



Università Politecnica delle Marche

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile e Ambiente

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e dell'Architettura – Area Strade

INDAGINE SPERIMENTALE SUGLI ASPETTI LEGATI AL RICICLAGGIO DI BIO-LEGANTI STRADALI

***EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE RECYCLING ASPECTS OF
ROAD BIO-BANDERS***

Relatore

Prof. Ing. CANESTRARI Francesco

Studente

SQUICCIARINO Antonello

A.A. 2018/ 2019

INDICE

INTRODUZIONE.....	1
1. BACKGROUND.....	3
1.1 IL BITUME	3
1.2 INVECCHIAMENTO DEL BITUME.....	9
1.3 IL RICICLAGGIO	10
1.4 I BIO-LEGANTI	12
2. INDAGINE SPERIMENTALE	15
2.1 MATERIALI	15
2.2 APPARECCHIATURE E PROCEDURE DI PROVA.....	18
2.2.1 PROVA DI PENETRAZIONE	18
2.2.2 PROVA DI RAMMOLLIMENTO	21
2.2.3 METODI DI INVECCHIAMENTO	26
3. RISULTATI SPERIMENTALI	34
3.1 PENETRAZIONE	34
3.2 PUNTO DI RAMMOLLIMENTO	37
4. EFFETTO DELL'INVECCHIAMENTO	40
4.1 PENETRAZIONE RESIDUA	40
4.2 INCREMENTO DEL PUNTO DI RAMMOLLIMENTO	42
CONCLUSIONI	44
BIBLIOGRAFIA	46

INTRODUZIONE

Il riciclaggio del conglomerato bituminoso nelle pavimentazioni stradali è una pratica ormai consolidata, in quanto garantisce notevoli benefici di tipo ambientale ed economico, tra cui la riduzione del consumo di nuove materie prime e il riutilizzo di materiali di scarto che altrimenti andrebbero appositamente smaltiti ad alto costo, oltre a benefici di natura tecnica.

Tuttavia, al contempo, sta suscitando sempre più interesse l'applicazione nelle pavimentazioni stradali di bio-leganti, ovvero leganti in cui parte del bitume è sostituito con bio-materiali. L'impiego di tali bio-leganti comporta a sua volta una serie di benefici ambientali ed economici, dal momento che i bio-materiali impiegati sono tipicamente prodotti di scarto di altri settori industriali e possono essere considerati "rinnovabili" rispetto al bitume, che è ottenuto dal petrolio (oltre al fatto che permettono di ridurre i quantitativi di bitume impiegati nelle pavimentazioni).

In tal senso, risulta pertanto necessario verificare il comportamento di tali bio-leganti in merito al riciclaggio, confrontandolo con quello dei bitumi tradizionali.

La sperimentazione descritta di seguito si focalizza sullo studio di quattro leganti bituminosi ottenuti miscelando secondo opportune proporzioni due bitumi vergini con caratteristiche analoghe, di cui uno parzialmente sostituito con un bio-olio, e due bitumi fortemente invecchiati, un RAP estratto dal conglomerato derivante da una pavimentazione dismessa e un Bio-RAP prodotto in laboratorio. Il bio-olio studiato è prodotto come scarto nei processi di lavorazione del legno di conifera.

La sperimentazione ha dunque due obiettivi principali: 1. Valutare se un bio-legante può essere impiegato come bitume vergine nel riciclaggio a caldo, senza penalizzazioni rispetto all'uso di un bitume tradizionale; 2. Valutare se un bio-legante, al termine della sua vita utile, può essere riciclato (cosa che è possibile per i bitumi tradizionali).

A tale scopo, le miscele prodotte sono state studiate in condizioni tal quali e dopo invecchiamento a breve e lungo termine. L'invecchiamento è stato simulato al fine di valutare il comportamento delle miscele nel tempo, in seguito ad un ipotetico intervento di riciclaggio della pavimentazione. Sui materiali indagati sono state effettuate prove di tipo convenzionale, ovvero penetrazione e palla-anello.

La tesi presente è strutturata nel modo seguente:

- nel capitolo 1 sono presentati alcuni concetti di base relativi ai bitumi, all'invecchiamento dei bitumi, al riciclaggio delle pavimentazioni stradali e all'impiego di bio-leganti in ambito stradale;
- nel capitolo 2 vengono descritti i materiali studiati e le apparecchiature e procedure di prova considerate;
- nel capitolo 3 sono presentati i risultati delle prove effettuate;
- nel capitolo 4 vengono valutati e quantificati gli effetti dell'invecchiamento;
- nelle Conclusioni sono infine riassunti i principali risultati della sperimentazione.

CAPITOLO 1 – BACKGROUND

1.1 IL BITUME

Il bitume è un composto organico eterogeneo che può avere due origini distinte: può formarsi in seguito a fenomeni geologici naturali oppure può essere ottenuto dal processo di distillazione del greggio del petrolio. In generale, si utilizza prevalentemente il bitume di natura industriale.

La distillazione frazionata è un processo fisico attraverso il quale vengono separate le fasi di una miscela (greggio di petrolio) per effetto delle diverse temperature di ebollizione e di condensazione che competono a ciascuna di esse. Il greggio viene inserito in una prima torre di distillazione a pressione atmosferica dove, per effetto dell'aumento di temperatura, le fasi iniziano a separarsi. Nella parte superiore della torre si hanno gli idrocarburi più leggeri, mentre in basso quelli più pesanti. Raggiunti i 370-380°C rimane alla base della torre un residuo di idrocarburi che a sua volta viene sottoposto ad un nuovo processo di distillazione, in torri a basse pressioni, a temperature inferiori a quelle precedenti: il frazionamento sottovuoto. Il bitume è ottenuto come residuo di questo secondo frazionamento (*Figura 1.1*).

Il bitume così ottenuto può essere utilizzato direttamente, previa caratterizzazione, oppure sottoposto ad ulteriori trattamenti quali ossidazione o diluizione con solventi.

Se il bitume tradizionale (ottenuto direttamente dalla distillazione del greggio), viene sottoposto ad appositi processi di lavorazione (*Figura 1.1*), si possono ottenere vari tipi di leganti bituminosi, tra i quali ad esempio:

- Bitume modificato con polimeri;
- Bitume albino o pigmentato;
- Asphalt Rubber.

A seconda del tipo di greggio di petrolio si avranno differenze sia nella quantità che nella qualità del bitume ricavato, come si può vedere, a titolo di esempio, in Tabella 1.1. Sebbene da una tipologia di greggio si possa ottenere una maggiore quantità di bitume, non è detto che questo abbia qualità superiori agli altri.

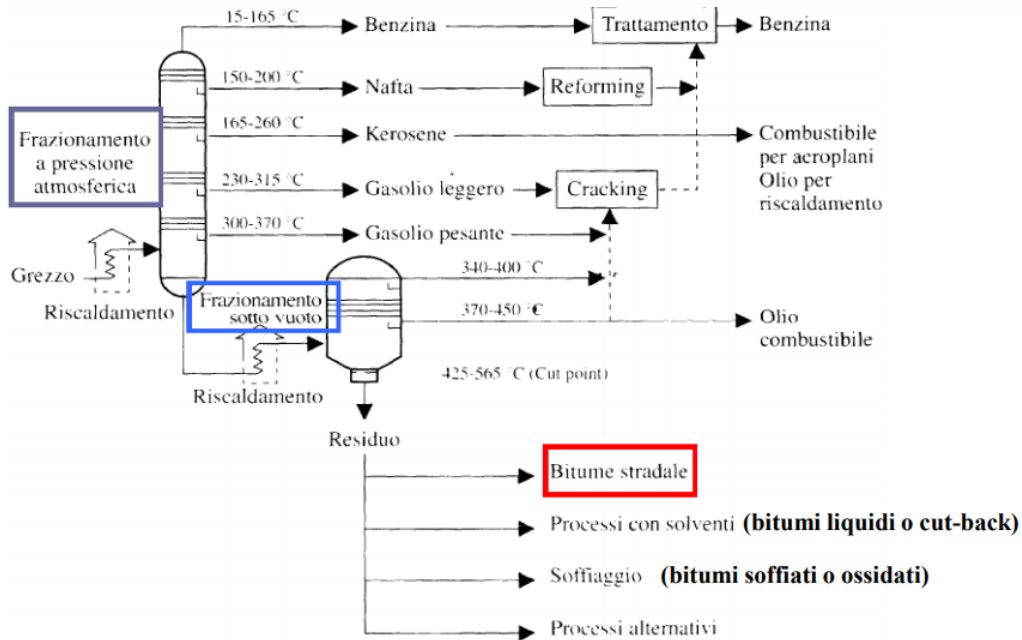


Figura 1.1 Processo di distillazione frazionata del petrolio greggio

Tabella 1.1 Valori percentuali delle frazioni a seconda del greggio utilizzato

	Venezuelano	Arabo	Nigeriano
Benzina	3%	21%	33%
Gasolio	7%	10%	16%
Cherosene	6%	14%	20%
Gas	26%	28%	30%
Bitume	58%	27%	1%

Le proprietà meccaniche e fisiche del bitume sono strettamente legate alla sua composizione chimica e strutturale.

Per il 90% il bitume è composto da idrocarburi (molecole complesse formate da carbonio (C) e idrogeno (H)); in quantità ridotte sono presenti sostanze non metalliche (N, S, O) che, pur presenti in quantità limitate, influenzano notevolmente le proprietà reologiche del bitume in quanto conferiscono caratteristiche di polarità. Si possono trovare anche tracce di metalli pesanti, solitamente esprimibili in p.p.m.

Dal punto di vista chimico, le tecniche di frazionamento consentono di dividere il bitume in pochi gruppi di molecole aventi proprietà simili e che possono essere inquadrati nella schematizzazione colloidale. Attraverso la tecnica cromatografica di adsorbimento e desorbimento è possibile distinguere nei bitumi le seguenti classi fondamentali (Figura 1.2):

- Asfaltene: prodotto insolubile in un alcano e solubile in toluene;
- Carboidi: prodotto insolubile in solfuro di carbonio (CS_2);
- Carbeni: prodotto solubile in solfuro di carbonio (CS_2) ed insolubile in tetracloruro di carbonio (CCl_4);
- Malteni: prodotto solubile in ognuna delle sostanze precedenti; a loro volta si suddividono in resine e oli ricavati attraverso un procedimento detto adsorbimento (resine) ed eluizione (oli).

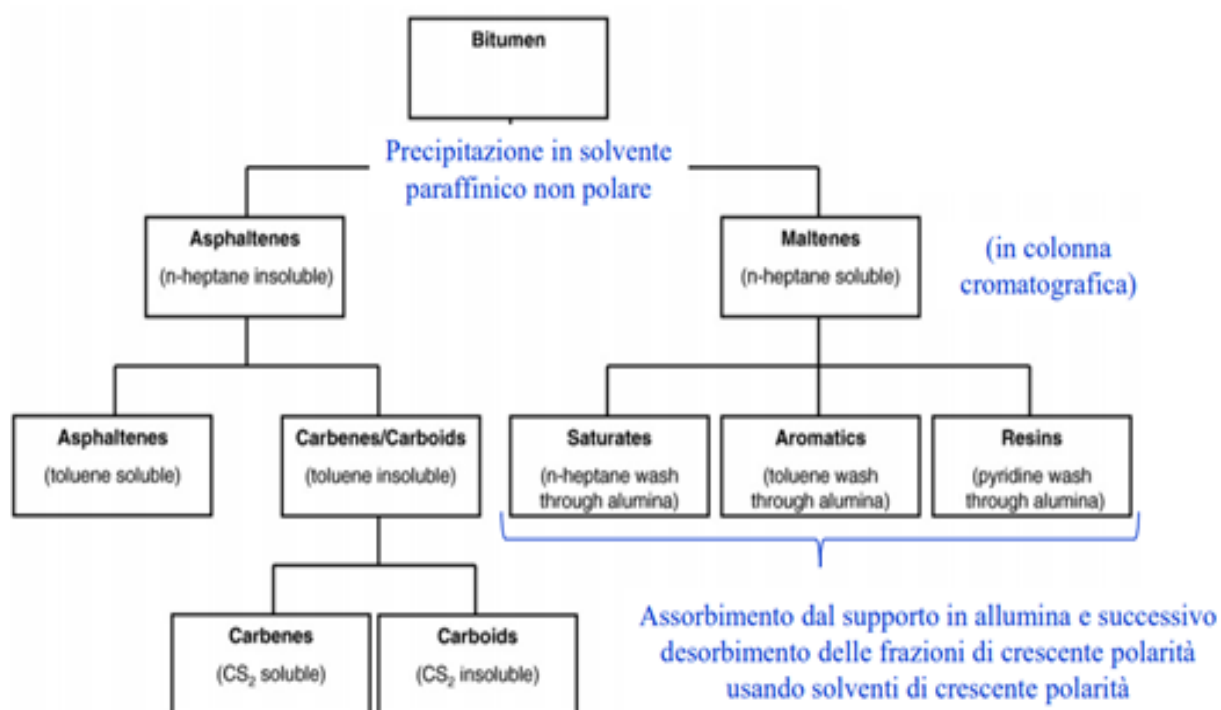


Figura 1.2 Tecnica cromatografica di adsorbimento e desorbimento

Essendo i carboidri ed i carbeni presenti in quantità modeste ($\leq 1\%$), il bitume può essere associato alla somma degli asfalteni con gli oli e le resine.

