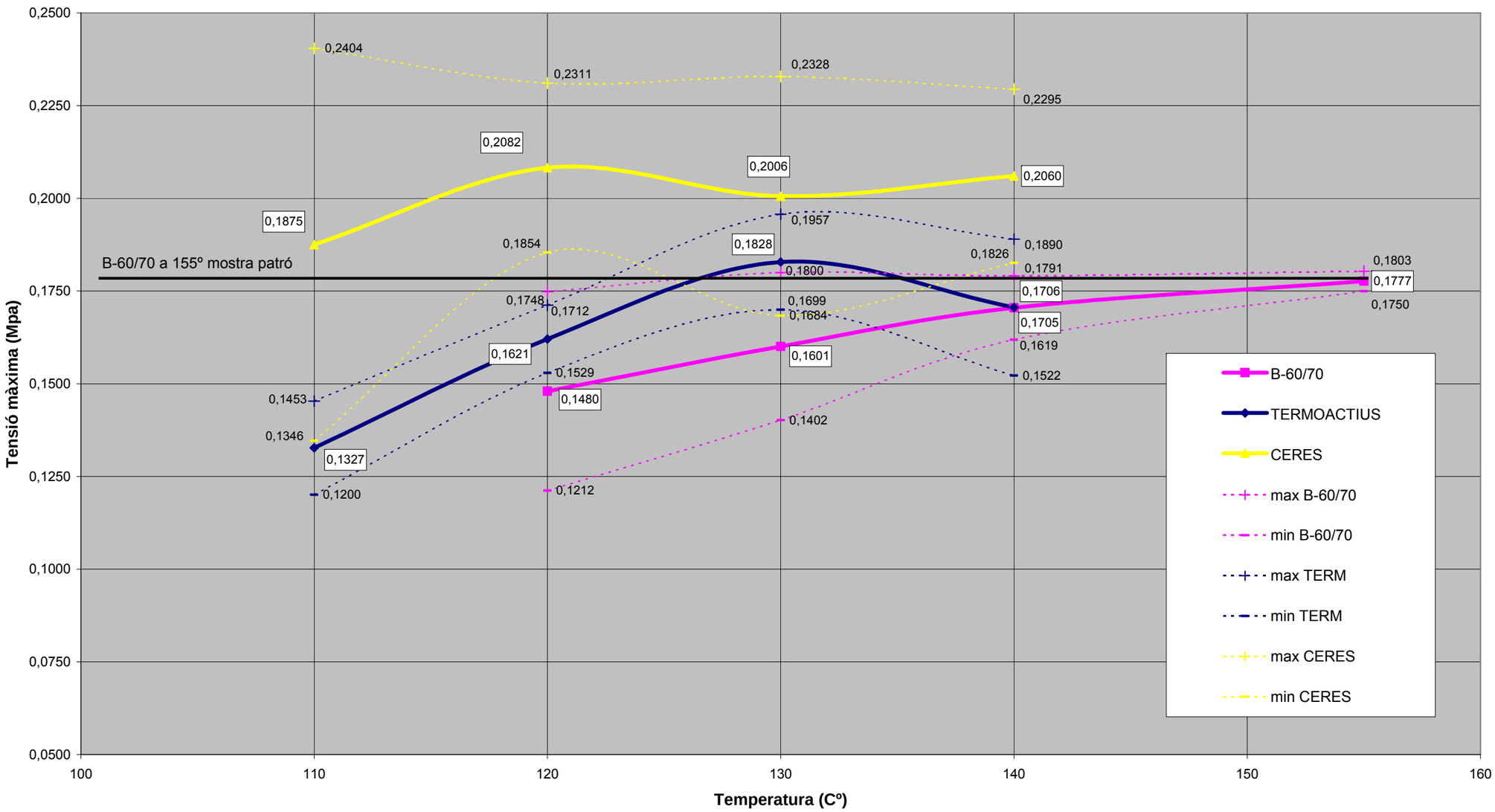
B-60/70 155º

Nº probeta	Fènix Tensió max(Mpa)
3	0,1567
6	0,1786
9	0,1767
Mitja	**0,1777**
Desviació	0,001

Cal dir també en aquests resultats, que alhora de fer les mitjanes i les desviacions s'han descartat els valors que apareixen en vermell donat que no es consideren correctes.

