

Università Politecnica delle Marche



FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

Dipartimento Ingegneria Civile, Edile e dell'Architettura

Valutazione dell'adesione di bitumi rigenerati mediante l'apparecchiatura PATTI

Evaluation of bitumen-aggregate adhesion of rejuvenated binders through
PATTI test

Relatore:

Prof. Ing. Bocci Maurizio

Tesi di Laurea di:

Beatrice Aulicino

Correlatore

Emiliano Prosperi

A.A. 2020 / 2021

Sommario

INTRODUZIONE.....	3
1 STATO DELL'ARTE.....	5
1.1 BITUME.....	6
1.1.1 Cos'è il bitume	6
1.1.2 Processo produttivo del bitume.....	6
1.1.3 Chimica del bitume.....	8
1.1.4 Vari tipi di bitumi	8
1.1.4 Invecchiamento del bitume	10
1.2 AGGREGATI.....	11
1.2.1 Cosa sono gli aggregati.....	11
1.2.2 Classificazione aggregati	13
1.2.3 Produzione aggregati	14
1.3 RICICLAGGIO	15
1.3.1 Tecniche di riciclaggio.....	15
1.3.2 Riciclaggio a caldo	16
1.4 CONCETTO DI COESIONE E ADESIONE.....	23
1.4.1 Adesione.....	23
1.4.2 Coesione	25
2 INDAGINE SPERIMENTALE.....	26
2.1 OBIETTIVI DELL'INDAGINE	26
2.2 MATERIALI.....	27
2.2.1 Aggregati.....	27
2.2.2 Bitume	29
2.2.3 Additivi.....	32
2.3 PROGRAMMA SPERIMENTALE	36
Fase 1	36

	Fase 2	45
	Fase 3	49
3	RISULTATI.....	62
4	CONCLUSIONE.....	85
	Sitografia	86

INTRODUZIONE

La presente tesi dal titolo “*Valutazione dell’adesione di bitumi rigenerati mediante l’apparecchiatura PATTI*” affronta una tematica di estrema importanza nel campo delle pavimentazioni stradali, ovvero l’adesione e coesione del conglomerato bituminoso agli aggregati.

Quando si parla di adesione si esprime non soltanto il fenomeno chimico-fisico col quale bitume ed inerte si legano tra loro durante il confezionamento del conglomerato, ma anche il contributo offerto da tale legame in termini di resistenza meccanica al materiale finale.

Se non viene assicurata una corretta adesione, possono verificarsi fenomeni di degrado che possono compromettere le caratteristiche fisiche e meccaniche di una pavimentazione stradale.

In particolare viene valutata l’adesione dei bitumi *Primario o Straight-run (S) e Visbreaking (V)*; i bitumi artificiali tradizionali del tipo *Primario o Straight-run* sono i più comuni e si ottengono dal processo di distillazione frazionata del petrolio greggio, invece il bitume *Visbreaking* deriva da un processo di raffineria di decomposizione termica, eseguito a una temperatura tra i $430 \div 485$ °C, del residuo viscoso risultante dalla distillazione frazionata a pressione atmosferica o sottovuoto del petrolio greggio.

Per quanto riguarda il tipo di aggregato, sono state utilizzate lastre di aggregato calcareo e lastre di aggregato calcareo pre-bitumato, ovvero ricoperto di bitume per simulare il materiale proveniente da vecchie pavimentazioni stradali, in modo tale da valutare l’adesione tra il bitume e il conglomerato bituminoso di recupero, il cosiddetto RAP.

In questo caso subentra il concetto di riciclaggio a caldo, il quale verrà trattato nello specifico in seguito, poiché tale concetto favorisce uno sviluppo economico di tipo sostenibile, riducendo le emissioni nocive prodotte, il fabbisogno energetico produttivo e favorendo l’utilizzo di risorse energetiche rinnovabili.

Le prove sono state eseguite a diverse temperature di invecchiamento dell’aggregato: a 170°, 140° e 60° per l’aggregato pre-bitumato.

L’apparecchiatura utilizzata per eseguire tali prove viene denominata PATTI, Questo strumento consente di misurare la resistenza a trazione del legame tra bitume e un

substrato solido, mediante l'applicazione di una forza di trazione crescente linearmente fino al raggiungimento della condizione di rottura (pull-off) su appositi pistoncini incollati al substrato attraverso un prefissato quantitativo di bitume pari a 0.08 grammi.

Al termine delle prove eseguite, si otterranno una serie di risultati che rappresentano proprio la resistenza a trazione dei bitumi valutati e verranno realizzati dei grafici per poter comprendere quali sono le condizioni migliori di adesione.

1 STATO DELL'ARTE

Premessa

Per pavimentazione stradale, detta anche sovrastruttura, si intende la parte superiore del corpo stradale direttamente interessata dal moto dei veicoli. Lo scopo della pavimentazione stradale è di garantire, per tutta la sua vita utile di progetto, i requisiti strutturali e funzionali necessari per un corretto utilizzo dell'infrastruttura da parte degli utenti stradali. Nel dettaglio, sono richiesti requisiti strutturali di portanza e di durabilità nei confronti delle azioni dei carichi del flusso di traffico veicolare e degli eventi atmosferici locali agenti e requisiti di comfort di guida, in termini di vibrazioni trasmesse dall'irregolarità della superficie della pavimentazione, la sicurezza di utilizzo da assicurare e inquinamento acustico prodotto dal rotolamento dello pneumatico.

Il conglomerato bituminoso è costituito da una miscela di aggregati (materiali rocciosi di diversa granulometria quali filler, sabbia e pietrisco) e un legante e viene utilizzato per realizzare diversi strati della pavimentazione stradale.

Nel seguente capitolo verranno trattati i principali componenti del conglomerato bituminoso, quali aggregati e bitume.

Inoltre, viene affrontato il concetto di riciclaggio del conglomerato, fondamentale al giorno d'oggi per ridurre l'inquinamento e il concetto di coesione e adesione tra bitume e aggregati, di sostanziale importanza per la corretta realizzazione di un conglomerato bituminoso.

1.1 BITUME

1.1.1 Cos'è il bitume

Il bitume è un materiale termo-plastico, che cambia la sua consistenza e viscosità al variare della temperatura, di colore da bruno a nero.

I bitumi sono impermeabili all'acqua, parzialmente solubili in molti solventi organici apolari, quali il benzene, il tetracloruro di carbonio ed il cloroformio e sono completamente solubili in solfuro di carbonio.

In un conglomerato bituminoso, il bitume ha la funzione di conferire alla miscela la necessaria coesione per poter resistere alle sollecitazioni di taglio e flessione dovute ai carichi superficiali indotti dal passaggio degli pneumatici.

