



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Efecte de l'addició del RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) sobre les propietats de las mescles bituminoses reciclades

TREBALL FINAL DE GRAU

Treball realitzat per:

Guillem Fernández i Casas

Dirigit per:

Adriana Martínez Reguero

Teresa López Montero

Grau en:

Enginyeria d'Obras Públiques

Barcelona, 01/2020

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

Agraïments

En primer lloc, m'agradaria donar les gràcies als meus pares, al meu germà i la meva parella en especial per donar-me suport, confiar en mi, ajudar-me en els moments més difícils i portar-me on sóc ara.

També vull agrair molt a les tutores del TFG Adriana Martínez i Teresa López la seva dedicació en l'ensenyament i tot el temps que han invertit i dedicat a fer d'aquest TFG una realitat.

A més a més, vull donar les gràcies a José Amorós i Jordi Martín pel bon ambient i la seva ajuda en la execució dels assaigs realitzats en el laboratori de camins de la UPC.

Finalment, vull donar les gràcies al meu company Guillem Gil Tolosa per ajudar-me quan jo no tenia força, per fer-me companyia i per deixar-me ser primer.

A tots vosaltres, estaré sempre agraït.

RESUM

Títol: Efecte de l'addició del RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) sobre les propietats de las mescles bituminoses reciclades.

Autor: Guillem Fernández i Casas

Tutores: Adriana Martínez Reguero i Teresa López Montero

L'interès pel material bituminós fressat de paviment d'asfalt, RAP (del anglès "Reclaimed Asphalt Pavement"), en la utilització per la fabricació de mescles bituminoses és creixent pels beneficis ambientals i econòmics que ofereix aquesta tècnica, que busca reutilitzar o recuperar els àrids i betum envellits en paviments antics per tornar a utilitzar-los en mescles noves reciclades.

Certament, quan s'utilitza el material fressat d'un paviment antic i envellit en la fabricació d'una mescla asfàltica reciclada en calent, les propietats del producte obtingut poden diferir de les d'una mescla asfàltica convencional, en especial la rigidesa i la tenacitat.

Degut a això, existeixen certs dubtes sobre les mescles que utilitzen RAP en la seva fabricació, ja que les propietats resultants de cada mescla reciclada varien segons les condicions de fabricació i del material.

El principal objectiu per aconseguir una bona mescla reciclada és aconseguir mobilitzar el betum vell i que es mescli bé amb el nou lligant d'aportació. Els principals factors que podrien afectar al grau de mesclat entre lligants envellits i els verges són: el percentatge de RAP utilitzat en la mescla, la temperatura de mesclat, el temps de mesclat, la temperatura final de la mescla, l'origen i estat del RAP, les seves propietats i l'ús d'additius rejuvenidors.

Per tot això, l'objectiu d'aquest treball final de grau es centra en analitzar principalment les propietats de les mescles reciclades en calent segons el seu contingut de RAP, estudiant les seves propietats volumètriques i mecàniques. En segon terme, s'analitzarà l'efecte de les condicions de temperatura de fabricació segons la temperatura dels àrids verges en el procés de mesclat.

L'estudi s'ha dut a terme mitjançant la fabricació de provetes Marshall d'una mescla bituminosa Patró, sense RAP, amb diferents continguts de lligant, per després fabricar varies sèries de provetes Marshall de mescles bituminoses reciclades amb continguts de 20, 30, 40, 50 i 60% de RAP, buscant un 4,5% de betum total entre envellit i verge. D'aquesta manera s'han comparat i contrastat les propietats de la mescla bituminosa reciclada amb la mateixa fabricada sense RAP i així doncs estudiar les similituds o divergències entre ambdues.

A part del present treball, per ampliar aquest estudi, s'ha establert una segona etapa d'investigació per un segon treball de fi de grau. És per això que aquest treball va de la mà amb el Treball Final de Grau que realitzarà l'alumne Guillem Gil Tolosa anomenada "Efecte de la temperatura del RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) sobre les propietats de las mescles bituminoses reciclades", que es centra més en la variable de la temperatura del RAP en la fabricació de la mescla.

Queda palès doncs que la tesis que es tracta en aquest treball s'orienta principalment en la variable del percentatge de contingut de RAP (%) que contenen les mescles bituminoses reciclades, amb l'objectiu de trobar similituds de propietats i comportaments entre les mescles reciclades i les mescles convencionals.

Els assaigs de les provetes Marshall s'han dut a terme mitjançant l'assaig Fènix, un mètode pràctic i eficient per caracteritzar el comportament a fissuració de les mescles bituminoses a diferents temperatures, desenvolupat a la UPC.

Al finalitzar aquest estudi, es conclou que les mescles reciclades tenen un comportament més rígid i fràgil que una mescla convencional, quan augmenta el contingut de RAP es perd ductilitat i augmenta notablement la seva resistència a tracció. A més a més, cap mescla reciclada ha resultat tenir un comportament en termes generals proper al de la mescla Patró de 4,5% de lligant. S'ha aproximat que una teòrica mescla amb un 38% de RAP i 4,5% de betum total (envellit + verge), presenta uns resultats en els paràmetres de l'assaig Fènix similars a una teòrica mescla Patró entre 3,3 i 3,5% de betum.

En resum, els resultats obtinguts han mostrat que no s'ha pogut aconseguir refondre la totalitat del betum envellit del RAP amb el lligant verge d'aportació, ja que els resultats han apuntat a una pèrdua de propietats mecàniques en comparació amb la mescla Patró amb 4,5% de lligant.

ABSTRACT

The interest for the Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in the manufacture of recycled bituminous mixtures is continually growing due to the economic and environmental benefits that this road maintenance technique entails, which tries to reuse and recover aged asphalt binder from old pavements in order to use them in new recycled mixtures.

Actually, when using milled material (RAP) from some aged pavements in the production of a hot recycled asphalt mix, the properties of the obtained product can differ from the ones of a conventional mix, specially stiffness and toughness.

Nowadays, the performance of recycled asphalt mixtures is not clear. It is because the properties of each recycled asphalt mixture are different depending on the fabrication conditions and the RAP conditions.

To obtain a high quality recycled binder is essential to get the old bitumen mobilized and well mixed with the new binder (homogeneous mixture). The main agents that could affect the level of mixing between aged and virgin binders are: the percentage of RAP used in the mixture, the mixing temperature, the mixing time, the final mixture temperature, the origin and the state of the RAP, its properties and the use of rejuvenating additives.

For all of that, the aim of this research is to further analyze the properties of hot recycled mixtures depending on the RAP's content and to study its volumetric and mechanical properties. Furthermore, the effect of virgin aggregates temperature on the manufacturing temperature conditions in the mixing process is analyzed.

Marshall specimens of a reference mixture, without RAP, with different binder contents are manufactured. On the other hand, recycled asphalt mixture specimens with contents of 20, 30, 40, 50 and 60% of RAP are also manufactured. This was set to be able to compare and contrast the properties of a recycled bituminous mixture with the same one without RAP and therefore studying similarities or divergences between them.

Aside of this project, and to further develop this study, it was established a second stage of research for a second end-of-degree project. Due to this, the present work goes together with the research that the student Guillem Gil Tolosa will do with the title of "Efecte de la temperatura del RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) sobre les propietats de las mesclas bituminoses reciclades", which focuses on the effect of RAP's temperature on the asphalt mixture manufacturing.

It is clear that the study we are dealing with in this paper is mainly focused on the variable of RAP content (%) contained in recycled bituminous mixtures.

The test of the Marshall specimens was performed using the Fénix test, a practical and efficient method for characterizing the cracking behavior of bituminous mixtures at different temperatures, developed at UPC.

At the end of this investigation, it is concluded that the recycled bituminous mixtures are more rigid and fragile than a conventional mixture. The more RAP content in the mixture, the less ductility and the more strength it has. Furthermore, results show that the blending of the old asphalt binder and the virgin one is not totally occurred. They show a loss of mechanical properties by the recycled mixture in comparison with the reference one.

Índex

CAPÍTOL 1. INTRODUCCIÓ	13
1.1 Plantejament del problema.....	13
1.2 Objectius del treball	14
1.3 Descripció dels capítols	15
CAPÍTOL 2. ESTAT DE L'ART	16
2.1. Introducció	16
2.2. Reciclat de paviments asfàltics	17
2.2.1. Consideracions per projectar un reciclat	19
2.2.2 Classificació del reciclat de materials de paviments de carreteres	21
2.3 Propietats de les mescles bituminoses reciclades	26
2.3.1. Estabilitat	26
2.3.2. Resistència a l'aigua	27
2.3.3. Rigidesa	28
2.3.4 Resistència al lliscament	29
2.3.5 Resistència a la fatiga	29
2.4 Variables que afecten les propietats de les mescles reciclades.....	30
2.4.1 Propietats del betum envellit	30
2.4.2 El procés de mesclat entre materials nous i RAP	31
CAPÍTOL 3. ESTUDI EXPERIMENTAL.....	33
3.1 Introducció	33
3.2 Pla de treball	33
3.3 Característiques de les provetes i els seus materials.....	36
3.3.1 Resum característiques provetes	36
3.3.2 Materials utilitzats	38
3.3.3 Anàlisi de la penetració i justificació de les temperatures addicionals d'estudi per els percentatges 20, 30, 50 i 60%	41
3.4 Fabricació	43
3.4.1 Tamisat dels àrids i RAP	43
3.4.2 Pesat dels àrids	44
3.4.3 Fabricació de la mescla bituminosa	44
3.5 Densitats i Contingut de buits (%H)	47
3.6 Assaig Fènix	49
3.6.1 Introducció	49
3.6.2 Descripció del procediment	50

3.6.2 Procediment per assajar les provetes	53
CAPÍTOL 4. RESULTATS	56
4.1 Introducció	56
4.2 Propietats volumètriques.....	56
4.3 Propietats mecàniques.....	60
4.3.1 Efecte del contingut de lligant en les mescles bituminoses.....	64
4.3.2 Efecte del contingut de RAP en les mescles bituminoses.....	66
4.3.3 Comparació entre les mescles reciclades i la mescla patró	71
4.3.4 Estudi del efecte de la variació de la temperatura dels àrids verges	75
CAPÍTOL 5. CONCLUSIONS	77
CAPÍTOL 6. FUTURES LÍNIES D'INVESTIGACIÓ	79
CAPÍTOL 7. BIBLIOGRAFIA	80

ANNEXES

ANNEX 1:

- Geometria de les provetes, Pesos i Dades densitats màximes.....83

ANNEX 2:

- Gràfiques assaig Fènix.....93

ÍNDEX D'IL·LUSTRACIONS

Il·lustració 2.1 - Efectes del stripping.....	27
Il·lustració 2.2 – Influència de la temperatura i el temps de mesclat en el GD de mescles reciclades amb 40% de RAP i a 20°C (Pérez Madrigal, 2018).....	32
Il·lustració 2.3 – Influència de la temperatura i el temps de mesclat en el IRT de mescles reciclades amb 60% de RAP i a 20°C (Pérez Madrigal, 2018).....	32
Il·lustració 3.1 – Esquema de producció mescla Patró.....	34
Il·lustració 3.2 – Esquema de producció mescla reciclada.....	35
Il·lustració 3.3 – àrids calcaris verges.....	38
Il·lustració 3.4 –Gràfic granulomètric del RAP.....	39
Il·lustració 3.5 – Mostra de RAP.....	40
Il·lustració 3.6 – Filler (Carbonat Calcic).....	40
Il·lustració 3.7 –Tamisadora mecànica.....	43
Il·lustració 3.8 – Pesat dels àrids amb balança.....	44
Il·lustració 3.9 – Mescladora mecànica amb l’olla i planxa.....	45
Il·lustració 3.10 – Compactadora Marshall.....	46
Il·lustració 3.11 – Mostra desgranada Mescla Patró per densitat màxima.....	48
Il·lustració 3.12 –Procés del buit per densitat màxima.....	48
Il·lustració 3.13 –Tensions de tracció assaig Fènix (Pérez-Jiménez, et al., 2010).....	50
Il·lustració 3.14 –Gràfic Càrrega-Desplaçament (Pérez-Jiménez, et al., 2010).....	50
Il·lustració 3.15 – Provetes de Mescla Reciclada tallades.....	53
Il·lustració 3.16 – Provetes de Mescla Reciclada enganxades en plaques.....	54
Il·lustració 3.17 – Provetes de Mescla Reciclada en nevera a 20°C.....	54
Il·lustració 3.18 – Monitor d’assaig Fènix.....	55
Il·lustració 3.19 – Inici i final de l’assaig Fènix.....	55

Il·lustració 4.1 – Contingut de buits segons el % de lligant. M. Patró.....	57
Il·lustració 4.2 – Contingut de buits segons el % de RAP. M. Reciclada.....	59
Il·lustració 4.3 – Corbes Càrrega-Desplaçament. Mescla patró amb 3% de lligant 20°C.....	60
Il·lustració 4.4 – Corbes Càrrega-Desplaçament. Mescla patró amb 3% de lligant a 5°C.....	61
Il·lustració 4.5 – Resistència a tracció (RT) de la mescla Patró a 20 i 5°C.....	64
Il·lustració 4.6 – Desplaçament de tenacitat (DT) de la mescla Patró a 20 i 5°C.....	65
Il·lustració 4.7 – Resistència a tracció (RT) a 20 i 5°C.....	66
Il·lustració 4.8 – Desplaçament de tenacitat (DT) a 20 i 5°C.....	67
Il·lustració 4.9 – Índex de resistència a tracció (IRT) a 20 i 5°C.....	69
Il·lustració 4.10 – Energia de fractura (GF) per 20 i 5°C.....	70
Il·lustració 4.11 – Gràfic 1.0 General Mescla Patró i Mescla Reciclada (RT-DT).....	71
Il·lustració 4.12 – Gràfic 1.1 Mescla Patró i Mescla Reciclada (RT-DT) 20°C.....	72
Il·lustració 4.13 – Gràfic 1.2 Mescla Patró i Mescla Reciclada (RT-DT) 5°C.....	73
Il·lustració 4.14 – Gràfic 2.1 Mescla Reciclada Completa(RT-DT) 20°C.....	75
Il·lustració 4.15 – Gràfic 2.1 Mescla Reciclada Completa(RT-DT) 5°C.....	76

ÍNDEX DE TAULES

Taula 3.1: Granulometria definida: Provetes de 1100 grams d'àrid.....	36
Taula 3.2: Temperatura dels àrids per les diferents combinacions de % RAP.....	37
Taula 3.3: Dosificació de les mescles reciclades: Granulometria dels àrids verges, percentatge de RAP i lligant nou a afegir.....	37
Taula 3.4: Anàlisi granulomètric del RAP.....	39
Taula 3.5: Caracterització del lligant extret del fresat.....	40
Taula 4.1: Contingut de buits (%H). Mescla Patró.....	56
Taula 4.2: Contingut de buits (%H). Mescla Reciclada Principal.....	56
Taula 4.3: Contingut de buits (%H). Mescla Reciclada amb T ^o C variables.....	57
Taula 4.4: Resultats de l'assaig Fènix. Mescla Patró a 20 ^o C.....	62
Taula 4.5: Resultats d'assaig Fènix. Mescla Patró a 5 ^o C.....	62
Taula 4.6: Resultats de l'assaig Fènix. Mescla Reciclada a 20 ^o C.....	62
Taula 4.7: Resultats Fènix. Mescla Reciclada a 5 ^o C.....	63
Taula 4.8: Resultats de l'assaig Fènix. Mescla Reciclada (T ^o àrid verge variable) a 20 ^o C.....	63
Taula 4.9: Resultats de l'assaig Fènix. Mescla Reciclada (T ^o àrid verge variable) a 5 ^o C.....	63

CAPÍTOL 1. INTRODUCCIÓ

1.1 Plantejament del problema

El principal mode de transport de persones i mercaderies es per carretera. Per assegurar unes bones condicions de circulació, seguretat i comoditat a la xarxa vial, són necessàries altes inversions en construcció, manteniment i recuperació d'aquestes vies. L'ús d'agregats reciclats (RAP, del anglès *Recycled Asphalt Pavement*) sorgeix com una alternativa tecnològicament viable y sostenible, tan des del punt de vista ambiental com econòmic.

L'estalvi energètic i la preservació del medi ambient són temes de primeríssim ordre mundial, juguen un paper molt important per lluitar contra el canvi climàtic i totes les seves conseqüències. És per això que, tractant el nostre tema de construcció de paviments de carretera, la investigació per millorar la qualitat dels paviments reciclats i augmentar l'ús del RAP en carreteres és primordial per millorar la sostenibilitat i reduir la contaminació.

Amb el RAP és possible construir estructures de paviment utilitzant materials fresats que normalment es llençarien. Els principals avantatges directes que obtenim de la utilització del RAP són: reducció del consum d'aigua, energia i emissió de gasos. La reducció de costos de trituració, el reciclatge 100% del material fresat, és un procés ecològic que redueix la explotació en els jaciments i ofereix la oportunitat de reduir costos, tan en la execució com en la conservació del paviment.

Avui en dia és freqüent l'ús de mesclades reciclades amb un contingut de RAP variable entre el 10% i el 30% en construcció i rehabilitació de carreteres. L'aprofitament del RAP segueix sent baix, ja que tècnicament es podria arribar a utilitzar percentatges més elevats de reciclat tot i que la normativa espanyola només permet arribar fins a un 50% de RAP, encara.

La capa superficial del paviment d'una carretera, la capa de rodament, és la més exigent degut al alt rendiment que es demana en paràmetres com la resistència a la fissuració i la resistència al lliscament. Els impediments per utilitzar més addició de RAP en mesclades reciclades en una capa de rodament deriven de 3 punts principals: les propietats dels àrids del RAP, especialment el contingut de fins; les propietats del betum envellit del RAP, que pot provocar danys de fissuració; i per últim, el grau de mesclat que es dona per la difusió entre el betum verge rejuvenidor i el betum envellit del RAP (Howard et al., 2009; Zaumanis i Mallick, 2015).

Un dels errors més comuns en quant al resultat d'una mescla bituminosa reciclada que es donen en el món professional, és assumir que durant el procés de mesclat tot el betum del RAP ha estat aprofitat i completament refós amb el lligant verge. Investigacions dutes a terme durant els passats anys (Bennert i Martin, 2010; Huang et al., 2005; Zhao et al., 2016), determinen que la citada hipòtesis és incorrecte.

1.2 Objectius del treball

L'objectiu d'aquest treball d'investigació és buscar equivalències de comportaments mecànics entre una mescla bituminosa reciclada i una mescla bituminosa convencional per tal de conèixer millor les qualitats reals d'una mescla reciclada.

El que busquem és estudiar les propietats mecàniques i volumètriques de les mescles bituminoses reciclades, principalment segons el seu percentatge de RAP i, en certa mesura, variant les temperatures dels àrids verges a l'hora de fabricar la mostra. D'aquesta manera poder avaluar les mescles reciclades fabricades amb diferents percentatges de RAP, comparant-les amb una mescla fabricada sense elements reciclats.

En el nostre estudi tenim l'objectiu d'arribar a determinar si durant el procés de fabricació el lligant envellit del RAP s'aconsegueix mobilitzar i refondre's amb el nou betum verge o no. Això s'estudiarà d'una forma indirecte, a base de comparar les propietats de la mescla reciclada amb les de la mescla patró, es determinarà si la mescla reciclada obté unes propietats similars a las de la mescla patró o es queda lluny de poder ser utilitzada en el seu lloc.

Per aconseguir l'objectiu d'aquest treball s'estudiarà la resistència a la fissuració de la mescla bituminosa de referència, així com de la mescla bituminosa fabricada amb diferents percentatges de RAP, mitjançant els principals paràmetres del assaig Fènix.

1.3 Descripció dels capítols

El Treball es divideix en cinc capítols.

El primer capítol és la Introducció, on es fa una breu presentació del tema a tractar en el treball, el seu objectiu i la importància o interès que conté.

El segon capítol correspon al Estat de l'art, el qual resumeix la informació existent fins avui dia, referent al tema principal en el que es centra aquest treball . Es veurà quines tècniques de fabricació existeixen, els seus avantatges i desavantatges, quines són les últimes investigacions sobre el tema tractat i les seves conclusions.

Al tercer capítol anomenat Estudi Experimental, es descriu la metodologia seguida en el Laboratori de Camins de la Universitat Politècnica de Catalunya per la fabricació de les provetes i els corresponents assaigs.

En quart lloc, en el capítol de Resultats es detallen els resultats obtinguts al llarg de tots els assaigs i es du a terme una avaluació on s'analitzen les dades.

En el cinquè apartat es descriuen les Conclusions obtingudes al finalitzar l'estudi.

Finalment, en l'últim apartat es poden trobar les Referències Bibliogràfiques i Annexes pertanyents al estudi.

CAPÍTOL 2. ESTAT DE L'ART

2.1. Introducció

Les rehabilitacions estructurals de paviments de carretera han estat tradicionalment mitjançant un reforç o un recrescut a sobre de la superfície existent. Consisteix en formar una capa o més de materials nous amb un gruix suficient per amagar desperfectes i fissures i dotar a la carretera de la textura superficial que pertoca.

Amb aquesta tècnica de rehabilitació de paviments d'aglomerat es corre el perill de que en els casos on l'estat de la carretera sigui massa dolent o presenti grans fissures, aquestes es puguin reflectir ràpidament en la nova capa que s'ha construït per rehabilitar el paviment si aquesta no és d'un espessor important. En els casos de deteriorament greu, convé fressar les primeres capes més malmeses per després estendre la nova capa, d'aquesta manera no caldrà que tingui un gruix tan important com si no es freses inicialment.

Durant els últims anys, la preocupació pel medi ambient ha crescut de forma global, és per això que en l'àmbit de la construcció i conservació de carreteres es persegueix la idea de poder reciclar el residu del procés de fressat (RAP) per reutilitzar-lo en rehabilitació i conservació de carreteres d'una forma eficient i amb bons resultats. D'aquesta manera, al reciclar les capes bituminoses s'aconsegueix aprofitar el lligant que conté el RAP i així disminuir el consum de betum i àrid verge. Es redueix també el volum de residu que s'origina, que cada vegada és més difícil i costos d'eliminar o emmagatzemar degut a la falta d'espai i les fortes regulacions imposades pel tema de la contaminació i medi ambient.

Aquests avantatges han fet que l'ús i la investigació de les mesclades bituminoses reciclades cobrin un valor molt important i es generi un gran interès al seu entorn.

2.2. Reciclat de paviments asfàltics

El reciclat de paviment asfàltic és una tècnica de conservació de carreteres que consisteix en la reutilització dels materials procedents dels paviments que han estat en servei, aquells materials deteriorats que han perdut gran part de les seves propietats inicials o materials encara en condicions d'ús, però amb voluntat de millorar les seves propietats. (PG4, 2001). És una tècnica relativament antiga que en els últims anys ha experimentat un fort creixement.

Els avantatges que proporciona aquesta tècnica de conservació en front a las convencionals o clàssiques són nombroses. Les tècniques més clàssiques tenen importants defectes. Un paviment envellit sense problemes estructurals greus es compon d'una sèrie de capes inferiors més o menys sanes i unes capes superficials deteriorades. La col·locació sense cap tractament d'una nova capa sobre la superfície existent (recrescut) fa que en el nou paviment existeixi una capa intermitja deteriorada que ha perdut les seves qualitats mecàniques i que constitueix per tant un element inútil i pertorbador per al seu bon funcionament. En l'actualitat, multitud de capes de rodament col·locades en operacions de reforç per recrescut convencional resulten greus i prematurament danyades degut al seu mal assentament. El reciclatge d'aquesta capa deteriorada abans de l'extensió de la nova capa superficial assegura un bon funcionament estructural del conjunt del paviment, una major durabilitat y un millor servei als usuaris.

En primer lloc el reciclat de paviments d'asfalt suposa un aprofitament dels recursos disponibles a l'obra. Els materials envellits poden ser reutilitzats mitjançant una tècnica adequada de forma que són novament vàlids per la construcció de carreteres. Amb aquestes tècniques de reciclatge, en les operacions de conservació de reciclatge es pot reduir significativament la demanda de materials com àrids i betum, s'elimina la necessitat de trobar canteres i abocadors pròxims a la obra i es milloren els rendiments de fabricació. Sumat a això, els mètodes de reciclatge "in situ" permeten eliminar les operacions de transport dels materials, tan dels envellits fins a un abocador, com dels nous des del seu punt de subministra fins la obra. D'aquesta manera el reciclat dels paviments asfàltics presenta una resposta adequada al repte que representa la creixent escassetat d'àrids i la dificultat cada vegada major d'enviar a un abocador els residus que es poden reutilitzar. Totes aquestes millores repercuteixen en importants estalvis i un major respecte cap al medi ambient.

Altres solucions tècniques que ofereix aquesta tècnica són:

- Resoldre el problema de gàlib de les tècniques convencionals, on la solució era fer un recrescut i s'afectava a la cota original, provocant en certs punts com túnels, calçades de ciutats en referència a la vorera, punts de recollida d'aigües, pendents, etc. Facilita les actuacions relatives al canvi de la geometria de la

carretera, on es poden fer canvis en l'alineació vertical i horitzontal sense la necessitat de grans actuacions, cosa que seria més difícil seguint les tècniques convencionals.

- Optimitza els recursos disponibles. El recrescut dels paviments pot no optimitzar els recursos, com es el cas d'una via de varis carrils, on els deterioraments es concentren en els carrils exteriors ja que per ells hi circulen els vehicles pesats de forma canalitzada. La tècnica convencional obliga a recréixer tots els carrils, quedant sobredimensionats els centrals, mentre que la tècnica de reciclat permet rehabilitar només el carril deteriorat.
- Tenen un nivell menor d'afectació al trànsit. Es possible reciclar només un carril y permetre la circulació pels demés carrils. El temps d'ocupació de la via es menor que el de las tècniques convencionals, ja que un paviment reciclat pot generalment obrir-se al trànsit en poques hores.
- Permeten la estabilització de les capes inferiors en cas de problemes estructurals i l'aprofitament de les capes de rodament envellides. És possible reparar errors estructurals sense la necessitat de desfer-se de tots els materials existents.
- Millora les condicions d'adherència superficial. A més a més, si el paviment conté deteriorament superficial, el reciclat pot resoldre el problema.

Cal dir que el reciclatge no és una tècnica aplicable a totes les operacions de conservació de carreteres. Aquestes tècniques poden tenir un cost econòmic superior al de las clàssiques, poden no ser acceptables social o ambientalment, o simplement poden no donar bons resultats tècnicament. És molt important l'anàlisi previ per l'elecció de la tècnica de conservació a utilitzar.

2.2.1. Consideracions per projectar un reciclat

Quan ens plantegem el reciclat d'una carretera, existeixen tres grans àrees que hem de considerar per assegurar l'èxit de l'operació: la tècnica, la ambiental i l'econòmica. Cada un dels tres, conté elements que poden decantar la decisió a favor d'una tècnica o una altra.

La primera consideració és de caràcter tècnic. Els paviments estan integrats per diferents capes de materials i tenen el deure de transmetre les sol·licitacions del trànsit que arriben a la superfície, a la explanada, de manera que aquesta, que no té una gran capacitat portant, no pateixi deformacions plàstiques. Cada una de les capes està definida pel seu gruix i naturalesa del material que la forma, que li aporta un cert comportament mecànic quantificable a través del seu mòdul elàstic.

Cal recordar que aquestes capes funcionen de dos formes. Quan són materials granulars, la transferència de càrregues es realitza a través de l'esquelet mineral de la capa. Amb el temps, es produeix una reordenació de les partícules minerals que es tradueixen en deformacions en la superfície. Quan parlem de materials lligants, la capa funciona en el seu conjunt actuant com una llosa. Això significa que en la seva part superior mobilitza una sèrie de compressions horitzontals i les corresponents traccions en la zona inferior. Aquests materials fallen per acumulació de cicles de càrrega i descàrrega que fatiguen el material donant lloc a fissures que es transmeten de dalt a baix.

Quan ens enfrontem a una rehabilitació es primordial tenir un compte l'explicació anterior. Hem d'identificar quin és el gruix de cada una de les capes del paviment i la seva naturalesa, quin tipus d'explanada tenim i de quin caire ha estat la fallada produïda.

Les fallades que provenen dels fonaments del ferm han de ser estudiades de manera particular. Per altra banda, quan els problemes procedeixen de les capes superiors, identificar la naturalesa d'aquests, ajuda a determinar quina és la solució més adequada per la seva rehabilitació.

A part de la identificació dels materials existents, és molt important que coneguem les seves condicions de treball. Per això hem de conèixer amb exactitud quin serà el tipus de trànsit que suportarà la carretera en el present i en el futur. L'anàlisi de les deflexions ens podrà aportar moltes dades per una millor comprensió del comportament mecànic de les capes.

La segona consideració és de caràcter ambiental. Encara avui és freqüent que el disseny de les seccions del ferm es realitzin en base als criteris estructurals a pesar de les diferents condicions ambientals. Les condicions ambientals afecten a la carretera de tres maneres diferents:

- En primer lloc podem nombrar el clima. La superfície del paviment està exposada al clima de l'entorn on s'ubiqui, els cicles tèrmics i la radiació solar produeixen un envelliment i deteriorament.
- En segon lloc tenim l'actuació de l'aigua. L'estructura del ferm es molt sensible a l'aigua que es filtra a través de las fissures superficials. Aquesta aigua, en combinació amb el primer efecte mencionat, pot tenir un efecte devastador per la infraestructura.
- En tercer i últim lloc hi ha les condicions mediambientals, que afectaran a la disponibilitat de nous àrids, canteres, punts d'abocament de residus o emissions a l'atmosfera.

Per acabar l'apartat de consideracions prèvies, ens falta parlar del tercer punt, l'econòmic. En general totes les propostes que impliquen un procés de reciclat són més econòmiques. Tot i així, en certs casos, la comparació econòmica no és del tot favorable a la tècnica de reciclat en sentit estricte. Tot s'ha de dir que fins i tot en aquests casos, si tenim presents totes les externalitats del processos convencionals, el procés de reciclat és sempre més econòmic en termes globals.

2.2.2 Classificació del reciclat de materials de paviments de carreteres

Es poden establir diferents classificacions del reciclat de materials de ferms de carretera amb paviment d'asfalt: segons el lloc en que es dugui a terme el reciclat (in situ o planta), segons la temperatura a la que es realitzi (en calent, semicalent, temperada o en fred), segons el material que es recicli (materials bituminosos, materials tractats amb ciment, capes granulars), segons el lligant utilitzat (sense lligant, lligant bituminós, conglomerant hidràulic o mixta) i segons es recicli amb o sense addició de materials nous.

Les tècniques més utilitzades són les de reciclat en calent i en fred, que són les que descriurem amb detall a continuació.

2.2.2.1. Reciclat en calent

El reciclat en calent es pot dur a terme de dos formes: In situ o en Planta.

- Reciclat "in situ" en calent:

Funciona de manera que es reutilitza la totalitat dels materials extrets del ferm envellit mitjançant un tractament amb aportació de calor que es realitza en el mateix lloc de la obra. En general, el ferm es calenta mitjançant uns cremadors i es fressa un determinat gruix. Aquest material es mesclat normalment amb agents químics rejuvenidors i amb mescla nova. Finalment, la nova mescla es estesa i compactada mitjançant procediments convencionals.

Altrament, existeixen diferents tècniques de reciclat en calent in situ:

- "Reforming"
Consisteix en retornar el perfil d'una calçada bituminosa mitjançant l'escalfament i l'escarificació, donant-li posteriorment la forma desitjada i compactant sense extreure ni addicionar cap material.
- "Regripping"
Es tracta de la primera tècnica "Reforming", acompanyada de la incorporació dels àrids mesclats o no amb lligant per modificar alguna de les propietats superficials com la rugositat.
- "Repaving"
Consisteix a retornar el perfil a una mescla bituminosa per escalfament, escarificació, anivellació, col·locació d'una nova capa prima de mescla bituminosa i compactada. Aquest mètode, es aplicat per corregir problemes de

regularitat longitudinal o transversal, pèrdues de material superficial, superfícies poc rugoses o permeables. Pot anar precedida de l'eliminació per fressat de 2 o 3 centímetres superiors que s'aportaran de material nou amb l'objectiu de mantenir la rasant.

- “Remixing”

Aquesta tècnica busca la millora de les propietats de la capa superficial de un ferm mitjançant escalfament, fressat, mesclat amb nous àrids o lligant i eventualment amb additius rejuvenidors del lligant. La mescla es estesa i compactada.