Cal indicar que els resultats complets de cada una de les probetes i les seves mesures es poden observar a l'Annex 4 Assaig Fènix.

Si en fem una gràfica dels resultats a mode resum, s'obté:



Com es pot observar els resultats per la mescla de CERA en qualsevol temperatura són major que el resultat obtingut per a la mescla patró B-60/70 a 155ºC.
Pel que fa a al tipus TERMOACTIU és pot observar que hi ha un interval òptim de 130 a 140ºC comparat amb la mescla patró (considerant el mateix interval de confiança).
Els resultats obtinguts per a les CERES són sempre molt superiors als dels TERMOACTIUS per a una temperatura donada.

4. CONCLUSIONS

L'objectiu de la tesina és demostrar que és possible i factible d'utilitzar mescles bituminoses semicalentes (WMA) en lloc de les tradicionals o mescles bituminoses en calent (HMA).

Per aquest motiu primer s'ha fet una dissertació de tot l'estat actual sobre aquest tema i posteriorment s'han analitzat mescles amb additius per a poder ser utilitzades a temperatura de fabricació i estesa inferior a la estàndard, les quals s'han comparat amb una mescla estàndard en calent de la mateixa tipologia.

En els següents 4 subapartats s'extrauran conclusions dels diferents assaigs, és a dir dels resultats que abans s'han analitzat, i finalment s'agruparan totes les conclusions parcials per a poder valorar-les de forma conjunta, i extreure'n les conclusions finals, que resten al final del present apartat.

4.1. DENSITATS

La densitat obtinguda en la mescla patró (B-60/70 a 155ºC) és de 2,455 T/m^3 i per tant resulta ser superior a les obtingudes en les mescles amb additius en tot el camp de temperatures estudiat.

Les mescles amb additius tenen un comportament similar que la mescla patró, és a dir segueixen la mateixa corba teòrica Temperatura – Densitat. I la mescla amb additiu de CERA es comporta de forma similar que el TERMOACTIU, (dintre del mateix interval de confiança).

4.2. ASSAIGS MÒDUL RESILIENT

El Mòdul Resilient o mòdul de Rigidesa de la mostra patró (B-60/70 a 155ºC) està al voltant dels 4500 MPa i es veu superada per la rigidesa de la mostra S-20 fabricada amb betum additivat amb CERA a partir de 120ºC.

També succeeix el mateix en el cas del TERMOACTIU, però sols per a la temperatura de 140ºC en que s'obté un valor superior a la de mescla patró.

Si comparem els resultats de les mescles amb CERA i les mescles amb TERMOACTIU es pot observar que a igual temperatura sempre s'obté un resultat molt superior en el cas de les mescles amb CERA.

Les mescles tipus CERA poden ser compactades mantenint o millorant la rigidesa, de la mescla patró, en el rang d'entre 120ºC i 140ºC, i les mescles tipus TERMOACTIU en el rang d'entre 130ºC i 140ºC, tenint en compte l'interval de confiança del 95% (màx. i mín. de cada additiu).

Per tant es conclou que, des del punt de vista de la rigidesa, els betums amb additius poden ser compactats a temperatures inferiors i ser utilitzats en comptes de les mescles convencionals.

4.3. ASSAIGS TRACCIÓ INDIRECTA

La tracció Indirecta de la mescla patró (B-60/70 a 155ºC) és de 2600 Kp aprox. i els resultats de les mescles tipus CERA són similars o superiors en l'interval de 120 a 140ºC.

Les mescles amb additiu tipus TERMOACTIU obtenen resultats similars o superiors al de la mescla patró en l'interval de temperatures de 130 a 140ºC.

Les mescles amb additiu tipus CERA obtenen uns millors resultats respecte als de les mescles tipus TEROMACTIU per a qualsevol temperatura donada.

4.4. ASSAIGS FÈNIX

Els resultats obtinguts a tracció directa en l'assaig Fènix en les mescles tipus CERA, per a temperatures de 110 a 140ºC, són superiors que el resultat obtingut per a la mescla patró B-60/70 a 155ºC, que és de 0,1777 MPa.

Els resultats de les mescles tipus TERMOACTIU són superiors o similars al de la mescla patró compactades a temperatures d'entre 130 i 140ºC (considerant l'interval de confiança del 95 %).