Gli asfalteni sono solidi amorfi di colore bruno, formate da molecole di elevato peso molecolare; danno "corpo" al bitume e sono presenti circa per il 5÷20% in peso del totale. Gli asfalteni sono i principali responsabili del comportamento viscoso del bitume, della sua elasticità o plasticità in funzione della temperatura, della capacità di resistere a sollecitazioni meccaniche e di depositarsi rapidamente se versato caldo su qualsiasi superficie formando una pellicola molto adesiva. Per carenza di asfalteni il bitume mostra una consistenza ridotta, è maggiormente suscettibile alle deformazioni indotte da sollecitazioni meccaniche o termiche e perde gran parte delle sue proprietà adesive. L'aumento del contenuto di asfalteni determina un bitume più duro e più viscoso, con un valore di penetrazione più basso ed un punto di rammollimento più alto.

Le resine sono sostanze semi-solidi, di consistenza circa uguale alla consistenza dell'intero bitume, di notevoli proprietà adesive, strutturalmente molto simili agli asfalteni, di colore marrone scuro presenti al 30÷45% che conferiscono al bitume le proprietà leganti e impermeabilizzanti. Quando il bitume si ossida le resine acquisiscono molecole di ossigeno ed assumono una struttura simile agli asfalteni, quindi la proporzione tra resine ed asfalteni governa, in larga misura, il carattere del bitume. Le resine forniscono elasticità, flessibilità, rendono il bitume duttile e adesivo. Per carenza di resine il bitume si dimostra instabile, cioè tende a separare gli asfalteni sotto forma di agglomerato lasciando affiorare gli oli.

Gli oli maltenici si suddividono in due classi: oli aromatici e oli saturi, in relazione al tipo di legami chimici prevalenti nella struttura. Gli oli aromatici sono rappresentabili come un liquido viscoso, di colore giallo tendente al rosso. Gli aromatici costituiscono la frazione maggiore del bitume, dal 40% al 60% in peso. Gli oli saturi sono un liquido viscoso, di colore bianco giallastro, costituito essenzialmente da idrocarburi saturi a lunga catena. Corrispondono ad una percentuale tra il 5% ed il 20% in peso del bitume. I saturi contengono la maggior parte delle cere presenti nei bitumi, le quali si presentano in forma paraffinica. I saturi fungono da agenti flocculanti nel confronto degli asfalteni. Gli oli maltenici sono il componente più fluido del bitume, quindi influiscono sul suo comportamento a caldo, conferendo scorrevolezza e quindi bagnabilità delle superfici da trattare. Per carenza di oli maltenici il bitume perde le caratteristiche di fluidità anche a temperature medio-alte, risultando troppo duro e appiccicoso per essere lavorato e senza capacità di scorrimento.

Quindi riassumendo il bitume è composto dalle seguenti frazioni:

- Asfalteni;
- Resine;
- Oli aromatici;
- Oli saturi.

Storicamente, il bitume è stato il primo prodotto petrolifero utilizzato dall'uomo per il suo elevato potere adesivo e impermeabilizzante. Presente in forma naturale vicino ai corsi d'acqua, il bitume fu usato dai Fenici, dagli Egizi, dai Romani e dai Greci. Furono infatti quest'ultimi a battezzare il misto di rocce e bitume con il nome di "asphaltos", indicando così qualcosa di "sicuro". Se si esclude la parentesi dei Babilonesi, i primi ad aver costruito una strada con questo materiale nel 600 a.C. circa, la storia del bitume come materiale leader per la viabilità comincia solo nella seconda metà dell'Ottocento prima in Francia e poi negli Stati Uniti. Prima dell'arrivo del bitume prodotto a partire dal petrolio, la cui produzione venne sostenuta e accelerata dall'avvento delle automobili e dal crescente bisogno di nuove strade e di nuovo materiale, il conglomerato era prodotto con bitume naturale. Ne abbondavano alcune zone come Trinidad e Venezuela, esclusivi fornitori di materia prima fino agli inizi del ventesimo secolo. Fu sempre con il bitume naturale che si mise fine all'era delle strade di ciottoli solcate dal continuo passaggio di carrozze e cavalli.

Nel tempo, la diffusione dei bitumi naturali è andata tuttavia scemando con lo sviluppo e l'affinamento delle tecniche di raffinazione, in grado di fornire bitumi in notevoli quantità a un prezzo via via più competitivo: essi sono tuttora utilizzati ma contribuiscono con una percentuale praticamente trascurabile alla produzione mondiale annua di bitume. Depositi di bitume nativo sono presenti in tutto il mondo, in zone con caratteristiche geologiche adeguate, nelle quali l'alta permeabilità delle formazioni rocciose ha permesso un processo di frazionamento naturale del petrolio greggio.

Nel corso dell'evoluzione tecnologica, il bitume è stato utilizzato per i più svariati problemi, sia nel campo delle costruzioni stradali (permettendo di creare una pavimentazione confortevole, resistente e durevole) sia nel campo delle impermeabilizzazioni dove sono richieste caratteristiche di resistenza all'acqua e adesione.

Il bitume, nell'ingegneria stradale, ha la funzione di conferire alla miscela granulata la necessaria coesione per poter resistere alle sollecitazioni di taglio e flessione dovute ai carichi veicolari. Affinché questa coesione sia garantita, non deve esserci distacco tra la pellicola di bitume e il

singolo grano (adesione) né rottura all'interno della pellicola di bitume (coesione in senso stretto). Questo legame deve sussistere sia a temperature elevate sia a basse temperature, come pure per sollecitazioni istantanee e per sollecitazioni lente. Pertanto risulta fondamentale la consistenza del bitume e la variabilità di questa caratteristica.

Infatti, a temperatura ambiente la consistenza del bitume è quella di un solido o semisolido; a temperature elevate si ha un progressivo rammollimento (e il materiale tende al comportamento di fluido viscoso), mentre a temperature basse il materiale assume un comportamento fragile.

La temperatura non è tuttavia il solo parametro da cui dipendono le caratteristiche meccaniche del bitume: trattandosi di un materiale viscoelastico, il suo comportamento meccanico è molto sensibile alla velocità di applicazione dei carichi. Infatti, se il bitume è sottoposto a brevi tempi di ciclo, si ha una deformazione di tipo prevalentemente elastico. Al contrario se è soggetto a lunghi tempi di carico tende a comportarsi come un fluido viscoso, e si originano deformazioni irreversibili.

L'identificazione delle proprietà dei bitumi stradali avviene attraverso la misura della consistenza, mediante prove standardizzate da norme tecniche UNI EN che classificano e accettano i bitumi stradali.

Le principali prove empiriche di caratterizzazione dei bitumi stradali sono:

- prova di penetrazione;
- prova di rammollimento (metodo palla-anello);
- prova Fraass;
- prova di duttilità;
- prova di ritorno elastico;
- prova di invecchiamento (indurimento), a breve termine (RTFOT) e a lungo termine (PAV);
- prova di viscosità dinamica.

Alcune di queste prove sono state utilizzate ai fini dell'indagine sperimentale in esame e sono descritte nel dettaglio nel Capitolo 2.

1.2 INVECCHIAMENTO DEL BITUME

L'invecchiamento è quel complesso insieme di fenomeni, legati all'azione combinata della temperatura, dell'ossigeno e degli agenti atmosferici, che causano un'alterazione irreversibile delle caratteristiche chimico-fisiche, colloidali e reologiche del legante bituminoso rispetto a quelle originarie di raffineria. Dal punto di vista reologico conducono ad un indurimento del materiale, determinando un aumento della sua rigidità e del grado di fragilità.

I problemi di durabilità e di deterioramento di una pavimentazione stradale sono quindi dipendenti anche dalla suscettibilità del bitume all'invecchiamento, in quanto il bitume in seguito all'invecchiamento tende ad essere più fragile e questo fa sì che la pavimentazione sia più predisposta a fenomeni fessurativi.

I principali meccanismi alla base dell'invecchiamento (breve e lungo termine) sono:

- Volatilizzazione: consiste nella perdita delle componenti più leggere del materiale contraddistinte da bassi punti di ebollizione. Essa si esaurisce quasi completamente già nella fase di miscelazione di bitume con gli aggregati;
- Ossidazione: consiste nella reazione dell'ossigeno con le macromolecole idrocarburiche: È favorita dalle alte temperature e induce una rottura dei legami covalenti di base con un conseguente incremento del grado di polarità delle molecole stesse;
- Polimerizzazione (per bitumi modificati con polimeri): processo basato sulla formazione di legami intermolecolari, anche qui favoriti da elevate temperature, che portano ad una riorganizzazione della struttura interna verso elementi di maggiore dimensione.

In genere si definisce "invecchiamento a breve termine" l'indurimento che il bitume subisce durante le fasi di miscelazione in impianto, trasporto, stesa e compattazione; invece si definisce "invecchiamento a lungo termine" quello che il bitume subisce in fase di esercizio durante la vita della pavimentazione.

In seguito al processo di invecchiamento è evidente che le caratteristiche fisiche del bitume subiscano profonde modifiche che, più precisamente, si riflettono sulla consistenza dello stesso e sulle altre caratteristiche a essa connesse. In generale si osservano:

- Diminuzione della penetrazione;
- Aumento del punto di rammollimento;
- Aumento della viscosità.

Dal punto di vista chimico, invece, il bitume in seguito all'invecchiamento subisce una modifica nel quantitativo di frazioni che lo compongono. Il processo di invecchiamento (o "aging") provoca una diminuzione del contenuto di aromatici e conseguentemente un aumento del contenuto di resine ed un valore maggiore di asfalteni, mentre i saturi rimangono pressoché invariati, per effetto della loro bassa reattività termica.

1.3 IL RICICLAGGIO

La tecnica di manutenzione stradale più diffusa consiste nella fresatura del conglomerato bituminoso ammalorato, prima di procedere con la stesa dei nuovi strati. Tale tecnica produce una notevole quantità di conglomerato bituminoso di recupero (Reclaimed Asphalt – RA o Reclaimed Asphalt Pavement – RAP), comunemente detto "fresato".

Sebbene questo materiale sia spesso erroneamente considerato uno scarto, in realtà i suoi costituenti (aggregati e bitume) presentano importanti proprietà meccaniche residue, le quali non devono essere sottovalutate ma rivalorizzate.

Il fresato può infatti essere usato nella realizzazione di nuovi strati in conglomerato bituminoso, sia con tecniche di riciclaggio a freddo che con tecniche di riciclaggio a caldo.

Nel riciclaggio a freddo il fresato viene reimpiegato come "aggregato nero" perché il bitume in esso contenuto resta approssimativamente inerte. Di conseguenza esso interagisce in maniera meno efficiente con il bitume vergine necessario al confezionamento della nuova miscela e, in pratica il fresato è utilizzato come parte sostitutiva degli aggregati vergini.