1.1.2 Processo produttivo del bitume

Il bitume si ottiene dai processi di raffinazione del petrolio grezzo; il processo di produzione più comune è quello della distillazione frazionata.

Al momento dell'estrazione il petrolio è detto petrolio grezzo. È composto da un miscuglio di idrocarburi, molto diversi per composizione chimica, e da impurità. Per essere utilizzato per fini energetici deve essere accuratamente lavorato e distillato.

Nella filiera del petrolio questa fase è detta di "raffinazione". La raffinazione del petrolio è un processo tecnologico in grado di trasformare il greggio in prodotti finali (carburanti, solventi, bitumi, lubrificanti) o in prodotti intermedi per l'industria petrolchimica.

Il processo si svolge in specifici stabilimenti industriali dette "raffinerie". La tecnologia ed i costi economici del processo di lavorazione del grezzo sono maggiori quanto più è bassa la qualità del petrolio grezzo. Un petrolio grezzo di scarsa qualità, oltre ad avere minori applicazioni tecniche, è caratterizzato da maggiori costi di lavorazione. In particolar modo, è importante analizzare la quantità di zolfo, di sali e di acqua presente nel petrolio grezzo.

Prima della distillazione il petrolio grezzo viene purificato eliminando l'acqua, i sali, i solidi in sospensione ed i gas disciolti, tramite le operazioni di decantazione, di desalificazione e di stabilizzazione.

Nella distillazione frazionata il petrolio grezzo viene riscaldato in una fornace ad alta temperatura fino ad essere portato al punto di ebollizione. Tramite la distillazione

frazionata si estraggono dal greggio le principali frazioni, dette tagli, gassose, liquide o semisolidi sfruttando il diverso intervallo delle temperature di distillazione. Ad esempio, la benzina ha un punto di ebollizione finale intorno a 200°C. Il gasolio, invece, ha un intervallo di ebollizione a 350° C. Tra questi estremi si colloca il cherosene con un punto di ebollizione compreso fra 175 e 275 °C. Oltre ai diversi carburanti la distillazione frazionata permette di recuperare gas e oli residui, dai quali si ottengono rispettivamente il gas GPL ed i bitumi.

La distillazione frazionata ha luogo in una torre di frazionamento composta da colonna di distillazione contenente un numero di piatti, posti a diverse altezze in base a distinti punti di ebollizione, da cui fuoriescono i tagli petroliferi. Sui piatti in cima alla colonna si depositano gli idrocarburi più leggeri (gas), sui piatti inferiori gli idrocarburi più pesanti. Sul fondo si raccolgono i residui della distillazione. Ogni piatto ha dei fori che consentono il passaggio delle frazioni da un piatto all'altro.

I tagli ottenuti dal processo di distillazione frazionata sono successivamente avviati verso specifiche filiere di lavorazione e raffinazione per ulteriori lavorazioni. Il prodotto intermedio viene lavorato nelle relative filiere a valle, fino all'ottenimento del prodotto finale (es. benzina, GPL, olefine, paraffine, cherosene, gasolio, olio combustibile, lubrificanti, cere, bitumi e coke).

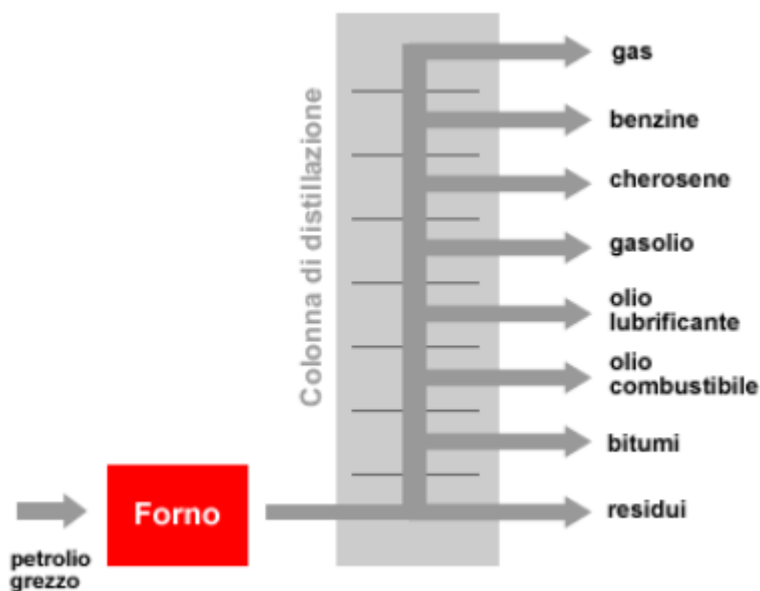


Figura 1: torre di frazionamento

1.1.3 Chimica del bitume

Nei bitumi si possono distinguere le seguenti classi:

- carboidi: prodotto insolubile in solfuro di carbonio CS₂
- carbeni: prodotto solubile in CS₂ ed insolubile in tetracloruro di carbonio CCl₄
- asfalteni: prodotto solubile in CS₂ e CCl₄ ed insolubile in un alcano bassobollente (n-eptano o n-pentano, con p.e. intorno ai 30-40°C)
- malteni: prodotto solubile in ognuna delle precedenti sostanze; a loro volta si suddividono in resine e oli ricavati attraverso un procedimento detto di adsorbimento (resine) ed eluizione (oli).

Gli asfalteni sono delle polveri solide, friabili, di colore bruno, con un elevato peso molecolare e danno “corpo” al bitume.

Le resine sono sostanze semi-solide appiccicose che conferiscono al bitume le proprietà leganti e impermeabilizzanti. Hanno una composizione simile a quella degli asfalteni seppur con minore polarità. In assenza di essi gli asfalteni tenderebbero ad aggregarsi e a flocculare.

Gli oli sono dei liquidi bianchi o incolori, a basso peso molecolare e fungono da agenti flocculanti nei confronti degli asfalteni.

Quindi il bitume può essere rappresentato chimicamente come una dispersione di asfalteni negli oli, dove le resine consentono la dispersione di questi asfalte.

1.1.4 Vari tipi di bitumi

I bitumi possono essere presenti in natura o ottenuti artificialmente.

I bitumi naturali sono sostanze minerali costituite da miscele di idrocarburi con molecole ad elevato numero di atomi carbonio. Si formano per addensamento ed ossidazione dei petroli venuti a contatto con l'atmosfera quando attraversano rocce sedimentarie quali calcari, arenarie, argilliti. Si trovano concentrati in depositi affioranti sulla superficie del suolo o su acque lacustri, da soli o mescolati ad altri materiali. Sono di colore nero, solidi a temperatura ambiente ma facilmente fusibili con alcuni solventi organici.