Els resultats obtinguts en les mescles amb additiu tipus CERA són sempre molt superiors, per a qualsevol temperatura donada, als obtinguts en les mescles amb additiu tipus TERMOACTIU.

4.5. CONCLUSIONS FINALS

Dels resultats obtinguts de les probetes tipus S-20 amb tres tipus de betum (tipus B-60/70, CERA i TERMOACTIU) assajades a diferents temperatures, l'assaig Mòdul Resilient, l'assaig a Tracció Indirecta i l'assaig Fènix, es pot concloure que:

- Existeix una reducció de la densitat de les mescles S-20 amb betums B-60/70 additivats amb CERA i TERMOACTIU respecte a la mescla de referència (B-60/70 sense additius a 155ºC).

Tot i que es pot millorar donant una lleugera i major compactació durant l'estesa de la mescla, per tal d'igualar-la a la de referència. Fet que s'hauria d'estudiar en un cas real, tram de proves.

- El mòdul de Rigidesa que s'ha obtingut de les mostres estudiades, presenta un interval òptim comparat amb les mescles patró d'entre 120ºC a 140ºC per a les tipus CERA i per a les tipus TERMOACTIU en l'entron i superior a 130ºC.

- La resistència a la tracció indirecta per a la mescla fabricada amb el betum B-60/70 amb additiu CERA i TERMOACTIU presenten propietats òptimes comparades amb la mostra patró dins de l'interval de temperatures d'entre 120ºC i 140ºC.

- La resistència a tracció directa determinada per l'assaig Fènix presenta un interval òptim comparat amb les mescles patró entre 120 i 140ºC per a la tipus TERMOACTIU i de tot el camp analitzat per a mescles amb betum additivat amb CERA ja que dóna uns valors superiors al llindar de la mescla patró per a qualsevol temperatura.

- Es considera que les mostres fabricades amb betum tipus CERA a temperatures d'entre 120º i 140ºC tenen unes propietats mecàniques òptimes (les estudiades) comparades amb la mescla patró de referència (S-20 amb B-60/70 a 155ºC).

- Es considera que les mostres fabricades amb betum tipus TERMOACTIU a temperatures d'entre 130 i 140ºC tenen unes propietats mecàniques òptimes comparades amb la mescla patró de referència (S-20 amb B-60/70 a 155ºC).

- Dels dos additius utilitzats és conclou que el de CERA funciona millor des del punt de vista mecànic ja que s'obtenen resultats superiors que en el cas de les mescles amb betum tipus TERMOACTIU.

Donat que els resultats d'aquesta tesina són satisfactoris s'hauria de continuar estudiant des del punt de vista de la durabilitat i de comportament aquests betums amb additius, i remarcant especialment el cas de la CERA, per el qual s'obtenen millors resultats. I en cas d'obtenir també resultats satisfactoris des dels punts de vista de durabilitat i comportament caldria passar a fer trams de proves, fins a poder estendre, mai millor dit, aquest tipus de mescles (WMA) de forma casi preferent enfront de les mescles clàssiques utilitzades fins al moment, ja que comporten una millor eficiència mediambiental, i a llarg termini poden resultar més econòmiques que les mescles tradicionals.

REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

Moreno Rubio, Javier. Efecto de equipo y procedimiento de medida en la determinación del módulo resiliente y resistencia a tracción indirecta de las mezclas bituminosas. Tesina d'especialitat ETSECCPB-UPC, 2005.

Garrote Villar, Elisabet. Efecto de la temperatura en la tenacidad de diferentes mezclas bituminosas Tesina d'especialitat ETSECCPB-UPC, 2006.

G. Marcozzi, R.. Análisis preliminar sobre la utilización del ensayo de tracción indirecta en mescles asfálticas diseñadas mediante el sistema Superpave. Carreteras, No. 125.95, 2003.

Ortiz Rodriguez, Rocio. Procedimientos para reducir la contaminación producida por la fabricación y puesta en obra de las mezclas bituminosas. Mezclas semicalientes. Tesina d'especialitat ETSECCPB-UPC, 2008.

Quesada Currubí, Ferran. Efecte de la incorporació de cautxú de NFU's sobre l'estabilitat i la cohesió d'una mescla per a capa base. Tesina d'especialitat ETSECCPB-UPC, 2008.