Al contrario, nella tecnica di riciclaggio a caldo sia il bitume che gli aggregati contenuti nel fresato sono recuperati dal punto di vista meccanico, anche se generalmente la quantità di fresato che è possibile inserire all'interno della nuova miscela risulta essere notevolmente inferiore rispetto alla tecnica a freddo.

Il vantaggio del riciclaggio con la tecnica a freddo rispetto quella a caldo sta nel minore impatto ambientale, riduzione delle emissioni in ambiente, salvaguardia della salute dei lavoratori, riduzione dei costi di costruzione/manutenzione.

La quantità di fresato che è possibile inserire all'interno di una nuova miscela dipende sia dal sistema di inserimento e riscaldamento del fresato all'impianto di produzione, sia dalla capacità di correggere le proprietà fisiche e chimiche del bitume invecchiato.

Quando il riciclaggio a caldo avviene in impianti di tipo discontinuo, il fresato può essere riscaldato attraverso differenti metodi, tra i quali i più efficienti prevedono :

- il tamburo essiccatore con bruciatore schermato;
- il doppio tamburo essiccatore;
- il tamburo essiccatore provvisto di anello esterno.

Il primo metodo consiste nell'inserire il fresato insieme agli aggregati vergini nel cilindro essiccatore. Seppur la schermatura della fiamma consente di evitare il contatto diretto tra la fiamma e il fresato, il riscaldamento di alte percentuali di conglomerato di recupero potrebbe comportare un eccesso di emissioni di fumi.

Il possibile incremento della generazione di fumi richiederebbe un sistema di filtraggio aggiuntivo che può avere un significativo impatto sull'investimento iniziale e sulla gestione dell'impianto, spesso superiore al risparmio dovuto al riutilizzo del fresato.

Il secondo metodo consiste nel riscaldamento del fresato in un tamburo separato, il quale opera a temperatura minore rispetto a quella per gli aggregati vergini, evitando così l'eccessiva produzione di fumi. Questo sistema però, considerando gli attuali prezzi dei materiali vergini, potrebbe risultare non conveniente dal punto di vista economico, in quanto una importante quantità aggiuntiva di energia per il funzionamento del secondo tamburo.

Infine, il terzo metodo consiste nell'introduzione in un anello esterno al tamburo essiccatore del conglomerato di recupero che poi viene riscaldato per contatto con gli aggregati vergini e rappresenta un buon compromesso tra le due soluzioni precedenti, poiché permette sia di limitare le emissioni che di contenere il dispendio energetico. È però da sottolineare che tramite quest'ultima tecnica, la quantità di fresato riutilizzabile è sicuramente inferiore ai due metodi precedenti.

Ovviamente, tanto più alte sono le percentuali di fresato che si vuole riutilizzare, tanto più accurata dovrà essere la gestione e selezione di tale materiale, sia in termini qualitativi che di omogeneità. È inoltre noto che il bitume invecchiato è rigido e fragile, e tali aspetti vanno considerati nel confezionamento della nuova miscela. A tal proposito anche se ad oggi il comportamento del bitume invecchiato in fase di miscelazione e la sua interazione con il legante vergine sono ancora in fase di studio, i benefici dell'uso di specifici additivi per il "ringiovanimento" del bitume contenuto nel fresato sono ben noti. Gli additivi per riciclaggio a caldo, devono consentire di correggere le caratteristiche del bitume invecchiato contenuto nel

fresato in termini di proprietà di adesione, consistenza e viscosità, migliorando perciò le prestazioni del conglomerato bituminoso finale.

Infatti, quando si utilizzano alte percentuali di fresato, l'integrazione con specifici additivi è fortemente raccomandata per il raggiungimento di un'appropriata lavorabilità e caratteristiche meccaniche. Questi additivi devono integrare il bitume invecchiato con le sostanze che si sono perse o modificate durante il processo di invecchiamento. Allo stesso tempo, essi devono essere stabili in un ampio intervallo di temperatura, da quella di stoccaggio a quella di applicazione, e non devono evaporare né essudare durante le fasi di realizzazione e di servizio, altrimenti il loro contributo sarebbe solo sulla lavorabilità del materiale e non sulle prestazioni a medio e lungo termine.

Il pieno recupero e la correzione del bitume invecchiato contenuto nel fresato, abbinato ad una riduzione della quantità di bitume nuovo senza pregiudicare le prestazioni del prodotto finito, è sicuramente uno degli obiettivi attuali più importanti nel settore delle pavimentazioni stradali.

1.4 I BIO-LEGANTI

Oggigiorno le problematiche connesse alla riduzione delle emissioni ambientali sono di primo piano nello sviluppo di prodotti sostenibili. In particolare, nell'ingegneria stradale, i processi che vanno dalla costruzione alla manutenzione di strade si stanno orientando verso soluzioni sempre più sostenibili, volte a minimizzare l'impatto ambientale in termini di consumo di energia ed emissioni, aumentando al contempo la durabilità dei materiali stradali e massimizzando l'utilizzo di materiali riciclati, cercando di mantenere buoni standard prestazionali. La costruzione di strade, come è noto, comporta l'utilizzo di una quantità notevole di risorse naturali non rinnovabili. Il bitume, il legante più utilizzato per le pavimentazioni stradali, viene infatti ricavato dal petrolio che è una risorsa non rinnovabile che si sta progressivamente esaurendo. Pertanto la sfida attuale per l'industria stradale è rappresentata dalla ricerca di materiali rinnovabili che possano sostituire almeno parzialmente il bitume, riducendo le emissioni in atmosfera e rendendo il settore meno dipendente dai prodotti petroliferi.

Quello che si sta cercando di fare è di utilizzare bio-materiali, ottenuti come scarti dei processi industriali o come rifiuti della vita quotidiana, in modo da evitare il loro smaltimento in discarica, poiché questo rappresenta un impatto rilevante sull'ambiente. In questa maniera si promuove il riciclo dei rifiuti generati da altri settori di produzione, riducendo sia le spese che le imprese devono sostenere per lo smaltimento nelle discariche sia la necessità di nuove materie prime. Dunque, si possono ottenere molti benefici sia di carattere ambientale sia di carattere economico dall'applicazione di bio-leganti in ambito stradale, in quanto garantiscono un complessivo miglioramento della sostenibilità del settore (ed anche di altri settori produttivi).

Un materiale rinnovabile, per essere idoneo all'utilizzo nei leganti bituminosi, deve tuttavia possedere alcuni requisiti di base, ad esempio:

1. Non deve comportare rischi per l'ambiente e per la salute e la sicurezza dei lavoratori.
2. La miscela bituminosa contenente il bio-legante deve essere riciclabile.
3. Deve dare un vantaggio di prestazioni, senza aumentare i costi della miscela finale oppure, a fronte di una leggera diminuzione delle prestazioni, il costo dev'essere circa invariato.
4. In caso di necessità, deve essere prontamente reperibile in grande quantità.

La maggior parte dei materiali rinnovabili proposti per uso stradale sono di origine vegetale e molti di loro sono ottenuti come scarti dalla lavorazione del legno e della carta. Tra i materiali rinnovabili si possono considerare anche gli olii da cucina esausti, disponibili in grandi quantità in tutto il mondo. Il loro riutilizzo, in particolare, evita problemi di inquinamento idrico e inconvenienti a fognature e sistemi di depurazione, che si verificano se gli olii non sono opportunamente smaltiti. Ulteriori esempi sono biomasse e olii vegetali derivanti da soia, semi di lino, colza, fagioli, semi di cotone, girasole, mais, ecc. Alcuni studi sono stati eseguiti anche su microalghe, abbondanti in natura, così come sugli scarti del caffè, prodotti in grande quantità in tutto il mondo. Sono stati studiati anche materiali di origine animale come il letame suino, che ha il vantaggio significativo di non entrare in concorrenza con il cibo e le materie prime destinate al consumo umano, come accade ad esempio anche per gli scarti di legno e le alghe, sebbene sembri molto ambizioso utilizzare il letame suino in larga scala.

Quindi possono essere potenzialmente utilizzati molti tipi di materiali rinnovabili, e l'utilizzo di ognuno implica una serie di vantaggi e svantaggi che devono essere valutati caso per caso.

In generale, però, un bio-materiale può essere utilizzato in ambito stradale nei seguenti modi:

- Come agente modificante del bitume (sostituzione del bitume minore del 10% in peso);
- In parziale sostituzione del bitume (sostituzione del bitume dal 25% al 75% in peso);
- Come legante totalmente alternativo al bitume (100% di sostituzione).

Per quanto riguarda gli effetti sul legante bituminoso, nella maggior parte dei casi i bio-olii provocano una diminuzione della viscosità, a prescindere dalla loro natura. Questo effetto è dovuto alla viscosità del bio-olio, che è molto più bassa rispetto ai valori tipici esibiti da bitumi duri o medi. In termini di proprietà convenzionali, si osservano per effetto dei bio-olii un aumento del valore di penetrazione e una diminuzione del punto di rammollimento. Da un lato, questo effetto ammorbidente, di solito, si traduce in un miglioramento del comportamento a basse temperature rispetto al bitume di partenza. D'altra parte, tuttavia, possono peggiorare le prestazioni del legante alle alte temperature di esercizio. In conclusione, sfruttando tali effetti, i bio-leganti potrebbero essere utilizzati in modo vantaggioso:

- Nei climi freddi;
- Per migliorare la lavorabilità del conglomerato bituminoso;
- Nelle operazioni di riciclaggio del fresato.

CAPITOLO 2 – INDAGINE SPERIMENTALE

2.1 MATERIALI

Al fine di riprodurre in laboratorio dei leganti bituminosi ottenuti da un intervento di riciclaggio a caldo, sono stati considerati quattro leganti di base (due leganti vergini “morbidi” e due leganti fortemente ossidati), descritti di seguito:

- Legante vergine “A”: ottenuto sostituendo ad un bitume tradizionale 50/70 il 10% in peso con un bio-olio prodotto come residuo delle industrie del legno e della carta, avente le caratteristiche in *Tabella 2.1*;
- Legante vergine “B”: bitume tradizionale avente caratteristiche simili ad A (si veda il Capitolo 3);
- Legante “Bio-RAP”: prodotto in laboratorio invecchiando A con RTFOT e 2 PAV consecutivi, al fine di simulare un bio-legante recuperato da una pavimentazione al termine della sua vita utile;
- Legante “RAP”: bitume estratto da conglomerato bituminoso di recupero di una pavimentazione dismessa al termine della sua vita utile.

A partire da tali materiali, sono state preparate quattro miscele utilizzando un mixer di laboratorio (*Figura 2.1*) ad una velocità di miscelazione di 500 rpm per 10 minuti, dopo aver pre-riscaldato i materiali di base a 160°C. Le proporzioni dei leganti di base nelle miscele, riportate in *Tabella 2.2*, sono state determinate in modo da ottenere una penetrazione circa pari a 70 dmm (si veda il Capitolo 3).

Le quattro miscele riportate in *Tabella 2.2* sono state studiate secondo tre gradi di invecchiamento, al fine di valutarne il comportamento in seguito ad un ipotetico intervento di riciclaggio della pavimentazione:

- nessun invecchiamento, ovvero considerando il materiale tal quale;
- invecchiamento a breve termine (RTFOT);
- invecchiamento a lungo termine (PAV).

Complessivamente, sono stati dunque studiati sedici leganti (i quattro leganti di base e le quattro miscele, indagate a 3 livelli di invecchiamento), come riassunto in *Tabella 2.3*.

Su questi materiali (materiali di base e miscele prodotte) sono state eseguite prove convenzionali per i bitumi, ossia prove di penetrazione e prove di palla-anello, descritte nel Paragrafo 2.2 insieme alle procedure di invecchiamento.