En tots els casos si la obra es de dimensions considerables i ho permet, s'utilitzen grans màquines integrals que en una sola passada aconseguixen dur a terme de manera seqüencial les diferents operacions de escalfament, fressat d'un cert gruix, formació d'un cordó de material aixecat, separació en el cas que pertoqui del material no aprofitat, aportació de materials verges, mesclat homogèniament dels materials vells i nous, estesa i compactació (Emery i Terao, 1992).

▪ Reciclat en calent en planta:

És la tècnica més comú a Europa. En la majoria de països aquestes mescles bituminoses reciclades són tècnicament equivalents a las convencionals i es poden aplicar en tots els tipus de capes o categories de trànsit. Las mescles que contenen reciclat han de complir les prescripcions tècniques que marca la llei de la mateixa manera que ho fan las no reciclades, exceptuant certs casos. La quantitat de material reciclat que conté la mescla depèn del disseny i la producció de la mateixa.

El procés de reciclat de paviments asfàltics en planta en calent consisteix bàsicament, en retirar las capes bituminoses dels paviments envellits mitjançant una fresadora o demolint-lo, després es transporta el material a una central de fabricació on s'apila, es caracteritza i es processa fins complir amb les condicions requerides. Un cop arribat aquí, es mesclat en calent amb àrids verges, lligant nou i/o agent rejuvenidor, per obtenir una mescla bituminosa composta parcialment per RAP. Cal dir que per obtenir un mesclat eficient i poder reconstituir la mescla, el RAP ha d'arribar a una temperatura suficientment elevada per permetre la fluïdificació o reblandiment del lligant vell i la seva fusió amb el nou. A l'hora de fabricar, s'han d'arribar a temperatures al voltant dels 160°C per les mescles habituals en Espanya.

En l'escalfament del RAP per transferència de calor a partir d'àrids sobreescalfats, la temperatura d'aquests no pot ser excessivament alta ja que pot provocar un envelliment addicional del lligant per xoc tèrmic.

Finalment, es transportada a obra, col·locada i compactada com si fos una mescla bituminosa tradicional.

Ara es presenten els avantatges i desavantatges entre la tècnica in situ i la de en planta:

El reciclat in situ permet estalviar econòmicament en front al reciclat en central, ja que no es necessari el transport de materials a la central ni el transport de posada en obra.

És més idoni el procés in situ per obres disperses i de petita escala.

Sobre el reciclat in situ, el reciclat en calent presenta las següents avantatges:

- Homogeneïtat més gran degut a que la dosificació de la mescla reciclada pot controlar-se de manera precisa mitjançant bàscules i dosificadors. Així mateix, la dosificació de materials nous pot controlar-se també amb exactitud.
- Es pot realitzar sobre qualsevol gruix de mescla bituminosa sense limitacions.
- El transport, l'estesa i la compactació es poden realitzar amb equips convencionals.
- Es pot regular l'escalfament de la mescla de manera que no es produeixi un enduriment inadmissible del betum.
- El reciclat en calent en planta té un comportament mecànic i una capacitat de reforç anàloga a las de las mescles noves i superiors a las de las reciclades in situ.

Alguns dels inconvenients del reciclat en calent en planta són:

- Menors estalvis econòmics directes i energètics que el reciclat in situ.
- Necessitat de grans obres per que resulti econòmicament rentable.
- En petites obres, necessitat de disposar en una zona propera d'una planta equipada per reciclar RAP.
- Necessitat de grans superfícies d'emmagatzematge en centrals.
- Necessitat d'una bona organització en les operacions de fressat per facilitar una operació continua.

2.2.2.2. Reciclat en fred

Existeixen dos tècniques de reciclat en fred, in situ o en planta, sent la primera la més usada. Aquestes tècniques són les menys contaminants i les més respectuoses amb el medi ambient, aconseguen reduir les emissions de gasos emesos a l'atmosfera i el cost de la rehabilitació de manera notable.

Donat la creixent necessitat de protegir el medi ambient i les dures lleis que el protegeixen, el reciclat en fred ha cobrat molta importància en els últims temps.

Es presenten les dues tècniques:

- Reciclat in situ en fred.

El reciclat in situ en fred amb emulsió bituminosa és una tècnica que busca transformar un ferm degradat en una estructura òptima per la circulació que suportarà, amb costos energètics i contaminació reduïts.

Es realitza amb equips de maquinària multifunció que fressen la capa d'aglomerat desitjada, mesclen el RAP amb aigua i emulsió i realitzen l'estesa, tot a temperatura ambient. Es pot aprofitar el 100% del material, pel que resulta molt beneficiós per disminuir costos en tots el sentits.

Les mesclades reciclades in situ en fred presenten característiques molt apropiades per ser utilitzades en capes base, encara que les seves propietats difereixen de les de les mesclades bituminoses en calent tradicionals. El mòdul elàstic és més baix que en les convencionals, però la seva ruptura és més dúctil, permeten el moviment de les fissures existents sota el ferm i la seva absorció. Tot i que es pot aconseguir una bona cohesió de la mescla utilitzant una emulsió adequada, la cohesió final depèn de la densitat aconseguida durant la compactació. Encara que la compactació en aquest tipus de mesclades és complicada.

Avantatges destacats del reciclat in situ en fred:

- Reducció de la pertorbació al tràfic durant la construcció. Amb una sola màquina i en una sola passada, es dur a terme el fressat del ferm deteriorat, la mescla amb el lligant i l'estesa i compactació de la mescla final. En conseqüència també es redueix les molèsties i desperfectes ocasionats a la via, pel pes i circulació de la maquinària pesant.
- Reducció de les emissions de gasos contaminants a l'atmosfera. La reducció dels transports en obra i la eliminació del escalfament de materials, es tradueix en una important disminució de les emissions de gasos contaminants.

- Reducció del nivell de contaminació acústica. Al reutilitzar els materials existents en la carretera i eliminar la necessitat d'aportar noves mescles, es produeix una reducció del transport considerable, amb la consegüent disminució de soroll a la zona d'afectació.
 - Minimitzar l'impacte ambiental. Es reutilitzen els materials existents del ferm antic, sense necessitat d'explotar nous jaciments, ni d'abocar nous residus.
 - Avantatge econòmic. No s'ha de comprar nous àrids, no és necessari pagar a una central de fabricació ni el transport que comporta. L'afectació al trànsit és menor i la durada de l'obra també.
- Reciclat en planta en fred.

És la menys usada en comparació amb la realitzada in situ, tot i així pot ser la més adequada en certes ocasions. Depenent de les necessitats o condicions tècniques, es pot utilitzar en la nova mescla lligants com emulsió bituminosa, espuma de betum o ciment. Normalment, aquests tipus de mescles reciclades s'utilitzen en la capa base i amb emulsió bituminosa com a lligant més freqüent.

La tècnica de reciclat en planta en fred consisteix en fabricar una mescla bituminosa a partir del material fressat d'un ferm o altrament anomenat RAP. La mescla és fabricada en una planta de fabricació continua i utilitza com a lligant emulsió o espuma de betum, es pot afegir cal o ciment i àrids correctors de granulometria.

Aquesta forma de reciclatge és similar a la tècnica in situ en quant a condicions de materials, formulació de la mescla, condicions d'utilització i posada en obra. Per això és una tècnica poc utilitzada i s'opta més per fer-ho in situ. Tot i així, presenta algunes avantatges en front del reciclat en fred in situ:

- Un major control dels materials per la fabricació de la mescla. El RAP pot ser tractat aixafant-lo i millorar la granulometria, també es poden substituir àrids no desitjables.
- Es pot buscar una mescla de més qualitat realitzant millores en planta de temps de mesclat.
- La mescla resultant es pot emmagatzemar i utilitzar quan es vulgui, considerant sempre uns límits.

2.3 Propietats de les mescles bituminoses reciclades

A continuació es descriuran les principals propietats que es poden presentar en les mescles bituminoses convencionals per després centrar-nos en les característiques especials de les reciclades.

2.3.1. Estabilitat

Estabilitat o altrament anomenat Resistència a la deformació permanent, es la capacitat de suportar las càrregues del tràfic i resistir les tensions provocades amb una deformació tolerable.

Aquesta propietat depèn principalment de la cohesió i el grau de fricció intern de les partícules. Degut al comportament viscoelastoplàstic de la mescla, la cohesió augmenta amb la viscositat del betum i baixa amb la temperatura del paviment, mentre que el fregament intern augmenta amb la angulositat de les partícules i amb una textura superficial aspra. Aquesta combinació de fricció i cohesió interna evita que les partícules del àrid es desplacin unes respecte les altres degut a les forces exercides pel tràfic. El contingut de betum també fa augmentar gradualment la cohesió fins un determinat punt en el que la pel·lícula de betum té un cert espessor que provoca una pèrdua de fricció entre partícules.

La falta d'estabilitat causa roderes (deformacions plàstiques) longitudinals i ressalts transversals en zones on el esforços tangencials són elevats. Aquests efectes es produeixen per l'acció de càrregues lentes a altes temperatures.

L'estabilitat o càrrega de ruptura s'acostuma a avaluar amb assaigs de base empírica. Els més coneguts son els assaigs Marshall per mescles gruixudes i Hubbard-Field per mescles fines.

Algunes observacions que s'han donat lloc en mescles reciclades expressen que la resistència a les deformacions plàstiques probablement sigui bona per mescles amb un alt contingut de RAP degut a la presència de betum envellit i endurit. Tanmateix, l'ús de rejuvenidors de manera excessiva o amb una mala difusió, pot provocar debilitats en la mescla reciclada en front a la deformació plàstica, ja que els rejuvenidors actuen per estovar la mescla reciclada i redueixen la rigidesa d'aquesta.

2.3.2. Resistència a l'aigua

La humitat o les filtracions d'aigua en les diferents capes de la mescla bituminosa en servei és un dels principals mecanismes que provoca el seu deteriorament manifestant-se generalment amb una pèrdua de cohesió en la mescla i una pèrdua d'adhesió entre betum i els àrids, fenomen anomenat "stripping" (Rodrigo Miró Recasens, Teresa López Montero, 2017). Es poden apreciar les conseqüències a la il·lustració 2.1.

Varis estudis determinen que l'ús d'un lligant més viscos genera major resistència al dany per humitat. Els mecanismes de deteriorament per humitat en mescles asfàltiques s'inicien quan l'aigua arriba a l'interior de l'estructura del material i acaba amb les diverses manifestacions de danys en el paviment. Els estudis (Tarefder, Zaman i Hobson, 2003) expliquen que l'aigua genera una pèrdua de resistència en la interfase entre el lligant asfàltic i l'àrid. Això fa que la taxa d'acumulació de la deformació permanent augmenti degut a la pèrdua de cohesió de la mescla per humitat.

En el cas de les mescles bituminoses reciclades, trobem el RAP que està recobert per asfalt, per tant hi ha menys possibilitats de que l'aigua arribi a l'interior del àrid. Generalment doncs, les mescles amb alt contingut de RAP s'esperen que tinguin una alta resistència a l'aigua en una primera aproximació.

En canvi, altres estudis (Rondón-Quintana i Moreno-Anselmi, 2010) expliquen que el lligant asfàltic en presència d'aigua, modifica la consistència del betum i augmenta la seva rigidesa. Aquest augment provoca contraccions del lligant sense canvi de volum, donant lloc a pèrdues de betum envolt en l'àrid. En materials de RAP amb betum envellit i rígid, aquest procés anterior es preveu més devastador.



Il·lustració 2.1 - Efectes del stripping.

2.3.3. Rigidesa

La rigidesa ve definida per la relació entre tensió i deformació a una temperatura i temps de càrrega donats. La rigidesa de les mescles asfàltiques s'utilitza per l'anàlisi de la resposta del paviment al pas del trànsit.

El paràmetre amb més influència en el mòdul de rigidesa és la temperatura. Com menys temperatura, més alta és la rigidesa d'una mescla bituminosa. Altres paràmetres a tenir en compte són: la forma i mida dels àrids i la penetració del lligant.

Les mescles bituminoses reciclades amb alt percentatge de RAP solen mostrar un comportament altament rígid per l'envelliment del betum, en molts casos excessiu per complir la normativa. Les mescles han de tenir la suficient flexibilitat per que no es trenquin o fatiguin amb rapidesa. És cert que les mescles reciclades poden presentar un increment de la capacitat de suport de càrregues i la resistència a la deformació permanent degut a la seva rigidesa, però aquests en excés condueixen a danys prematurs en els paviments provocant la formació de fissures amb la possibilitat de fallada total.

És útil l'ús d'agents rejuvenidors per aconseguir un mòdul de rigidesa acceptable.

2.3.4 Resistència al lliscament

La resistència al lliscament és la capacitat d'una superfície per atenuar el lliscament de les rodes dels vehicles, especialment quan la superfície està mullada, de forma que puguin frenar amb seguretat. L'objectiu és que el pneumàtic es mantingui en contacte amb el paviment i no rodi per la pel·lícula d'aigua (aquaplaning).

Una superfície rugosa tindrà millor resistència al lliscament que una llisa. Per obtenir aquestes característiques s'ha d'avaluar la textura de l'àrid i la seva resistència a polir-se, així com la granulometria de la mescla.

En mescles bituminoses reciclades, s'ha de tenir en compte que el RAP tingui un alt coeficient de poliment accelerat i que la macrotectura de la mescla posada en obra sigui suficientment rugosa, vigilant els nivells de soroll al pas dels vehicles.

2.3.5 Resistència a la fatiga

La resistència a la fatiga es defineix com la resistència a la ruptura a flexió sota l'efecte de càrregues repetides del tràfic, manifestada per una pèrdua de rigidesa i posteriorment per una fissuració generalitzada.

Entre els factors que poden influir en la resistència a la fatiga d'una mescla destaca la porositat, en el sentit que quan el percentatge de buits d'una mescla augmenta, la resistència a la fatiga disminueix. Aquesta resistència també baixarà amb un envelliment del betum o un baix contingut del mateix. També disminuirà si s'ha practicat una mala compactació de l'explanada o el ferm.

Els principals deterioraments de les mescles bituminoses reciclades provenen per l'enduriment del betum del RAP, aquest és generalment menys flexible pel que fa augmentar la rigidesa de la mescla i en conseqüència pot causar danys per fatiga i fragilitat a baixa temperatura sobretot.

Els comportaments de les mescles reciclades varien molt de les d'una mescla convencional, encara no és del tot clar quin és el seu comportament físic i químic i de què depenen. Per això és important seguir elaborant investigacions i estudis per esclarir i tenir una major comprensió del comportament de les mescles reciclades.

2.4 Variables que afecten les propietats de les mescles reciclades

Per poder utilitzar més RAP en les mescles reciclades, és necessari saber quines variables afecten a la qualitat de la mescla. Conèixer les variables que impedeixen obtenir bons resultats en mescles reciclades és important per a l'hora de fabricar-les poder rectificar els aspectes negatius i així créixer en l'àmbit de les mescles reciclades per potenciar les seves avantatges de reducció d'ús d'energia, materials d'àrids i betums, estalvi econòmic i mediambiental.

Les principals variables de que depèn una mescla bituminosa reciclada de RAP són:

- Les propietats del betum envellit.
- El procés de mesclat entre materials nous i RAP: temps de mesclat i temperatura.

2.4.1 Propietats del betum envellit

La rigidesa del material bituminós per l'envelliment ve donat per la suma de l'envelliment químic i l'envelliment físic. Els mecanismes de volatilització i oxidació són de caire químic, mentre que l'enduriment estèric correspon a un reacondicionament estructural de caràcter físic (Rodrigo Miró Recasens, Teresa López Montero, 2017).

Els canvis en les propietats mecàniques de les mescles asfàltiques degut a l'envelliment, comencen durant la seva fabricació. Un cop compactades, l'oxigen és difós en l'interior de la mescla i es comença a donar el procés químic entre l'oxigen i la interfase entre l'àrid i el lligant, fenomen conegut com "envelliment oxidatiu". És una de les causes més importants que provoquen l'enduriment i la fragilitat en les mescles reciclades, derivant en la seva resistència a la fatiga i fissuració.

Els processos d'enduriment per canvis en el comportament reològic i en la composició del betum poden afectar de forma que les mescles reciclades presentin un increment de la capacitat de suport de càrregues i la resistència a la deformació permanent degut a la seva rigidesa, però aquests en excés condueixen a danys prematurs en els paviments provocant la formació de fissures amb la possibilitat de fallada total.

L'efecte de l'envelliment del betum combinat amb les càrregues del tràfic sobre el paviment acostuma a reduir la seva vida útil. L'envelliment provoca que la mescla perdi la seva ductilitat, tornant-se més propensa a patir danys per fatiga i pèrdua del seu potencial de recuperació.

La majoria dels paràmetres d'avaluació del envelliment consisteixen en mesures de la consistència del betum com la penetració, viscositat i ductilitat.

2.4.2 El procés de mesclat entre materials nous i RAP

Quan el procés de mesclat es dur a terme, l'àrid verge i el nou betum es barregen amb el RAP, es busca que el betum vell que conté el RAP es refongui amb el nou, però aquest ideal no acostuma a ser així. Per aconseguir una mescla reciclada ben homogènia i amb un alt aprofitament del betum del RAP són necessàries unes condicions de temps i temperatura de mesclat adequades:

2.4.2.1 *Temperatura de mesclat*

L'efecte de la temperatura de mesclat és molt important ja que afecta directament al envelliment del betum del RAP i el reblandiment i grau de mesclat d'ambdós betums. Com més alta temperatura pateixi el betum, més serà el grau d'envelliment que patirà aquest. La temperatura de mesclat afecta de manera extrema a les propietats del betum.

Un procés molt utilitzat per la fabricació d'una mescla asfàltica reciclada és incorporar el RAP a temperatura ambient i barrejar-lo amb els àrids verges sobreescalfats, de manera que quan entrin en contacte, el RAP s'escalfa només per conducció, evitant l'exposició del RAP al foc del assecador. La temperatura de sobreescalfament de l'àrid d'aportació depèn de les característiques del RAP i del seu percentatge en la mescla.

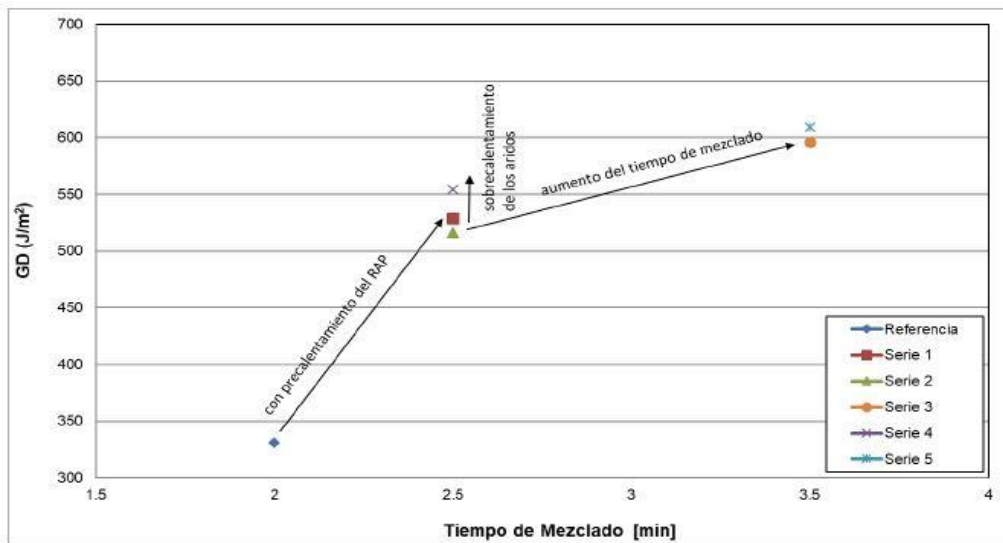
2.4.2.2 *Temps de mesclat*

El temps de mesclat és una variable important per l'escalfament homogeni entre els components de la mescla. Com més percentatge de RAP s'utilitzi en la mescla més complicat serà la difusió entre el lligant nou i el vell. Per un altre banda, també es necessitarà majors temps de mesclat per aconseguir millors transferències de betum quan existeix una disminució del sobreescalfament dels àrids verges.

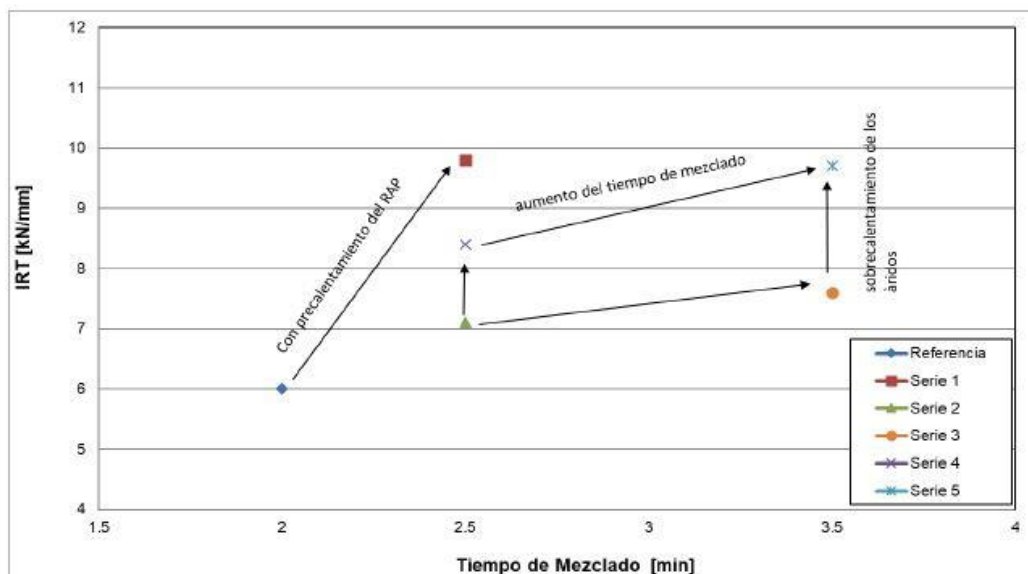
És molt important que per aconseguir un bon resultat en les mescles reciclades, el lligant verge pugui interactuar amb el betum del RAP amb la missió de reduir la seva viscositat i recuperar les seves propietats.

Durant el temps de mesclat s'espera que el RAP es mescli amb els àrids verges i el nou lligant, donant temps suficient per que l'asfalt envellit redueixi la seva viscositat per després barrejar-se amb el betum verge i mobilitzar-se per que els àrids verges i àrids del RAP quedin recoberts per un espessor d'una capa homogènia "envuelta".

Un estudi recent del 2018 realitzat al laboratori de camins de la UPC per Pérez Madrigal, va analitzar entre altres coses, l'efecte de les condicions de fabricació de les propietats de les mescles bituminoses reciclades amb percentatges de 20, 40 i 60% de RAP. Aquest estudi va concloure que l'augment del temps de mesclat i la temperatura millorava els resultats de les mescles reciclades i obtenia un comportament similar al de les mescles convencionals. Preescalfant el RAP aconseguia difondre millor el lligant d'aportació i també mobilitzar més betum envellit. Augmentant els temps de mesclat provocava que les aglomeracions de RAP comencessin a separar-se i d'aquesta manera aconseguir mobilitzar una major quantitat de betum.



Il·lustració 2.2 – Influència de la temperatura i el temps de mesclat en el GD de mescles reciclades amb 40% de RAP i a 20°C (Pérez Madrigal, 2018).



Il·lustració 2.3 – Influència de la temperatura i el temps de mesclat en el IRT de mescles reciclades amb 60% de RAP i a 20°C (Pérez Madrigal, 2018).

CAPÍTOL 3. ESTUDI EXPERIMENTAL

3.1 Introducció

En aquest capítol parlarem del desenvolupament del pla experimental, on donarem una descripció detallada del treball pràctic que s'ha dut a terme durant la execució de la present tesis.

Descriurem el pla de treball que hem dissenyat i la seva execució pas per pas, explicant els procediments de fabricació, assaigs de provetes i obtenció de resultats.

L'objectiu final de l'estudi és definir les propietats més crítiques (resistència a la fissuració i ductilitat) de la mescla bituminosa reciclada en calent segons el percentatge de RAP utilitzat, comparant-la amb la mateixa mescla sense reciclar.

Els assaigs realitzats per a l'obtenció de dades han estat els propis per l'obtenció del contingut de buits (%H) i l'assaig a tracció directa anomenat Fènix.

3.2 Pla de treball

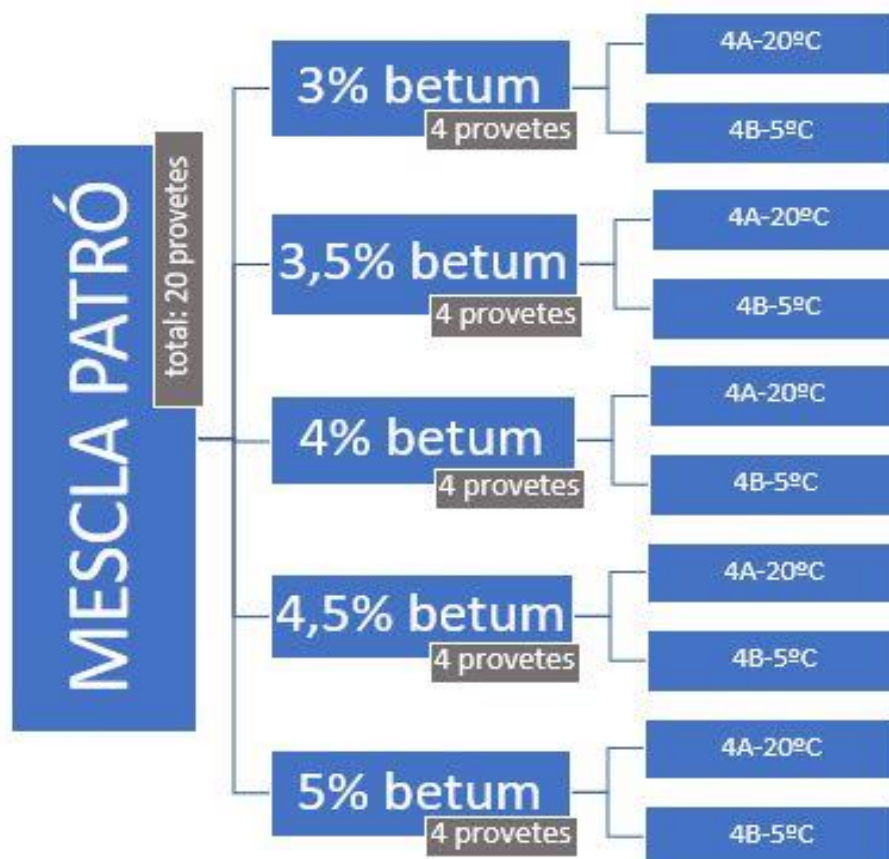
El pla de treball consisteix en la elaboració en primer lloc d'una Mescla Patró o de referència, formada per 20 provetes en 5 sèries de 4 provetes amb un contingut de betum del 3 – 3,5 – 4 – 4,5 i 5%, respectivament. Es fabrica una mescla bituminosa en calent per capa de rodament tipus AC16S.

Un cop realitzada la Mescla Patró, es procedeix a fabricar les provetes de mescla bituminosa reciclada en calent. Es fabriquen 9 series de 4 provetes variant el percentatge de RAP entre un 20% fins a un màxim 60% de RAP. Aquestes són fabricades buscant un percentatge de betum total del 4,5% contant amb el que aporta el RAP. Les provetes són de les mateixes dimensions que les de la Mescla Patró.

D'aquesta manera s'obté un total de 56 provetes que es tallaran degudament per la meitat, quedant nombrades unes cares A que es trencaran pel mètode Fènix a 20°C i les cares B a 5°C.

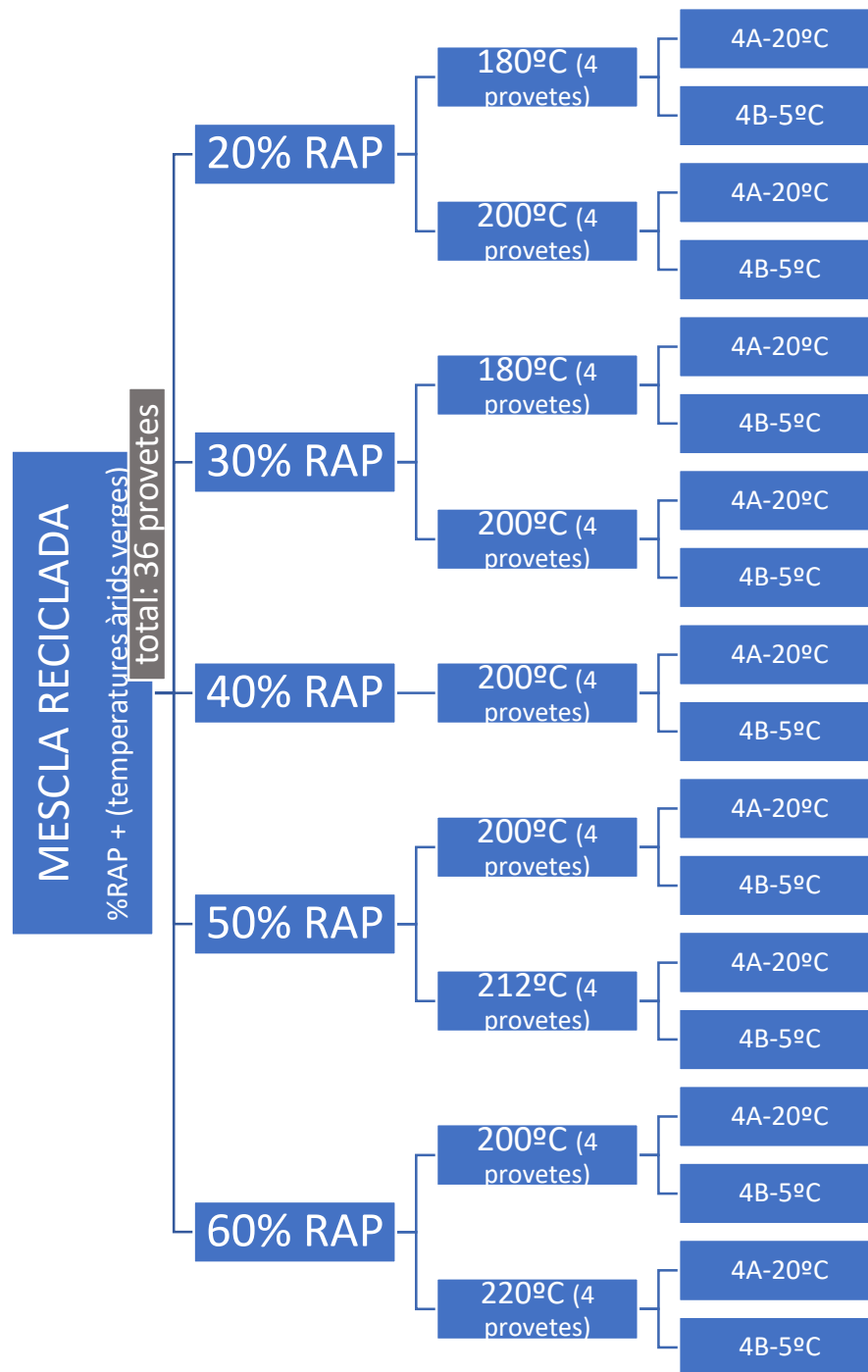
Tot seguit es poden apreciar els esquemes de producció de provetes de les dues mescles seguint el pla de treball.

En primer lloc, en la il·lustració 3.1 es presenta l'esquema de producció de la mescla Patró:



Il·lustració 3.1 – Esquema de producció mescla Patró.

A continuació, en la il·lustració 3.2 es pot veure l'esquema de l'ordre de producció de la mescla reciclada:



Il·lustració 3.2 – Esquema de producció mescla reciclada.

Un cop obtinguts els resultats dels assaigs de cada proveta, els processem mitjançant un excel preparat pel processament de dades de l'assaig Fènix i es descarten aquells assaigs que presentin anomalies o errors en la seva execució. Després s'analitzen i es treuen conclusions.

3.3 Característiques de les provetes i els seus materials

3.3.1 Resum característiques provetes

El tipus de mescla bituminosa que s'ha utilitzat per l'estudi ha estat un AC16S, totes les mescles tindran una mida d'àrid màxim de 16mm i una granulometria semidensa tal i com es designa en la Norma UNE-EN 13108-1. La granulometria s'ha definit per tanteig en una etapa anterior.