I bitumi artificiali sono prodotti che si ottengono dalla lavorazione dei residui della distillazione del petrolio. Si presentano più molli di quelli naturali perchè contengono residui di oli lubrificanti.

In base al punto di rammollimento i bitumi possono classificarsi in: bitumi stradali che hanno punto di rammollimento fino a 35° C e si presentano semisolidi a temperatura ambiente, sono molto duttili e vengono utilizzati per manti stradali e bitumi industriali che hanno punto di rammollimento più alto, e di conseguenza minore duttilità. Vengono utilizzati per la creazione di conglomerati, blocchi per pavimentazioni, cavi elettrici...

I bitumi possono essere poi suddivisi in base ai processi utilizzati per la produzione in bitumi estratti con processi di distillazione diretta, è una tecnica svolta sotto vuoto che consente di separare il bitume dal greggio, vengono utilizzati per la realizzazione di guaine impermeabilizzanti e per sovrastrutture stradali; e bitumi realizzati con processi di estrazione con solvente. Il solvente separa il raffinato dalle peci. In base al grado di evaporazione del solvente avremo bitumi a rapido, a medio ed a lento indurimento.

I bitumi realizzati per soffiaggio con aria si ottengono insufflando aria ad altissima temperatura (150/250° C) nei residui della distillazione del greggio ossidandoli. Il bitume in tal modo diventa meno sensibile alle sollecitazioni termiche e più elastico. utilizzati per lavori di impermeabilizzazione, in edilizia e nell'industria ed anche per la fabbricazione di vernici impermeabilizzanti.

Migliorare le caratteristiche reologiche dei bitumi ha portato all'introduzione sul mercato del bitume modificato con sostanze di natura diversa, come ad esempio polimeri, le gomme provenienti dal riciclo di pneumatici, i filler, le cere paraffiniche, le fibre, i catalizzatori.

Queste aggiunte modificano le proprietà fisiche e chimiche del bitume di origine.

Gli agenti maggiormente usati sono i polimeri, costituiti da una macromolecola, ovvero una molecola dall'elevato peso molecolare, costituita a sua volta da un gran numero di gruppi molecolari uguali o diversi uniti "a catena" mediante la ripetizione dello stesso tipo di legame.

I polimeri si dividono in termoindurenti, non utilizzabili in campo stradale, e termoplastici, che a loro volta si suddividono in elastomeri e plastomeri.

I polimeri termoplastici elastomerici migliorano prevalentemente il comportamento duttile ed elastico della miscela finale con conseguente incremento della deformazione a rottura e della resistenza ai carichi ciclici.

I polimeri termoplastici plastomerici sono caratterizzati da una struttura reticolare

rigida e resistente e dunque, non modificano in maniera significativa la risposta elastica del bitume ma ne determinano un sostanziale incremento della resistenza a rottura.

Un altro tipo di bitume è il bitume schiumato, il quale nome si riferisce ad uno stato fisico del bitume in corrispondenza del quale esso assume un aspetto schiumoso, alterando temporaneamente le sue proprietà fisiche. La schiuma incrementa la superficie specifica del bitume che, in una condizione temporanea di bassa viscosità, diventa più adatto ad essere mescolato con aggregati a temperatura ambiente e alle condizioni di umidità presenti in sito. Questo tipo di bitume si ottiene trasferendo del calore dal bitume all'acqua, il vapore generato causa un'immediata ed esplosiva espansione. La bolla, ostacolata dalla tensione superficiale esercitata dal bitume, si espande con pressione sempre minore e poi la schiuma si dissolve in meno di un minuto e il legante riacquista le sue proprietà originali.

1.1.4 Invecchiamento del bitume

Il Bitume è soggetto ad un fenomeno di invecchiamento detto "aging" che può essere suddiviso in due tipi differenti:

- invecchiamento di lungo termine

Può avvenire per la continua esposizione agli agenti atmosferici, ma anche a causa del traffico che circola sull'infrastruttura con conseguente ossidazione delle sostanze oleose e delle resine asfaltiche e successivo aumento della concentrazione degli asfalteni, rendendo il conglomerato più duro, meno elastico, quindi più fragile.

- invecchiamento a breve termine

Si verifica nelle fasi di impegno ed è imputabile alle alte temperature a cui il bitume è sottoposto con conseguente perdita delle frazioni volatili. Questo comporta una diminuzione delle caratteristiche di fluidità e scorrimento anche a temperature medio alte, risultando troppo duro e appiccicoso per essere lavorato idealmente.

Si differenziano, per l'invecchiamento del bitume, i seguenti fenomeni:

- volatilizzazione: è responsabile del solo invecchiamento a breve termine, infatti, si ha generalmente entro la fase di miscelazione a caldo tra aggregati e bitume, provoca l'allontanamento per volatilizzazione delle componenti più leggere aventi bassi punti di ebollizione;

- ossidazione: riguarda sia l'invecchiamento a breve termine che quello a lungo termine, anche grazie alle elevate temperature si crea una reazione chimica tra l'ossigeno e le macromolecole idrocarburiche che provoca la rottura dei legami covalenti di base riscontrando un aumento del grado di polarità delle suddette molecole;
- polimerizzazione: è relativo sia all'invecchiamento a breve termine che a lungo termine, anche grazie alle elevate temperature si formano legami intermolecolari con conseguente incremento della dimensione delle molecole che ne costituiscono la struttura interna.

Essere a conoscenza che un legante bituminoso tende inevitabilmente a processi di invecchiamento, mutando fin da subito durante la miscelazione a caldo le proprie caratteristiche reologiche di bitume vergine, è fondamentale per un corretto impiego del conglomerato bituminoso di recupero.

1.2 AGGREGATI

1.2.1 Cosa sono gli aggregati

Gli aggregati sono materiali ricavati dalla triturazione delle rocce e i principali costituenti delle miscele stradali.



Figura2: esempio di aggregati per costruzioni stradali

Questi si dividono in naturali, artificiali e riciclati.

Quelli naturali derivano dalla frantumazione di roccia compatta.

Le rocce possono essere ignee, sedimentarie o metamorfiche.

Quelle ignee derivano dal raffreddamento del magma e possono essere effusive con una struttura cristallina, intrusive con una struttura grossolana, piroclastiche che

derivano dal deposito di materiali di lancio durante le fasi esplosive dell'attività vulcanica.

Quelle sedimentarie derivano dall'alterazione ed erosione delle rocce preesistenti, seguito da un successivo trasporto del materiale detritico, seguito dalla sedimentazione e litificazione dei sedimenti.

Quelle metamorfiche derivano dall'alterazione delle rocce sedimentarie a causa di agenti atmosferici come vento, variazioni di temperatura..