Figura 2.1 Mixer per la preparazione delle miscele

Tabella 2.1 Caratteristiche del bio-olio

VISCOSITÀ DEL BIO-OLIO	
Viscosità cinematica (T=60°C)	712 mm ² /s
Viscosità cinematica (T=135°C)	26 mm ² /s
COMPOSIZIONE CHIMICA DEL BIO-OLIO	
CARBONIO (C)	81%
IDROGENO (H)	11%
OSSIGENO (O)	7.5%

Tabella 2.2 Composizione miscele prodotte

MISCELA	A (% in peso)	B (% in peso)	Bio-RAP (% in peso)	RAP (% in peso)
A+Bio-RAP	62		38	
B+Bio-RAP		62	38	
A+RAP	70.8			29.2
B+RAP		70.8		29.2

Tabella 2.3 Leganti studiati

Grado di invecchiamento	Identificazione del materiale
Materiali di base	A
	B
	Bio - RAP
	RAP
Nessun grado di invecchiamento	A+Bio-RAP
	B+Bio-RAP
	A+RAP
	B+RAP
Invecchiamento a breve termine (RTFOT)	A+Bio-RAP_RTFO
	B+Bio-RAP_RTFO
	A+RAP_RTFO
	B+RAP_RTFO
Invecchiamento a lungo termine (PAV)	A+Bio-RAP_PAV
	B+Bio-RAP_PAV
	A+RAP_PAV
	B+RAP_PAV

2.2 APPARECCHIATURE E PROCEDURE DI PROVA

2.2.1 PROVA DI PENETRAZIONE

I bitumi possiedono valori di penetrazione in base alla loro consistenza e durezza. I bitumi più duri possiedono penetrazioni più basse (viceversa per bitumi morbidi). Un bitume duro solitamente manifesta un miglior comportamento alle temperature elevate rispetto ad un bitume morbido, mentre un bitume morbido tende ad avere un comportamento migliore rispetto a un bitume duro alle basse temperature.

La prova permette di determinare la consistenza e la durezza del bitume mediante la misura della penetrazione di un ago normalizzato in un campione di bitume condizionato ad una temperatura fissata, utilizzando come apparecchiatura di prova il penetrometro (*Figura 2.2*), apparecchiatura che permette all'ago di spostarsi verticalmente senza attrito all'interno del campione di bitume e che consente di misurare la penetrazione dell'ago stesso con una precisione di 0.1 mm.

La strumentazione e la procedura di prova sono normati dalla UNI EN 1426.



Figura 2.2 Apparecchiatura di prova per la penetrazione (“penetrometro”)

La norma UNI EN 1426 descrive tutti i passaggi di prova a partire dalla preparazione del provino:

1. Si versano 60-70 g di bitume (a seconda della penetrazione attesa) in un contenitore di metallo o di vetro, di forma cilindrica e a fondo piatto (*Figura 2.3*) con:

$35 \text{ mm} < H < 45 \text{ mm}$;

$55 \text{ mm} < D < 70 \text{ mm}$.



Figura 2.3 Contenitore di metallo per la prova di penetrazione

2. Una volta versato il bitume, si fa condizionare il campione per 1h a temperatura ambiente.
3. Si condiziona poi 1h in un bagno termostatico ad una temperatura di 25°C (15°C per bitumi con valori di penetrazioni maggiori di 330 x 0.1 mm)
4. Terminato il condizionamento del campione, si posiziona il contenitore sulla base dell'apparecchiatura e si monta l'ago (di acciaio inossidabile e di dimensioni standardizzate, con diametro di circa 1 mm) su una ghiera tale da fornire un carico mobile di 100 g (*Figura 2.4*).

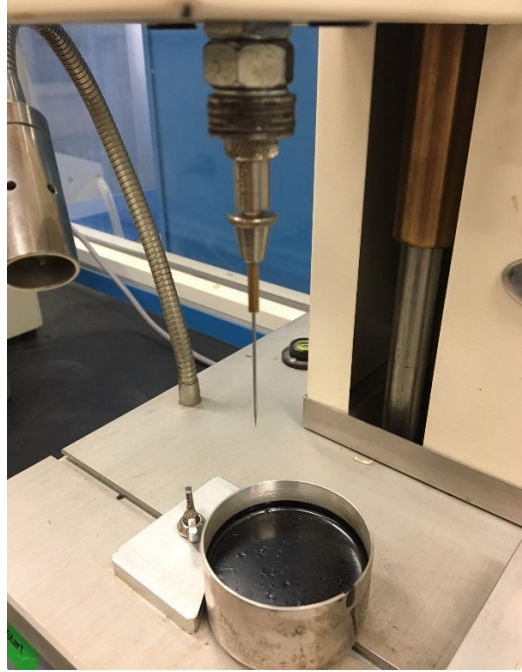


Figura 2.4 Contenitore posizionato sotto l'ago del penetrometro

5. Per la misura si avvicina lentamente l'ago alla superficie del bitume fino a sfiorarla, attraverso i pulsanti di movimento dell'apparecchiatura. Il punto di misura deve essere distante circa 10 mm dal bordo del contenitore.
6. Posizionati ago e contenitore, con il pulsante "Start" si avvia la prova. Viene applicato il carico di 100 g per 5 secondi e la penetrazione dell'ago viene restituita in automatico sul display del penetrometro.
7. Si solleva l'ago e si pulisce dal residuo di bitume.
8. Si sceglie un altro punto di misura, sempre mantenendo una distanza di 10 mm dal bordo del contenitore e almeno 10 mm dal punto di misura precedente.
9. Si effettuano misure per un totale di 3-5 misure sul provino.

I parametri caratteristici della prova sono riassunti in *Tabella 2.4*.

Tabella 2.4 Parametri caratteristici della prova di penetrazione

PROVA DI PENETRAZIONE	
1° CONDIZIONAMENTO	$T_1 = T_{AMB.}$ per $t = 1h$
2° CONDIZIONAMENTO	$T_2 = 25^{\circ}C$ per $t = 1h$
QUANTITA' DI BITUME	60 ÷ 70 grammi
PARAMETRO DI PROVA MISURATO	penetrazione (dmm)

2.2.2 PROVA DI RAMMOLLIMENTO

La prova di rammollimento fornisce un valore di temperatura il quale indica il comportamento del bitume in un intervallo di temperatura tra i 30°C e i 150°C ; più la temperatura al punto di rammollimento è alta, migliori saranno le prestazioni del bitume alle alte temperature.

In particolare, con questa prova si misura la temperatura di rammollimento (in inglese, *softening point*) alla quale un dischetto di bitume colato in uno specifico anello di ottone con diametro e spessore prefissati, sotto l'azione di una biglia di acciaio del peso noto su di esso appoggiata con appositi sistemi reggi-sfera, si deforma raggiungendo una piastrina metallica posta ad 1 pollice (25.4 mm) di distanza.

La temperatura di rammollimento viene raggiunta imponendo ai provini immersi in un bagno termico d'acqua (Figura 2.5) un gradiente di +5°C/min, partendo da una temperatura iniziale di 5°C.

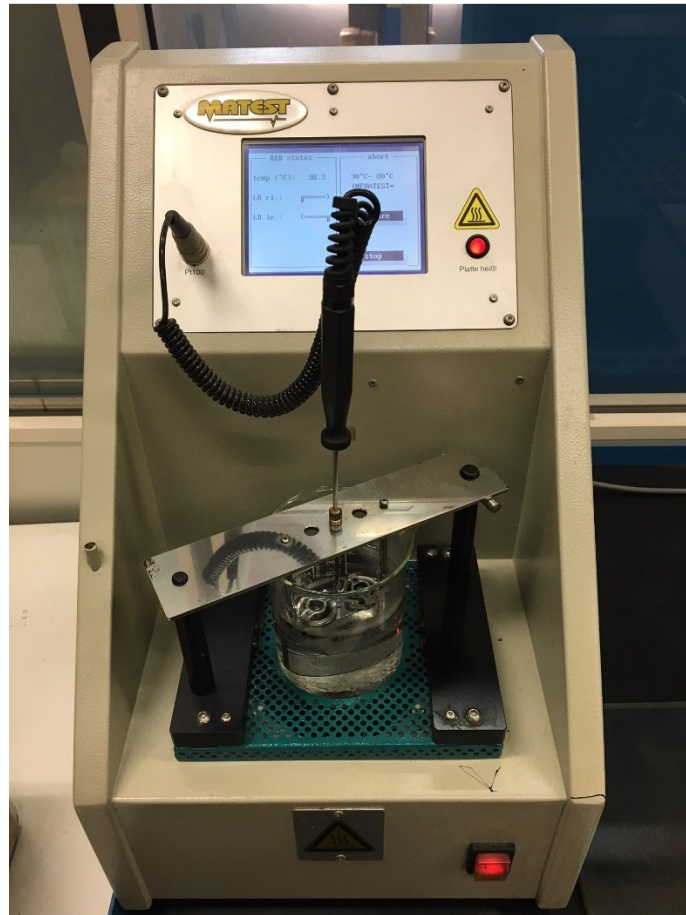


Figura 2.5 Strumentazione per la prova di rammollimento

Il metodo di prova utilizzato per determinare il punto di rammollimento è quello della prova di palla-anello, normata dalla UNI EN 1427 la quale descrive tutti i passaggi di prova:

1. Spennellare un adeguato quantitativo di glicerina sul piano di appoggio in vetro (questa evita che il bitume colato negli anelli si attacchi al piano di appoggio).
2. Posizionare 2 anelli di ottone di diametro 20 mm e spessore 6.4 mm sul piano di appoggio dove è stata spennellata la glicerina. Riempirli con precisione (Figura 2.6), in modo che il bitume riempi l'anello senza eccedere rispetto al bordo superiore (se si versa bitume in eccesso, bisogna rimuoverlo con un cutter caldo dopo che si è raffreddato).



Figura 2.6 Anelli riempiti con il bitume

3. Condizionare i provini 1h a temperatura ambiente.
4. Riempire un becher con acqua fredda, non torbida.
5. Finito il tempo di condizionamento, posizionare sugli anelli gli appositi reggi-sfera (*Figura 2.7*), quindi posizionare i sistemi anelli/reggi-sfere nell'apposito supporto e inserire quest'ultimo assieme alle sfere nel becher (*Figura 2.8*).



Figura 2.7 Reggi-sfera e sfere

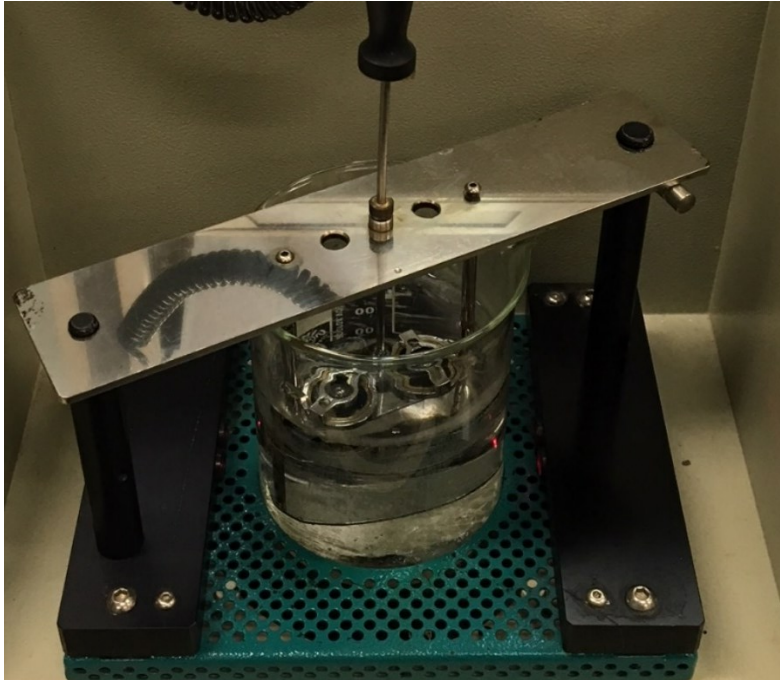


Figura 2.8 Supporto di acciaio immerso con gli anelli e reggi-sfera nel becher

6. Accendere il macchinario, inserire il termometro nell'apposito foro del supporto.
7. Inserire gradualmente ghiaccio fino ad ottenere $T = 5 \pm 1$ °C. Mantenere tale temperatura per 15 minuti.
8. Recuperare le sfere dal fondo becher e posizionarle sui provini, in corrispondenza dei reggi-sfere.
9. Sul monitor del macchinario indicare il range del punto di rammollimento atteso (per la maggior parte dei bitumi e nel caso dei materiali in esame è di 30-80°C, per bitumi più duri potrebbe essere necessario considerare il range di 80-150°C); e quindi premere il tasto "Start".
10. La temperatura viene aumentata con un gradiente di 5°C/min. Per effetto dell'aumento della temperatura, della riduzione di consistenza del bitume e del peso delle sfere (3.5 grammi ognuna), i provini si deformano progressivamente, come in *Figura 2.9*.