Resum de les característiques Mescla Patró:

La mescla Patró s'estructura de 5 sèries de 4 provetes amb percentatges de lligant de 3 - 3,5 - 4 - 4,5 - 5 (%).

- Mescla tipus AC16S.
- Àrid de tipus Calcària (165°C).
- Betum 35/50 (155°C) amb continguts de 3 - 3,5 - 4 - 4,5 - 5 (%).
- Fíller d'aportació: Carbonat càlcic.
- Temps de mesclat 2,5 min (mecànic).
- Temperatura de mesclat (155°C).

Taula 3.1: Granulometria definida: Provetes de 1100 grams d'àrid.

Tamiz (mm)	Pasa (%)
22	100
16	95
8	67,5
4	42,5
2	31
0,5	16
0,25	11
0,063	5,5

Resum de les característiques mescla Reciclada:

- Betum verge: 160/220 (150°C).
- Temps de mescla: 3 min (mecànic).
- RAP (120 °C constant).

Taula 3.2: Temperatura dels àrids per les diferents combinacions de % RAP.

RAP temp. Constant a 120°C			
RAP%	Temperatures àrid verge °C		
20	180	200	
30	188	200	
40		200	
50		200	212
60		200	220

Taula 3.3: Dosificació de les mescles reciclades: Granulometria dels àrids verges, percentatge de RAP i lligant nou a afegir.

Mescla reciclada	20% RAP	30% RAP	40% RAP	50% RAP	60% RAP
Tamís (mm)	Passa (%)	Passa (%)	Passa (%)	Passa (%)	Passa (%)
22	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
16	93,8	92,9	91,7	90,0	87,5
8	62,4	58,7	53,8	47,0	36,8
4	38,6	35,9	32,2	27,0	19,3
2	28,0	25,9	23,0	19,0	13,0
0,5	14,0	12,6	10,7	8,0	4,0
0,25	9,0	7,6	5,7	3,0	0,0
0,063	4,3	3,4	2,3	0,7	0,0

Àrids (%)	76,2	66,4	56,5	46,5	36,5
RAP ret 4 mm (%)	12,5	18,9	25,3	31,7	38,2
RAP passa 4 mm (%)	7,7	11,6	15,5	19,4	23,4
Betum nou (%)	3,6	3,1	2,7	2,2	1,7

3.3.2 Materials utilitzats

3.3.2.1 Àrids

Per la fabricació de la mescla Patró s'ha utilitzat àrid verge de tipus calcari, s'obtenen de la trituració de pedra de cantera o grava natural, no presenten argiles, material vegetal, llims ni altres materials no classificats.

Els àrids provinents de roca calcària tenen unes característiques molt positives per la fabricació de mescles bituminoses degut a la seva major adhesivitat. A part, és un tipus d'àrid hidròfob, que repel·leix l'aigua. Això és important en la capa de rodament ja que ajuda a millorar l'adhesivitat àrid-lligant i afavoreix la durabilitat.

Els àrids utilitzats són provinents de la cantera Foj, ubicats a Vallirana (Barcelona). Es poden apreciar en la il·lustració 3.3.



Il·lustració 3.3 – àrids calcaris verges.

3.3.2.2 RAP (Reclaimed Asphalt Pavement)

El RAP és el material a reciclar que consisteix normalment en capes bituminoses que han estat fressades en un espessor determinat. El RAP després es triturat o tamisat fins una mida màxima de 14-20mm, produint-se durant el procés la disgregació en els seus components originals i la ruptura d'algunes partícules de les fraccions més grosses.

El RAP utilitzat en aquest cas té les següents característiques:

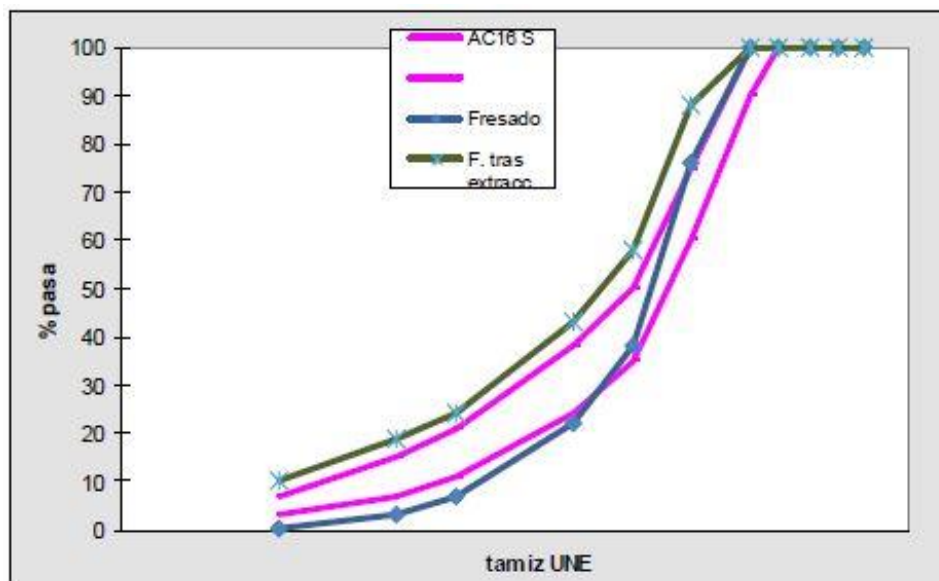
- Anàlisi granulomètric fressat:

A continuació, en la taula 3.4 es mostra la granulometria del fressat abans i després de la seva extracció i es compara segons l'interval de la AC16S.

Taula 3.4: Anàlisi granulomètric del RAP.

TAMIZ UNE	Fresado	F. tras extracc.	AC16 S	
60	100	100		
45	100	100		
32	100	100		
22	100	100	100	100
16	100	100	90	100
8	76	88	60	75
4	38,0	58	35	50
2	22,0	43,0	24	38
0,5	7,0	24,0	11	21
0,25	3,0	19,0	7	15
0,063	0,4	10,3	3	7

SUPERFICIE ESPECIFICA.- 17,06 m²/Kg



Il·lustració 3.4 – Gràfic granulomètric del RAP.



Il·lustració 3.5 – Mostra de RAP.

Taula 3.5: Caracterització del lligant extret del fresat.

<i>Propietat/paràmetre</i>	<i>Norma</i>	<i>Valor</i>
<i>Lligant extret (% s/m)</i>		<i>4.5</i>
<i>Penetració (0,1 mm)</i>	<i>EN 1426</i>	<i>4</i>
<i>P. R A&Bt (°C)</i>	<i>EN 1427</i>	<i>80.3</i>

3.3.2.3 Filler

Pel filler s'ha utilitzat Carbonat Càlcic. És un compost químic que es troba en la naturalesa formant estructures geològiques, les més comuns són de roca calcària i marbre. La seva aplicació en el món de la construcció és molt extensa, com per exemple en la fabricació de ciment. En la il·lustració 3.6 es mostra el seu aspecte.



Il·lustració 3.6 – Filler (Carbonat Càlcic).

3.3.2.4 Lligant bituminós

Pel nostre estudi s'han utilitzat dos betums diferents, un per l'elaboració de la Mescla Patró i l'altre per la Mescla Reciclada.

En primer lloc s'ha utilitzat un betum 35/50 per la mescla Patró. D'altra banda, per les Mescles Reciclades s'ha utilitzat un betum 160/220. Els dos es tracten de betums per mescles asfàltiques convencionals, però per la mescla reciclada s'ha optat per un betum d'aportació més tou per compensar el grau d'envelliment que presenta el RAP.

Les característiques dels betums asfàltics es recullen en la taula d'especificacions del PG-3 (Art. 211).

3.3.3 Anàlisi de la penetració i justificació de les temperatures addicionals d'estudi per els percentatges 20, 30, 50 i 60%

Amb la informació disponible sobre els betums a utilitzar, així com el betum contingut en el RAP, s'ha calculat el percentatge de RAP que podria mesclar-se per obtenir una penetració similar a la utilitzada en la mescla patró, fent un ús de la ecuació del Anex A de la norma EN13108-1, Mescles bituminoses. Especificacions de materials. Part 1: Formigó bituminos.

Aquesta ecuació permet obtenir la penetració resultant de la mescla de dos betums, assumint que el grau de mesclat entre ells és total.

$$a \cdot \lg pen_1 + b \cdot \lg pen_2 = (a + b) \cdot \lg pen_{mez}$$

On:

- Pen_{mez} és la penetració del lligant en la mescla reciclada
- Pen_1 : és la penetració del lligant recuperat del RAP
- Pen_2 : és la penetració del lligant afegit
- A i B són el percentatges en pes del lligant del RAP (a) i del lligant afegit (b) en la mescla, sent $(a+b)=1$

Sent les penetracions del betum de la mescla patró de 39, la del betum afegit 184 i la del RAP, 4 dècimes de mm, deixant la variable b expressada com (1-a), es possible aïllar a, que dona un 40% de betum del RAP.

A més a més, tenint en compte que el percentatge de betum en el RAP és el mateix que el definit a la mescla patró, 4,5%, es pot deduir que el percentatge de RAP a afegir també és 40%.

A partir d'aquesta dosificació obtinguda i raonant que els continguts de RAP superiors i inferiors al 40% podran aconseguir propietats similars variant la temperatura d'escalfament dels àrids d'aportació verges, és que s'ha afegit aquesta última variable i s'han estudiat les temperatures addicionals de 180°C per la mescla de 20% de RAP, 188°C per la mescla de 30% de RAP, 212°C per la mescla de 50% de RAP i 220°C per la mescla de 60% de RAP.

3.4 Fabricació

3.4.1 Tamisat dels àrids i RAP

Per la preparació dels àrids es procedeix a tamisar-los segons la mida, seguint la granulometria exigida. Per dividir els àrids en els diferents usos es fa ús de la tamisadora mecànica vibratòria amb els tamisos que marca la normativa UNE. Es representa en la il·lustració 3.7 la tamisadora mecànica.

El seu funcionament es molt senzill, en primer lloc es col·loquen els tamisos, després s'aboquen els àrids a la part de sobre i s'activa la màquina. Poc a poc, amb la vibració que va produint l'aparell, els àrids van filtrant pels diferents tamisos fins quedar atrapats en el tamís de forats més petits al seu diàmetre. Un cop s'acaba el procés, els àrids es disposen en recipients , un per cada diàmetre. I en cas d'estar humits, s'assequen en estufes hermètiques a 100°C durant 24h.

Pel RAP es fa el mateix procediment però només amb el tamís 4mm. Quedant dos recipients, un amb el RAP retingut del 4mm i l'altre del passa 4mm.

Es recomana fer ús de guants i mascareta.



Il·lustració 3.7 –Tamisadora mecànica.

3.4.2 Pesat dels àrids

Un cop tenim els àrids i RAP preparats i dividits segons la granulometria, ens disposem a pesar a la balança assegurant-nos de que estar tarada i calibrada, posem un recipient i anem pesant per cada mida d'àrid el seu pes corresponent seguint la granulometria calculada (Il·lustració 3.8). Es comença pels àrids de diàmetre major (passa 2 / retingut 16), fins el més petit a excepció del filler, que es posarà a part en gots de plàstic i s'unirà a la mescla a l'hora del procés de mesclat.



Il·lustració 3.8 – Pesat dels àrids amb balança.

3.4.3 Fabricació de la mescla bituminosa

Quan ja tenim els àrids pesats per una banda i el RAP per una altra, els hem de posar a diferents forns ja que estaran a diferent temperatura, els àrids verges en un forn a les diferents temperatures segons el tipus de mescla, els recipients amb RAP es desaran a un altre forn a 120°C sempre que fabriquem provetes de mescla reciclada. Per separat, en un tercer forn hi deixarem el betum a 155°C en el cas del 35/50 i el més tou de 160/220 pel RAP a una temperatura de 150°C si anem a fabricar la mescla reciclada.

Els àrids i RAP s'han de deixar a els forns 4 hores abans de fabricar la mescla per estar a la temperatura demanada. El betum el deixem de 2 a 4 hores com a màxim per evitar que s'envelleixi. Per altra banda, els motlles de les provetes, el braç de la mescladora mecànica i la cassola on s'aboquen els materials també hauran d'estar a dins del forn a 150°C per tal d'igualar les temperatures a l'hora de fabricar.

Abans de començar, necessitarem tallar dos cercles de paper del diàmetre de la proveta, un per protegir la part superior i l'altre per la inferior, d'aquesta manera durant el procés de compactació Marshall evitarem que la mostra s'espallii. Els haurem de preparar abans de començar la fabricació de la mescla, i un parell per cada proveta que anem a fabricar.

Per començar els procés, traurem del primer forn un recipient amb àrids verges i els abocarem a l'olla ja calenta, si estem fabricant la mescla reciclada haurem de treure un recipient del segon forn amb el RAP i abocar-lo a la olla, tot seguit posem l'olla a la

balança i la tarem, traiem de la tercera estufa la llauna de betum per abocar la quantitat necessària de la mescla, ajudant-nos de la balança per mesurar els grams de betum.

Després s'hi aboca el filler i es col·loca l'olla a la màquina de mesclat mecànic amb el seu escalfador (Il·lustració 3.9) per no perdre temperatura i es prem el botó per iniciar el procés de mesclat. Amb l'ajuda d'un cronòmetre esperarem 2 min i 30 segons en els casos de fabricació de Mescla Patró i 3 minuts en els casos que fabriquem mescla reciclada.



Il·lustració 3.9 – Mescladora mecànica amb l'olla i planxa.

Mentre es va mesclant la mesclant, anirem preparant la base de la proveta, el motlle cilíndric, el coll del motlle i el paper circular al fons de la base. Aquest material es deixa sobre la planxa calenta preparat per quan s'acabi el procés de mesclat.

Un cop passat el temps de mesclat, es treu l'olla de la màquina i s'aboca el material dins del motlle calent i es posa el cercle de paper a sobre.

Ràpidament es porta la proveta calenta a la compactadora Marshall (Il·lustració 3.10), on la deixarem compactar mitjançant 75 cops per cara, un cop s'acaben els 75 primers cops, s'ha de donar la volta a la proveta manualment i tornar-la a deixar a la compactadora pels altres 75 cops seguint la normativa UNE-EN 12697-30.



Il·lustració 3.10 – Compactadora Marshall.

Un cop s'acaba la compactació, es deixen sobre la taula. Només queda arrancar els papers circulars de les dos cares, nombrar la proveta amb un guix i deixar que es refredin durant una dia.

Deixat passar un dia, es pot desemmotllar la proveta amb un gat hidràulic preparat per això.

Aquest procés es repeteix per totes les 56 provetes a fabricar.

3.5 Densitats i Contingut de buits (%H)

A continuació es fa una descripció del procediment previ pel càlcul del contingut de buits i densitat màxima i aparent per cada proveta.

Al finalitzar la fabricació de les provetes i ja desemmotllades, es procedeix a fer els càlculs de tres altures de proveta equidistants amb el peu de rei, pel càlcul es fa la mitjana aritmètica de les tres. Després es pesa la proveta a la bàscula i apuntarem el pes en sec (g).

A partir d'aquí, procedim a fer el càlcul del pes submergit i el pes amb superfície saturada seca.

Per calcular el pes submergit en aigua, haurem de disposar d'un cubell amb aigua per col·locar la proveta sobre una reixa enganxada a la bàscula i assegurar-nos de que la proveta està en contacte directe amb l'aigua per totes les cares. Quedarà submergida 30 min per tal de donar temps a que l'aigua pugui filtrar dins de la proveta. Passat el temps, apuntarem el pes submergit (g). Un cop tinguem el pes submergit, traurem la proveta de l'aigua, la sacarem superficialment amb un drap i la tornarem a pesar per obtenir el pes en superfície saturada seca (g).

Amb totes aquestes dades podem procedir al càlcul de la densitat aparent, que es defineix per la fórmula següent:

$$\rho_{ap} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \cdot \rho_w$$

On:

- ρ_{ap} : densitat aparent (g/cm^3)
- m_1 : massa proveta seca (g)
- m_2 : massa proveta submergida en aigua (g)
- m_3 : massa proveta superfície saturada seca (g)
- ρ_w : densitat del aigua (g/cm^3)

Un cop hem calculat la densitat aparent, toca calcular la densitat màxima. Per fer el càlcul necessitem haver creat una mescla més per cada sèrie de la Mescla Patró (3 – 3,5 – 4 – 4,5 i 5% de betum) i una mescla més també per cada sèrie de la mescla reciclada amb cada percentatge (20, 30, 40, 50 i 60% de RAP). Cada mostra de cada mescla es fabricarà de la mateixa manera que les demés provetes però sense arribar a posar-les en el motlle ni a compactar-les. En canvi, deixarem la mescla escampada en una safata metàl·lica per que es refredi. Un cop refredada, procedim a desgranar-la manualment

deixant totes les partícules més grans de 3mm separades entre elles tal i com descriu la UNE-EN 1297-5:2003+A1).

En les imatges es poden veure totes les mostres de cada Mescla Patró:



Il·lustració 3.11 – Mostra desgranada Mescla Patró per densitat màxima.

Un cop es té les mostres desgranades (il·lustració 3.11), agafarem dos picnòmetres i els pesarem, després posarem la meitat d'una mostra en un picnòmetre i l'altre meitat en un picnòmetre diferent. Tornarem a pesar els picnòmetres amb la mescla al seu interior i tot seguit repetirem l'operació però amb els picnòmetres amb la mescla i aigua destil·lada. S'hauran de deixar durant 30 minuts en un bany d'aigua a temperatura 25°C.

Els requisits demanen que cada picnòmetre estigui connectat a una màquina que fa el buit per extraure l'aire que queda atrapat a l'interior de la mostra. Cada cinc minuts s'ha d'agitar el picnòmetre per ajudar al procés del buit (il·lustració 3.12). Quan haguem acabat el procediment dels 30 minuts, traurem els picnòmetres del bany, els acabarem d'omplir d'aigua destil·lada fins on marca el picnòmetre i els pesarem a la bàscula.



Il·lustració 3.12 – Procés del buit per densitat màxima.

Les dades obtingudes durant el procés ens serviran per calcular la densitat màxima, definida per la fórmula següent:

$$\rho_{max} = \frac{m2 - m1}{Vp - \left(\frac{m3 - m2}{\rho_w}\right)}$$

On:

- ρ_{max} : densitat màxima (g/cm^3)
- $m1$: massa picnòmetre (g)
- $m2$: massa picnòmetre + mostra de la mescla (g)
- $m3$: massa picnòmetre + mostra de la mescla i aigua destil·lada (g)
- ρ_w : densitat del aigua (g/cm^3)
- V_p : Volum del picnòmetre (cm^3)

Amb la densitat aparent i la densitat màxima calculades, podem obtenir el percentatge de buits mitjançant la fórmula donada per la normativa UNE-EN 12697-8:

$$\%H = \frac{\rho_{max} - \rho_{ap}}{\rho_{max}} \cdot 100$$

3.6 Assaig Fènix

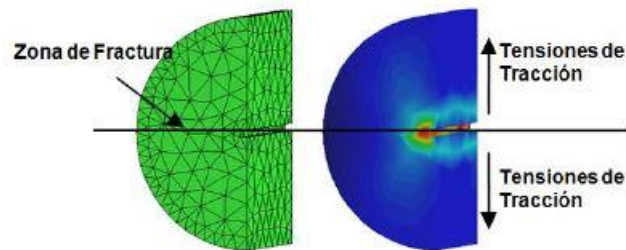
3.6.1 Introducció

L'assaig Fènix és un assaig de tracció directa desenvolupat al Laboratori de Camins de la UPC. Es tracta d'un assaig experimental, que consisteix en determinar l'esforç necessari per fracturar una proveta semicilíndrica, aplicant una esforç de tracció en el seu pla diametral (Pérez-Jiménez, et al., 2010-2013). En la Il·lustració 3.13 es representen les tensions de tracció en l'assaig Fènix.

L'assaig permet calcular la tenacitat i energia dissipada en la fractura de les mescles bituminoses. És un assaig senzill, que permet detectar l'efecte de la composició i la naturalesa dels components de la mescla tenen en el seu comportament, en especial el

seu mòdul de rigidesa, l'energia dissipada i la tenacitat. (Pérez-Jiménez, et al., 2010-2013).

L'assaig Fènix també serveix doncs per caracteritzar comportaments de fissuració de mesclades reciclades, considerant variables com el contingut de lligant i temperatura d'assaig.

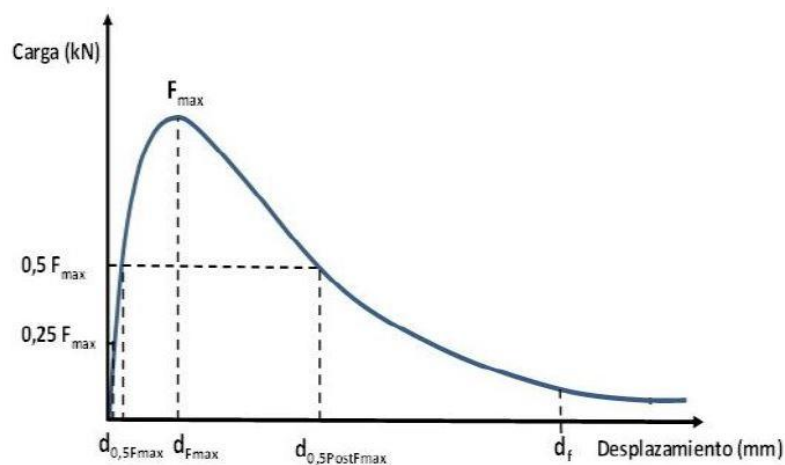


Il·lustració 3.13 –Tensions de tracció assaig Fènix (Pérez-Jiménez, et al., 2010).

3.6.2 Descripció del procediment

Per la realització de l'assaig Fènix, es necessari la fabricació de les provetes cilíndriques mencionades anteriorment en l'apartat 3.4.3 *Fabricació de la mescla bituminosa*, aquestes provetes hauran de ser tallades per la meitat i amb una incisió de 6mm de profunditat per l'eix central. Les cares planes de la mitja proveta s'enganxen degudament a unes plaques metàl·liques dissenyades per ser subjectades correctament durant l'assaig Fènix en els ancoratges de la premsa. L'assaig es realitza amb càrregues tensionals constants de 1mm/min i la temperatura desitjada.

D'aquest assaig obtenim una corba Càrrega-Desplaçament com la següent:



Il·lustració 3.14 –Gràfic Càrrega-Desplaçament (Pérez-Jiménez, et al., 2010).

Els paràmetres mecànics que obtenim són els següents:

- La càrrega màxima a tracció ($F_{m\grave{a}x}$) registrada en l'assaig de tracció directa (kN).
- El desplaçament a càrrega màxima ($d_{F_{m\grave{a}x}}$) realitzat pel pistó un cop registrada la càrrega màxima a tracció (mm).
- La resistència a tracció (R_T) que es la relació entre càrrega màxima ($F_{m\grave{a}x}$) i l'àrea de fractura (MPa).

$$R_T = \frac{F_{m\grave{a}x}}{S}$$

On:

- R_T : resistència a tracció (MPa)
 - $F_{m\grave{a}x}$: Càrrega màxima a tracció (Kn)
 - S : Superfície de rotura de la proveta (mm²)
-
- L'energia de fractura (G_D) : Està representada per la integral de l'àrea sota la corba de càrrega-desplaçament, dividida per la superfície de fractura.

$$G_D = \frac{\int_0^{d_f} F(x) dx}{S}$$

On:

- G_D : energia total de fractura per unitat de superfície en el procés de fissuració (J/m²)
- X : Desplaçament (mm)
- d_f : Desplaçament final d'assaig (mm) $d_f = 4\text{mm}$
- S : Superfície de fractura de la proveta (mm²)

- Desplaçament al 50% de la càrrega màxima postpic (d_{50PM}) mm és el registrat per la mescla un cop el valor de la càrrega ha disminuït a la meitat de la càrrega màxima. És el paràmetre principal per poder determinar la deformació patida. Com més petit sigui el valor, més fràgil serà la mostra.
- El Desplaçament de tenacitat (mm) (DT): És la diferència de desplaçament entre el desplaçament de càrrega a 50% en la fase de fractura

$$DT = d_{50pm} - d_{max}$$

On:

- DT: Desplaçament tenacitat (mm)
 - d_{50pm} : Desplaçament al 50% de la càrrega màxima en la fase de fractura (mm)
 - d_{max} : Desplaçament a càrrega (mm)
- Índex de rigidesa (IRT) és la relació entre el valor mig de la càrrega màxima i el desplaçament a aquest valor de càrrega abans de la càrrega màxima. Com menor sigui, major flexibilitat té la mescla.

$$IRT = \frac{F50 - F25}{1000 \cdot S (d50 \cdot d25)} \cdot$$

On:

- IRT: Índex de rigidesa a tracció (MPa/mm).
- F_{max} : Càrrega màxima a tracció (KN).
- h: espessor de la proveta (m).
- L: Longitud inicial del radi reduït (m).
- Δ_m : desplaçament abans de la càrrega màxima a $1/2 F_{max}$ (mm).

3.6.2 Procediment per assajar les provetes

Si seguim on ho hem deixat en l'apartat 3.4.3, un cop tenim les provetes fabricades, desemmotllades i hem pres les mesures per l'obtenció del càlcul de contingut de buits i la densitat màxima, toca tallar les provetes per la meitat i realitzar una incisió en l'eix central de 6mm en la cara plana del mateix tall. Quan ja tinguem el tall fet (il·lustració 3.15), haurem de prendre les mesures amb el peu de rei del radi de la semicircumferència i la distància des de la incisió de 6 mm fins l'altre extrem per obtenir la distància de ranura.



Il·lustració 3.15 – Provetes de Mescla Reciclada tallades.

Un cop tinguem les provetes tallades i seques, podrem procedir a enganxar-les. Per enganxar-les necessitarem dos plaques metàl·liques. Les plaques hauran de ser llimades amb paper de vidre i netejades amb diclorometà per no tenir problemes de desenganxar-se a l'hora d'assajar.

Per continuar s'haurà de preparar una resina epoxi per enganxar les provetes. La resina es prepara amb 3 parts del producte Sikadur 31EF component A i 1 part del component B, es calcula uns 10g de resina per proveta.



Il·lustració 3.16 – Provetes de Mescla Reciclada enganxades en plaques.

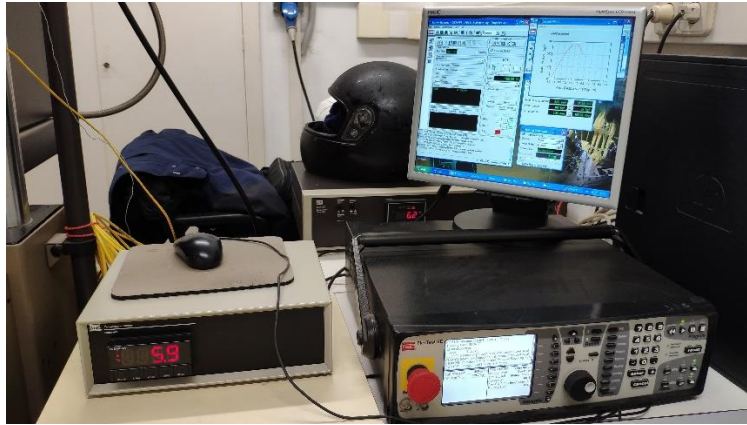
Per enganxar les provetes, disposarem les plaques ben col·locades i amb l'ajuda d'una guia metàl·lica deixarem les provetes centrades i les plaques totes amb la mateixa equidistància. La resina s'unta a la part plana de cada costat de la proveta deixant la zona de la incisió sense afectar. Un cop haguem enganxat una a una cada proveta (il·lustració 3.16), deixarem 24h sense tocar-les, després les deixarem 24h més a la nevera (il·lustració 3.17) a temperatura d'assaig (20°C cares A i 5°C cares B).



Il·lustració 3.17 – Provetes de Mescla Reciclada en nevera a 20°C.

Passat el temps de 48h, les provetes ja estan acondicionades per assajar. Per començar en l'assaig Fènix, haurem de regular la temperatura a 5°C o 20°C de la cabina on té lloc l'assaig. Després ja podem agafar la proveta, col·locar-la en el suport de la premsa inferior i superior, quedant en posició vertical. Per tal de que les plaques estiguin en tensió, aplicarem una força mínima de 3kN prèvia al assaig. Per continuar tancarem la porta de la cabina i revisarem que la temperatura sigui la correcta per al nostre assaig, ja podem iniciar l'assaig, que aplicarà un esforç de tracció a velocitat constant de 1mm/min.

Al acabar l'assaig, les plaques es netegen per reutilitzar i la mescla trencada es llença.



Il·lustració 3.18 – Monitor d'assaig Fènix.



Il·lustració 3.19 – Inici i final de l'assaig Fènix.

CAPÍTOL 4. RESULTATS

4.1 Introducció

En aquest apartat es descriuen i s'analitzen els resultats obtinguts en els assaigs que s'han dut a terme en aquesta investigació.

En primer lloc, es recullen i s'analitzen els resultats de les propietats volumètriques de les mescles considerades en aquest estudi.

En segon lloc, es presenten els resultats del estudi de les seves propietats mecàniques. Dins d'aquest apartat s'analitza principalment l'efecte del contingut de RAP en les mescles bituminoses. En segon pla s'examina l'efecte de la variació de la temperatura dels àrids verges d'aportació en la fabricació de la mescla reciclada.

4.2 Propietats volumètriques

En aquest apartat es realitza un anàlisi de les propietats volumètriques de les mescles estudiades: mescla patró fabricada amb diferents percentatges de lligant i mescla reciclada amb diferents percentatges de RAP per una mateixa temperatura dels àrids verges, així com variant la temperatura.

Així, la taula 4.1 es mostra els valors mitjos del Contingut de buits de les provetes de mescla bituminosa, així com la seva desviació típica per la Mescla Patró fabricada amb diferents percentatges de lligant.

Taula 4.1: Contingut de buits (%H). Mescla Patró.

Contingut Lligant mescla patró (%)	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
Contingut de buits (%)	8,3	5,7	3,6	2,6	1,2
σ	0,5	0,4	0,2	0,2	0,1

En la taula 4.2 es presenten els valors mitjos del Contingut de buits i la desviació típica de les provetes de mescla bituminosa reciclada fabricada amb diferents percentatges de RAP quan la temperatura dels àrids verges per la fabricació de la mescla era de 200°C.

Taula 4.2: Contingut de buits (%H). Mescla Reciclada Principal.

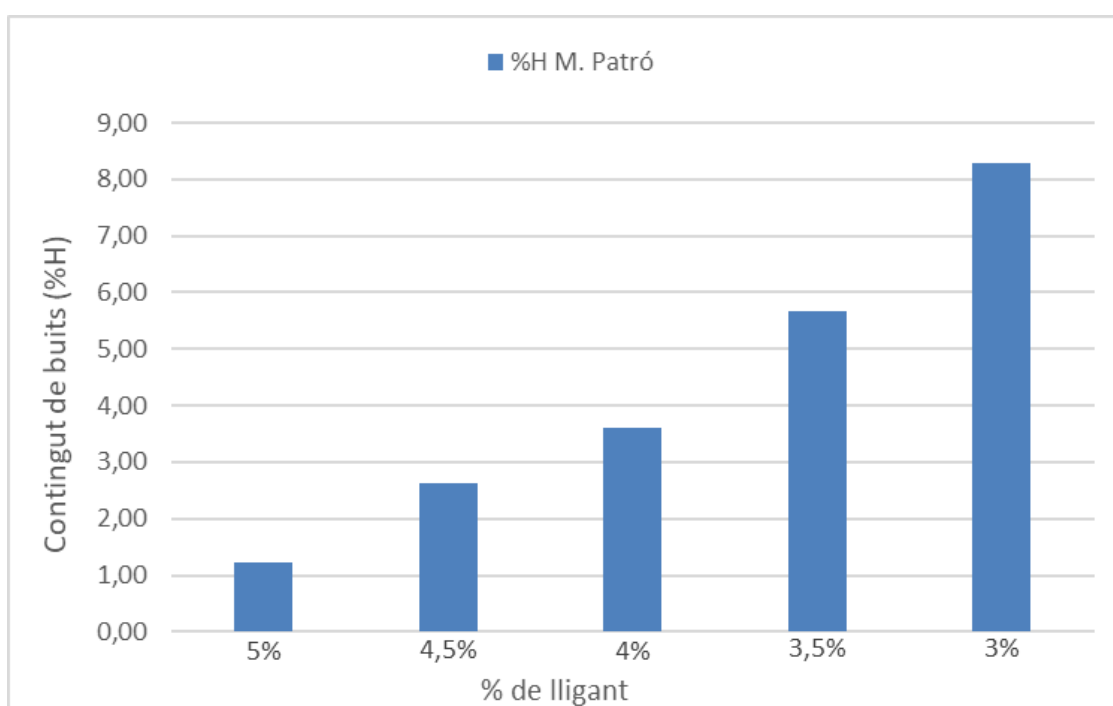
Contingut de RAP mescla reciclada (%)	20	30	40	50	60
Contingut de buits (%)	3,8	4,3	5,4	6,7	7,6
σ	0,2	0,1	0,5	0,1	0,4

Per últim, la taula 4.3 mostra els valors mitjos del Contingut de buits de la mescla reciclada fabricada amb diferents percentatges de RAP on a més a més, s'ha variat la temperatura dels àrids verges.