Quelli artificiali possono essere progettati e prodotti su misura e sono ad esempio la loppa d'altoforno, cenere volante, argilla espansa..

Quelli riciclati, invece, da costruzioni e demolizioni o dalla scomposizione di pavimentazioni esistenti.

Gli aggregati sebbene non partecipino alle reazioni che alla presa ed indurimento delle malte, concorrono in maniera sostanziale a determinarne le caratteristiche fondamentali.

Il loro utilizzo nella preparazione delle malte determina i seguenti benefici:

- riduce il rischio di fessurazioni durante la fase di ritiro. Ritiro che si accompagna all'indurimento della pasta fluida. Le fessurazioni possono interessare sia la superficie del manufatto che la sua massa interna. Il problema nasce perché nella fase di ritiro le dimensioni della malta non si riducono in maniera uniforme passando dalla direzione longitudinale a quella trasversale. Nascono delle tensioni che provocano o possono provocare delle fessurazioni. L'aggiunta degli inerti, specie se di grana fine, riducono notevolmente questo rischio perché dotano l'aggregato di una sorta di struttura scheletrica.
- Riducono il costo della malta. A parità di peso di malta una maggiore percentuale di inerti implica una diminuzione della quantità di legante utilizzato che, tra i vari componenti della miscela, è quello che ha il costo più elevato.
- Riducono il calore di idratazione della malta: le reazioni del legante, con aria o acqua, che conducono a presa ed indurimento della malta sono tutte esotermiche (avvengono con sviluppo di calore). La qual cosa può condurre, in impasti consistenti, anche a notevole aumento della temperatura degli stessi. L'aumento di temperatura dell'impasto dal punto di vista pratico ne riduce la lavorabilità specie nella bella stagione in quanto facilita l'indurimento ed accorcia i tempi con cui si realizza ed inoltre aumenta la rapidità di ritiro ed

i rischi di fessurazione. L'aggiunta di inerti, a parità di peso di malta, riduce la percentuale di legante. Legante che reagendo sviluppa calore e quindi indirettamente l'aggiunta di inerti riducono il problema.

- Aumentano la plasticità dell'impasto: condizione che aumenta la facilità con cui la malta può essere posta in opera.

1.2.2 Classificazione aggregati

Gli inerti di norma si classificano in:

- **Inerti fini o sabbie:** hanno dimensioni più piccole di 5 millimetri.

Gli inerti fini possono poi suddividersi ancora in:

- inerti fini o sabbie naturali: se sono reperibili direttamente in natura come può essere ad esempio la sabbia di fiume o di lago.
- inerti fini o sabbie artificiali: si ottengono artificialmente per molitura di aggregati più grandi in speciali mulini.
- **Inerti grandi:** hanno dimensioni superiori ai 5 millimetri. Anche essi si suddividono in:
 - inerti grandi naturali o ghiaie: sono il risultato della frantumazione naturale, avvenuta in tempi paragonabili a quelli geologici, di rocce dure e compatte. Sono reperibili nell'alveo di fiumi e laghi. Hanno spigoli che si sono arrotondati per il lavoro dell'acqua nel corso di millenni.
 - inerti grandi artificiali o pietrisco: sono il risultato della frantumazione ad opera dell'uomo di rocce dure e compatte come quelle calcaree e silicee. Hanno, come risultato della frantumazione, bordi e spigoli vivi e taglienti.

In funzione stretta delle loro dimensioni gli aggregati possono differenziarsi in:

- Sabbie naturali/artificiali fini. Se hanno dimensioni inferiori al mezzo millimetro.
- Sabbie naturali/artificiali medie. Se hanno dimensioni che sono contenute tra il mezzo millimetro ed i 2 millimetri.
- Sabbie naturali/artificiali grosse. Se hanno dimensioni comprese tra 2 millimetri e 5 millimetri.
- Ghiaietti (naturali) - pietrischetti (artificiali). Se hanno dimensioni comprese tra i 5 millimetri ed i 3 centimetri.
- Ghiaie/pietrischi piccoli. Se hanno dimensioni comprese tra i 3 ed i 4 centimetri.

- Ghiaie/pietrischi medi. Se hanno dimensioni tra i 4 ed i 5 centimetri
- Ghiaie/pietrischi grandi. Se hanno dimensioni tra i 5 ed i 7 centimetri.

1.2.3 Produzione aggregati

La produzione degli aggregati inizia con l'estrazione tramite una serie di successivi sbancamenti con mezzi meccanici o con l'utilizzo di esplosivi.

Poi si procede con la frantumazione e riduzione del materiale cavato tramite specifici frantoi.

Successivamente il materiale viene suddiviso in classi granulometriche tramite vagliatura.

1.3 RICICLAGGIO

Con il termine RAP si intende il conglomerato bituminoso di recupero che deriva dal materiale rimosso da una pavimentazione stradale esistente.

Il conglomerato bituminoso di recupero generalmente è formato da aggregati lapidei aventi ottime caratteristiche meccaniche e da bitume ormai invecchiato.

L'uso di RAP consente di ridurre le emissioni di gas serra, inoltre comporta un beneficio economico, ovvero meno spese in nuovi materiali di costruzione e ristrutturazione o inerti "vergini" e tutela le risorse naturali come sassi, sabbia e ghiaia, che non sono rinnovabili.

Il conglomerato bituminoso rimosso con la tecnica della fresatura viene detto *fresato d'asfalto*. Questo materiale può essere utilizzato come materiale costituente per miscele bituminose prodotte in impianto a caldo e rientra nella categoria dei rifiuti da costruzione e demolizione ed è classificato come rifiuto non pericoloso.

La valorizzazione e il riuso del fresato d'asfalto nel settore delle costruzioni stradali porta enormi vantaggi sia per gli operatori del settore che per le pubbliche amministrazioni e contribuisce alla concretizzazione degli obiettivi di sostenibilità e di economia circolare.

1.3.1 Tecniche di riciclaggio

Le tecniche principali per recuperare questo materiale sono due: il riciclaggio a caldo, con recupero fino al 50% del fresato e quello a freddo, con riciclo fino al 100% del prodotto.

Il riciclaggio a caldo è un trattamento che consiste nel riscaldamento degli inerti oltre i 150°C, mentre quello a freddo non prevede il riscaldamento degli inerti ed è un trattamento che consiste nel miscelare il fresato con il legante bituminoso, acqua, cemento ed eventuali inerti vergini. Questi trattamenti possono essere realizzati in impianti fissi oppure direttamente in sito mediante appositi treni di macchine per riciclare sul posto la pavimentazione stradale. Le tecniche con cui all'impianto viene inserito il conglomerato bituminoso di recupero determinano modalità, entità e tempi di riscaldamento diversi che incidono sul bitume vecchio e su quello nuovo.