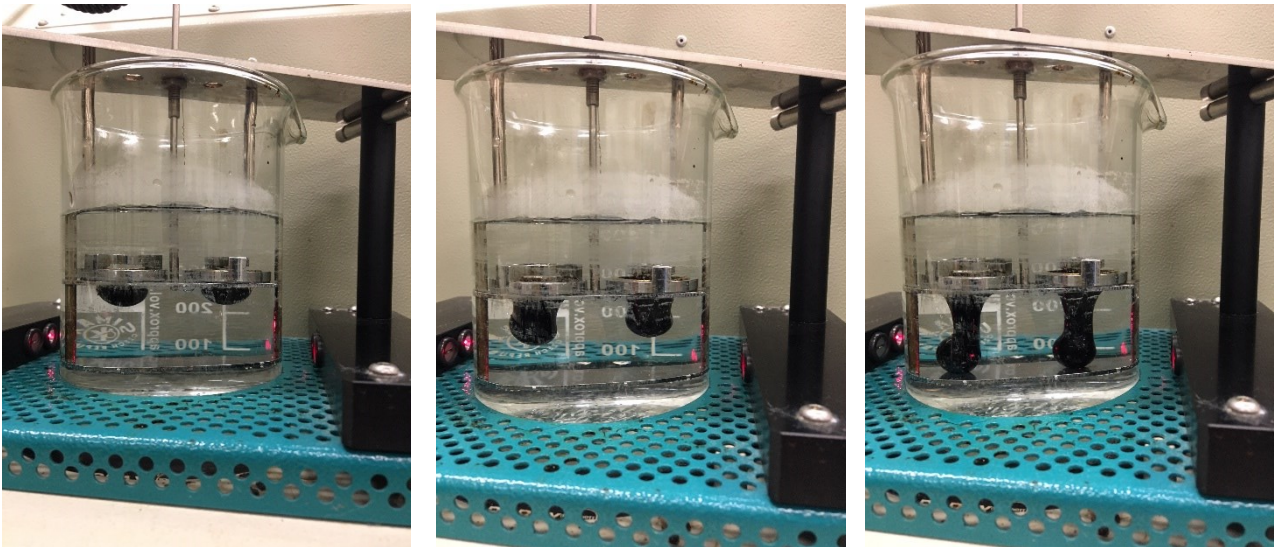


Figura 2.9 Deformazione progressiva del bitume per effetto della temperatura e del peso delle sfere

11. La prova termina quando le due sfere toccano la base del supporto e, grazie a un sistema di infrarossi, la corrispondente temperatura di rammollimento viene registrata in automatico sullo schermo per entrambi i provini.

I valori di temperatura di rammollimento si considerano accettabili se la differenza tra i due valori registrati è inferiore a 1°C. In tal caso si prende come risultato la media tra i due provini.

I parametri caratteristici della prova sono riassunti in *Tabella 2.5*.

Tabella 2.5 Parametri caratteristici della prova di rammollimento

PROVA DI PALLA-ANELLO	
1° CONDIZIONAMENTO	$T_1 = T_{AMB.}$ per $t = 1h$
2° CONDIZIONAMENTO	$T_2 = 5^{\circ}C$ per $t = 15 \text{ min}$
QUANTITA' DI BITUME	Pochi grammi
PARAMETRO DI PROVA MISURATO	Temperatura di rammollimento ($^{\circ}C$)

2.2.3 METODI DI INVECCHIAMENTO

Le principali prove riconosciute a livello nazionale, europeo ed internazionale per l'invecchiamento del bitume in laboratorio sono:

- la prova **RTFOT** (*Rolling Thin Film Oven Test*) con strumentazione, metodologia e procedura di prova standardizzate dalla norma UNI EN 12607-1 che simula l'invecchiamento a breve termine;
- la prova **PAV** (*Pressure Aging Vessel*) normata dalla UNI EN 14769, la quale simula l'invecchiamento a lungo termine.

Entrambe le prove sono descritte nel dettaglio di seguito.

❖ ROLLING THIN FILM OVEN TEST (RTFOT)

La prova permette di valutare l'indurimento di un film sottile di bitume dovuto all'effetto combinato dell'aria e del calore, simulando l'indurimento che il materiale subisce durante le fasi di miscelazione in impianto, trasporto, stesa e compattazione (invecchiamento a breve termine). Uno specifico quantitativo di bitume, versato in appositi contenitori cilindrici (a loro volta alloggiati in una rastrelliera rotante), viene scaldato ad una temperatura standard e sottoposto ad un getto d'aria per un fissato intervallo di tempo.

L'apparecchiatura di prova è composta da:

- Un forno parallelepipedo a doppia parete (*Figura 2.10*).

Le dimensioni interne sono:

- Altezza: 340 ± 15 mm;
- Larghezza: 405 ± 15 mm;
- Profondità: 445 ± 15 mm.

La porta d'ingresso deve contenere una finestra simmetrica con due lastre di vetro resistenti al calore e separate da uno spazio; inoltre il forno è in grado di immettere un flusso d'aria di 400 cl/min e temperatura e pressione fissate.



Figura 2.10 Forno per invecchiamento RTFOT

- 8 contenitori cilindrici in vetro di dimensioni standard simili a dei bicchieri (*Figura 2.11*), nei quali viene colato il campione di legante bituminoso sottoposto alla prova (35 ± 0.5 g, per ciascun contenitore).



Figura 2.11 Cilindri di vetro utilizzati per invecchiamento a breve termine RTFOT, prima dell'invecchiamento

La procedura di prova, standardizzata dalla norma UNI EN 12607-1, prevede le seguenti fasi:

1. Accendere il macchinario con il tasto “main switch” e attendere che venga raggiunta la temperatura di prova $T=163 \pm 1$ °C (circa 1 h di attesa).
2. Riempire i bicchieri con il bitume da invecchiare.
3. Raggiunta la temperatura di prova, inserire i bicchieri nel tamburo rotante all’interno del forno; nel caso in cui devono essere sottoposti ad invecchiamento meno di 8 bicchieri di bitume, gli spazi restanti vanno comunque occupati con bicchieri vuoti in posizioni diametralmente opposte (*Figura 2.12*).



Figura 2.12 Bicchieri inseriti nel tamburo rotante

4. Non appena la temperatura del forno ritorna alla temperatura di prova, si azionano la rotazione del tamburo e la ventilazione con i tasti “carriage” e “ventilation” e si regola il getto d’aria a 400 cl/min sul manometro.
5. Da questo momento il bitume deve essere invecchiato per 75 minuti; il tempo va preso manualmente, poiché la prova non si interrompe in automatico.
6. Trascorsi i 75 minuti, spegnere i tasti “carriage” e “ventilation” e chiudere il getto d’aria ma mantenere acceso il forno per non far raffreddare il bitume. Estrarre i bicchieri (uno

alla volta) che risultano ricoperti da un film sottile di bitume e recuperare il materiale invecchiato.

I parametri caratteristici della prova sono riassunti in *Tabella 2.6*.

Tabella 2.6 Parametri caratteristici della prova RTFOT

PROVA RTFOT	
FLUSSO D'ARIA	Q = 400 cl/min
VELOCITA' ROTAZIONE VENTOLA	$V_1 = 1725 \pm 100$ rpm
TEMPERATURA DI PROVA	T = 163 ± 1 °C
VELOCITA' ROTAZIONE TAMBURO ROTANTE	$V_2 = 15 \pm 0.2$ rpm
N° BICCHIERI	8
QUANTITATIVO BITUME/BICCHIERE	35 ± 0.5 g
DURATA DELLA PROVA	t = 75 min

❖ PRESSURE AGING VESSEL (PAV)

Tramite il pressure aging vessel test si simula l'invecchiamento che il legante subisce nei primi 10-15 anni di vita della pavimentazione. Infatti, la prova permette di simulare l'invecchiamento a lungo termine grazie alla combinazione degli effetti di pressione e temperatura, che vanno a riprodurre le trasformazioni subite dal bitume nella pavimentazione stradale per effetto degli agenti atmosferici e dei carichi veicolari.

L'apparecchiatura di prova è composta da:

- Un forno (*Figura 2.13*) progettato per funzionare a 2.1 MPa tra gli 80 e 115 °C, realizzato in acciaio inossidabile con dimensioni tali da permettere l'inserimento di un castelletto capace di contenere un numero determinato di provini (massimo 10). Il fondo del forno deve essere tale da garantire che i contenitori con i provini vengano tenuti in posizione perfettamente orizzontale con lo strato di legante bituminoso uniformemente distribuito lungo la superficie del contenitore.



Figura 2.13 Apparecchiatura di prova PAV

- Dei contenitori metallici (simili a dei piatti) con diametro di 140 mm, che permettono di colare al loro interno 50 ± 0.5 g di legante bituminoso, e un castelletto su cui disporre i piatti per effettuare l'invecchiamento (Figura 2.14).

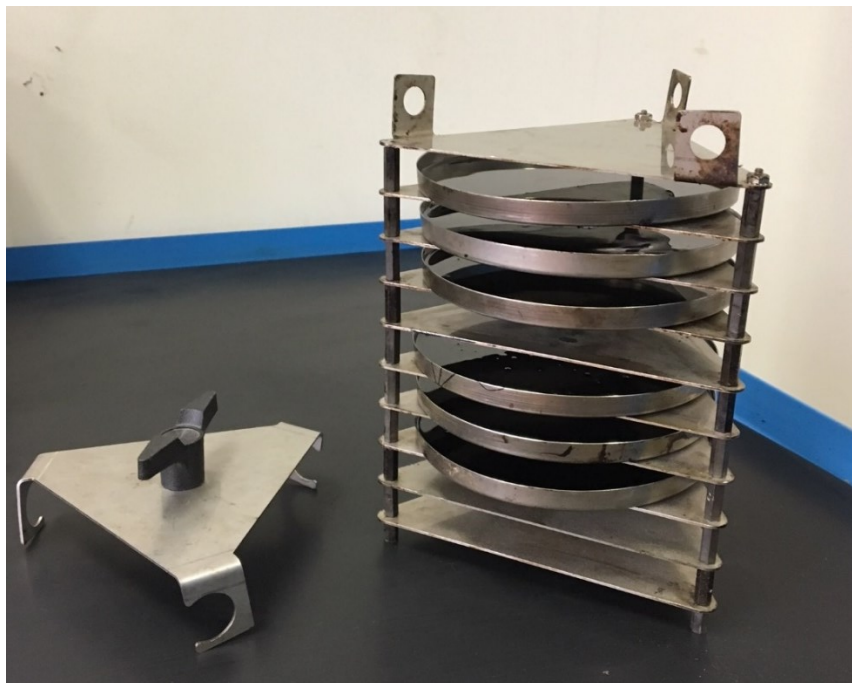


Figura 2.14 Castelletto per alloggiare i piatti riempiti di bitume

La procedura di prova, standardizzata dalla norma UNI EN 14769, prevede le seguenti fasi:

1. Il bitume, a seguito dell'invecchiamento RTFOT, viene colato nei piatti metallici del PAV (*Figura 2.15*). Questi vengono quindi posizionati nel castelletto.