Taula 4.3: Contingut de buits (%H). Mescla Reciclada amb T°C variables.

Mescla Reciclada V.	20% (180°C)	30% (188°C)	50% (212°C)	60% (220°C)
Mitja %H	4,01	4,39	6,72	7,20
DV.T.	0,22	0,54	0,20	0,29

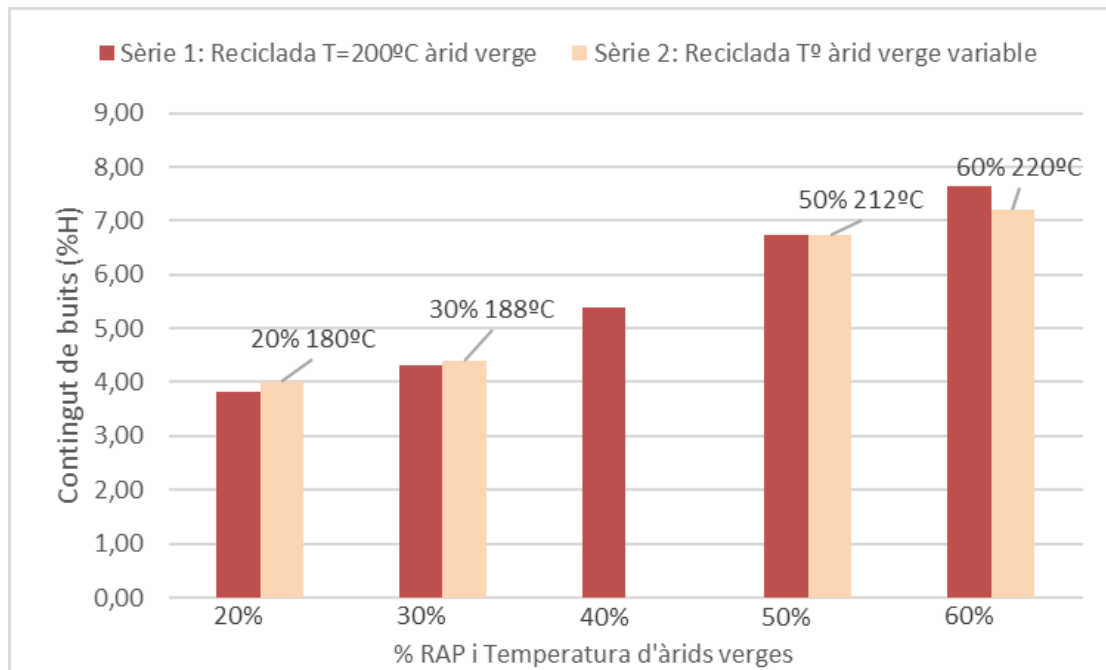
La Il·lustració 4.1 mostra el Contingut de buits segons el percentatge de lligant de la mescla Patró. En aquest gràfic s'observa com el contingut de buits augmenta al disminuir el contingut de lligant. Aquest comportament de la Mescla Patró és esperable.



Il·lustració 4.1 – Contingut de buits segons el % de lligant. M. Patró.

En la il·lustració 4.2 es mostren els resultats dels Continguts de buits de la Mescla Reciclada segons el percentatge de RAP, juntament amb la Mescla Reciclada fabricada amb diferents temperatures d'àrid verge. En aquesta gràfica s'observa clarament com a mesura que augmenta el percentatge de RAP, augmenta el contingut de buits. En

comparació amb la Mescla Patró amb un contingut de lligant del 4,5%, la Mescla Reciclada presenta un contingut de buits més elevat. Així, la mescla reciclada del 20% de RAP es pot assimilar a la de la mescla Patró amb un 4% de betum en quant a percentatge de buits. Igualment, la mescla fabricada amb un 40% de RAP presenta uns valors de percentatge de buits propers als de la Mescla Patró amb un 3,5%.



Il·lustració 4.2 – Contingut de buits segons el % de RAP. M. Reciclada.

El segon punt a examinar en la il·lustració 4.2 és el comportament del contingut de buits de la mescla reciclada amb la variable de la temperatura del àrid verge. Per examinar aquesta variable (temperatura d'àrid verge) s'ha pres com a referència la mescla reciclada fabricada amb diferents continguts de RAP on s'ha mantingut constant la temperatura de l'àrid verge (220°C). Per un percentatge de RAP del 20%, la mescla s'ha fabricat escalfant els àrids verges a 180°C (20°C menys). Es pot observar com una disminució de la temperatura de mesclat afecta al contingut de buits, fent que el seu valor augmenti. Això s'explica degut a una pitjor compactació a causa d'una temperatura de mesclat menor. El mateix succeeix per el cas de la mescla fabricada amb un 30% de RAP, encara que en menor grau, amb una diferencia de temperatura d'escalfament dels àrids verges de 12°C. Com ja s'ha comentat, al augmentar el contingut de RAP s'aprecia un contingut de buits lleugerament més elevat que per la mescla fabricada amb un 20% de RAP.

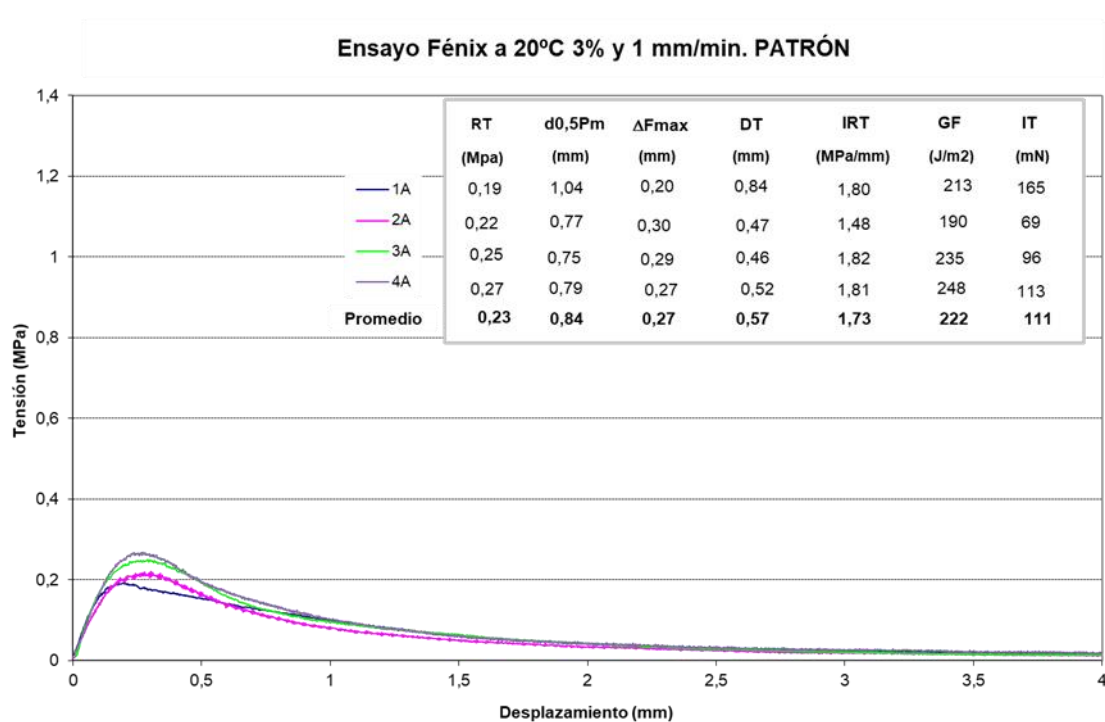
Per altra banda, les últimes dos columnes del gràfic corresponents a un contingut de RAP del 50 i 60%, s'han fabricat amb un sobreescalfament dels àrids de +12°C i +20°C respectivament, presentant un contingut de buits menor que en la mescla reciclada de referència. En el cas de la mescla amb 60% de RAP la diferència és més acusada. Aquesta reducció de buits s'explica per l'efectivitat de la compactació gràcies al sobreescalfament dels àrids i amb això l'augment de temperatura de la mescla.

4.3 Propietats mecàniques

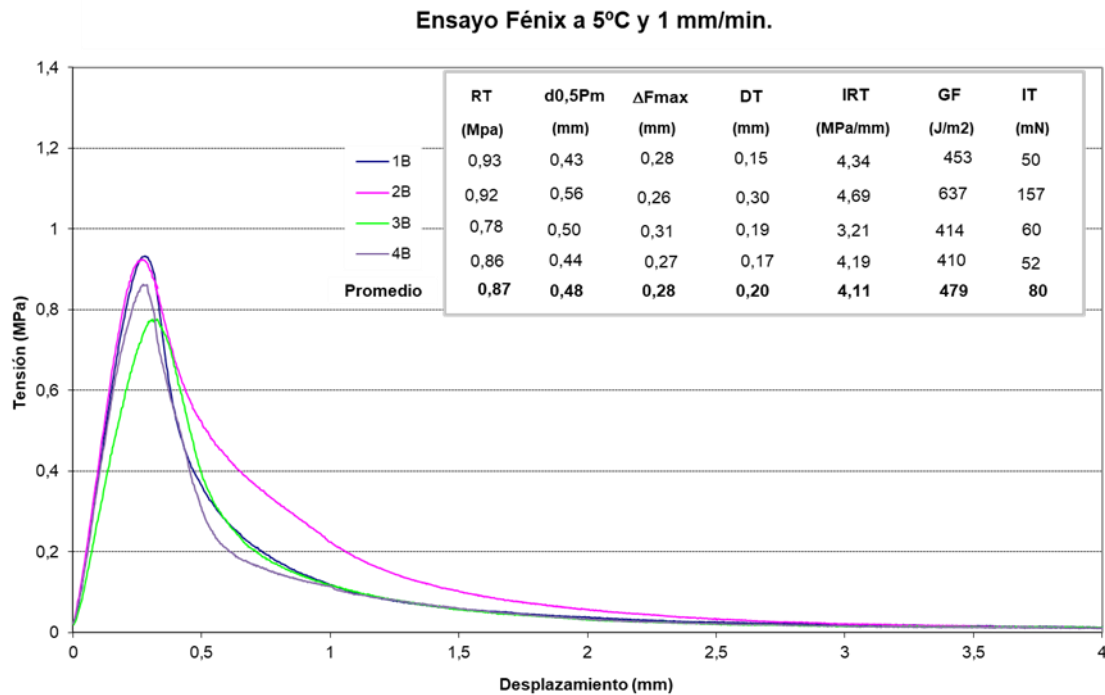
En aquest apartat s'analitza l'efecte d'addició de RAP en les propietats mecàniques de la mescla. Per això, l'estudi s'ha dividit en quatre parts. En primer lloc, s'ha analitzat l'efecte del contingut de lligant en la mescla. A continuació, s'ha estudiat l'efecte del contingut de RAP, per després comparar els resultats obtinguts de la mescla reciclada amb la mescla patró. Per últim, per acabar aquesta investigació, s'ha analitzat l'efecte de la variació de la temperatura dels àrids verges.

Per estudiar les propietats mecàniques de les mescles asfàltiques, s'ha utilitzat l'assaig Fènix. S'ha posat com a exemple les il·lustracions 4.3 i 4.4 que mostren les corbes Càrrega – Deformació de l'assaig Fènix a 20 i a 5°C de la mescla Patró.

Es pot observar com a menys temperatura el comportament del material és més fràgil. La pendent del tram elàstic augmenta, igual que la càrrega màxima, tot i que la ductilitat disminueix considerablement.



Il·lustració 4.3 – Corbes Càrrega-Desplaçament. Mescla patró amb 3% de lligant 20°C.



Il·lustració 4.4 – Corbes Càrrega-Desplaçament. Mescla patró amb 3% de lligant a 5°C.

En les Taules 4.4 a 4.9 es recullen els resultats mitjos dels principals paràmetres de l'assaig Fénix per la mescla patró i la mescla reciclada, assajades les temperatures de 20 i 5°C, amb el seu estudi estadístic pertinent (la desviació típica (σ) i el Coeficient de Variació (Cv)). Els paràmetres són: Àrea de fractura (A_f , mm^2), Càrrega màxima (F_{max} , KN), Resistència a tracció (RT, MPa), Desplaçament per la càrrega màxima (ΔF_{max} , mm), Índex de Rigidesa a Tracció (IRT, MPa/mm), Energia total de Fractura (G_d , J/m^2), Desplaçament al 50% de la càrrega màxima postpic ($d_{0,5Pm}$, mm) i Desplaçament de tenacitat (DT, mm). En base a aquests resultats, es pot considerar que el valor del coeficient de variació Cv , es troba dins dels valors de precisió exigits en els assaigs de carreteres, excepte algun cas on el valor supera mínimament el 20%.

Taula 4.4: Resultats de l'assaig Fènix. Mescla Patró a 20°C.

M. PATRÓ 20°C	PARÀMETRES	Af	Fmax	RT	DFmax	DR	IRT/Af	GF	d0,5Pm	DT
		(mm ²)	(KN)	(Mpa)	(mm)	(mm)	(MPa/mm)	(J/m ²)	(mm)	(mm)
3% Lligant	MITJA	2694,0	0,7	0,2	0,3	2,1	1,8	224,5	0,8	0,5
	DESV. TÍPICA	5,4	0,1	0,0	0,0	0,3	0,2	30,7	0,0	0,0
	COEF. VARI.	0,2	9,8	9,8	5,7	12,5	10,6	13,7	2,4	6,5
3,5% Lligant	MITJA	2655,1	0,9	0,3	0,3	2,8	1,9	372,9	1,0	0,7
	DESV. TÍPICA	23,7	0,1	0,0	0,0	0,2	0,1	68,7	0,1	0,1
	COEF. VARI.	0,9	14,4	14,0	13,4	8,0	6,6	18,4	8,7	9,3
4% Lligant	MITJA	2642,4	1,0	0,4	0,3	3,2	2,1	468,4	1,1	0,8
	DESV. TÍPICA	29,3	0,1	0,0	0,0	0,6	0,2	46,9	0,1	0,1
	COEF. VARI.	1,1	8,8	9,4	5,5	17,4	11,6	10,0	10,8	14,4
4,5% Lligant	MITJA	2637,8	0,9	0,3	0,4	4,2	1,6	576,0	1,5	1,0
	DESV. TÍPICA	21,3	0,1	0,1	0,0	0,4	0,1	76,9	0,2	0,1
	COEF. VARI.	0,8	16,2	16,5	8,7	9,5	3,7	13,3	10,7	13,4
5% Lligant	MITJA	2596,4	0,7	0,3	0,5	4,2	1,1	519,1	1,9	1,4
	DESV. TÍPICA	24,3	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	42,7	0,2	0,2
	COEF. VARI.	0,9	4,3	4,6	10,7	2,3	4,9	8,2	8,1	13,0

Taula 4.5: Resultats d'assaig Fènix. Mescla Patró a 5°C.

M. PATRÓ 5°C	PARÀMETRES	Af	Fmax	RT	DFmax	DR	IRT/Af	GF	d0,5Pm	DT
		(mm ²)	(KN)	(Mpa)	(mm)	(mm)	(MPa/mm)	(J/m ²)	(mm)	(mm)
3% Lligant	MITJA	2646,6	2,3	0,9	0,3	2,0	4,1	425,8	0,5	0,2
	DESV. TÍPICA	25,3	0,2	0,1	0,0	0,3	0,6	23,8	0,1	0,0
	COEF. VARI.	1,0	8,8	8,3	7,0	12,3	15,5	5,6	12,5	13,5
3,5% Lligant	MITJA	2644,0	2,6	1,0	0,4	2,9	3,9	625,1	0,6	0,2
	DESV. TÍPICA	8,7	0,2	0,1	0,0	0,4	0,3	79,6	0,1	0,0
	COEF. VARI.	0,3	5,9	5,8	12,0	15,4	8,2	12,7	14,2	22,2
4% Lligant	MITJA	2620,6	3,1	1,2	0,4	2,8	4,1	692,5	0,7	0,3
	DESV. TÍPICA	4,7	0,1	0,0	0,0	0,4	0,4	12,1	0,0	0,0
	COEF. VARI.	0,2	2,7	2,6	9,9	13,5	8,8	1,8	4,4	1,8
4,5% Lligant	MITJA	2590,0	3,0	1,2	0,3	2,6	5,7	725,6	0,5	0,3
	DESV. TÍPICA	10,2	0,2	0,1	0,0	0,4	0,3	50,3	0,1	0,0
	COEF. VARI.	0,4	5,6	6,0	0,6	13,6	6,0	6,9	11,6	0,0
5% Lligant	MITJA	2592,0	2,9	1,1	0,3	3,5	4,8	848,7	0,7	0,3
	DESV. TÍPICA	44,7	0,2	0,1	0,0	0,4	0,2	79,0	0,0	0,0
	COEF. VARI.	1,7	5,5	7,2	5,4	11,9	4,0	9,3	3,0	8,6

Taula 4.6: Resultats de l'assaig Fènix. Mescla Reciclada a 20°C.

M. RECICLADA (200°C) 20°C	PARÀMETRES	Af	Fmax	RT	DFmax	DR	IRT/Af	GF	d0,5Pm	DT
		(mm ²)	(KN)	(Mpa)	(mm)	(mm)	(MPa/mm)	(J/m ²)	(mm)	(mm)
20% RAP	MITJA	2582,6	0,5	0,2	0,3	2,6	1,3	317,7	1,1	0,8
	DESV. TÍPICA	16,4	0,0	0,0	0,0	0,9	0,1	0,0	0,1	0,1
	COEF. VARI.	0,6	2,7	2,1	1,8	32,8	3,9	0,0	11,2	16,2
30% RAP	MITJA	2545,0	0,7	0,3	0,3	2,7	1,8	333,2	1,1	0,8
	DESV. TÍPICA	51,0	0,1	0,0	0,1	0,2	0,6	43,7	0,1	0,1
	COEF. VARI.	2,0	11,6	11,3	26,1	8,9	32,2	13,1	8,8	7,7
40% RAP	MITJA	2544,9	0,9	0,3	0,3	2,5	2,1	336,2	0,9	0,6
	DESV. TÍPICA	9,7	0,1	0,0	0,0	0,4	0,2	18,3	0,1	0,1
	COEF. VARI.	0,4	11,9	11,6	5,2	14,3	9,7	5,4	13,5	18,6
50% RAP	MITJA	2547,8	1,0	0,4	0,2	2,4	2,7	323,8	0,7	0,5
	DESV. TÍPICA	11,9	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	72,4	0,1	0,1
	COEF. VARI.	0,5	13,6	13,7	25,3	9,3	9,1	22,4	14,9	25,8
60% RAP	MITJA	2540,6	1,1	0,4	0,3	2,6	2,9	317,3	0,7	0,4
	DESV. TÍPICA	30,6	0,1	0,1	0,0	0,3	0,5	83,9	0,1	0,1
	COEF. VARI.	1,2	13,1	13,0	11,1	13,0	17,5	26,4	12,2	13,1

Taula 4.7: Resultats Fènix. Mescla Reciclada a 5°C.

M. REICLADA (200°C) 5°C	PARÀMETRES	Af	Fmax	RT	DFmax	DR	IRT/Af	GF	d0,5Pm	DT
		(mm ²)	(KN)	(Mpa)	(mm)	(mm)	(MPa/mm)	(J/m ²)	(mm)	(mm)
20% RAP	MITJA	2563,7	2,0	0,8	0,3	2,9	4,6	577,7	0,6	0,3
	DESV. TÍPICA	28,3	0,2	0,1	0,0	0,4	0,4	76,8	0,1	0,0
	COEF. VARI.	1,1	7,6	8,4	10,3	15,4	8,3	13,3	11,4	15,8
30% RAP	MITJA	2593,2	2,2	0,9	0,3	2,1	4,7	465,2	0,5	0,2
	DESV. TÍPICA	22,0	0,1	0,0	0,0	0,3	0,2	50,8	0,0	0,0
	COEF. VARI.	0,8	2,6	1,8	9,2	16,4	5,1	10,9	10,0	12,7
40% RAP	MITJA	2584,0	2,4	0,9	0,3	2,5	4,9	462,5	0,5	0,2
	DESV. TÍPICA	24,1	0,1	0,0	0,0	0,7	0,4	50,5	0,0	0,0
	COEF. VARI.	0,9	4,1	4,0	5,0	27,5	9,0	10,9	4,6	7,8
50% RAP	MITJA	2558,9	2,5	1,0	0,2	2,2	5,4	443,5	0,4	0,2
	DESV. TÍPICA	23,5	0,1	0,1	0,0	0,7	0,2	103,6	0,0	0,0
	COEF. VARI.	0,9	5,6	5,3	4,3	30,1	4,4	23,4	6,4	12,2
60% RAP	MITJA	2576,1	2,2	0,9	0,2	2,2	5,4	364,1	0,4	0,1
	DESV. TÍPICA	18,6	0,2	0,0	0,0	0,4	0,7	62,2	0,1	0,0
	COEF. VARI.	0,7	8,1	5,0	12,2	18,7	12,5	17,1	13,5	25,7

Taula 4.8: Resultats de l'assaig Fènix. Mescla Reciclada (T^o àrid verge variable) a 20°C.

M. REICLADA (T°C var.) 20°C	PARÀMETRES	Af	Fmax	RT	DFmax	DR	IRT/Af	GF	d0,5Pm	DT
		(mm ²)	(KN)	(Mpa)	(mm)	(mm)	(MPa/mm)	(J/m ²)	(mm)	(mm)
180°C 20% RAP	MITJA	2629,9	0,5	0,2	0,3	2,5	1,4	224,9	1,0	0,8
	DESV. TÍPICA	7,9	0,0	0,0	0,0	0,4	0,2	37,9	0,1	0,1
	COEF. VARI.	0,3	4,4	4,1	18,1	14,2	13,0	16,8	14,3	15,7
188°C 30% RAP	MITJA	2633,2	0,7	0,3	0,3	3,1	1,7	341,4	1,0	0,7
	DESV. TÍPICA	11,0	0,1	0,0	0,0	0,3	0,2	6,3	0,1	0,1
	COEF. VARI.	0,4	8,5	8,9	7,1	10,4	10,4	1,8	11,8	16,4
212°C 50% RAP	MITJA	2574,9	0,9	0,3	0,2	2,4	2,5	332,2	0,8	0,6
	DESV. TÍPICA	3,6	0,1	0,0	0,0	0,1	0,3	35,4	0,0	0,0
	COEF. VARI.	0,1	10,3	10,4	12,1	4,2	11,8	10,7	0,7	4,2
220°C 60% RAP	MITJA	2632,6	1,1	0,4	0,2	2,4	2,7	342,9	0,6	0,4
	DESV. TÍPICA	26,6	0,1	0,0	0,0	0,2	0,1	43,0	0,1	0,1
	COEF. VARI.	1,0	6,8	6,1	8,8	9,7	5,2	12,5	12,1	16,8

Taula 4.9: Resultats de l'assaig Fènix. Mescla Reciclada (T^o àrid verge variable) a 5°C.

M. REICLADA (T°C var.) 5°C	PARÀMETRES	Af	Fmax	RT	DFmax	DR	IRT/Af	GF	d0,5Pm	DT
		(mm ²)	(KN)	(Mpa)	(mm)	(mm)	(MPa/mm)	(J/m ²)	(mm)	(mm)
180°C 20% RAP	MITJA	2627,0	1,9	0,7	0,2	2,6	4,3	497,7	0,5	0,3
	DESV. TÍPICA	18,4	0,1	0,0	0,0	0,7	0,4	80,2	0,1	0,0
	COEF. VARI.	0,7	5,0	5,6	12,2	25,8	9,9	16,1	13,2	16,2
188°C 30% RAP	MITJA	2613,4	2,0	0,8	0,3	2,7	4,2	512,8	0,5	0,3
	DESV. TÍPICA	19,6	0,2	0,0	0,0	0,4	0,6	63,7	0,0	0,0
	COEF. VARI.	0,8	7,5	0,2	2,2	14,3	14,5	12,4	4,5	0,3
212°C 50% RAP	MITJA	2544,6	2,4	0,9	0,2	1,8	4,9	433,2	0,4	0,2
	DESV. TÍPICA	8,4	0,1	0,0	0,0	0,2	0,4	70,9	0,1	0,1
	COEF. VARI.	0,3	3,4	3,4	6,3	12,9	7,3	16,4	13,4	36,6
220°C 60% RAP	MITJA	2635,5	2,5	0,9	0,2	2,1	5,3	446,1	0,4	0,2
	DESV. TÍPICA	25,0	0,2	0,1	0,0	0,6	0,4	89,7	0,0	0,0
	COEF. VARI.	0,9	9,4	9,9	6,2	30,0	6,8	20,1	10,2	20,4

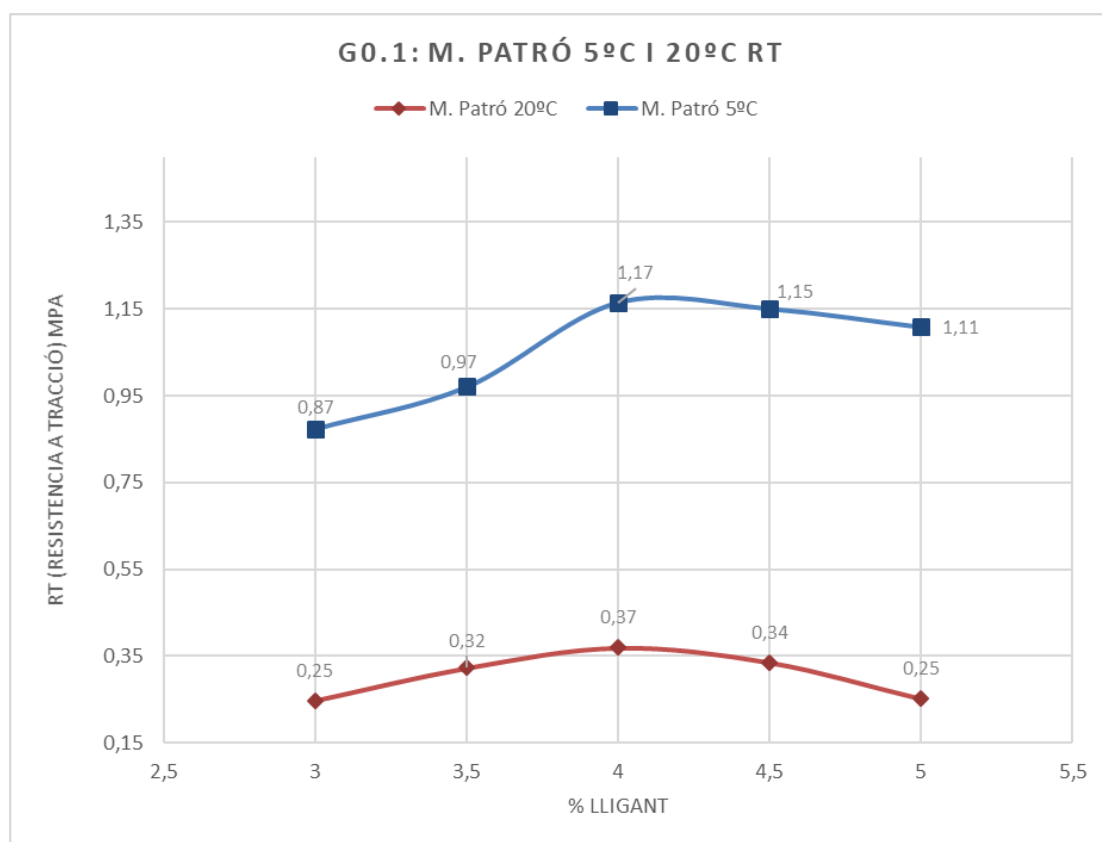
Encara que mitjançant aquest assaig es poden obtenir diferents paràmetres per analitzar la resistència a la fissuració de les mescles, l'estudi de l'addició de RAP es centrarà principalment en els paràmetres de resistència a la tracció (RT) i desplaçament de tenacitat (DT), els quals aporten informació sobre rigidesa i tenacitat del material.

4.3.1 Efecte del contingut de lligant en les mescles bituminoses

En aquest apartat es fa una introducció del comportament de la mescla Patró. Per estudiar l'efecte del contingut de lligant en el comportament mecànic de la mescla, s'analitza el paràmetre de Resistència a tracció (RT) i el de Desplaçament de tenacitat (DT) segons els seus diferents percentatges de lligant.

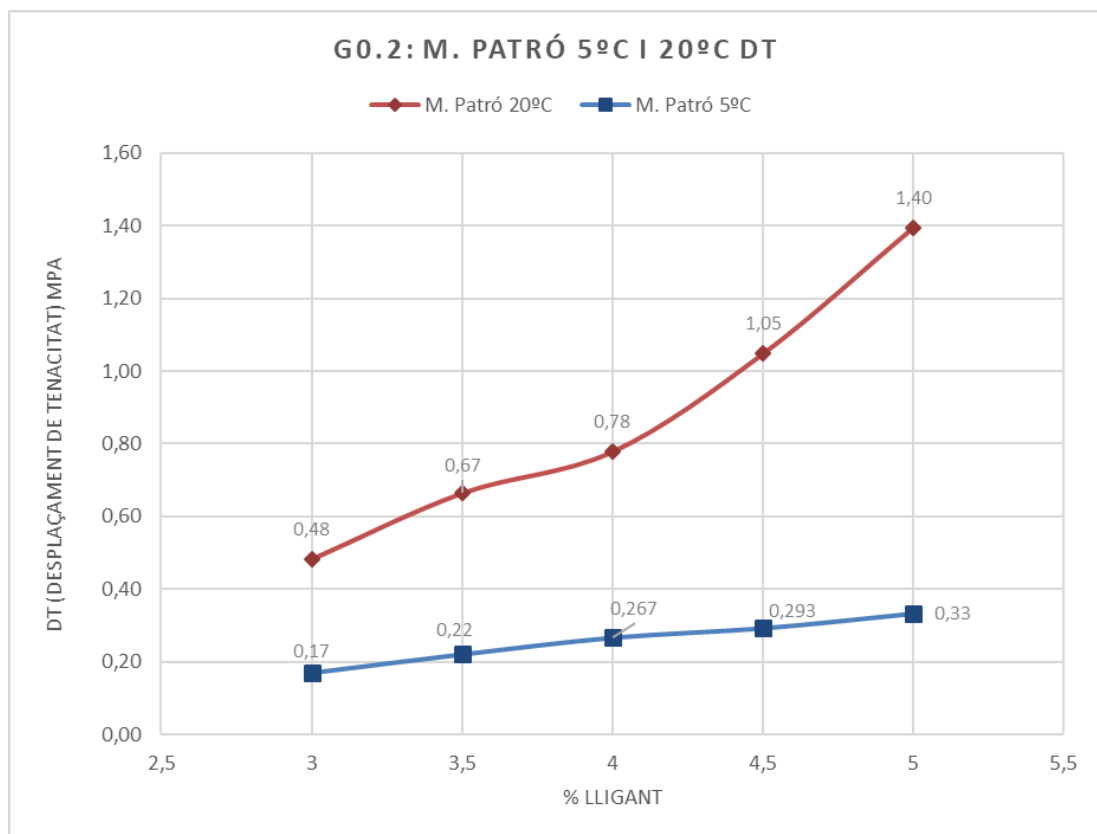
En la il·lustració 4.5 es pot observar la tendència de la resistència a tracció de la mescla Patró a 20 i 5°C segons el percentatge de lligant. En la corba de 20°C, la resistència creix a mesura que augmenta el percentatge de lligant fins on s'observa un punt màxim de resistència a tracció amb un valor de 0,37 MPa, que pertany a la mescla amb un 4% de lligant. A partir d'aquest punt, comença un decreixement dels valors de resistència arribant a la sèrie de 5% de lligant, on conclou amb una resistència igual a la de 3%.