L'impianto di tipo continuo ha un funzionamento senza interruzione di esercizio: la miscelazione del materiale avviene all'interno di un tamburo che ha la funzione anche di mescolatore. Questo sistema è molto semplice, con costi di manutenzione

bassi, che però necessita di un controllo preciso delle miscele prima ancora che il materiale inerte entri nell'essiccatore.

L'impianto di tipo discontinuo è il più diffuso al mondo per la produzione di conglomerati bituminosi, con più flessibilità di utilizzo e maggiore qualità del prodotto finito. In questo tipo di impianto infatti è presente un vaglio selezionatore e gli aggregati caldi, il filler e il bitume sono prima pesati e poi dosati separatamente nel mescolatore; ogni 40-50 secondi è possibile ottenere un impasto completo con tutti i diversi componenti.

Ci sono due tipologie principali di macchinari per il riciclo del RAP: i fissi e i mobili. Gli impianti fissi sono progettati su misura per soddisfare le diverse esigenze del cliente, adatti per grandi produzioni di riciclaggio inerti o per produzioni complete. Gli impianti mobili sono impianti in sagoma, compatti e facili da trasportare da un cantiere a un altro, senza bisogno di permessi specifici; scegliere questa tipologia di impianti offre molteplici benefici, anche in termini economici, ad esempio:

- installare un impianto fisso richiede spazi di grandi dimensioni, l'impianto mobile ha dimensioni contenute e può essere usato sul posto
- con l'acquisto di un solo impianto mobile è possibile coprire più cantieri
- con un impianto mobile, le aziende possono prendere anche lavori per conto terzi o noleggiare l'impianto ad altre aziende.

1.3.2 Riciclaggio a caldo

1.3.2.1 Riciclaggio a caldo in situ

La rigenerazione in sito delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso, era stata molto sfruttata in passato, quasi esclusivamente per ricostituire strati di base, ottenendo risultati prestazionali molto elevati; tuttavia questa tecnica fu presto abbandonata a causa delle notevoli emissioni in atmosfera, che non riuscivano ad essere fronteggiate dai dispositivi di abbattimento dell'epoca.

Nel caso di fresatura a caldo, inoltre, la termorigenerazione consente di non alterare la granulometria degli aggregati, danneggiando però le caratteristiche del legante, particolarmente sensibile alle alte temperature, soprattutto se modificato. Proprio per questo motivo i macchinari tradizionali, opportunamente integrati e/o modificati, utilizzano propano o altri gas, per riscaldare la pavimentazione.

Questa tipologia di intervento è però limitata ai soli strati superficiali, potendo agire su una profondità di 5 o 6 cm, per cui non può essere utilizzata per pavimentazioni che presentino anche danni strutturali negli strati più profondi.

A differenza degli impianti fissi, questa tecnica è realizzata mediante impianti mobili, semoventi, anche detti "treni di riciclaggio", costituiti da macchine che riscaldano e

scarificano la pavimentazione esistente, e che successivamente aggiungono al materiale recuperato, bitume nuovo, agenti attivanti per rigenerare il bitume invecchiato, eventuali inerti vergini per la correzione granulometrica della miscela: il materiale è ora pronto per essere steso e compattato.

Inoltre con rigenerazione in situ si ha un eccessivo inquinamento causato dall'impossibilità pratica di portare su strada depuratori efficaci, a causa dell'enorme ingombro che essi rappresenterebbero ed un'enorme difficoltà di ottenere una correzione granulometrica esatta.

Il riciclaggio in sito a caldo presenta anche notevoli vantaggi, tra cui il risparmio in trasporto del materiale. Questi impianti, seppur comportino un notevole impatto ambientale, permettono di ridurre i percorsi ed il numero di mezzi di trasporto che, producendo gas di scarico, prodotti volatili e danni acustici, hanno ripercussioni negative sull'ambiente; risparmio in combustibile: il materiale appena fresato presenta infatti un'umidità molto ridotta rispetto a quello presente nei sili di stoccaggio, pertanto i materiali trattati in sito, saranno sottoposti ad un preriscaldamento minore; risparmio relativo alle spese di stoccaggio del materiale fresato; risparmio relativo alla quantità di bitume nuovo, potendo utilizzare maggiori percentuali di conglomerato bituminoso (anche il 100%), rispetto ad una tecnologia in impianto fisso.

La fase di demolizione del conglomerato bituminoso della pavimentazione stradale esistente può effettuarsi con la tecnica della fresatura, a caldo o a freddo.

Con la tecnica a caldo si preriscalda la pavimentazione fino ad una temperatura di $130 \div 150$ °C tramite pannelli radianti o a infrarossi con l'obiettivo di rammollire il bitume dello strato superficiale. Questa fase crea emissioni di vapori e polveri pericolose per la salute e per l'ambiente. La tecnica della a freddo, invece, prevede l'introduzione, prima dell'impasto, di una fase di riscaldamento del fresato e del materiale aggiuntivo in area attrezzate, simulando ciò che avviene in un impianto.

Ormai il riciclaggio a caldo in situ, è stato da molti anni abbandonato, soprattutto per motivi di ordine ambientale, legati principalmente all'emissione dei fumi di bitume. Fa eccezione tuttavia il processo di riciclaggio a caldo in situ dei conglomerati drenanti.

1.3.2.2 Riciclaggio a caldo in impianto

Questo tipo di procedura avviene all'interno di impianti fissi.

Il conglomerato bituminoso prodotto è una miscela di fresato, aggregati vergini, bitume vergine ed eventuali additivi. Le Norme Tecniche prevedono limiti all'impiego del fresato, ad esempio del 30% nei conglomerati per strati di base, 20% nei conglomerati per strati di binder e impiego escluso per i tappeti di usura. Infatti, la presenza del RAP diminuisce in percentuale andando verso lo strato superficiale della pavimentazione e aumenta rispettivamente la qualità dei materiali vergini impiegati.

L'inserimento del conglomerato bituminoso di recupero nella nuova miscela fa sorgere problemi di:

- omogeneità della miscela
- riscaldamento del fresato
- riduzione della lavorabilità
- riduzione delle prestazioni.

Per evitare questi problemi bisogna garantire un'adeguata omogeneità del fresato, mediante una demolizione selettiva, stoccaggio in cumuli separati per tipo di conglomerato, frantumazione di placche più grandi e vagliatura.

Inoltre, il mastice costituito dal legante nuovo e da "parte" del legante vecchio deve garantire il raggiungimento delle caratteristiche volumetriche e meccaniche previste per il conglomerato bituminoso senza fresato.