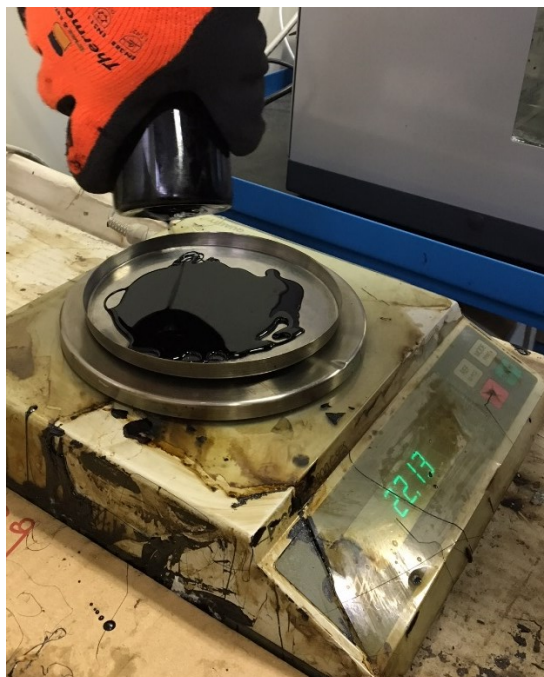


Figura 2.15 Fase di riempimento dei piatti del PAV

2. Si accende l'apparecchiatura e si seleziona il controllo di prova automatica.
3. Si scelgono i valori di pressione e temperatura ($P = 2.1 \pm 0.1$ MPa; $T = 90 - 100 - 110$ °C). Per la sperimentazione in esame è stata considerata una temperatura di 100 °C, che può essere adottata per massime temperature di esercizio "ordinarie".
4. Si preriscalda il macchinario vuoto fino alla temperatura di 95 °C, spostando su "ON" la leva della temperatura. Questa fase richiede un tempo compreso tra i 60 e 90 minuti.
5. Una volta raggiunta la temperatura di pre-riscaldamento, si accende la luce verde relativa alla fase "Load sample". A questo punto si può inserire il castelletto con i piatti pieni di bitume e successivamente si chiude il coperchio della camera principale dell'apparecchiatura serrando a stella le viti (*Figura 2.16*).



Figura 2.16 Chiusura del coperchio della camera principale del PAV

6. Si preme “Continue” sul display touch del macchinario (Figura 2.17). Si apre la pressione della bombola esterna all’apparecchiatura affinché nel PAV ci sia la pressione voluta ($P=2.1 \pm 0. \text{MPa}$) e quindi si sposta su “ON” la leva della pressione.



Figura 2.17 Display dell’apparecchiatura PAV

7. Inizia la pressurizzazione del sistema fino al raggiungimento dei valori di pressione e temperatura richiesti. Il mantenimento di questi valori di pressione e temperatura durante la prova è assicurato da un dispositivo O-ring che garantisce l'isolamento del sistema dall'esterno e dalla perfetta chiusura dei bulloni presenti nel coperchio del macchinario.
8. Raggiunte le condizioni di prova , automaticamente parte la fase di invecchiamento della durata di 20 ore.
9. terminate le 20 ore di invecchiamento, si accende la luce verde sul display touch "Depressurizing system" e la fase di depressurizzazione inizia automaticamente, per una durata di circa 10 minuti.
10. Quando si accende la luce verde su "Process complete", si chiude la bombola esterna e si spostano le leve di pressione e temperatura su "OFF", si preme "End Test" e si spegne il PAV.
11. Si apre il coperchio svitando i bulloni e si estrae con cautela il castelletto.
12. Come specificato dalla norma UNI EN 14769, i piatti con il bitume invecchiato vanno successivamente riscaldati in forno a 170 °C per 30 minuti, per rimuovere le bolle d'aria presenti nel bitume.
13. Terminata questa fase, si procede a recuperare il materiale invecchiato dai piatti in acciaio, per sottoporlo successivamente alle prove di laboratorio.

I parametri caratteristici della prova sono riassunti in *Tabella 2.7*.

Tabella 2.7 Parametri caratteristici della prova PAV

PROVA PAV	
PRESSIONE	$P = 2.1 \pm 0.1 \text{ MPa}$
TEMPERATURA DI PROVA	$T = 100 \text{ °C}$
N° MAX PIATTI	10
DIAMETRO DEI PIATTI	$d = 140 \text{ mm}$
QUANTITATIVO BITUME/PIATTO	$50 \pm 0.5 \text{ g}$
DURATA DELLA PROVA	$t = 20 \text{ h}$

CAPITOLO 3 – RISULTATI SPERIMENTALI

3.1 PENETRAZIONE

I seguenti grafici illustrano i risultati delle di penetrazione per i materiali oggetto di indagine.

In *Figura 3.1* sono rappresentati i valori di penetrazione dei materiali di base: come si può notare, i materiali A e B presentano valori di penetrazione più alti, essendo questi bitumi vergini; invece, il RAP ed il bio-RAP, che sono leganti fortemente invecchiati ed ossidati, presentano valori di penetrazione più bassi. In particolare, il RAP risulta leggermente più duro del bio-RAP (penetrazione inferiore). Inoltre, l'elevata penetrazione dei bitumi A e B risulta necessaria per compensare le caratteristiche del RAP e del bio-RAP nelle miscele prodotte.

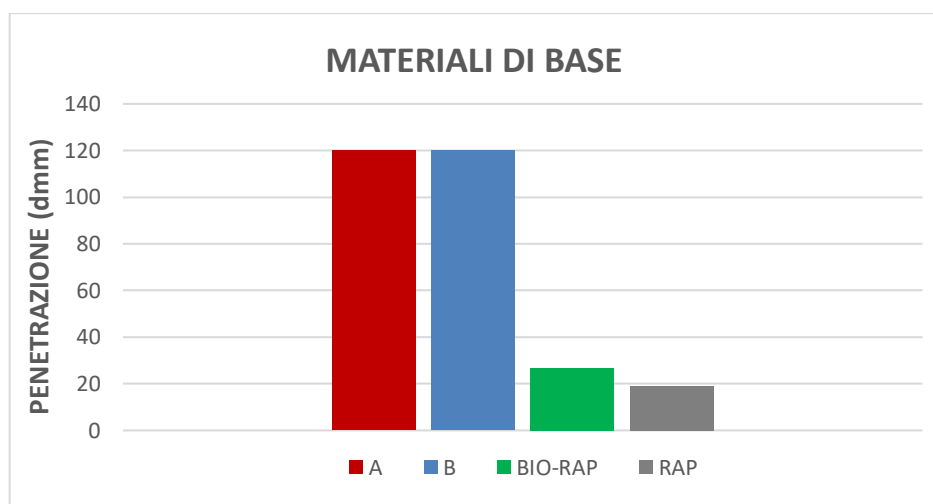


Figura 3.1 Valori di penetrazione dei materiali di base

Le figure seguenti illustrano i valori di penetrazione delle miscele prodotte, per diversi gradi di invecchiamento: *materiali tal quali (Figura 3.2)*; *materiali dopo RTFOT (Figura 3.3)*; *materiali dopo PAV (Figura 3.4)*. In Tabella 3.1 sono riportati i valori della penetrazione per tutti i materiali indagati nella sperimentazione.

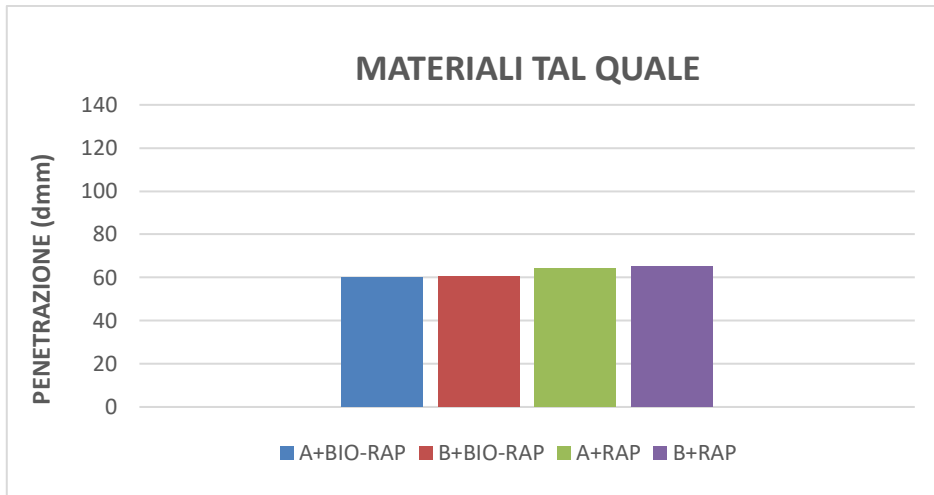


Figura 3.2 Valori di penetrazione delle miscele prodotte, in condizioni tal quali

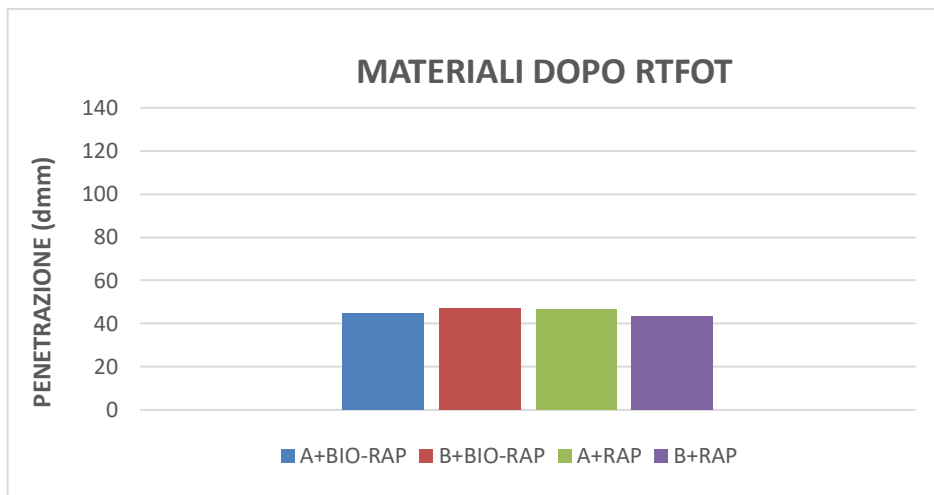


Figura 3.3 Valori di penetrazione delle miscele prodotte, dopo RTFOT

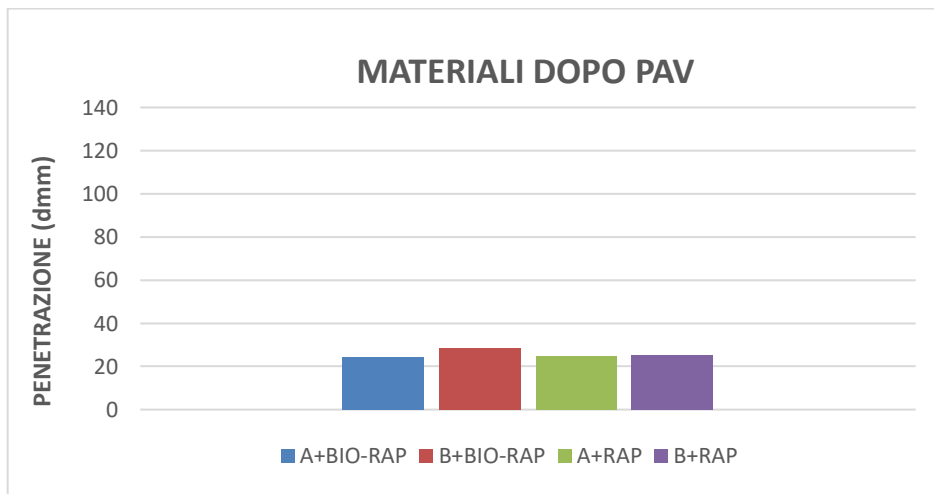


Figura 3.4 Valori di penetrazione delle miscele prodotte, dopo PAV

Tabella 3.1 Risultati delle prove di penetrazione

MATERIALE	PENETRAZIONE (dmm)
A	120
B	120
Bio - RAP	26.7
RAP	19
A+RAP	64.0
A+RAP_RTFOT	46.7
A+RAP_PAV	24.7
A+Bio-RAP	60.0
A+Bio-RAP_RTFOT	44.7
A+Bio-RAP_PAV	24.3
B+RAP	65.0
B+RAP_RTFOT	43.3
B+RAP_PAV	25.0
B+Bio-RAP	60.7
B+Bio-RAP_RTFOT	47.0
B+Bio-RAP_PAV	28.3

Analizzando i risultati ottenuti, si nota che, in generale, i valori di penetrazione sono diminuiti con l'aumentare del grado di invecchiamento del materiale (come atteso). Inoltre, a parità di grado di invecchiamento, i valori di penetrazione sono confrontabili per tutte le miscele studiate. Questo suggerisce che la presenza del bio-olio non penalizza il comportamento del legante.