En la corba de 5°C, els valors de resistència a la tracció (RT) són molt més alts que a 20°C, ja que a temperatures fredes la mescla és més rígida. La corba comença amb un mínim en la sèrie del 3% de lligant i va creixent fins un pic que, en aquest cas, també es troba per la mescla fabricada amb un 4% de lligant, on el valor de resistència a la tracció (RT) es de 1,17 MPa. Després, baixa la resistència suaument fins el 5% de lligant.



Il·lustració 4.5 – Resistència a tracció (RT) de la mescla Patró a 20 i 5°C.

En la il·lustració 4.6 es mostren les corbes dels resultats del paràmetre desplaçament de tenacitat (DT) per la mescla Patró fabricada amb diferents continguts de lligant i assajada a 20 i 5°C. En aquesta gràfica es pot observar com a 20°C la mescla presenta uns valors de desplaçament de tenacitat (DT) més elevats que a 5°C, el qual està indicant una major ductilitat de la mescla. En ambdós casos, com més betum conté la mescla, més ductilitat presenta. Això es pot apreciar veient les dues corbes creixents en la gràfica, que tenen el màxim en les sèries de 5% de lligant, sent aquest creixement molt superior al de la mescla assajada a temperatures mitges (20°C).



Il·lustració 4.6 – Desplaçament de tenacitat (DT) de la mescla Patró a 20 i 5°C.

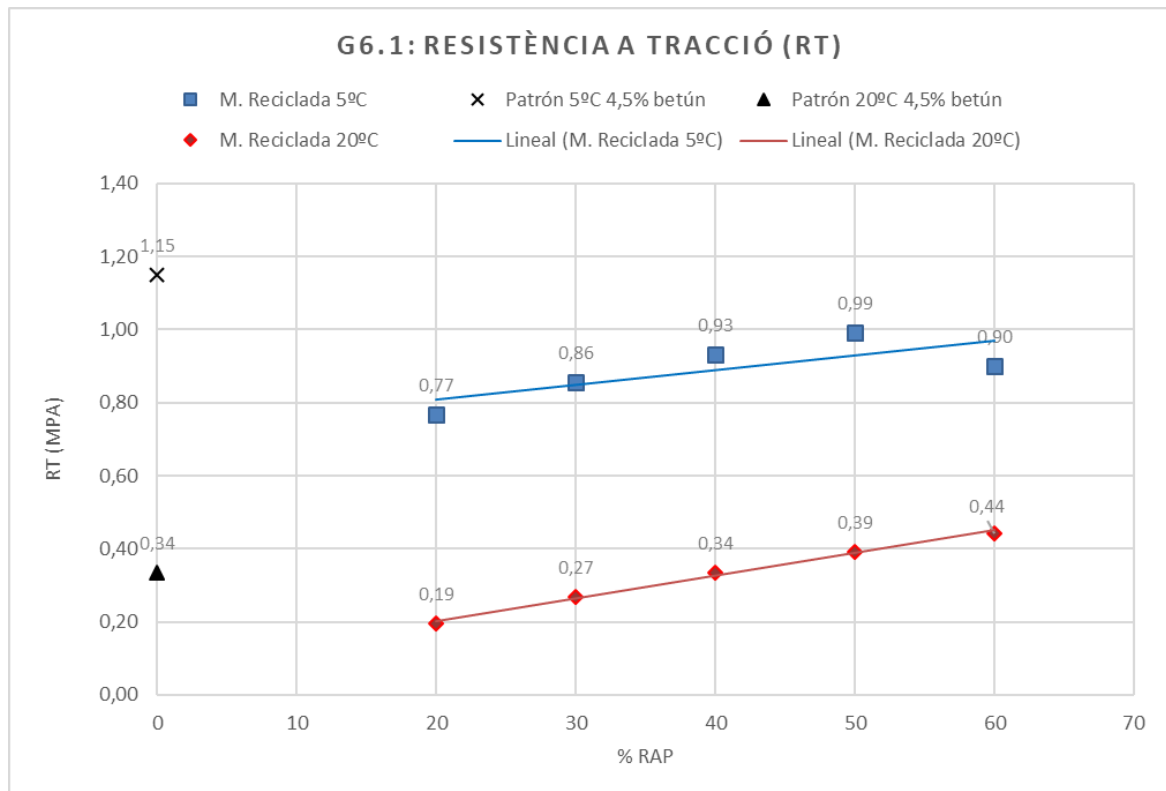
4.3.2 Efecte del contingut de RAP en les mescles bituminoses

La il·lustració 4.7 mostra els valors de Resistència a tracció de la mescla reciclada fabricada amb diferents continguts de RAP, tant a 20 com a 5°C. A més a més, en la gràfica es mostra els resultats de resistència a tracció de la mescla patró fabricada amb el mateix contingut de lligant que la mescla reciclada (4,5%), per poder comparar els resultats obtinguts amb els de la mescla patró sense RAP.

En primer lloc es pot observar com la resistència a tracció de la mescla a baixa temperatura és superior a la de la mescla assajada a temperatures mitges (20°C).

La resistència a tracció va en augment a mesura que l'addició de RAP també ho fa. En els assajos a temperatura de 5°C s'observa un màxim de 0,99MPa en la sèrie de 50% RAP, a partir d'aquí la resistència cau. Per altra banda, a 20°C la resistència creix amb tendència lineal positiva a mesura que augmentem el % de RAP.

Si comparem el resultat de la mescla de referència, podem observar que la mescla amb un 40% de RAP a 20°C coincideix amb els valors de RT de la mescla no reciclada. En canvi, si analitzem el paràmetre RT dels assajos a 5°C veiem que cap sèrie de RAP s'acosta al resultat màxim de la mescla de referència.



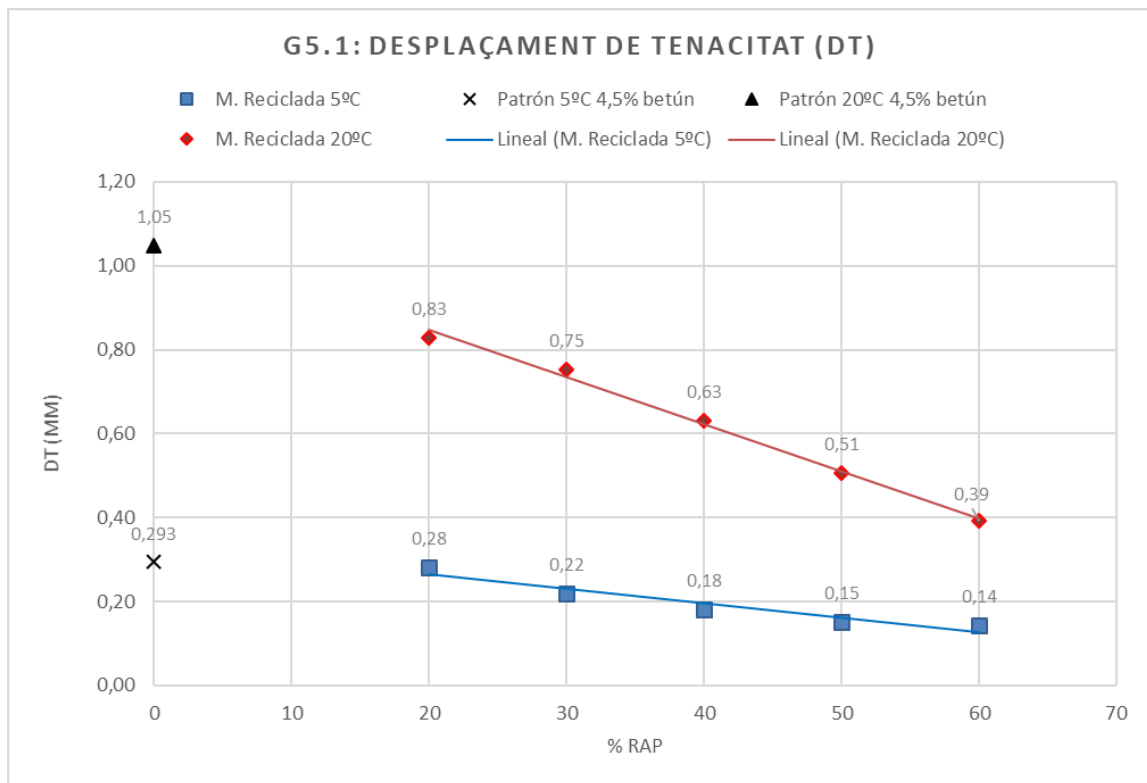
Il·lustració 4.7 – Resistència a tracció (RT) a 20 i 5°C.

En la il·lustració 4.8 s'analitza el desplaçament de tenacitat de la mescla reciclada per cada contingut de RAP i es compara amb la mescla patró fabricada amb un 4,5% de lligant, tant para la temperatura de 20°C com per la de 5°C. En primer lloc, s'observa que per tots els casos estudiats, la mescla a la temperatura de 20°C es comporta d'una forma significativament més dúctil que a 5°C, el qual és d'esperar a arrel dels resultats de resistència a tracció.

A mesura que augmentem el percentatge de RAP, tant per la temperatura de 20°C com per la temperatura de 5°C, la mescla perd ductilitat. A 20°C ho fa de forma més acusada, en canvi a 5°C no existeix tanta diferència entre els valors màxims i mínims de desplaçament de tenacitat.

Si es compara el valor de desplaçament de tenacitat obtingut per la mescla patró fabricada amb un 4,5% de lligant assajada a 20°C, amb la de les diferents reciclades, s'observa que les mescles reciclades no aconseguen obtenir valors similars de desplaçament de tenacitat als de la mescla patró i que a mesura que augmenta el contingut de RAP més s'allunya dels valors de la mescla de referència.

A 5°C les mescles reciclades no s'aparten tant dels resultats de desplaçament de tenacitat de la mescla de referència (mescla fabricada con un 4,5% de lligant, sense RAP). En el cas de la mescla amb un 20% de RAP, s'aconsegueix un valor molt semblant al de la mescla sense RAP en termes de tenacitat.



Il·lustració 4.8 –Desplaçament de tenacitat (DT) a 20 i 5°C.

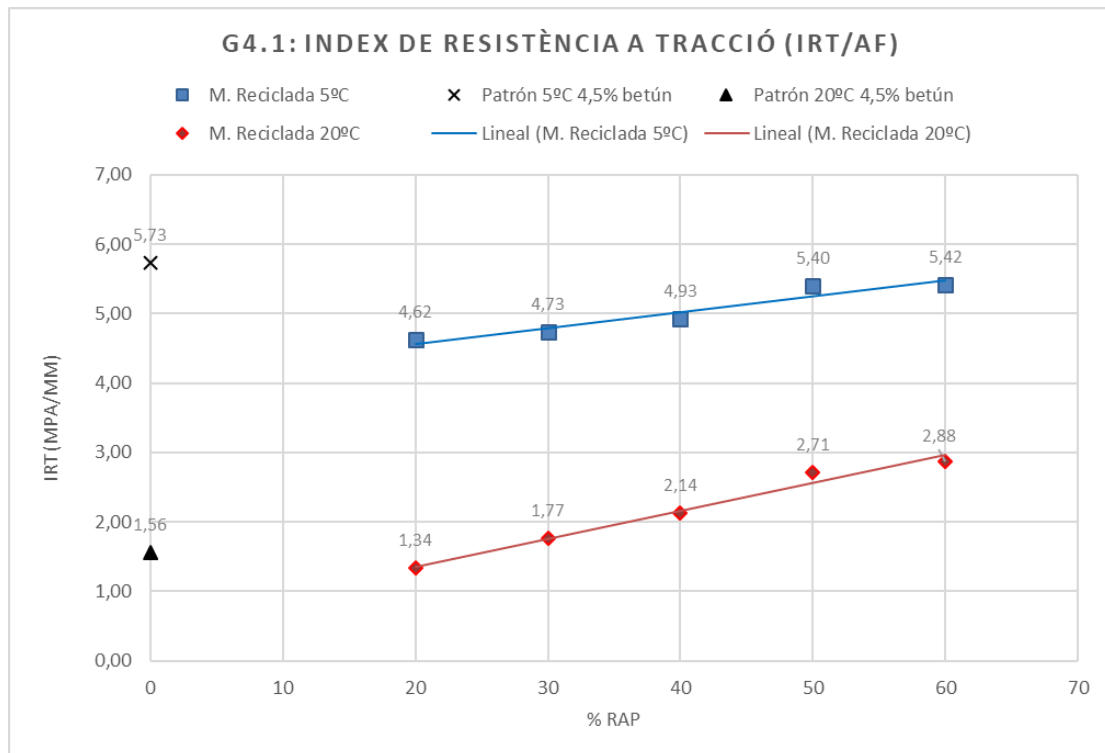
Encara que per analitzar l'efecte de la addició de RAP en les mescles asfàltiques aquest treball es centra principalment en l'estudi dels paràmetres de resistència a tracció i desplaçament de tenacitat, els quals permeten l'estudi de les principals propietats mecàniques de les mescles asfàltiques, s'han obtingut altres paràmetres que amb els seus resultats proporcionen informació addicional sobre el comportament de les mescles com ja s'ha indicat anteriorment, aquests paràmetres es recullen en les Taules 4.4 a 4.9, resultant d'especial interès en aquest apartat l'indicador de rigidesa a la tracció (IRT) i la energia de fractura (GF), els quals es mostren a continuació.

En la il·lustració 4.9 es mostra els resultats del indicador de rigidesa a la tracció (IRT) de la mescla reciclada a 20 i 5°C. Igualment, s'han representat els dos punts de la mescla patró fabricada amb un 4,5% de betum a les dues temperatures d'assaig per poder tenir una referència a l'hora de comparar els resultats.

Per ambdues temperatures, s'observa com a mesura que augmentem el percentatge de RAP en la mescla reciclada, els valors del indicador de rigidesa a la tracció (IRT) augmenten. El augment d'aquest paràmetre està indicant que la primera part de la corba càrrega-desplaçament obtinguda a partir de l'assaig Fènix té cada vegada una pendent major, la qual és característica d'un augment de rigidesa en la mescla a mesura que augmenta el contingut de RAP, ja que s'hauria d'aplicar una major càrrega en l'assaig per produir el mateix desplaçament.

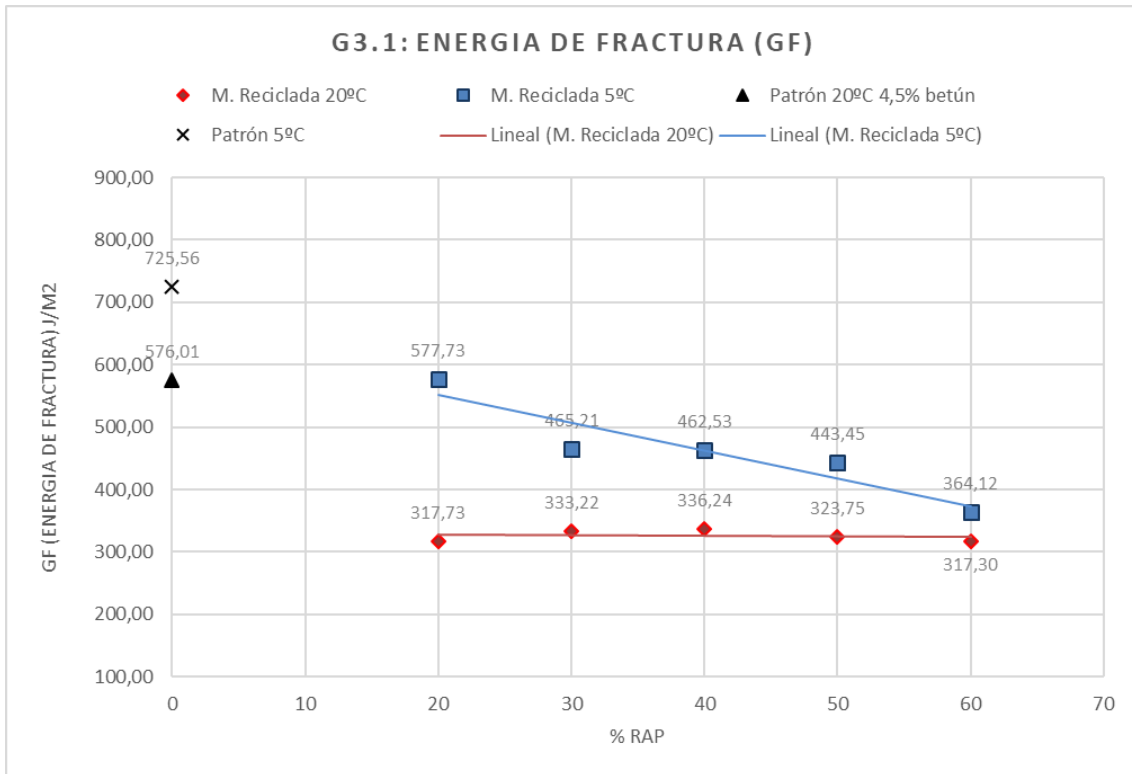
A 20°C, els valors d'IRT per tots els casos (diferents percentatges de RAP) són molt menors que a 5°C, el qual indica que la mescla a temperatures mitges es comporta de forma més dúctil. Al comparar els resultats de la mescla pels diferents continguts de RAP amb els de la mescla patró (sense RAP) fabricada amb un 4,5% de lligant s'obtenen valors d'IRT similars quan la mescla fabricada aproximadament amb un 25% de RAP. Les mescles reciclades amb alts percentatges de RAP i assajades a 20°C presenten una alta rigidesa.

Si es compara la mescla reciclada assajada a 5°C amb la mescla patró (sense RAP) fabricada amb un 4,5% de lligant, s'observa que la mescla reciclada obté valors inferiors a la Patró en tots els casos. Això sembla indicar que les mescles reciclades són més flexibles a baixa temperatura que la mescla patró. Tot i això, aquest fet es podria explicar degut al major contingut de buits (%H) de les mescles reciclades en front la mescla convencional.



Il·lustració 4.9 –Índex de resistència a tracció (IRT) a 20 i 5°C.

En la il·lustració 4.10 es mostren els resultats de l'energia de fractura de la mescla reciclada per cada percentatge d'addició de RAP. Igualment, s'han representat els punts de la mescla patró fabricada amb un 4,5% de lligant per tenir una referència. A partir d'aquests resultats s'observa que l'energia de fractura de les mescles reciclades és menor en comparació amb la de la Mescla Patró de referència tant a 5°C com a 20°C. A 20°C els valors d'energia de fractura romanen constants encara que variï el contingut de RAP. A 5°C, en canvi, aquest valor va disminuint a mesura que augmenta el contingut de RAP. Aquests resultats indiquen que a 5°C com més percentatge de RAP tingui la mescla, més fàcil es trenca, dit d'una altra manera, menys energia es necessita per fracturar-la.



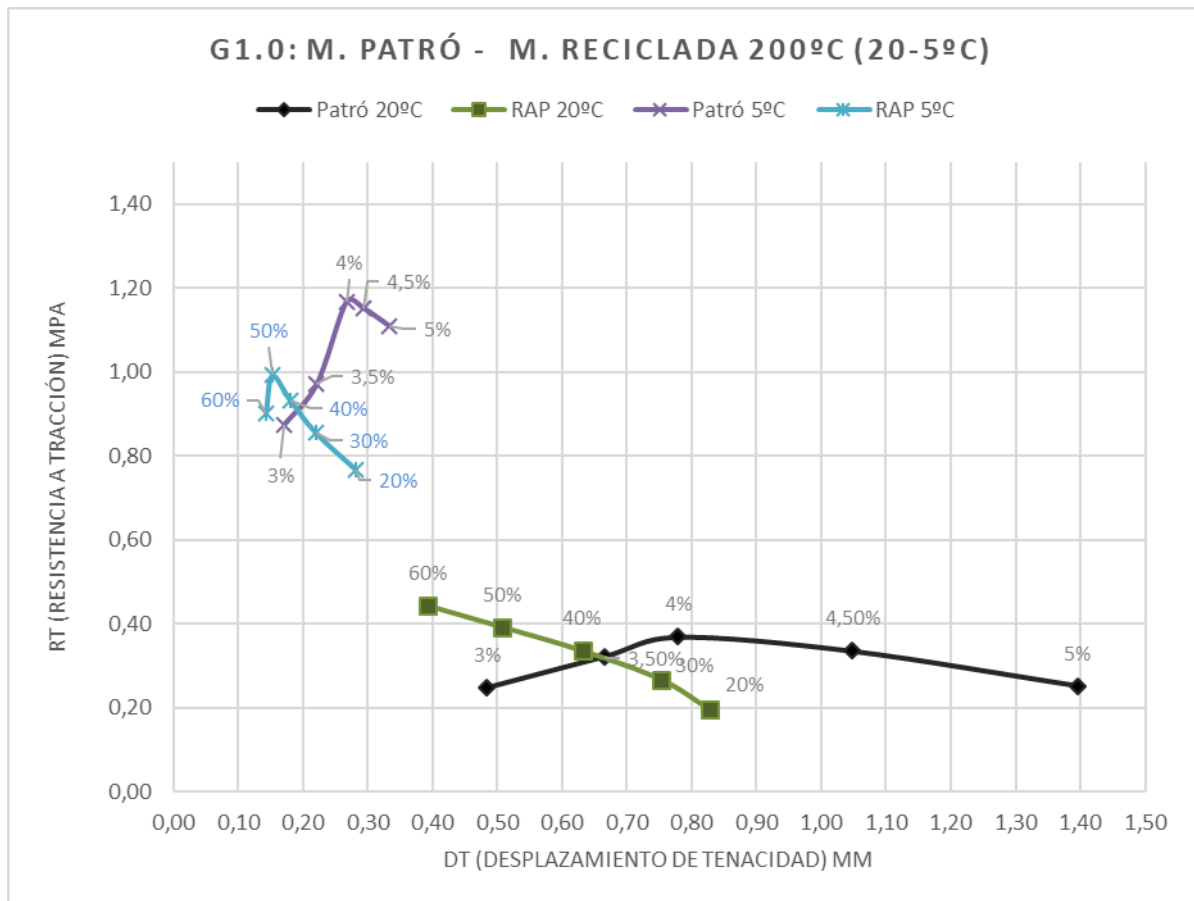
Il·lustració 4.10 –Energia de fractura (GF) per 20 i 5°C.

4.3.3 Comparació entre les mescles reciclades i la mescla patró

Per comparar el comportament de totes les mescles i buscar similituds entre les reciclades i les diferents sèries de mescla Patró, s'ha optat per estudiar la Resistència a tracció (RT) i el Desplaçament de Tenacitat (DT) com a paràmetres principals que caracteritzen les propietats de les mescles.

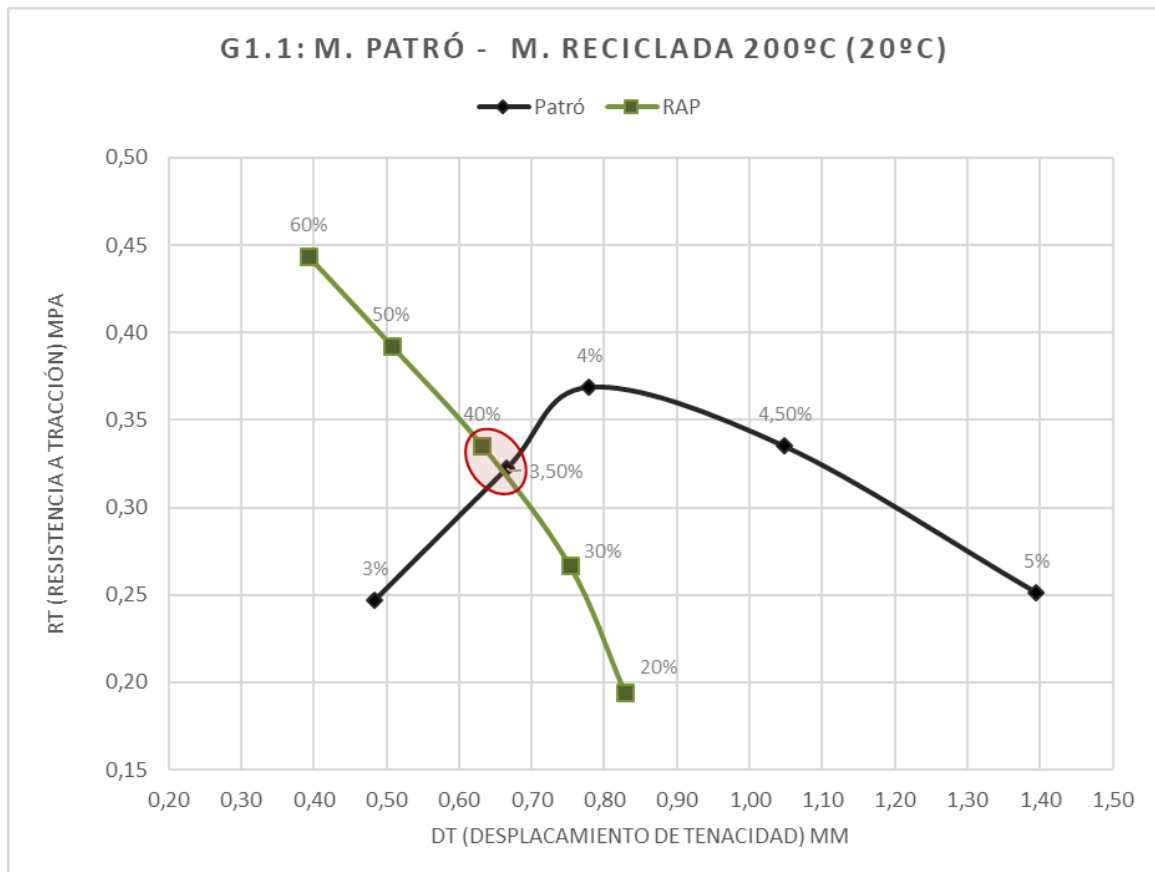
En primer lloc es presenta en la Il·lustració 4.4 una gràfica general de la Mescla Patró i la Mescla Reciclada on es representen en l'eix d'abscisses els valors del paràmetre DT en mil·límetres i en l'eix d'ordenades els valors del paràmetre RT en Mpa.

Amb la il·lustració 4.11 es pretén aconseguir una visió general entre els assajos a 20°C i els realitzats a 5°C, tan de la Mescla Patró com de la Reciclada.



Il·lustració 4.11 – Gràfic 1.0 General Mescla Patró i Mescla Reciclada (RT-DT).

Per començar la comparació de les mescles bituminoses elaborades, es mostra a continuació el gràfic 1.1 (Il·lustració 4.12) representant la Resistència a Tracció i el Desplaçament de tenacitat. Primer s'analitza la Mescla Patró, tot seguit la Mescla Reciclada i finalment es fa una comparació del comportament de la Mescla Reciclada amb la Mescla Patró.



Il·lustració 4.12 – Gràfic 1.1 Mescla Patró i Mescla Reciclada (RT-DT) 20°C.

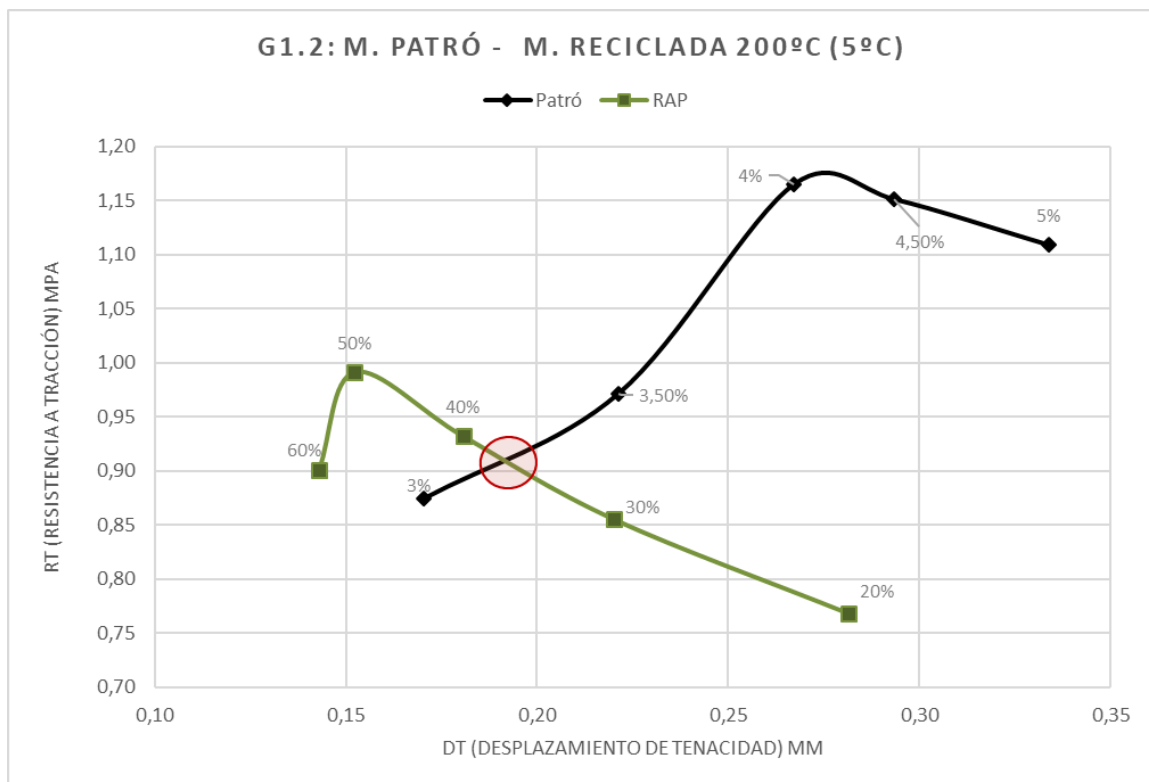
Observant el comportament de la Mescla Patró a 20°C, podem veure com a mesura que augmentem l'addició de betum tenim un augment de ductilitat de la mescla. Per altra banda, si analitzem la resistència veiem com la corba ens descriu un valor màxim en la sèrie del 4% de betum, però després decau fins arribar a la última sèrie del 5% de betum a valors de 0,25 MPa semblants a les provetes de 3% de betum.

En el cas de la Mescla Reciclada, s'observa com a mesura que s'augmenta l'addició de RAP, la mescla es va fent més rígida, perd ductilitat i guanya resistència fins al màxim del 60% de RAP, probablement es suposa que el màxim de resistència està entre un 60% i 70% de RAP i que a partir d'aquí, les mesclades amb més percentatge de reciclat obtenen valors de resistència menors.

Si comparem les dos mescles, veiem la intersecció de les dues corbes (marca vermella) entre dos punts propers, la sèrie de 3,50% de betum de la Mescla Patró i la teòrica d'un 40% de RAP per part de la Mescla Reciclada. D'aquest fet es pot extreure que la mescla amb un teòric 38% de RAP té un comportament similar a la mescla amb un 3,5% de lligant, en termes de ductilitat presenta un valor lleugerament menor i en resistència major.

La mescla reciclada de 50% de RAP obté resultats semblants a la mescla de 3% de lligant si analitzem el paràmetre DT, si ens fixem en el RT podem dir que la mescla reciclada de 50% RAP obté valors del ordre de la mescla amb un 4% de betum. De la mateixa manera ho fa la mescla de 30% RAP però al contrari, s'assimila en termes de ductilitat a la mescla de 4% betum i en resistència ho fa a la sèrie de 3% de betum.

La mescla reciclada amb un 60% de RAP obté uns resultats de ductilitat molt baixos i molta resistència a tracció, cosa que la fa ser una mescla molt fràgil. Per altra banda, la sèrie amb 20% de RAP de la Mescla Reciclada perd uns 0,17 MPa si la comparem amb la Mescla Patró de 4% de RAP i manté una bona ductilitat.



Il·lustració 4.13 – Gràfic 1.2 Mescla Patró i Mescla Reciclada (RT-DT) 5°C.

En el cas de l'assaig a 5°C (Il·lustració 4.13), la corba de la Mescla Patró ens mostra un pic en la corba marcant un màxim de resistència proper a la sèrie del 4% i 4,5% de betum. La ductilitat és creixent a mesura que augmentem el percentatge de betum.