I gas di scarico prodotti durante la produzione sono controllati e filtrati, da essi si ottiene il filler che viene stoccato e utilizzato nella miscela. Gli impianti, come citato precedentemente, sono divisi in: a ciclo continuo e a ciclo discontinuo.

Gli *impianti continui* sono così chiamati perché non vi è interruzione (o discontinuità) nel processo produttivo del conglomerato bituminoso.

Si possono distinguere in due tipologie: quelli comunemente noti come *drum mixer*, caratterizzati da un processo produttivo che si svolge in un'unica unità operativa, detta cilindro essiccatore e quelli caratterizzati dalla presenza di un sistema di miscelazione esterno posto a valle del cilindro essiccatore.

Gli aggregati lapidei da utilizzare vengono trasportati dalle cave di estrazione e produzione al piazzale dell'impianto e stoccati in cumuli che si differenziano per natura petrografica e classe dimensionale. Non essendo prevista una fase di riselezione degli aggregati, è necessario porre particolare attenzione alle varie classi che non subiscano contaminazioni reciproche.

Il numero minimo di tramogge di alimentazione dipende dalle frazioni granulometriche impiegate per ogni miscela: la maggior parte degli impianti è dotata di 5-6 tramogge, al di sotto delle quali sono localizzati dei nastri estrattori muniti di celle di carico. La variazione di velocità dei nastri permette di dosare la quantità di materiale prelevato da ogni tramoggia al fine di realizzare la giusta combinazione tra le frazioni granulari a disposizione e ottenere la miscela lapidea di progetto.

Gli aggregati così dosati vengono scaricati su un nastro collettore, dotato di un sistema di pesatura automatica per il controllo continuo della loro massa, che essendo “umida”, richiede l’immediata determinazione del tenore di umidità per risalire alla massa secca alla quale va riferita la corretta quantità di bitume da aggiungere nel cilindro essiccatore-miscelatore.

Un impianto continuo drum mixer ha un cilindro essiccatore che funge anche da miscelatore, avendo così una fase contemporanea di essiccazione e miscelazione, funziona a flussi concorrenti, gli aggregati si introducono dal lato bruciatore e scorrono verso il lato di uscita in modo concorde con i gas di scarico. Infatti, i materiali si inseriscono a lunghezze diverse del tamburo, gli aggregati vergini a inizio cilindro, il bitume a circa un terzo dalla fine, il filler o a inizio o a fine tamburo, mentre, il fresato a circa metà della lunghezza.

Un impianto continuo con mescolatore esterno divide le fasi di essiccazione e miscelazione avendo fisicamente un cilindro essiccatore per riscaldare gli aggregati e a valle un miscelatore per introdurre all’impasto il bitume, il filler e gli eventuali additivi. In questo impianto, il cilindro essiccatore funziona a flussi controcorrente, gli aggregati non si introducono dal lato del bruciatore e scorrono verso di esso in senso, quindi, opposto al flusso dei gas di scarico.

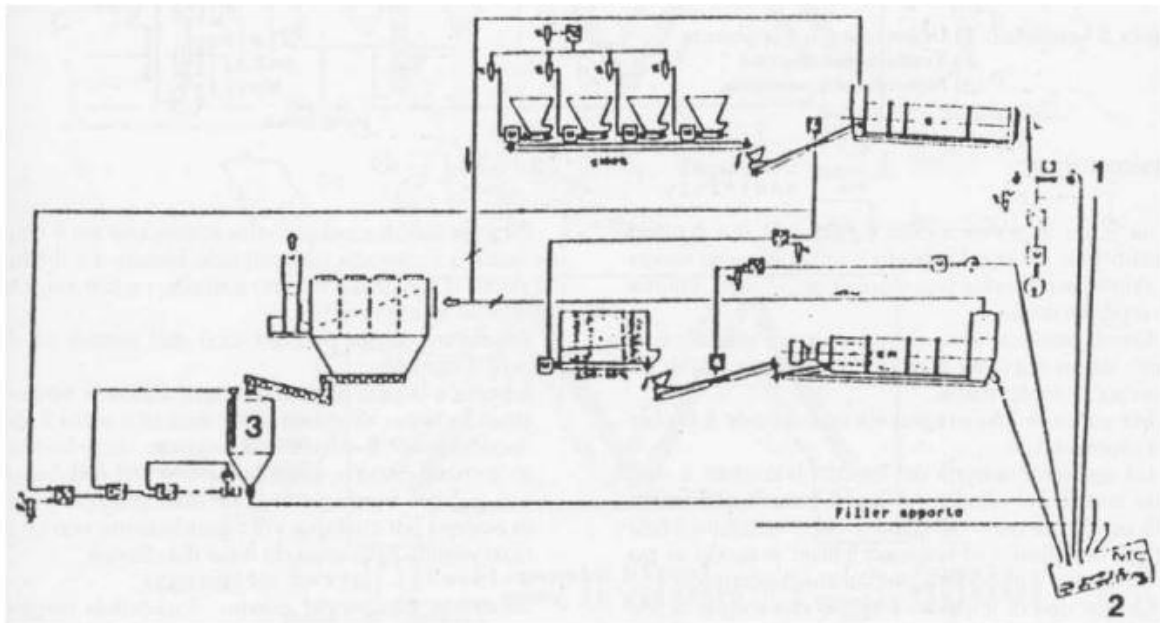


Figura 3: schema di un impianto continuo. Legenda: 1) Tramoggia,
2) Mescolatore continuo
3) Silo filler di recupero

Gli impianti a *ciclo discontinuo* sono più versatili prevedendo un controllo più dettagliato della miscela e confezionandola ciclicamente e non continuamente, potendo così variarne la produzione.

Gli aggregati vengono prelevati dai cumuli e caricati nei predosatori, apposite tramogge dotate di nastri estrattori. Grazie a un nastro trasportatore gli aggregati vengono portati all'interno del tamburo essiccatore.

Il tamburo essiccatore è che un cilindro rotante, che al suo interno possiede una apposita palettatura che solleva il materiale vergine, riscaldandolo tramite irraggiamento con l'aria calda prodotta da un bruciatore. All'interno del tamburo si formano quantità considerevoli di gas, polveri e prodotti di combustione che vengono trattati da un filtro a maniche e successivamente espulsi in atmosfera.



Figura 4: esempio di cilindro essiccatore

Il materiale trattenuto dal filtro, chiamato filler, viene depositato sul fondo e raccolto mediante un'apposita coclea che lo invia al silo di stoccaggio per essere poi prelevato durante la mescolazione.