3.2 PUNTO DI RAMMOLLIMENTO

I seguenti grafici illustrano i risultati delle prove di palla-anello per i materiali oggetto di indagine. In *Figura 3.5* sono rappresentati i valori del punto di rammollimento dei materiali di base: come si può notare, i risultati sono coerenti con quelli delle prove di penetrazione. Infatti, A e B (bitumi vergini e morbidi) hanno un punto di rammollimento praticamente identico tra loro e molto più basso rispetto a RAP e bio-RAP (bitumi invecchiati e duri). Inoltre, il punto di rammollimento del legante RAP è di poco superiore a quello del bio-RAP.

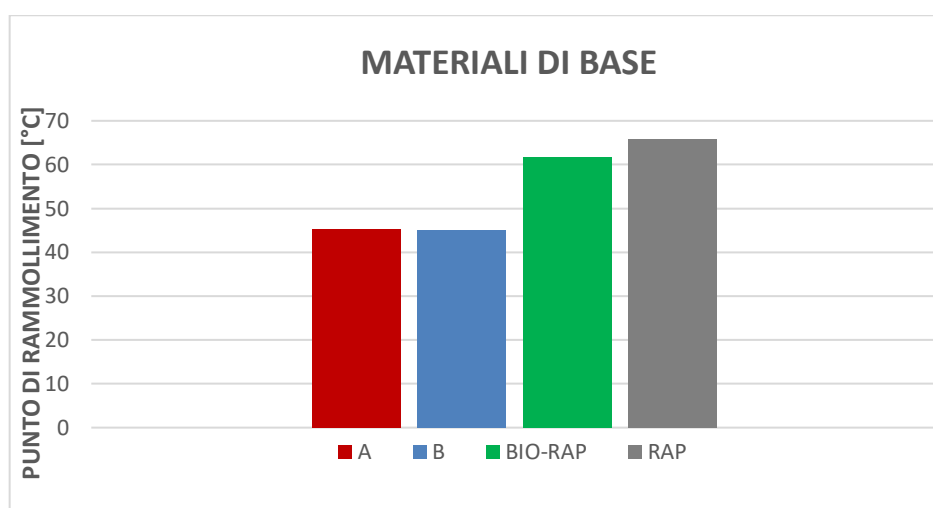


Figura 3.5 Valori del punto di rammollimento dei materiali di base

Le figure seguenti illustrano i valori del punto di rammollimento delle miscele prodotte per diversi gradi di invecchiamento: *materiali tal quali* (*Figura 3.6*); *materiali dopo RTFOT* (*Figura 3.7*); *materiali dopo PAV* (*Figura 3.8*). In *Tabella 3.2* infine sono riportati i valori del punto di rammollimento di tutti i materiali indagati nella sperimentazione.

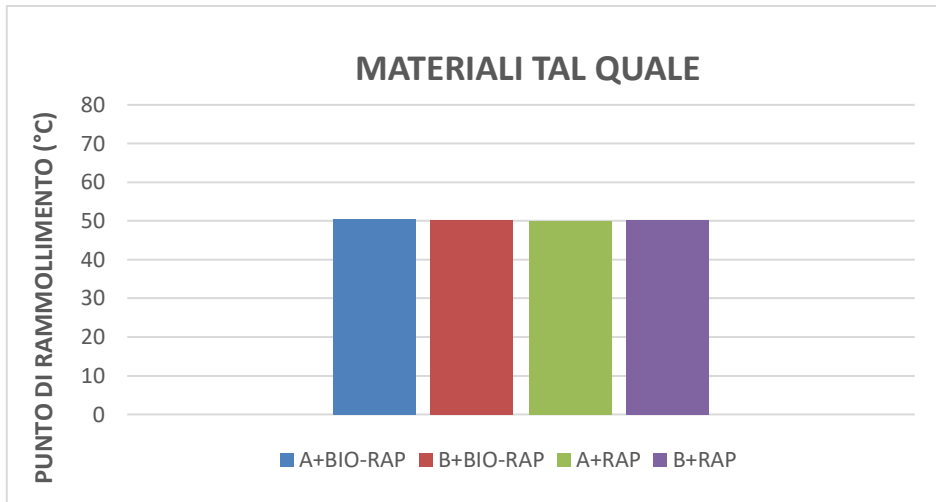


Figura 3.6 Valori del punto di rammollimento delle miscele prodotte, in condizioni tal quali

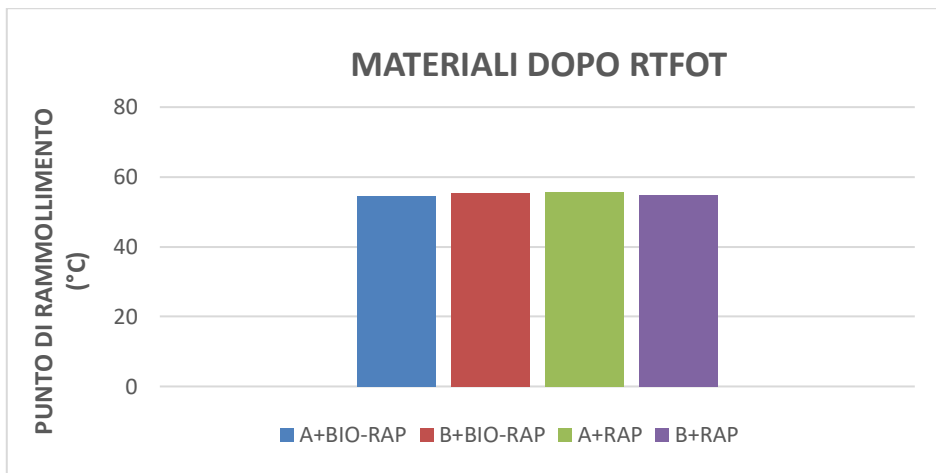


Figura 3.7 Valori del punto di rammollimento delle miscele prodotte, dopo RTFOT

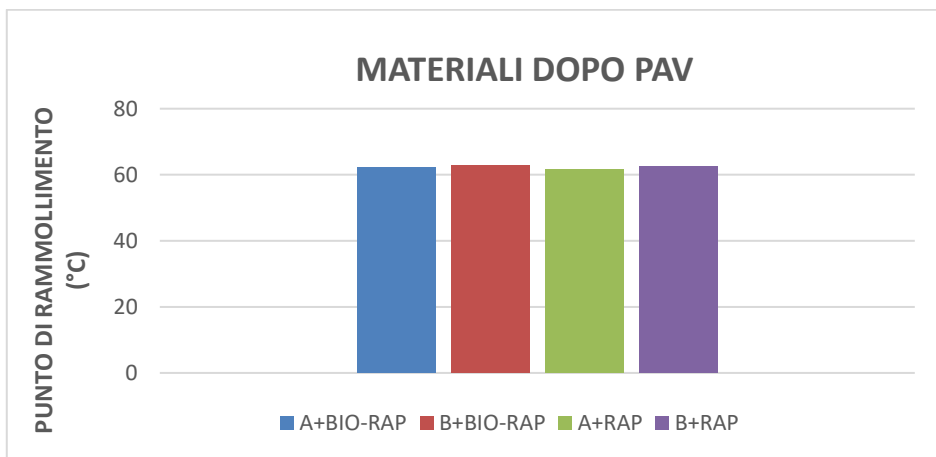


Figura 3.8 Valori del punto di rammollimento delle miscele prodotte, dopo PAV

Tabella 3.2 Risultati delle prove di palla-anello

MATERIALE	PUNTO DI RAMMOLLIMENTO (°C)
A	45.25
B	45.0
Bio - RAP	61.6
RAP	65.75
A+RAP	50.1
A+RAP_RTFOT	55.7
A+RAP_PAV	61.55
A+Bio-RAP	50.4
A+Bio-RAP_RTFOT	54.65
A+Bio-RAP_PAV	62.15
B+RAP	50.2
B+RAP_RTFOT	54.8
B+RAP_PAV	62.5
B+Bio-RAP	50.2
B+Bio-RAP_RTFOT	55.35
B+Bio-RAP_PAV	62.9

I risultati evidenziano (come è lecito aspettarsi) un aumento della temperatura di rammollimento in seguito all'invecchiamento per tutti i materiali. A parità di grado di invecchiamento, il punto di rammollimento è confrontabile per tutte le miscele studiate. Questo risultato conferma che la presenza del bio-olio (sia come bitume vergine, A, sia come bitume ossidato, bio-RAP) non penalizza le proprietà del legante.

CAPITOLO 4 – EFFETTO DELL’INVECCHIAMENTO

4.1 PENETRAZIONE RESIDUA

La penetrazione residua a 25°C, come specificato dalla norma UNI EN 12607-1, viene calcolata con l’equazione 4.1.

Il valore di penetrazione residua indica di quanto cambia la penetrazione del materiale dopo aver subito l’invecchiamento. Valori di penetrazione residua che si avvicinano al 100% indicano che il materiale ha una bassa tendenza ad indurire e quindi la penetrazione varia poco dopo l’invecchiamento del materiale.

$$\text{Penetrazione residua (\%)} = \frac{P_2}{P_1} \times 100 \quad (4.1)$$

Con:

P_2 = penetrazione del materiale dopo l’invecchiamento;

P_1 = penetrazione del materiale non invecchiato.

Di seguito (Figura 4.1, Figura 4.2 e Tabella 4.1) sono riportati i valori di penetrazione residua per i materiali indagati nella sperimentazione.