La corba de la Mescla Reciclada dibuixa una reducció de ductilitat amb l'augment de l'addició de RAP, per tant com més RAP contingui la mescla més rígida serà. Si observem el paràmetre de resistència, veiem com la Mescla Reciclada augmenta la resistència fins arribar a la sèrie de 50% de RAP on es troba el màxim, després decau en arribar a la sèrie de 60% RAP.

Quan comparem les dos Mescles, observem un punt on es tallen les dos corbes, es localitza a mig camí de les sèries 3% i 3,5% de lligant per part de la Mescla Patró i entre les sèries 40% i 30% RAP de la Mescla Reciclada. Podem imaginar que una mescla amb un 38% aproximadament de RAP i un teòric 4,5% de betum total tindria un comportament similar a una mescla no reciclada amb un 3,25% de lligant.

En el cas de la sèrie fabricada amb un 50% de RAP, mostra uns valors del paràmetre RT semblants a la de la sèrie 3,5% de la Mescla de referència. Per altra banda, no arriba a tenir una ductilitat acceptable.

Les provetes amb un 30% de reciclat s'assimilen en termes de ductilitat a una mescla de 3,5% de lligant i pel que fa a la resistència s'apropa a valors de la mescla amb un 3% de betum.

Per últim trobem la sèrie del 20% de RAP, perd molta resistència a tracció. En ductilitat manté un bon resultat, semblant a la Mescla Patró de 4,5% de betum.

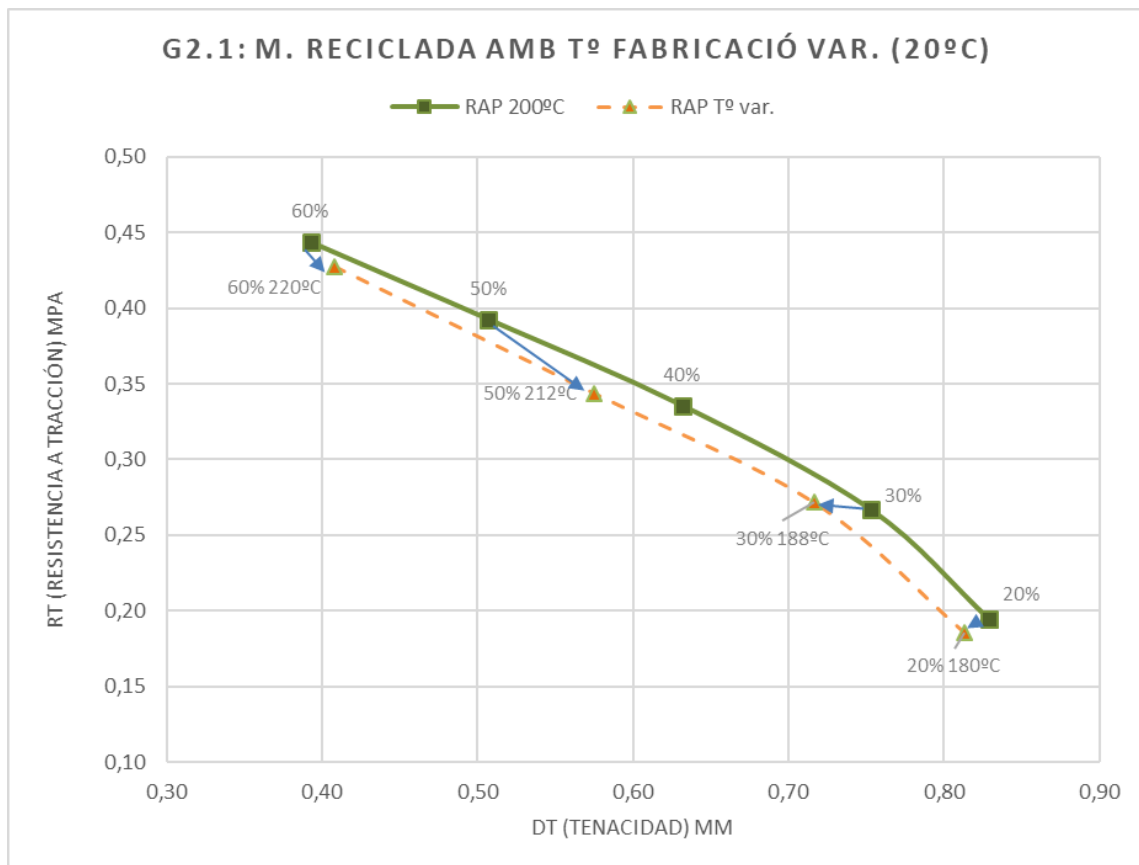
Podem concloure que a mesura que augmentem el percentatge de RAP, la mescla esdevé menys dúctil i guanya molta resistència. Això fa que la mescla reciclada sigui molt fràgil i no apta. S'ha observat com una teòrica mescla amb un 38% de RAP i 4,5% de lligant total, s'apropa a les propietats mecàniques de resistència i tenacitat d'una mescla de referència d'entre 3,3% i 3,5% de lligant verge.

4.3.4 Estudi del efecte de la variació de la temperatura dels àrids verges

A continuació es presenten les gràfiques amb les dades dels paràmetres RT-DT dels assaigs Fènix per la Mescla Reciclada amb les variacions de temperatura dels àrids verges. Es compara la Mescla Reciclada fabricada amb diferents temperatures d'àrids verges: 20% (180°C), 30% (188°C), 50% (212°C) i 60% (220°C) d'addició de RAP, amb la sèrie Principal de Mescla Reciclada amb la temperatura dels àrids verges constant a 200°C i 20%, 30%, 40%, 50% i 60% d'addició de RAP que ja s'ha analitzat en els anteriors gràfics.

En la sèrie de provetes de mescla reciclada amb temperatures d'àrid verge variables, s'ha augmentat la temperatura d'àrid verge pels casos de 60% i 50%, a diferència de les de 30% i 20% on s'ha disminuït, sempre respecte la sèrie completa amb l'àrid a 200°C.

A partir d'aquest apunt, es comenten els resultats obtinguts.

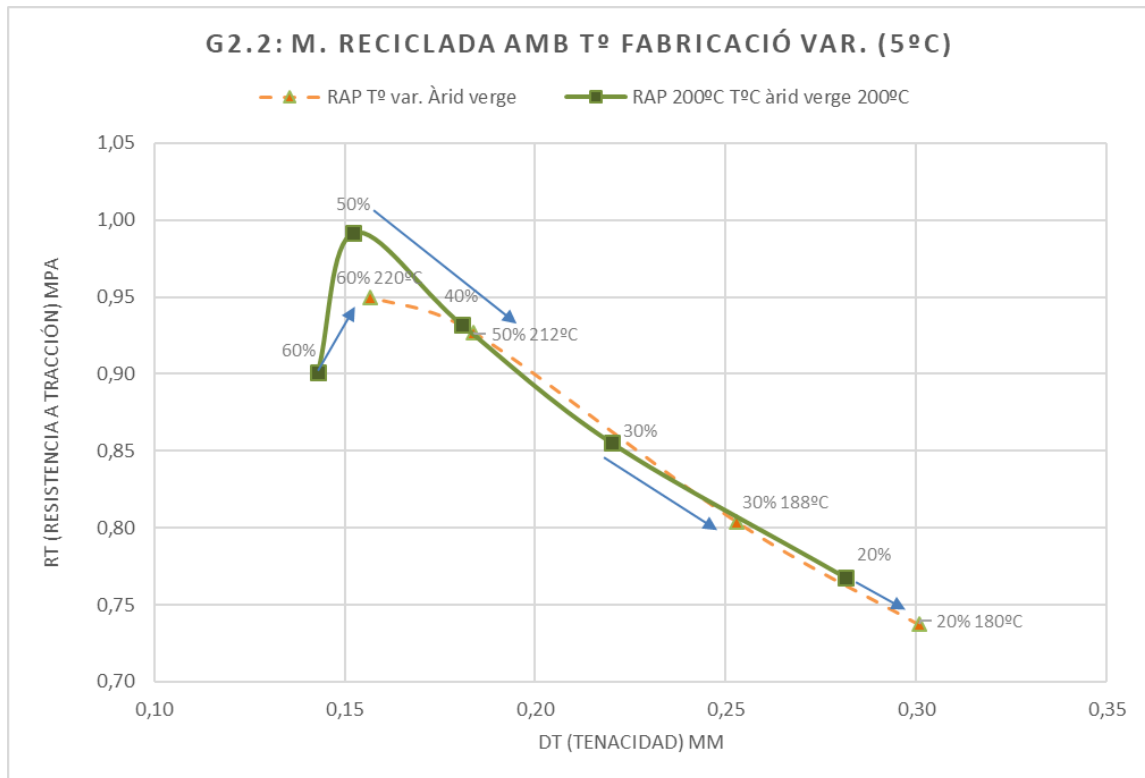


Il·lustració 4.14 – Gràfic 2.1 Mescla Reciclada Completa(RT-DT) 20ºC.

Observem com les sèries de 60% i 50% que s'han fabricat amb un augment de temperatura dels àrids verges han millorat la ductilitat, però han patit una certa pèrdua de resistència a 20ºC.

Per altra banda, les series 30% (188°C) i la 20% (180°C) en les quals s'ha disminuït la temperatura d'àrid verge respecte la constant de 200°C, veiem com pateixen una reducció de ductilitat i mantenen la resistència de forma general.

En aquest cas, l'augment de la temperatura de mesclat en la fabricació té un impacte positiu, sobretot en el paràmetre de Desplaçament de Tenacitat.



Il·lustració 4.15 – Gràfic 2.1 Mescla Reciclada Completa (RT-DT) 5ºC.

En el gràfic 2.1 (Il·lustració 4.15) a temperatura 5ºC, s'observa que el màxim valor en resistència de les series amb major temperatura de mesclat passar a ser el 60% (220ºC), en lloc del 50% amb àrids verges a 200ºC que marcava el pic màxim en la corba dibuixada. La sèrie de la mescla 60% (220ºC) millora en ductilitat i resistència.

La sèrie de 50% (212ºC) s'assimila a la sèrie 40% amb àrids verges a 200ºC, perd resistència clarament però guanya ductilitat respecte la seva mateixa sèrie amb àrids a menor temperatura (200ºC).

Per últim, les sèries 30% (188ºC) i 20% (180ºC) es comporten de forma contrària a com ho feien quan s'han assajat a 20ºC. Sembla que són lleugerament més dúctils i amb menys resistència. Tot i que la diferència respecte la mescla principal és mínima, aquest fet es podria explicar pel seu augment de contingut de buits (H%) que fa que la mescla a temperatures baixes al tenir més buits es comporti d'una manera més dúctil.

CAPÍTOL 5. CONCLUSIONS

La utilització de mescles bituminoses reciclades amb alts continguts de RAP és un objectiu que es persegueix des de fa temps ja que permet reduir els danys ambientals i els costos econòmics.

És cert que fins ara no acaba de quedar clar quines són les propietats reals de les mescles reciclades amb un cert percentatge de RAP, quins són els factors de fabricació que fan variar aquestes propietats i fins a quin punt es pot reaprofitar realment el betum envellit del RAP.

En aquest estudi, hem fabricat mescles reciclades amb un 20% de RAP fins arribar a un màxim de 60% de RAP per buscar equivalències amb una mescla de referència fabricada sense reciclat. Després d'analitzar les propietats més característiques podem concloure que:

- En percentatge de buits (H%), la sèrie fabricada amb un 40% de RAP aconsegueix uns percentatges entre 5% i 6% (%H) semblants a la de la mescla patró amb un 3,5% de lligant. S'ha pogut observar també una mínima millora de la compactació en els resultats dels continguts de buits gràcies al sobreescalfament dels àrids verges tot i que la variació de temperatura ha estat molt poca.
- Sobre les propietats mecàniques, a mesura que augmentem el percentatge de RAP, la mescla esdevé menys dúctil i guanya molta resistència. Això fa que la mescla reciclada sigui molt fràgil i no apta. S'ha observat com una teòrica mescla amb un 38% de RAP i 4,5% de lligant total, s'apropa a les propietats mecàniques de resistència i tenacitat d'una mescla de referència d'entre 3,3% i 3,5% de lligant verge. En cap cas hi ha un mescla reciclada que iguali en tots els paràmetres Fènix a la Mescla Patró amb un 4,5% de betum.

Si tenim en compte que la mescla teòrica reciclada (38% RAP) amb un teòric 4,5% de lligant (2,8% dels quals verge) s'ha quedat en uns nivells de propietats mecàniques pròpies d'una mescla entre 3,3% i 3,5% de betum, podem intuir que el betum envellit del RAP no s'ha pogut recuperar o mobilitzar-se i fondre's amb el lligant verge en la seva totalitat.

- Es creu que per l'alt grau d'envelliment del betum contingut en el RAP (evidenciat per la seva baixa penetració) ha estat el principal factor que ha impedit aconseguir les mateixes propietats mecàniques que la mescla de referència. Per confirmar aquesta hipòtesis, es recomana repetir l'estudi amb

RAPs amb betums que tinguin una penetració superior, que podrien donar millors resultats al combinar-los amb un betum més tou.

Pel que fa a la elecció del betum nou afegit, el 160/220, no existeix en el mercat un altre betum més tou, pel que seria impossible tractar d'incrementar la ductilitat de la mescla reciclada fins ser comparable a la mescla sense RAP amb un 4,5% de betum.

CAPÍTOL 6. FUTURES LÍNIES D'INVESTIGACIÓ

Aquest treball final de grau deixa varies línies d'investigació obertes en les que es poden dedicar futurs estudis per esclarir i aportar nova informació per les mescles bituminoses reciclades. Amb la fi d'ampliar l'estudi de les propietats de les mescles bituminoses reciclades es suggereixen les següents línies complementaries d'estudi:

- En primer lloc vull apuntar el TFG *“Estudio del efecto de la temperatura del RAP en las propiedades de las mezclas bituminosas recicladas”* que es farà a partir del present estudi i el realitzarà en Guillem Gil Tolosa per tractar amb més abast les variables de temperatura de mesclat, variant en un ampli ventall de temperatures el RAP a l'hora de fabricar la mescla.
- En segon lloc, seria interessant profunditzar en l'estudi de la fabricació de mescles reciclades prenent com a variable l'ús de productes rejuvenidors del betum envellit. Intentant buscar bones condicions de fabricació de mescles reciclades per arribar a bons resultats amb alts percentatges de RAP.
- Per últim, es recomana repetir l'estudi present amb RAPs amb betums que tinguin una penetració superior, ja que podrien donar millors resultats al combinar-los amb un betum més tou.

CAPÍTOL 7. BIBLIOGRAFIA

Bennert, Thomas, Jean-Valery Martin. (2010) Polyphosphoric Acid in combination with Styrene-Butadiene-Styrene Block Copolymer. Laboratory Mixture Evaluation. Asphalt pavin Technology Proceedings Association of Asphalt Technologists.

CEDEX Reciclado de pavimentos asfálticos 5.1 (12/2011).

Domingo Pérez Madrigal, Tesis Doctoral (2018) Efecto de las condiciones de fabricación en las propiedades de las mezclas bituminosas recicladas.

Howard, I. L., Cooley, A. L. Jr., and Doyle, J. D. (2009) Laboratory testing and economic analysis of high rap warm mixed asphalt. Mississippi Department of Transportation.

Huang Y, Li G, Vukosavilijevic D, Shu X, Egan B. (2005) "Laboratory investigation of mixing hot-mix asphalt with reclaimed asphalt pavement". Transportation Research Record.

John J. Emery i Masahisa Terao, 1992. Transportation research record. Asphalt Technology for Hot In-Place Surface recycling.

Marko Oreskovic, Gustavo Menegusso Pires, Sara Bressi, Kamilla Vasconcelos, Davide Lo Presti (2019). Quantitative assessment of the parameters linked to the blending between reclaimed asphalt binder and recycling agent: A literatura review.

Rondón-Quintana, H. i L. Moreno-Anselmi, 2010. Influencia del agua en el fenómeno de stripping en mezclas asfálticas: estudio sobre el ligante. Ing. Univ. Bogotá (Colombia) 14(2), pp. 297-312.

Servas, V P Whitehall Press Limited-Headington Hill Hall-Oxford OX3 0BW, England. Transportation research laboratory. Hot Surface recycling. Highway Engineer Volume: 28

Tarefder, R A., Zaman, M., i Hobson, K. (2003), Micro Deval Test for Evaluating Properties of Roadway Aggregate, International Journal of Pavements.

Valdés, G.: Pérez-Jimenez, F.; Botella, R. Revista de la Construcción, vol. 8, núm. 1 2009, pp.114-125 Ensayo Fénix, una Nueva Metodología para Medir la Resistencia a la Fiauración en Mezclas Asfálticas.

Valdés, G.: Pérez-Jimenez, F.; Miró, R.; Martinez, A.; Botella, R. Fénix Test. Development of a new test procedure for evaluating cracking resistance in bituminous mixtures. Transportarion Research Record, Journal of Transportation Research Board, nº 2181 (2010).

Zaumanis, M. And Mallick, R.B., (2015) Review of very high content reclaimed asphalt use in plant produced pavements: State of the Art. International Journal of Pavement Engineering, Vol 16 No. 1.

Zhao, Sheng, Baoshan Huang, Xiang Shu, and Mark E. Woods. (2016) Quantitative Evaluation of Blending and Diffusion in High RAP and RAS Mixtures.

Altres:

Cuadernos tecnológicos de la PTC. Nº5 / 2015: El envejecimiento en mezclas asfálticas.

Autores: Rodrigo Miró Recasens, Teresa López Montero.

Cuadernos tecnológicos de la PTC. Nº5 / 2017: El daño por humedad en las mezclas asfálticas.

Autores: Rodrigo Miró Recasens, Teresa López Montero.

Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes. 2004 FOM/891/2004

PG4-2001. Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de conservación de carreteras.

Normativas UNE:

UNE EN 12697-5:2010: Densidad màxima

UNE-EN 12697-6:2012: para determinar la densidad aparente de las probetas.

UNE-EN 12697-8:2003: para determinar el contenido de huecos.

http://www.carreteros.org/normativa/pg3/articulos/5/iv/a_542e.htm

<http://www.asefma.es/resistencia-a-la-fisuracion-de-las-mezclas-sma>

ANNEXES

ANNEX 1. Geometria de les provetes, Pesos i Dades densitats màximes

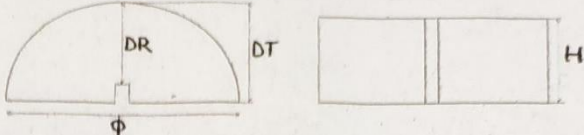
Altures de proveta, Pes sec, Pes submergit, P.S.S.S.

Mescla Patró (20 Provetes)

Probeta Núm.	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	Hm (mm)	Peso Seco (g)	Peso Sumergido (g)	P.S.S.S (g)	Densidad (g/cm3)	Densidad Media
1	59,5	59,5	59,6	59,5	1121,8	655,5	1129,1		
2	60	60,1	60	60	1112,6	654,4	1125,1		
3	59,2	59,3	60,9	59,8	1104,6	649,2	1117,3		
4	59,1	59,5	59,4	59,3	1103,8	650,8	1113,2		
5	58,7	59,2	59,1	59	1120,2	659,0	1126,2		
6	58,4	58,9	59,0	58,8	1125,8	664,2	1129,6		
7	58,9	59	59	59	1127,8	664,0	1133,1		
8	59,1	59,9	59,3	59,4	1136,8	670,2	1142,3		
9	58,8	59	58,7	58,8	1134,8	669,9	1137,6		
10	58,9	59,1	59	59	1139,3	673,5	1142,4		
11	58,6	58,8	58,4	58,4	1129,2	668,9	1132,2		
12	58,8	58,7	59,2	58,9	1127,6	667,2	1130,9		
13	58,5	58,2	58,4	58,4	1133,8	674,0	1136,5		
14	58,2	58,7	58,3	58,3	1133,1	673,9	1136,3		
15	58,6	58,7	58,2	58,5	1133,7	674,8	1136,5		
16	58,5	58,4	58,5	58,5	1143,6	680,2	1146,7		
17	57,8	57,8	57,8	57,7	1132,2	672,6	1134,9		
18	59,1	58,3	58,6	58,7	1142,2	678,1	1144,7		
19	58,4	58,4	58,3	58,4	1134,7	672,5	1138,0		
20	57,9	57,9	57,7	57,8	1117,5	662,8	1120,5		

Distàncies de ranura (DR) i Distàncies totals (DT)

Mescla Patró



Probeta N°	φ (mm)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	Hm (mm)	DR1 (mm)	DR2 (mm)	DRm (mm)	DT1 (mm)	DT2 (mm)	DTm (mm)
1-A						44,8	44,7		50,4	50,7	
1-B						44,2	44,7		49,1	48,9	
2-A						45,0	44,8		50,6	50,3	
2-B						44,7	44,6		48,8	49,1	
3-A						44,9	45,0		50,7	49,9	
3-B						43,7	44,6		49,6	48,8	
4-B						43,6	44,7		49,5	48,7	
4-A						44,7	45,5		49,9	49,9	50,9
5-A						44,6	44,8		50,4	50,9	
5-B						44,3	45,1		49,2	48,8	
6-A						44,7	43,2		48,83	49,4	
6-B						45,1	44,4		50,4	50,9	
7-A						45,2	44,4		50	50,7	
7-B						45,2	44,4		49,5	48,9	
8-A						45,0	45,5		50,2	49,9	50,5
8-B						44,3	45,1		49,4	49,1	
9-A						45,2	44,5		50,5	50,9	
9-B						44,5	44,7		49,2	48,5	
10-A						44,9	46		49,8	50,7	
10-B						44,2	44,3		49,5	49,2	48,5
11-A						45	44,4		50	50,7	
11-B						45	44,7		49,1	48,9	
12-A						44,7	44,9		50,8	50,2	
12-B						44,8	44		48,9	49,3	
13-A						45	44,9		50	50,6	
13-B						44,6	44,5		49,5	49,7	
14-A						45,9	45,6		49,8	50,4	
14-B						44,4	44,7		49,6	48,9	
15-A						44,8	44,8		50,1	50,3	
15-B						44,3	44,4		49,2	49	

Altures de proveta, Pes sec, Pes submergit, P.S.S.S.

Mescla Reciclada fabricada amb àrids verges a 200°C (20 Provetes)

GFC 20 provetes 170-200°C
 SCILLEY

Probeta Núm.	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	Hm (mm)	Peso Seco (g)	Peso Sumergido (g)	P.S.S.S (g)	Densidad (g/cm3)	Densidad Media
1	58,7	57,5	57,3		1119,9	666,0	1122,7		
2	57,7	57,8	57,8		1126,3	669,2	1128,4		
3	57,3	57,5	57,7		1127,5	671,8	1129,5		
4	57,8	58	58,1		1133,6	675,8	1135,7		
5	58,4	58,6	58,4		1137,3	676,5	1140,2		
6	58	57,6	57,4		1124,8	668,9	1128,8		
7	58,9	58,5	58		1124,6	667,6	1126,8		
8	58,5	58,6	58,2		1135,1	675,3	1137,6		
9	58,2	58,7	58		1135,6	675,6	1137,9		
10	58	58,5	57,7		1133	673,9	1134,7		
11	57,7	57,9	58,3		1119,6	661,6	1121,3		
12	58,6	58,3	58,2		1121,5	663,6	1124,0		
13	57,3	57,2	57,6		1123,8	668,7	1125,5		
14	57,7	58,2	57,8		1119,7	664,8	1122,0		
15	57,6	58,3	58		1122,4	666,5	1124,8		
16	57,3	57,2	57,3		1118,8	664,2	1122,0		
17	58,2	58,2	58,3		1125,4	666,2	1128,2		
18	58,5	58,3	58,1		1121,6	661,7	1125,2		
19	57,2	57,5	57,7		1120,8	665,5	1122,8		
20	57,4	57,6	57,5		1115,1	660,0	1117,94 1117,94		

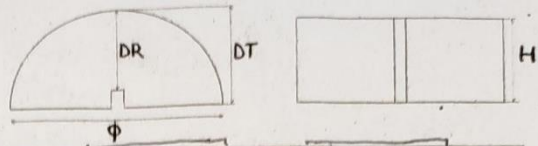
Distàncies de ranura (DR) i Distàncies totals (DT)

Mescla Reciclada fabricada amb àrids verges a 200°C (20 Provetes)

GFC 20 provetes dobles + T_{max} 120°C
T_{env.} de 200°C ①

Probeta N°	φ (mm)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	Hm (mm)	DR1 (mm)	DR2 (mm)	DRm (mm)	DT1 (mm)	DT2 (mm)	DTm (mm)
1-A						44,5	44,5		49,54	50	
1-B						44,7	45,7		49,7	49,3	
2-A						44,6	45,1		49,6	50,3	
2-B						44,4	43,9		49	49,7	
3-A						45,4	44,5		50,2	50,4	
3-B						45,3	43,6		49,5	49,9	
4-A						44,7	44,9		49,3	50	
4-B						44,2	43,5		49,3	49,5	
5-A						43,3	43		49,4	49,2	
5-B						44,7	45,1		49,8	50,2	
6-A						45,0	44,4		49,9	49,5	
6-B						44,6	45		49,5	50	
7-A						44,8	44,4		50,3	49,5	
7-B						43,7	44,1		49,7	49,2	
8-A						43,8	44,3		49,1	50	
8-B						45	43,6		50,1	49,5	
9-A						43,9	44,6		49,5	49,8	
9-B						45,5	49,3		50	49,7	
10-A						43,8	44,3		49,5	50,2	
10-B						44,8	44,5		50,2	44,6	
11-A						43,9	44,10		49,4	49,7	
11-B						44,2	44,4		50,1	49,7	
12-A						43,6	44,5		49,2	49,9	
12-B						44,1	43,8		50,1	49,7	
13-A						43,5	44,9		49,5	50	
13-B						44,6	44,4		50	48,5	
14-A						44,2	44,4		50	49,5	
14-B						44,7	44,4		49,6	50,1	
15-A						43,3	44,7		49,4	50	
15-B						44,7	44,3		50,2	48,6	

GFC 20 probetas dobles T_{trm} 120°C
 T_{mid} 200°C



Probeta N°	Φ (mm)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	Hm (mm)	DR1 (mm)	DR2 (mm)	DRm (mm)	DT1 (mm)	DT2 (mm)	DTm (mm)
16-A						43,6	44,5		49,5	50,1	
16-B						44,0	44,3		50,1	49,9	
17-A						43,8	44,6		49,6	49,8	
17-B						45,0	44,4		49,7	49,9	
18-A						45,2	45,9		49,4	50,2	
18-B						43,1	43,2		49,2	50,0	
19-A						43,5	44,4		49,5	49,7	
19-B						44,6	44,6		49,9	49,7	
20-A						41,6	44,9		49,6	50	
20-B						44,8	44,4		49,9	49,1	

Altures de proveta, Pes sec, Pes submergit, P.S.S.S.

Mescla Reciclada fabricada amb àrids verges a 180-188-212-220°C (4+4+4+4 Provetes)

GFC 4+4 + 4+4

2/12/19
5/12/19
11/12/19

Probeta Núm.	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	Hm (mm)	Peso Seco (g)	Peso Sumergido (g)	P.S.S.S (g)	Densidad (g/cm3)	Densidad Media
1	58,7	57,8	57,7		1127,4	669,3	1130,8		
2	57,7	58,3	58,0		1127,6	670,2	1129,7		
3	58	58	58,2		1130,1	675,5	1134,8		
4	58	58,1	58,2		1137,1	677,2	1138,8		
5	59,1	58	57,8		1118,6	663,8	1121,4		
6	57,7	57,7	57,6		1129,1	673,6	1130,7		
7	57,7	57,9	58		1129,0	672,6	1130,8		
8	57,7	57,8	58		1123,5	670,2	1125,3		
9	57,5	57,5	57,6		1115,8	661,4	1120,2		
10	57,4	57,9	57,7		1121,8	666,9	1124,1		
11	58,3	57,9	57,7		1118,9	663,9	1123,3		
12	57,6	57,8	57,8		1112,7	659,5	1118,0		
13	57,4	57,7	57,6		1113,9	656,2	1116,8		
14	57,3	57,7	57,3		1121,8	666,9	1124,7		
15	57,4	57,4	57,2		1117,7	662,0	1120,8		
16	57,5	57,2	57,8		1116,5	661,8	1119,6		

Distàncies de ranura (DR) i Distàncies totals (DT)

Mescla Reciclada fabricada amb àrids verges a 180-188-212-220°C (4+4+4+4 Provetes)

4+4+4+4 GFC
 20% 30% 20% 60% RAP signante heja

5/12/19

Probeta N°	φ (mm)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	Hm (mm)	DR1 (mm)	DR2 (mm)	DRm (mm)	DT1 (mm)	DT2 (mm)	DTm (mm)
1-A						45,8	45		50,15	49,9	
1-B						44,7	45,7		49,5	50	
2-A						45,3	45,5		49,5	50	
2-B						44,5	45,8		50,5	49,7	
3-A						45,5	45,4		49,4	50,1	
3-B						45,4	45,1		50,4	49,5	
4-A						45	45,4		49,3	49,9	
4-B						45,7	45,6		50,3	49,9	
5-A						44,8	45,3		50,3	50,1	
5-B						44,9	44,5		49,2	49,7	
6-A						45,7	45,6		49,4	49,3	
6-B						44,9	45,1		50,2	50	
7-A						45,2	46,2		49,5	49,7	
7-B						44,9	45,5		49,9	50,2	
8-A						45,2	45,6		49,3	49,7	
8-B						45,9	45,5		50,3	49,9	
9-A						44,4	44,5		49,8	49,7	
9-B						43,5	44,8		50	50,4	
10-A						45,0	44,4		49,8	49,7	
10-B						44,11	44,5		50	49,8	
11-A						44,8	43,9		50,1	49,3	
11-B						43,9	44,7		49,5	50,2	
12-A						45,1	44,3		50,2	49,7	
12-B						43,4	44,6		49,4	49,2	

GFC
 4-B 60% RAP

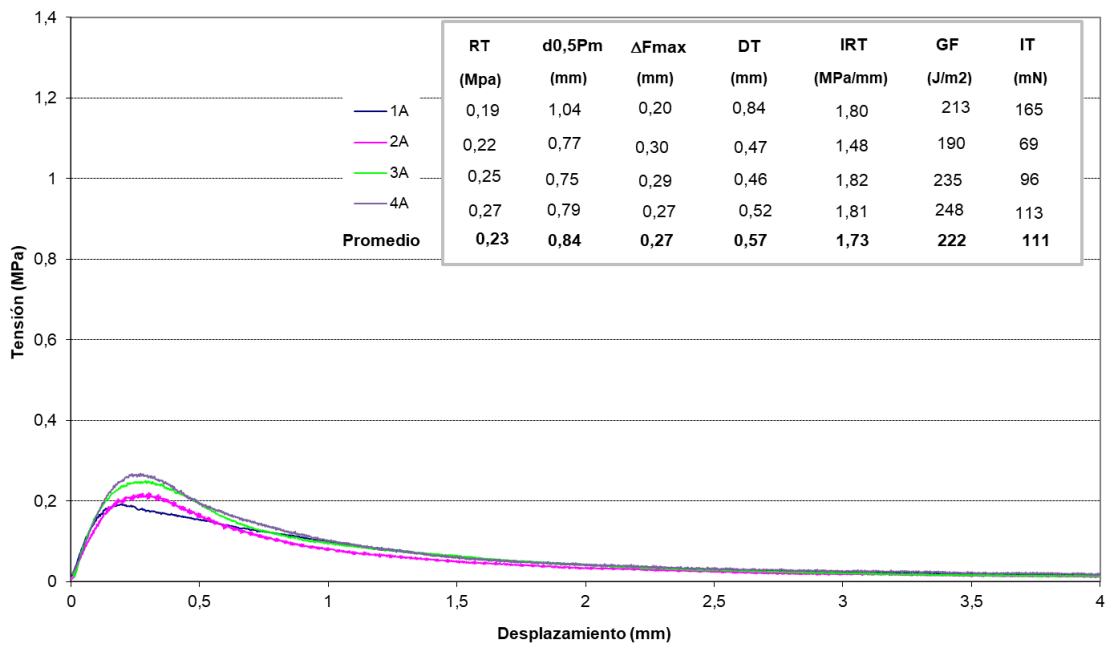
Probeta N°	φ (mm)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)	Hm (mm)	DR1 (mm)	DR2 (mm)	DRm (mm)	DT1 (mm)	DT2 (mm)	DTm (mm)
13-A						45	46,1		48,9	49,3	
13-B						46,2	45,9		50,4	50,4	
14-A						46,3	46,3		50,8	50,2	
14-B						45,8	45,6		48,8	49,2	
15-A						46,4	46		51	50,5	
15-B						45,1	45,8		48,6	49,2	
16-A						45,4	45,1		48,8	49,2	
16-B						46,2	46,4		50,6	50,2	