Pliego de prescripciones técnicas generales per obras de carreteras i puentes de la Dirección General de Carreteras (PG-3). Orden de Fomento 891/04.

Normas del Laboratorio de Transportes NLT-159/00. Resistencia a la deformación plástica de mescles bituminosas empleando el aparato Marshall.

Normas del Laboratorio de Transportes NLT-168/90. Densidad i huecos en les mescles compactadas.

Normas del Laboratorio de Transportes NLT-167/74. Densidad relativa de los áridos en aceite de parafina.

Normas del Laboratorio de Transportes NLT-346/90. Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas.

Rico R. A. Del Castillo H. La ingenieria de los suelos en las Vias Terrestres. Volum 2. Editorial LIMUSA. Mèxic 1992.

Hveem, F.N i Caramny, R.M. The Factors Underlying the Rational Design of Pavements. Material and Research Department of California EEUU 1948.

Hveem, F.N. Some Steps in the Development of Light Road Oil Mix Road Surfaces in California and Western States. Supplemental Load Conditions Studies Data on Roadway Structure and Roadway Condition As Surveyed. Material and Research Department of California EEUU 1955.

Seed, H.B, Chan, C.K. and Lee, C.E. Resilience characteristics of subgrade soils and their relation to fatigue failures. Proc. Int. Conf. on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, Michigan, pp. 611-636. EEUU 1962

Roque R. i Buttlar, WG. The Development of Measurament and analysis Siystem to Accuratly Detemine Asphalt Concrete Properties Using the Indirect Tensile Mode. Asphalt Paving Technology, Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist, Proceedings of the Technical Sessions, St Louis, Missouri. Volum 63 pp 305-362. EEUU 1992.

Kennedy T.W. Characterization of asphalt Pavement Materials Using the Indierct Tensile Test. Asphalt paving Technology. Proceedings Association of asphalt Paving Technical Sessions. San Antonio. Texas. Vol 6, pp 132-149. EEUU 1977.

Kennedy T.W. i Hudson WR. Application of the Indirect Tensile test to Stabilitzed Matirials. Highway research Record NO. 235. Highway Research Board. pp 36-48. EEUU 1968

ALTRES REFERÈNCIES

- Mezclas bituminosas templadas. Un paso adelante hacia la ecoeficacia. (www2.nynas.com/start/article.cfm?Art_ID=3021&Sec_ID=151)
- Protocolo de Kioto i Protocolo de Kioto en la construcción de firme (www.wikipedia.org)
- Low-energy asphalt with the performance of hot-mix asphalt. 4 (http://fs1.hotmix.org/mbc/Introduction_to_Warm-mix_Asphalt.pdf)
- Asphalt Pavement. NAPA (Asphalt Pavement Association) (www.hotmix.org)
- Veidekke Group, (www.veidekke.no/english/)
- tipos de wma en castellano (www.hotmix.org)
- Página web de Asphalt innovations a MeadWestvaco Business. (www.meadwestvaco.com)
- Procés de Fischer-Tropsch (www.wikipedia.org)
- Propiedades de sasobit, NCAT (National Center for Asphalt Technology) www.eng.auburn.edu/center/ncat/
- John Shaw, Sasol Wax (Sasobit) (PPT) (www.warmmixasphalt.com)
- Sasobit modified, (pdf en *www.sasolwax.com/Sasobit.html*)
- Fènix. “Proyecto Fènix” (www.proyectofenix.es)
- Propiedades de Aspha-Min (www.virginiadot.org)
- Propiedades de Evotherm. (www.virginiadot.org)
- VOC Volatile Organic compound (www.wikipedia.org)
- Bob Bistor (ppt), Aspha-Min . (www.aspha-Min.com)
- Wam-foam, about_warm external (www.shell.com)

AGRAÏMENTS

Per últim agrir la col·laboració del Josep Amorós i el Jordi Martín, treballadors del laboratori de camins del departament de materials, que m'ha ajudat al dia a dia al fabricar i realitzar les provetes.

Agrair també la col·laboració del doctorant Oscar Reyes, el qual m'ha ajudat en el tractament de les dades, i per últim al meu tutor donat que sense ell no hagués estat possible realitzar la present tesina el Dr. Rodrigo Miró i Recasens