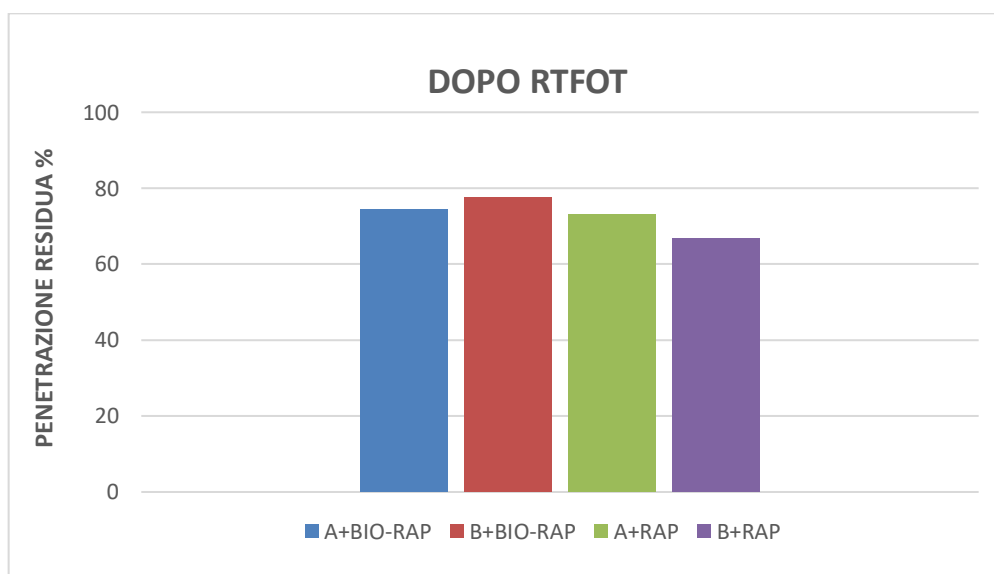


Figura 4.1 Valori di penetrazione residua delle miscele prodotte, dopo RTFOT

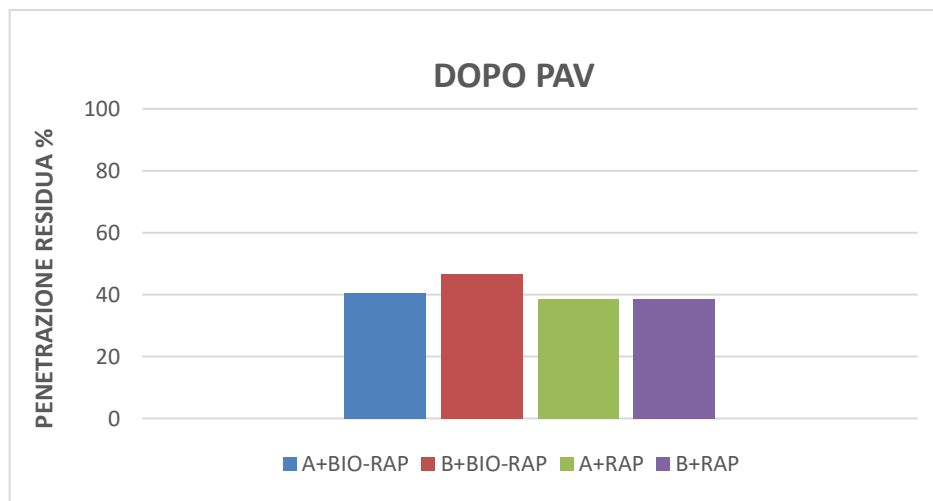


Figura 4.2 Valori di penetrazione residua delle miscele prodotte, dopo PAV

Tabella 4.1 Risultati della penetrazione residua dei materiali studiati

MATERIALE	PENETRAZIONE RESIDUA (%)
A+Bio-RAP_RTFOT	74.50
A+Bio-RAP_PAV	40.50
B+Bio-RAP_RTFOT	77.43
B+Bio-RAP_PAV	46.62
A+RAP_RTFOT	72.97
A+RAP_PAV	38.59
B+RAP_RTFOT	66.62
B+RAP_PAV	38.46

Osservando i risultati ottenuti si vede che, in generale, sia dopo l'invecchiamento RTFOT sia dopo l'invecchiamento PAV, i leganti che contengono bio-RAP hanno una minore suscettibilità ad indurire rispetto ai leganti che contengono il RAP. Tale risultato indica che i bio-leganti possono essere vantaggiosamente riciclati. Per quanto riguarda il confronto tra A e B come bitumi vergini, invece, non emergono sostanziali differenze nella tendenza della miscela ad invecchiare.

4.2 INCREMENTO DEL PUNTO DI RAMMOLLIMENTO

L'incremento del punto di rammollimento, come specificato dalla norma UNI EN 12607-1, è calcolato con l'equazione 4.2.

Il valore di incremento del punto di rammollimento indica di quanto cambia il punto di rammollimento del materiale dopo aver subito l'invecchiamento. Valori di incremento del punto di rammollimento più bassi indicano che il materiale ha una bassa tendenza ad indurire e quindi la temperatura di rammollimento varia poco con l'invecchiamento del materiale.

$$\text{Incremento del punto di rammollimento } (^{\circ}\text{C}) = T_2 - T_1 \quad (4.2)$$

Con:

T_2 = temperatura di rammollimento del materiale dopo l'invecchiamento;

T_1 = temperatura di rammollimento del materiale non invecchiato.

Di seguito (Figura 4.3, Figura 4.4 e Tabella 4.2) sono riportati i valori di incremento del punto di rammollimento per i materiali indagati nella sperimentazione.

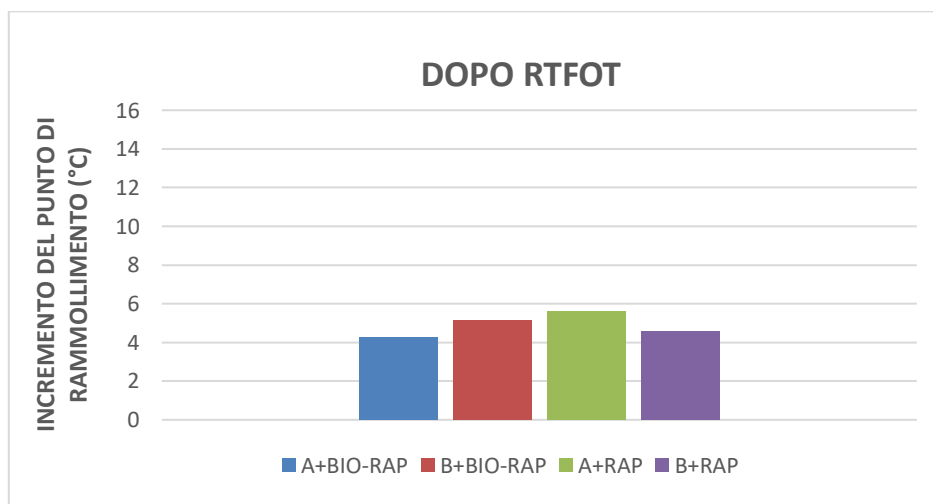


Figura 4.3 Valori di incremento del punto di rammollimento delle miscele prodotte, dopo RTFOT

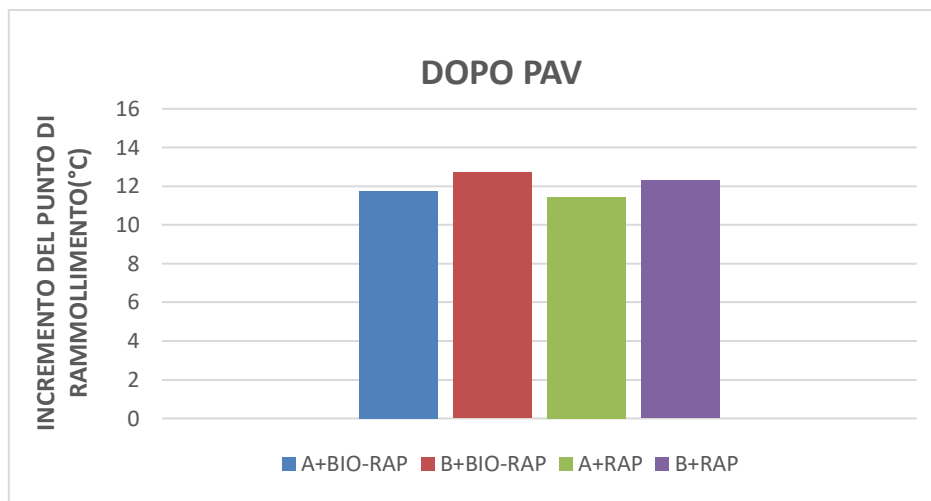


Figura 4.4 Valori di incremento del punto di rammollimento delle miscele prodotte, dopo PAV

Tabella 4.2 Risultati dell'incremento del punto di rammollimento dei materiali studiati

MATERIALE	Incremento del punto di rammollimento (°C)
A+Bio-RAP_RTFOT	4.25
A+Bio-RAP_PAV	11.75
B+Bio-RAP_RTFOT	5.15
B+Bio-RAP_PAV	12.7
A+RAP_RTFOT	5.6
A+RAP_PAV	11.45
B+RAP_RTFOT	4.6
B+RAP_PAV	12.3

Analizzando i risultati ottenuti si vede che, in generale, sia dopo l'invecchiamento RTFOT sia dopo l'invecchiamento PAV, le miscele contenenti bio-RAP e quelle contenenti RAP hanno analoga tendenza ad invecchiare. Per quanto riguarda l'effetto dei bitumi vergini, l'impiego del bitume A non comporta una sostanziale differenza nella tendenza all'indurimento rispetto all'utilizzo del bitume B.

CONCLUSIONI

La sperimentazione condotta ha avuto come oggetto lo studio di quattro leganti bituminosi prodotti in laboratorio in modo da riprodurre gli effetti di un intervento di riciclaggio a caldo. Tali leganti sono stati ottenuti miscelando secondo opportune proporzioni due bitumi vergini con caratteristiche analoghe (denominati "A" e "B"), di cui uno parzialmente sostituito con un bio-olio ("A"), e due bitumi fortemente invecchiati, un "RAP" estratto dal conglomerato recuperato da una pavimentazione dismessa e un "bio-RAP" prodotto in laboratorio. Il bio-olio esaminato è un residuo dei processi di lavorazione e trasformazione del legno di conifera.

Gli obiettivi della sperimentazione erano: 1. Valutare se i bio-leganti possono essere impiegati come bitumi vergini nel riciclaggio a caldo, senza penalizzazioni rispetto all'uso di bitumi tradizionali; 2. Valutare se i bio-leganti, al termine della vita utile della pavimentazione, possono essere riciclati, come normalmente si fa per i bitumi tradizionali.

A tale scopo, le miscele prodotte sono state studiate in condizioni tal quali e dopo invecchiamento a breve e lungo termine, per valutare l'evoluzione del loro comportamento nel tempo a seguito di un ipotetico intervento di riciclaggio della pavimentazione. Sui materiali indagati sono state effettuate prove di penetrazione e pall-anello.

I risultati ottenuti hanno portato alle seguenti conclusioni:

- Per tutte le miscele studiate, la penetrazione registra una diminuzione all'aumentare dell'invecchiamento (come atteso);
- A parità di invecchiamento, i valori di penetrazione sono confrontabili per tutte le miscele studiate;
- La temperatura di rammollimento aumenta per tutte le miscele con il grado di invecchiamento (come atteso);
- A parità di invecchiamento, anche il punto di rammollimento è confrontabile per tutte le miscele studiate;
- In termini di penetrazione residua, i risultati sembrano indicare, in generale, che le miscele che contengono il bio-RAP hanno una minore suscettibilità all'invecchiamento rispetto alle miscele che contengono il RAP. Per quanto riguarda il confronto tra A e B come bitumi vergini, invece, non emergono sostanziali differenze nella tendenza della miscela ad invecchiare;

- In termini di incremento del punto di rammollimento, i risultati indicano, in generale, che le miscele contenenti Bio-RAP e quelle contenenti RAP hanno analoga tendenza ad invecchiare. Lo stesso vale se si confronta l'effetto dell'aggiunta di A e B come bitumi vergini.

Nel complesso, tali risultati suggeriscono che i bio-leganti possono essere impiegati come bitumi vergini nel riciclaggio a caldo di pavimentazioni dismesse e che possono essere a loro volta riciclati alla fine della vita utile della pavimentazione, senza penalizzazioni prestazionali rispetto a bitumi tradizionali. Tuttavia occorrono ulteriori studi per avvalorare i risultati della sperimentazione descritta, come ad esempio prove chimiche e reologiche sugli stessi leganti. Nonostante ciò, vale la pena sottolineare come l'uso dei bio-leganti porterebbe enormi vantaggi dal punto di vista ambientale ed economico, in quanto si utilizzerebbe un minor quantitativo di bitume per produrre leganti stradali, diminuendo di conseguenza l'impiego di petrolio e sfruttando in modo vantaggioso materiali di scarto che altrimenti andrebbero appositamente smaltiti in discarica (come il bio-olio considerato in questo studio).

BIBLIOGRAFIA

- UNI EN 1426 (2007) – Bitumi e leganti bituminosi - Determinazione della penetrazione con ago.
- UNI EN 1427 (2007) – Bitumi e leganti bituminosi - Determinazione del punto di rammollimento (metodo biglia e anello).
- UNI EN 12607-1 (2007) – Bitumi e leganti bituminosi - Determinazione della resistenza all'indurimento per effetto del calore e dell'aria (Parte 1: metodo RTFOT).
- UNI EN 14769 (2013) – Bitumi e leganti bituminosi - Invecchiamento, condizionamento accelerato a lungo termine mediante l'utilizzo di un recipiente di invecchiamento pressurizzato (PAV).