ANNEX 2 Gràfiques assaig Fènix

MESCLA PATRÓ 20°C

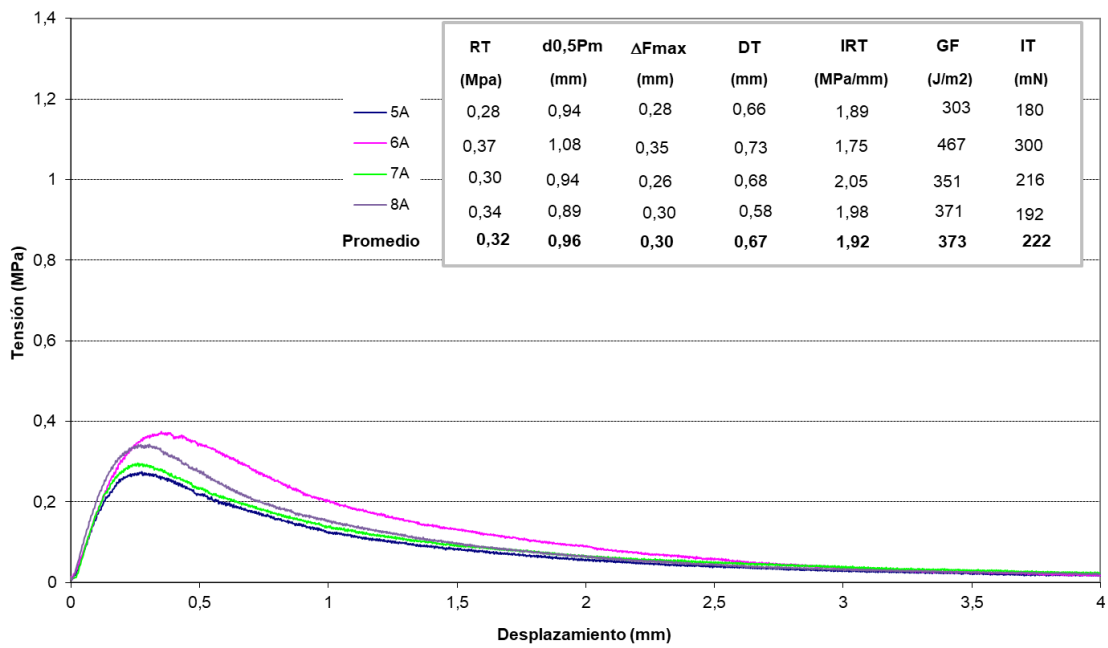
3% M. patrón 20°C

Ensayo Fénix a 20°C 3% y 1 mm/min. PATRÓN



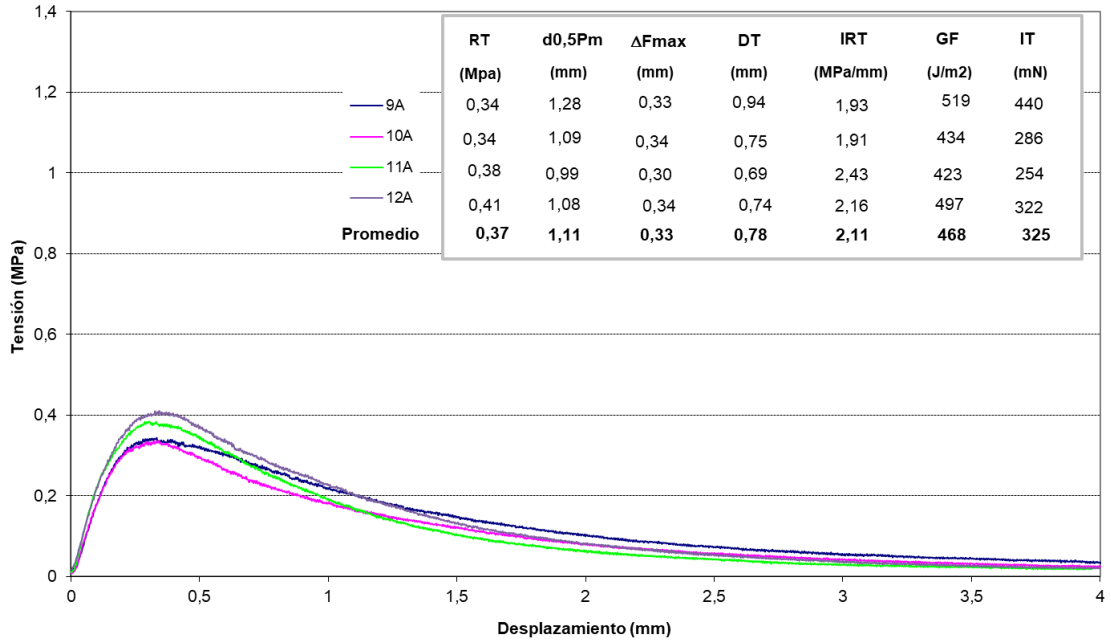
3.5% M. patrón 20°C

Ensayo Fénix a 20°C 3,5% y 1 mm/min. PATRÓN



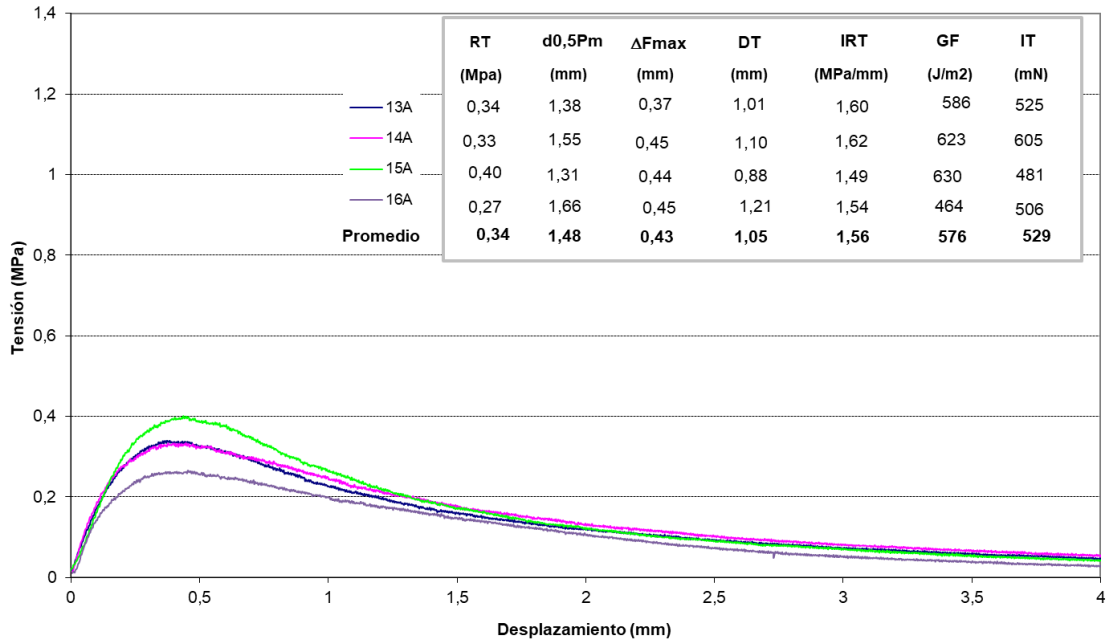
4% M. patrón 20°C

Ensayo Fénix a 20°C 4% y 1 mm/min. PATRÓN



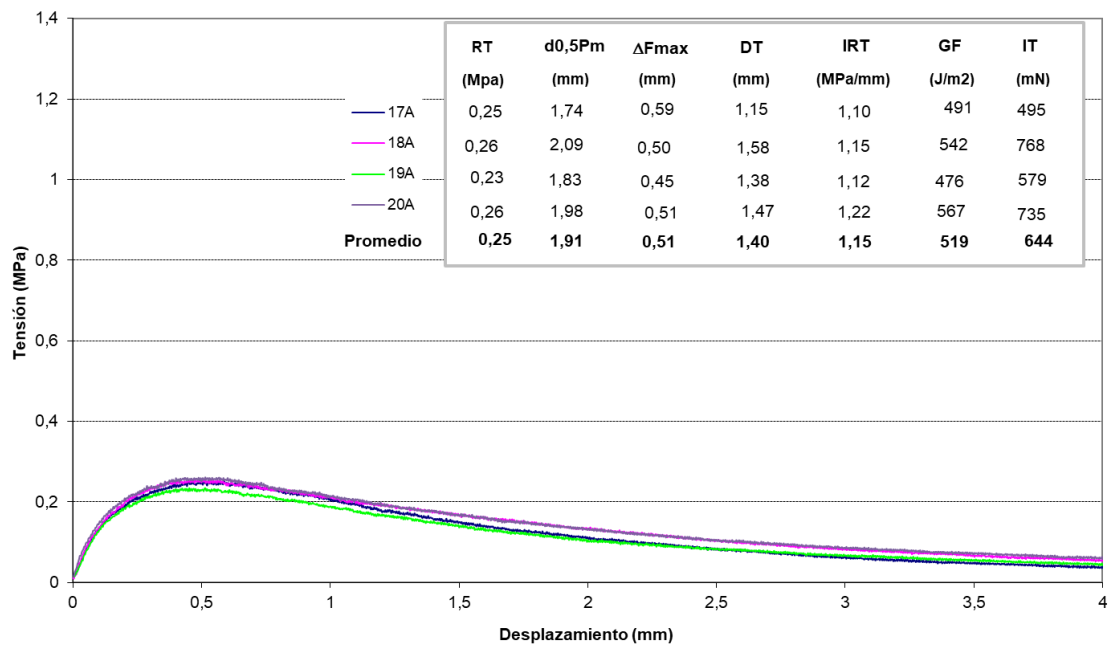
4.5% M. patrón 20°C

Ensayo Fénix a 20°C 4,5% y 1 mm/min. PATRÓN



5% M. patrón 20°C

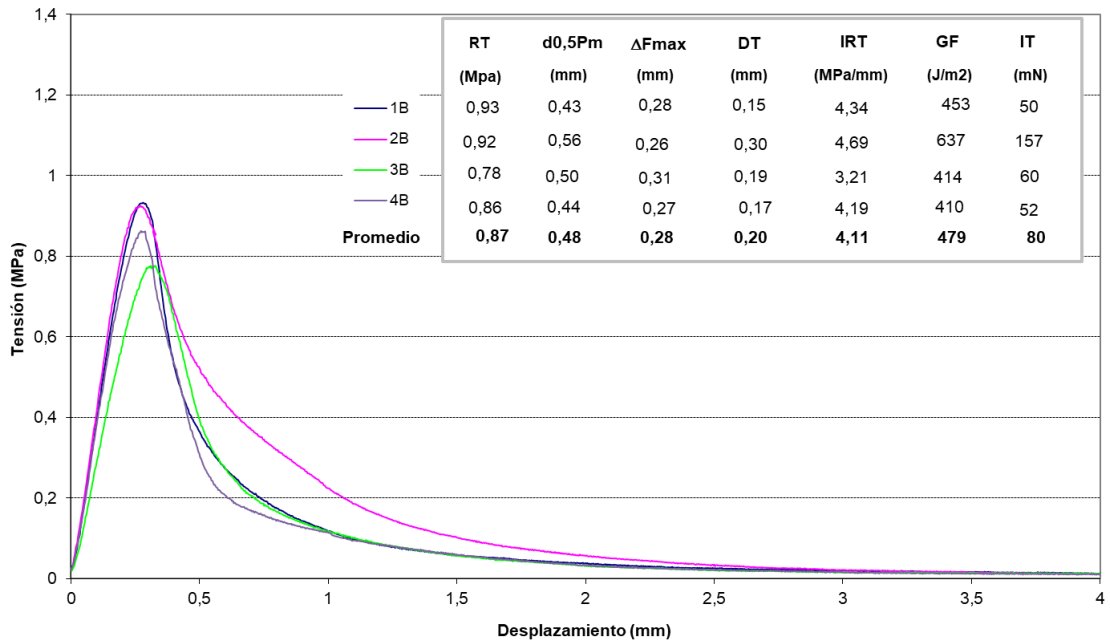
Ensayo Fénix a 20°C 5% y 1 mm/min. PATRÓN



GRÀFICS MESCLA PATRÓ 5°C

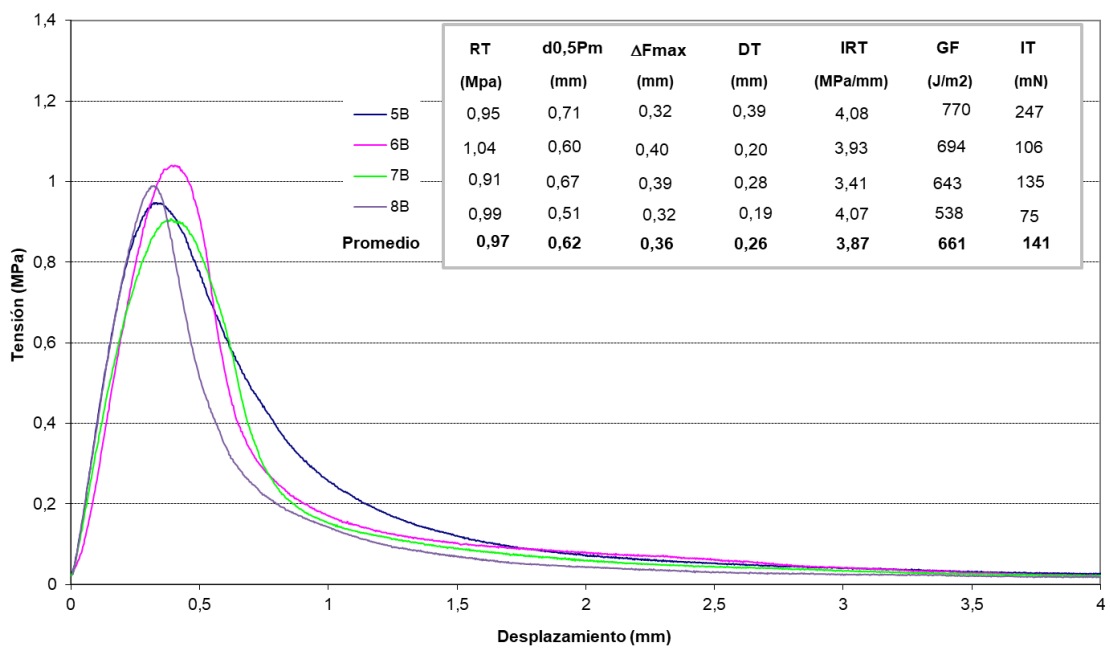
3% M. Patrón 5°C

Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min.



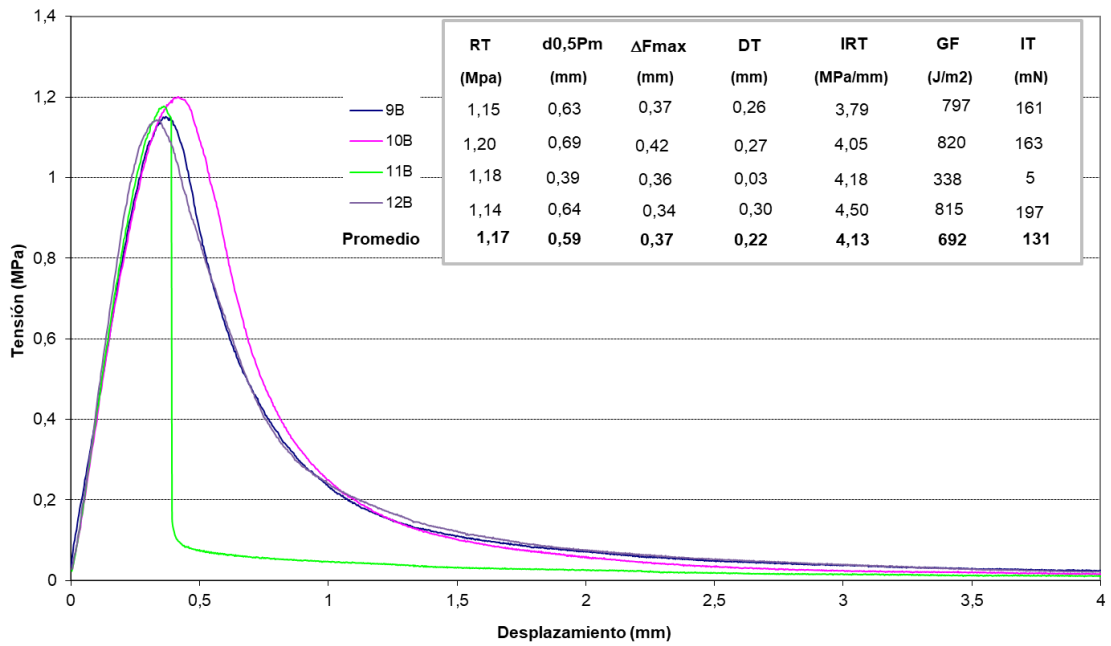
3.5% M. patrón 5°C

Ensayo Fénix a 5°C 3,5% y 1 mm/min. PATRÓN



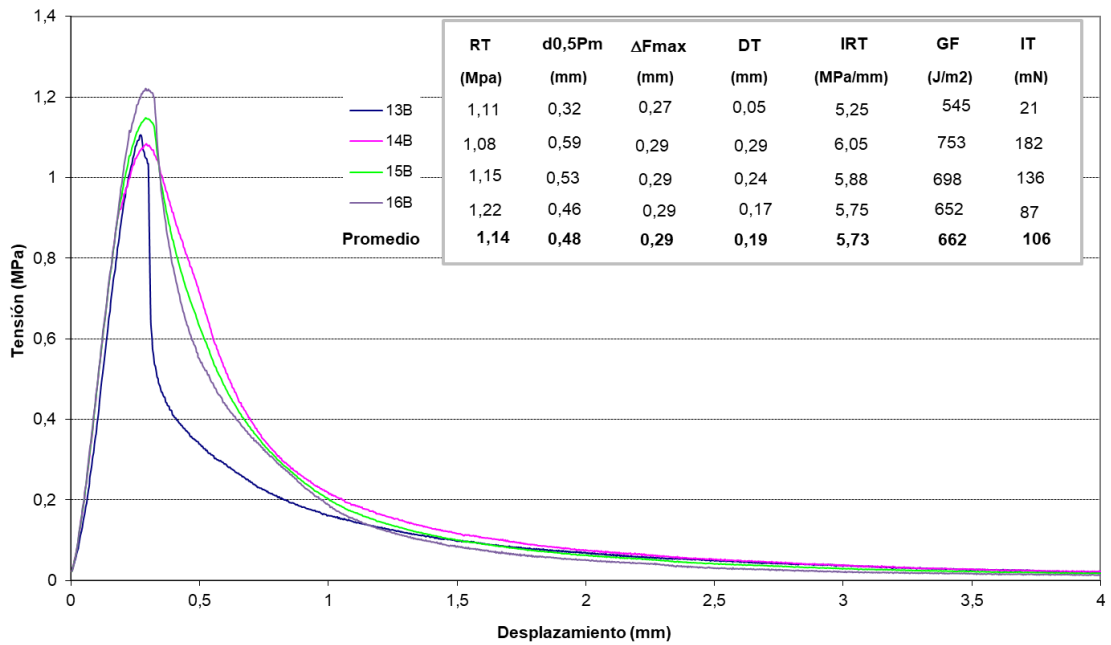
4% M.patrón 5°C

Ensayo Fénix a 5°C 4% y 1 mm/min. PATRÓN



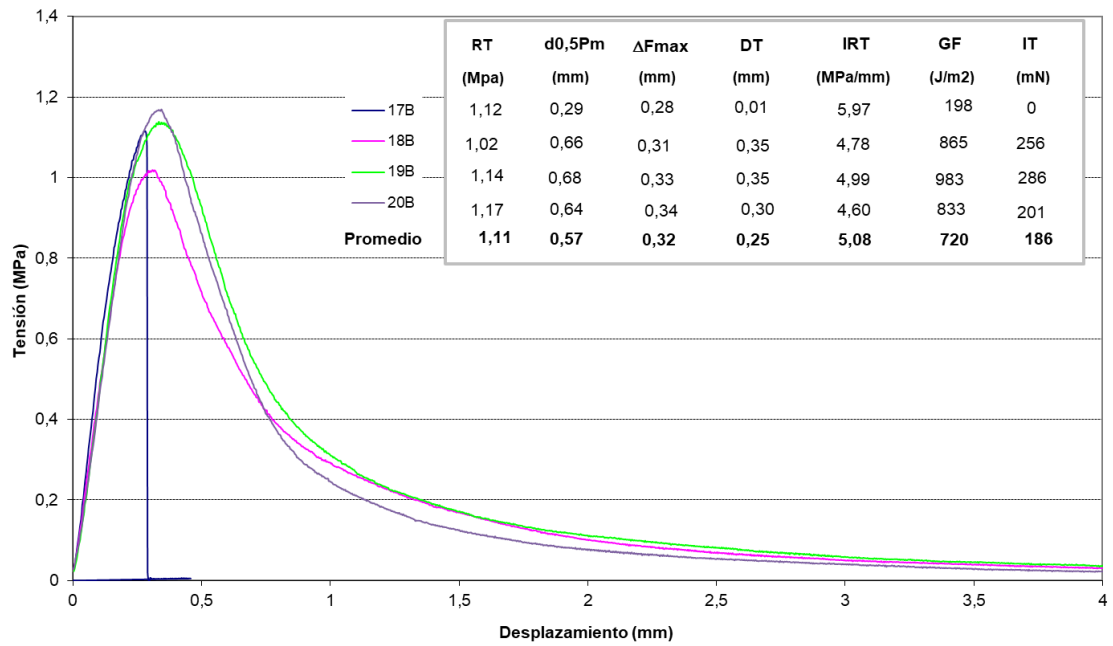
4.5% M.patrón 5°C

Ensayo Fénix a 5°C 4,5% y 1 mm/min. PATRÓN



5% M.patrn 5°C

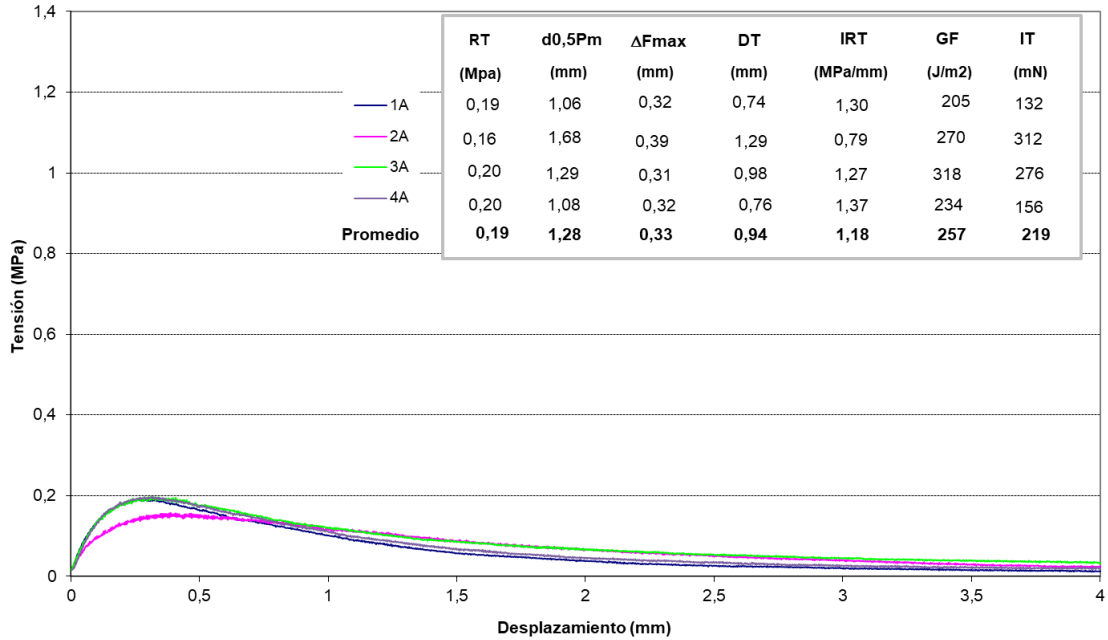
Ensayo Fénix a 5°C 5% y 1 mm/min. PATRÓN



GRÀFICS MESCLA RECICLADA

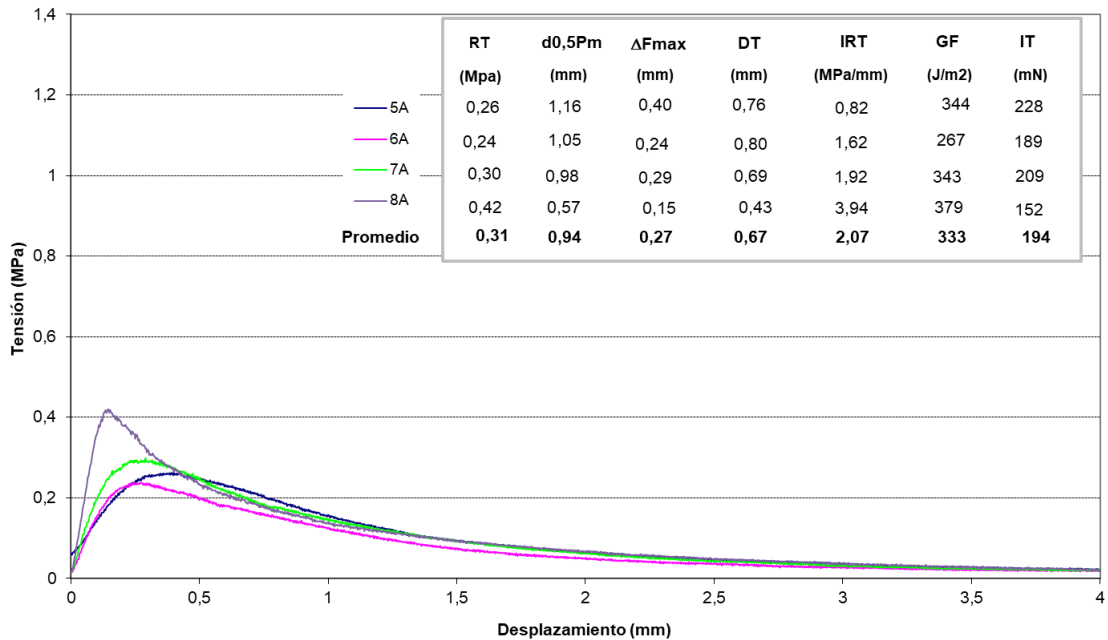
20% RAP 20°C

Ensayo Fénix 20% RAP a 20°C y 1 mm/min.



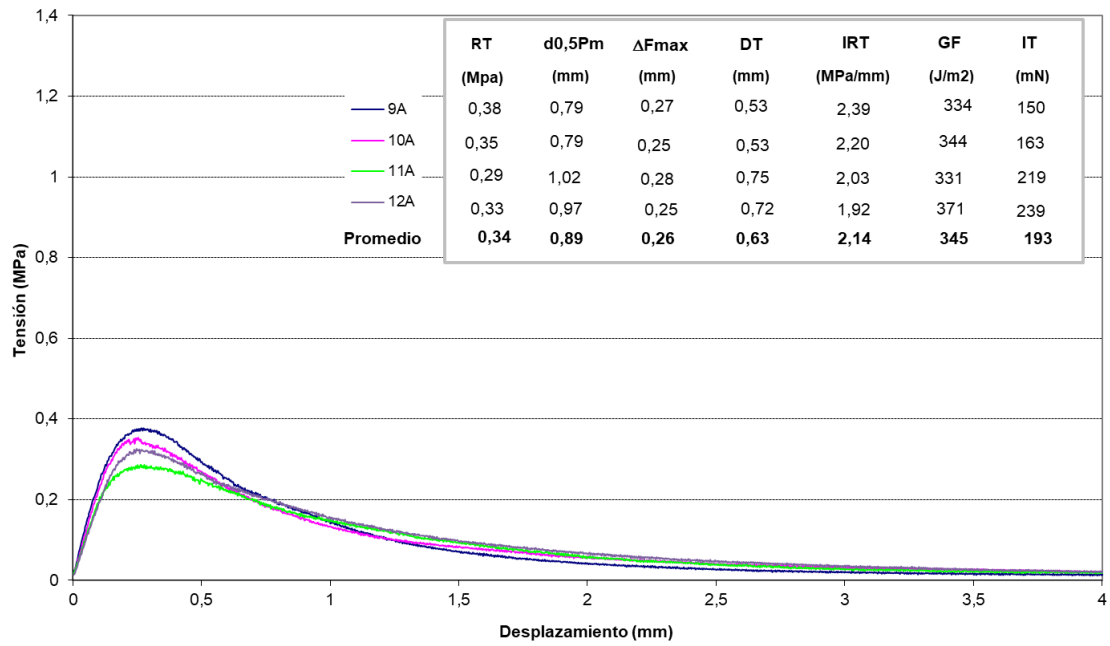
30% RAP 20°C

Ensayo Fénix 30% RAP a 20°C y 1 mm/min.



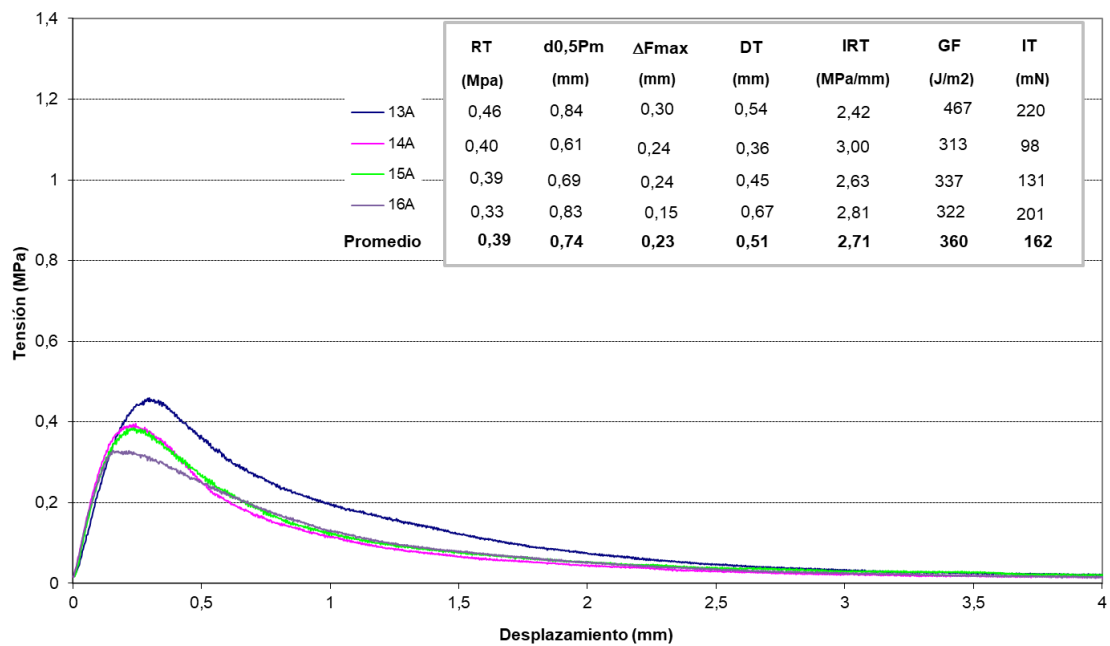
40% RAP 20°C

Ensayo Fénix 40% RAP a 20°C y 1 mm/min.