Parte fondamentale dell'impianto è la torre di mescolazione: gli aggregati caldi ed essiccati raggiungono la sommità della torre per mezzo di un elevatore a tazze posto all'uscita dell'essiccatore. In questa parte dell'impianto di produzione la movimentazione degli aggregati avviene per gravità.

Le fasi di processo partono con la selezione degli aggregati caldi per mezzo del vaglio vibrante. Ogni tramoggia ha nella parte inferiore un'apertura per il prelievo delle campionature.

Il vaglio di rifelezione è costituito da una serie di reti metalliche fissate su di un telaio tenuto in vibrazione per permettere la vagliatura degli aggregati.

Il bitume necessario alla produzione è avviato alla vasca di pesatura e in seguito una pompa lo preleva dalla vasca di pesatura e lo invia al mescolatore attraverso la barra di spruzzatura.

Passando alla fase successiva del ciclo produttivo l'impianto provvede alla pesatura dei tre elementi primari: aggregati, filler, bitume; essa avviene in tre diverse pesate attrezzate ciascuna con celle elettroniche.

Il ciclo di produzione prevede che gli inerti entrino per primi nel mescolatore, poi il bitume, eventuali additivi ed il filler.

Al termine della mescolazione, il conglomerato bituminoso è già pronto per la stesa, il mescolatore si apre e lo fa cadere nella benna di carico che lo trasporta nel silo di stoccaggio del prodotto finito.

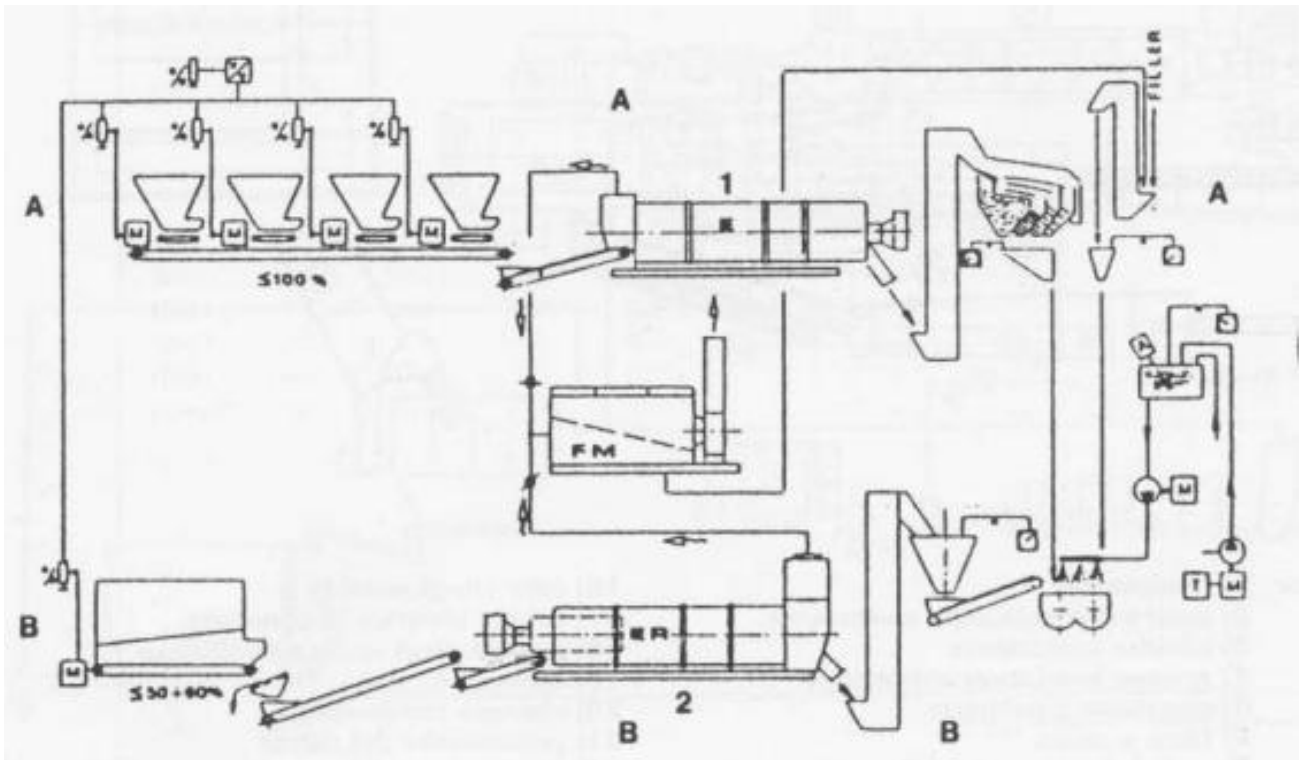


Foto 5: esempio schema impianto discontinuo
 Legenda: A) Percorso aggregati vergini
 B) Percorso materiali di recupero
 1) Cilindro essiccatore controcorrente aggregati vergini
 2) Cilindro essiccatore materiale di recupero

1.4 CONCETTO DI COESIONE E ADESIONE

1.4.1 Adesione

Dal punto di vista generale, l'adesione può essere definita come la forza molecolare di attrazione che si manifesta tra due corpi di diversa natura a contatto tra loro. Nel contesto dei conglomerati bituminosi il contatto è di tipo liquido (bitume) e solido (aggregati).

L'adesione dei leganti bituminosi coinvolge proprietà fisiche di differente origine. Infatti, l'adesione bitume-aggregati è influenzata dalle caratteristiche sia del bitume (materiale idrofobo) sia dell'aggregato utilizzato nella miscela (materiale tendenzialmente idrofilo), nonché dalle condizioni ambientali (umidità e temperatura), dalle caratteristiche superficiali della pavimentazione (rugosità, porosità e rivestimento) e dal traffico cui è soggetta.

La mescolazione di aggregati con del bitume comporta il rivestimento degli elementi lapidei da parte bitume, cioè gli aggregati sono "bagnati" dal legante. Infatti, il legante bituminoso ha la funzione di creare una pellicola superficiale attorno all'aggregato, al fine di ottenere una superficie idrofoba, ovvero impermeabile alle particelle d'acqua. Ogni qualvolta si ha la separazione dello strato di bitume dalla superficie lapidea, si ha l'interposizione dell'acqua e si ha la diretta diminuzione delle prestazioni del conglomerato bituminoso.

Uno dei principali meccanismi di innesco del degrado di una pavimentazione in conglomerato bituminoso è l'indebolimento o il distacco della pellicola di bitume adesa alla superficie dell'aggregato, detto stripping.

L'acqua rappresenta la principale causa dello stripping e quindi l'umidità influisce sulle microstrutture dei materiali, compromettendo così l'intero sistema.