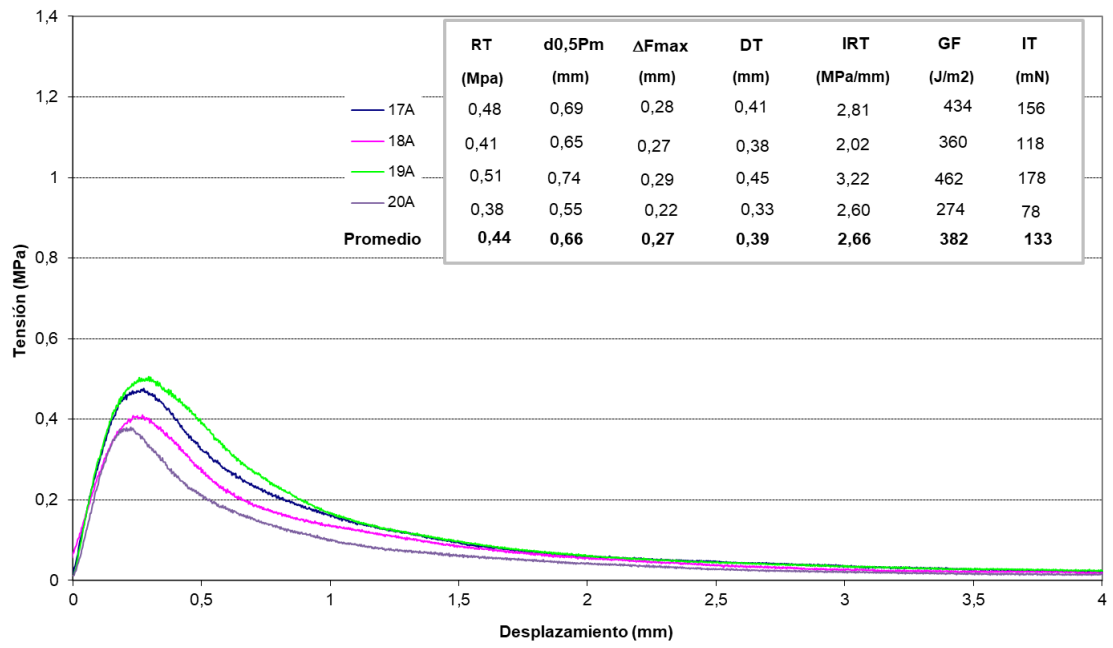
50% RAP 20°C

Ensayo Fénix 50% RAP a 20°C y 1 mm/min.



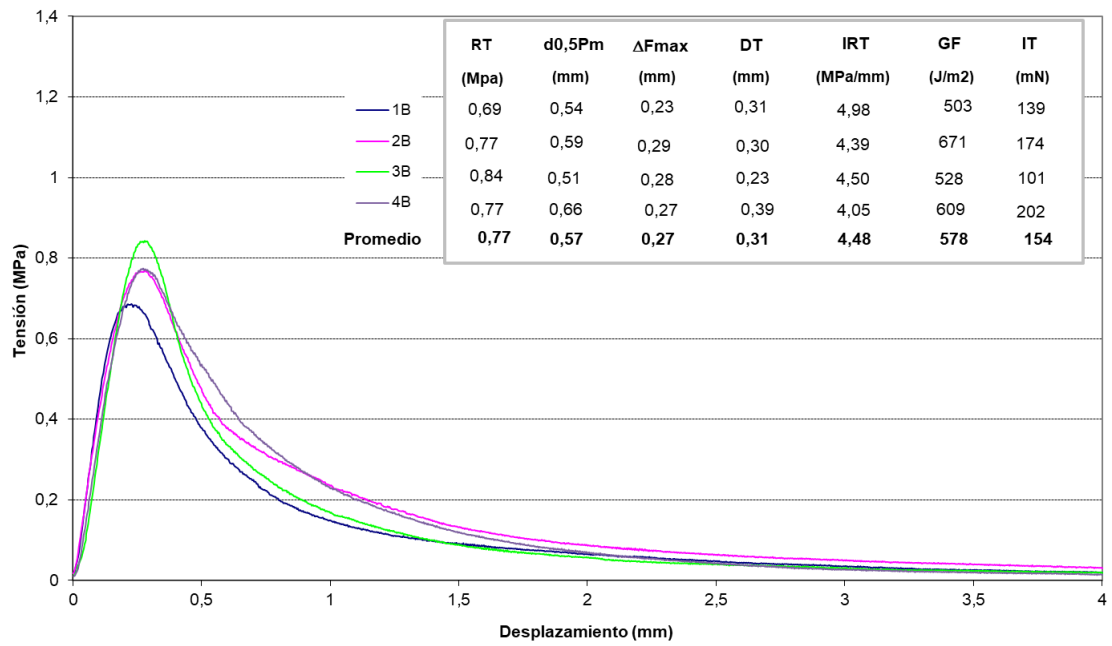
60% RAP 20°C

Ensayo Fénix 60% RAP a 20°C y 1 mm/min.



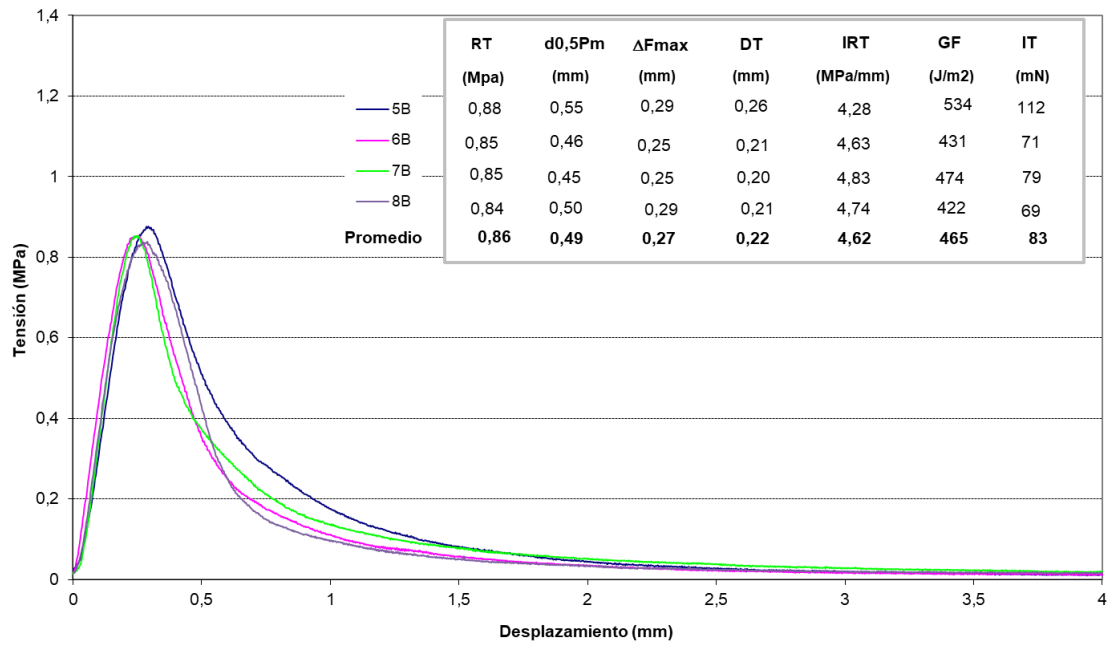
20% RAP 5°C

Ensayo Fénix 20% RAP a 5°C y 1 mm/min.

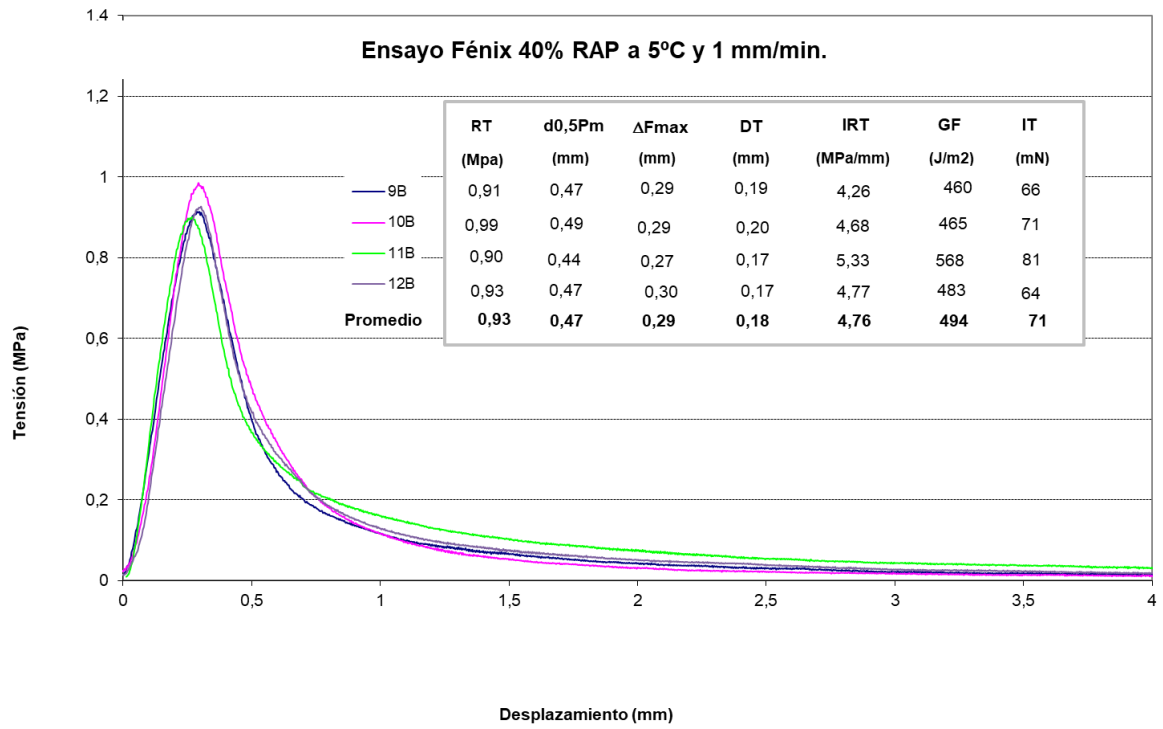


30% RAP 5°C

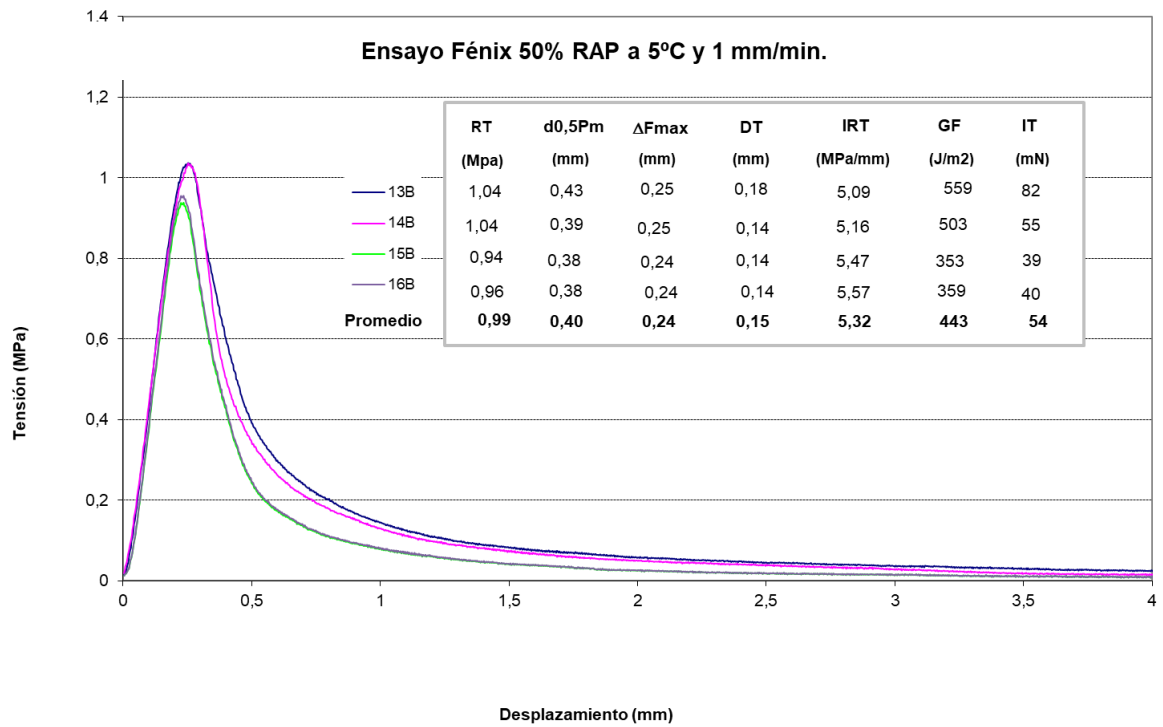
Ensayo Fénix 30% RAP a 5°C y 1 mm/min.



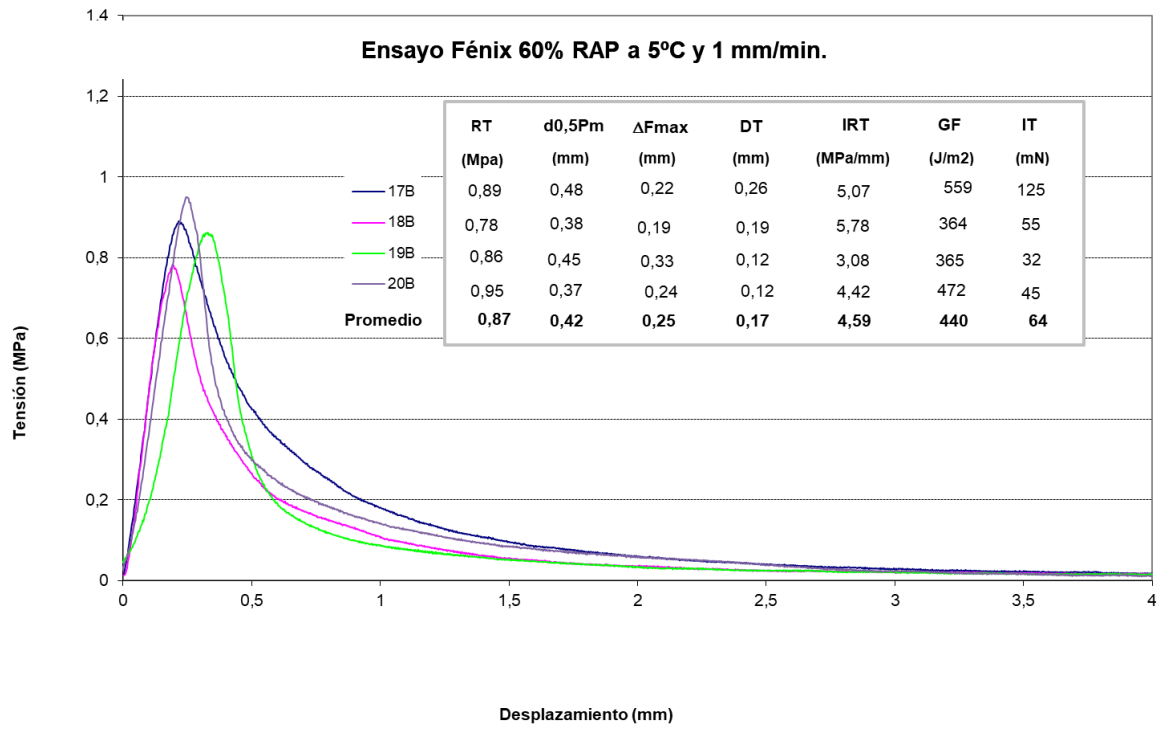
40% RAP 5°C



50% RAP 5°C

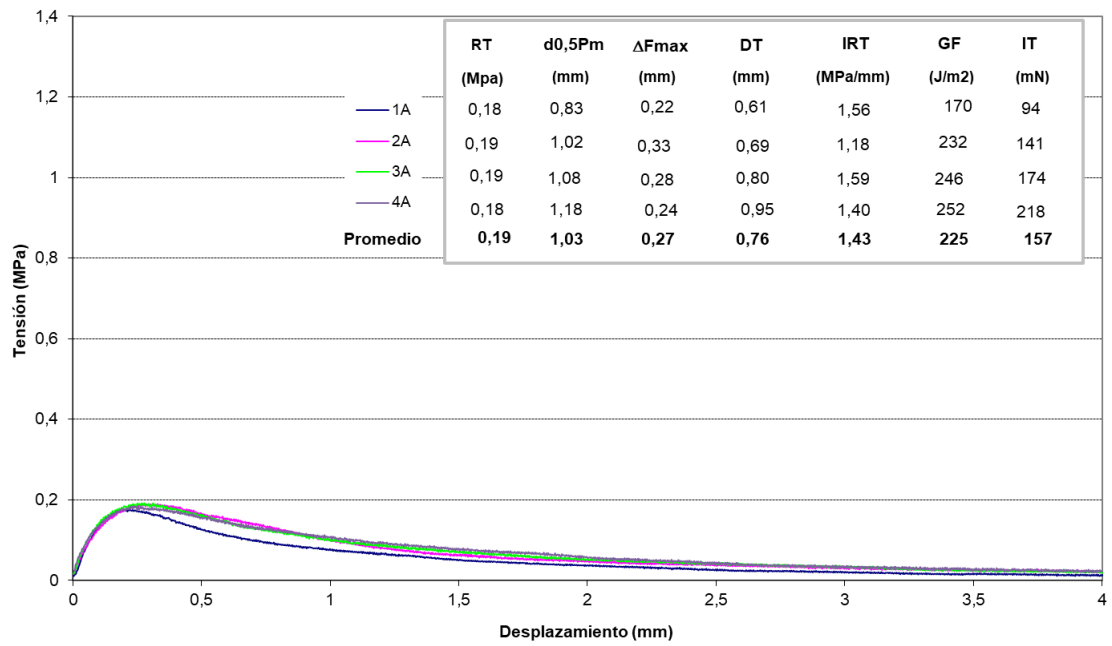


60% RAP 5°C



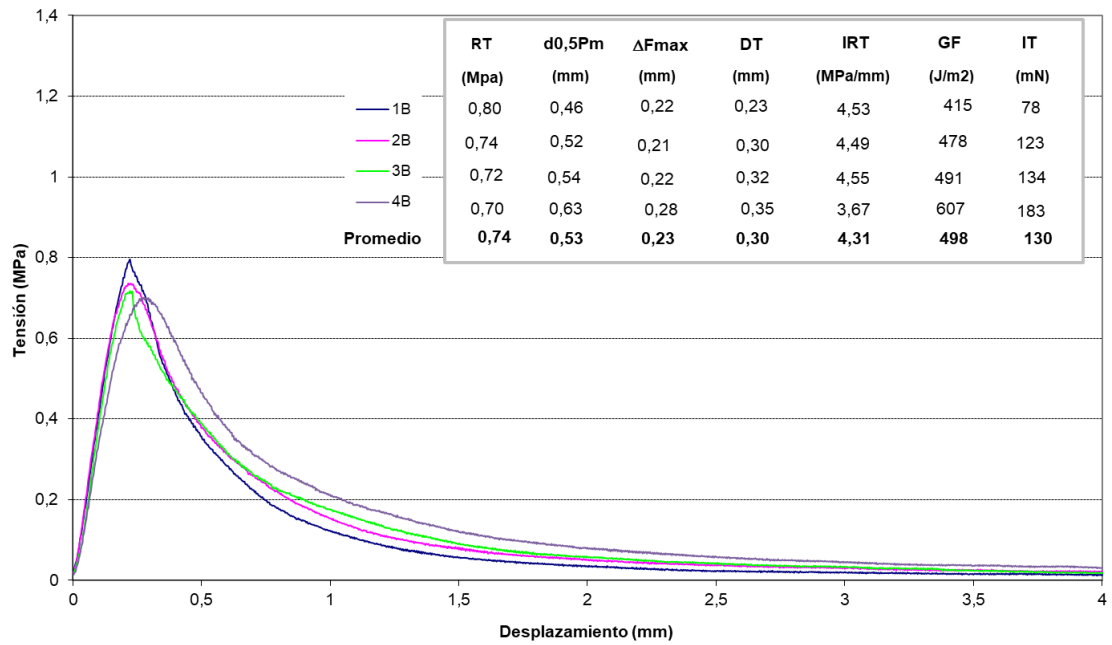
20% RAP 20°C

Ensayo Fénix 20%(180°C) RAP a 20°C y 1 mm/min.



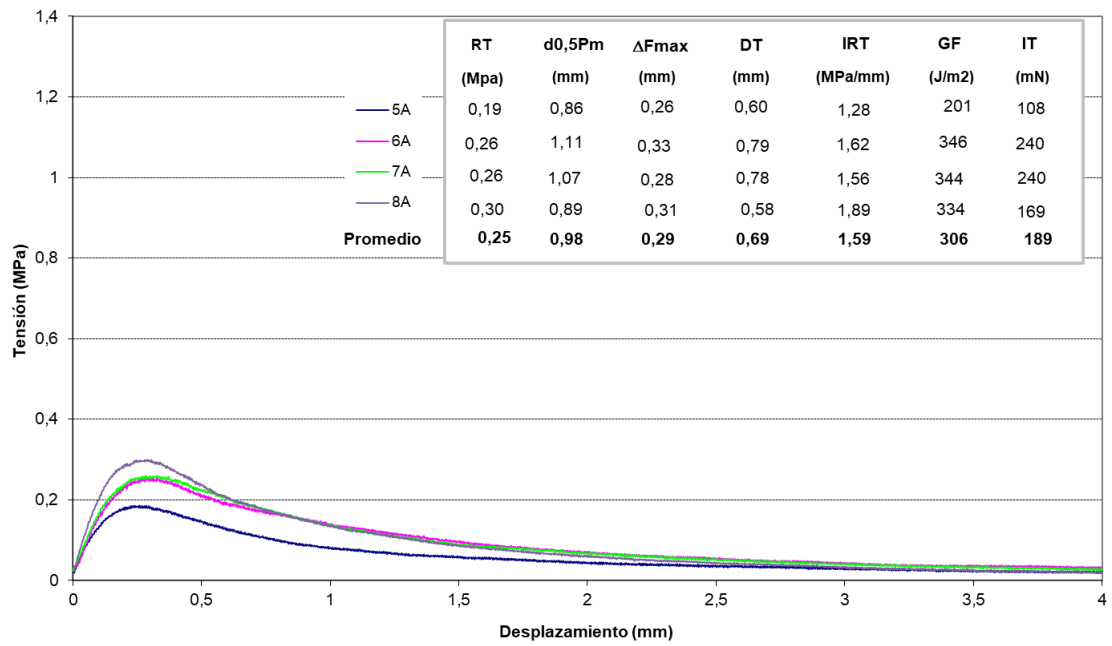
20% RAP 5°C

Ensayo Fénix 20%(180°C) RAP a 5°C y 1 mm/min.



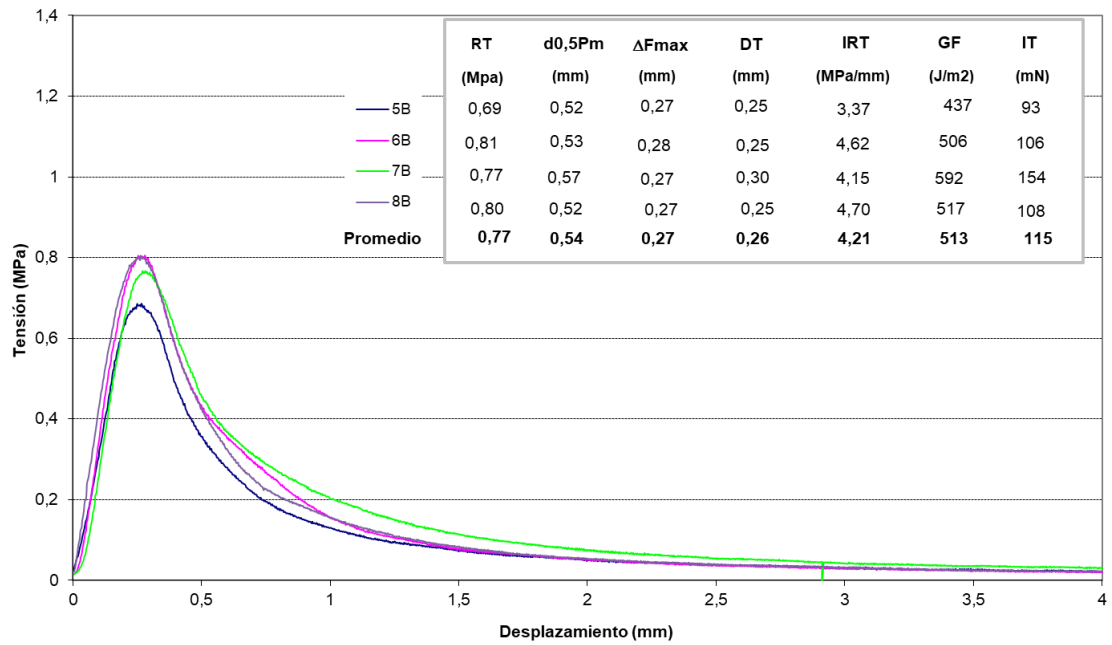
30% RAP 20°C

Ensayo Fénix 30%(188°C) RAP a 20°C y 1 mm/min.



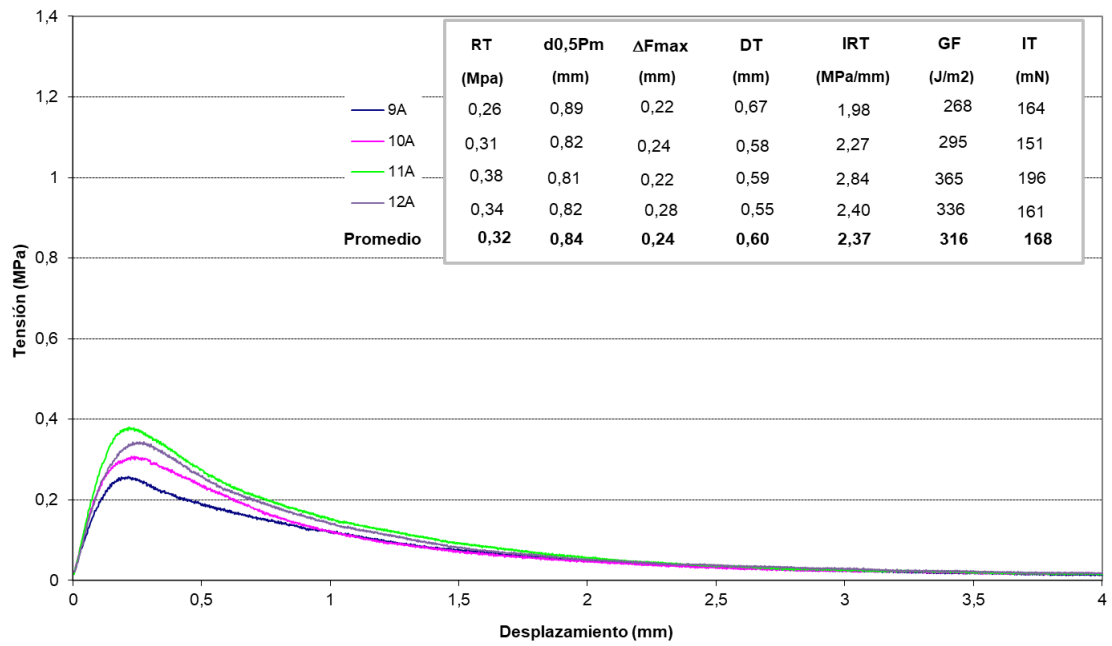
30% RAP 5°C

Ensayo Fénix 30%(188°C) RAP a 5°C y 1 mm/min.



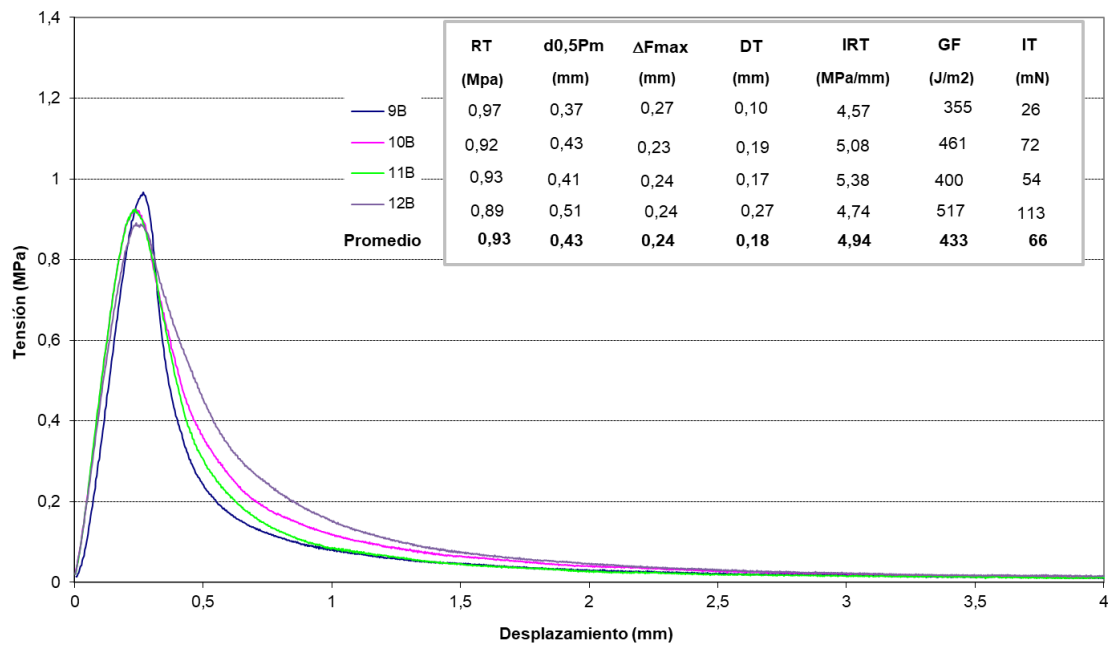
50% RAP 20°C

Ensayo Fénix 50%(212°C) RAP a 20°C y 1 mm/min.



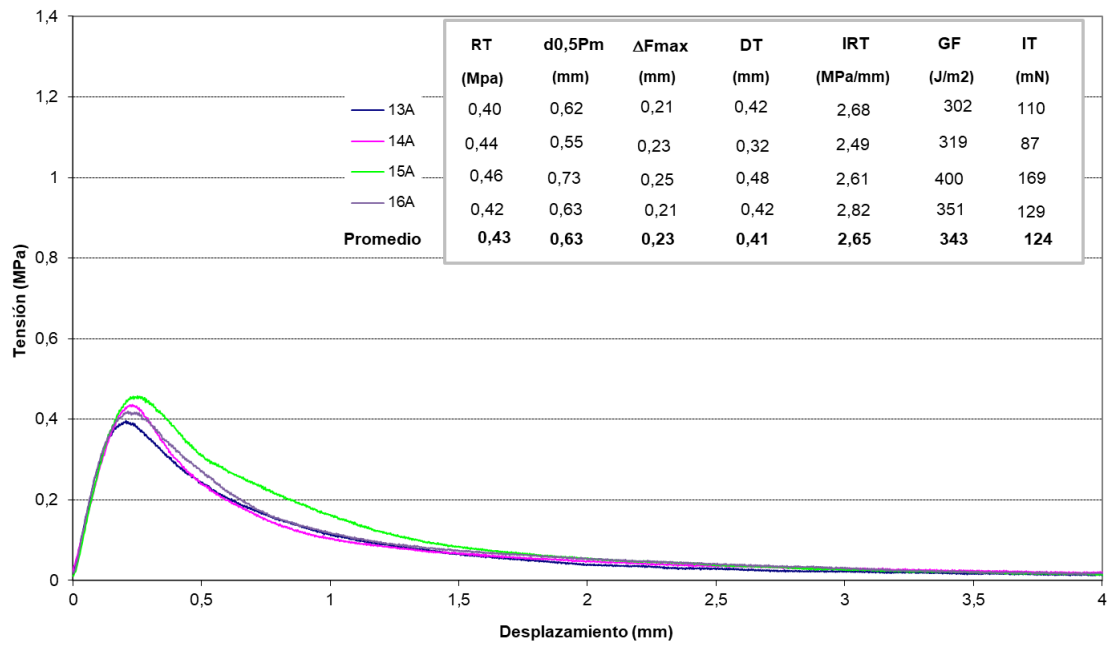
50% RAP 5°C

Ensayo Fénix 50%(212°C) RAP a 5°C y 1 mm/min.



60% RAP 20°C

Ensayo Fénix 60%(220°C) RAP a 20°C y 1 mm/min.



60% RAP 5°C

Ensayo Fénix 60%(220°C) RAP a 5°C y 1 mm/min.