L'acqua può ridurre la coesione del conglomerato andando ad infiltrarsi all'interfaccia con l'aggregato, rompendo così il legame adesivo ed asportando il bitume dall'aggregato stesso. In questi modi si viene a generare una dislocazione dell'aggregato.

Il fenomeno dello stripping può essere definito come la perdita di adesione causata dall'acqua con conseguente delaminazione del film di bitume dalla superficie dell'aggregato facente parte del conglomerato bituminoso. L'acqua può così infiltrarsi tra il film bituminoso e l'aggregato, rompere il legame di adesione che esiste tra i due e far sì che il conglomerato si 'spogli' dell'aggregato

I fattori che influenzano lo stripping sono:

- Caratteristiche chimico/fisiche dei materiali utilizzati (bitume e aggregati);

- Caratteristiche del conglomerato bituminoso, con particolare riferimento agli aggregati e al tipo di miscela prodotta (chiusa, drenante, SMA...);
 - Metodologia di produzione, a caldo (HMA), a tiepido (WMA), eventuale utilizzo di acqua (sali, zeoliti, sabbie umide...);
 - Condizioni di utilizzo della pavimentazione come quelle ambientali, i carichi...
- Nel momento in cui si ha la separazione della pellicola di bitume, per la pavimentazione inizia immediatamente il relativo deterioramento, con conseguente riduzione della vita utile.

Non potendo alterare la natura dell'aggregato costituente le miscele bituminose, l'unico elemento controllabile è il bitume, attraverso l'aggiunta di attivanti di adesione. Gli attivanti di adesione sono miscele chimiche contenenti particolari gruppi funzionali attivi che migliorano l'adesione del film di bitume sulla superficie degli aggregati. Miscelati con il legante, essi tendenzialmente agiscono attraverso l'abbassamento della tensione superficiale del bitume.

Gli aggregati calcarei hanno un comportamento basico, una maggiore affinità al bitume (idrofobi), sviluppano forti legami di tipo chimico, elevata adesione anche in presenza di acqua.

Gli aggregati silicei, invece, hanno un comportamento acido, maggiore affinità all'acqua, maggiormente soggetti a degrado, ovvero spogliamento, stripping.

Una misura indiretta della capacità del bitume di aderire all'aggregato viene eseguita valutando il **grado di spogliamento** di un campione di aggregato, totalmente ricoperto di bitume, a seguito di un predefinito processo di immersione in acqua e di ebollizione.

Il criterio di valutazione consiste nel misurare il grado di ricoprimento del bitume sull'aggregato attraverso il consumo di un reagente chimico (analisi quantitativa), che risulta essere proporzionale alla superficie non ricoperta dell'aggregato;

Il grado di spogliamento (stripping) viene espresso in termini di percentuale di superficie di aggregato non ricoperta di bitume:

$$\text{Stripping (\%)} = 100 - \text{covered surface (\%)}$$

1.4.2 Coesione

La coesione è un'altra proprietà del bitume che conferisce resistenza al conglomerato di appartenenza; rappresenta la capacità che il bitume ha, in termini di resistenza meccanica, di mantenere intatto il conglomerato bituminoso legando tra loro gli elementi che lo formano.

La coesione è una proprietà che si riferisce solo al tipo di legante utilizzato e non, come nel caso dell'adesione anche all'inerte e dipenderà dalle condizioni di opera del conglomerato bituminoso.

Le proprietà coesive di un legante bituminoso rivestono quindi un ruolo fondamentale nella resistenza a fatica di una pavimentazione stradale che è uno dei principali meccanismi di degrado.

Se andassimo ad analizzare da vicino carote estratte da pavimentazioni in cui si sono verificate rotture per fatica o provini sottoposti in laboratorio a prove di fatica, osserveremo che le fratture nel conglomerato avvengono principalmente nel volume del film di bitume.

Per simulare in laboratorio le rotture da fatica e il fenomeno dell'auto-riparazione di film sottili di bitume sotto carico ciclico, così come lo sono nella realtà all'interno del conglomerato bituminoso, è stato messo a punto il cosiddetto **“Local Fracture Test on Bitumen”**, nel quale una lente di bitume viene colata su due elementi convessi metallici, che simulano due aggregati ravvicinati, lasciata solidificare e sottoposta a sforzi ciclici di trazione mono assiale. Questa prova, pur essendo condotta in laboratorio, risulta essere estremamente rappresentativa di ciò che accade all'interno del conglomerato bituminoso in esercizio, in corrispondenza della zona di contatto tra due aggregati.

Un altro parametro che influenzala coesione è la temperatura; si è visto che temperature più basse tendono ad irrigidire il bitume favorendo la comparsa di cricche e fessure, invece a temperature più elevate avviene il contrario.

Infine, per quanto riguarda gli effetti della velocità di applicazione del carico, dalle prove è emerso che carichi ciclici con frequenze elevate acceleravano la comparsa dei fenomeni di rottura per fatica con conseguente perdita di coesione.

Per studiare gli effetti del fenomeno di autoriparazione, si sono eseguiti diversi test nei quali sono stati applicati un certo numero di cicli di carico allo stesso campione, intervallati da periodi di riposo durante i quali il provino veniva riportato nelle condizioni di partenza. Si è osservato come la capacità di auto-riparazione del bitume dipenda sostanzialmente dalla durata del periodo di riposo e della temperatura al quale esso avviene.

2 INDAGINE SPERIMENTALE

2.1 OBIETTIVI DELL'INDAGINE

In questo capitolo verrà descritta in maniera dettagliata la sperimentazione condotta presso il Laboratorio di Strade del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e dell'Architettura (DICEA) situato presso l'Università Politecnica delle Marche.

L'obiettivo di questa indagine è stato quello di valutare le proprietà adesive/coesive di sistemi bitume-aggregato. A tal proposito sono state eseguite delle prove che consentono di misurare la resistenza a trazione del legame tra bitume e un substrato solido, mediante l'applicazione di una forza di trazione crescente linearmente fino al raggiungimento della condizione di rottura (pull-off) su appositi pistoncini incollati al substrato attraverso un prefissato quantitativo di bitume pari a 0.08 grammi.

Per eseguire queste prove è stata utilizzata un'apparecchiatura chiamata PATTI, il quale è l'acronimo di Pneumatic Adhesion Tensile Testing Instrument.

In particolare, per quanto riguarda gli aggregati, è stato utilizzato il calcare, testato sia in condizione vergine, ovvero di primo impiego, sia in condizioni pre-bitumate, ovvero configurati in modo da simulare inerti provenienti dalla demolizione e riciclo di vecchie pavimentazioni stradali.

Per quanto riguarda il bitume, invece, sono stati utilizzati bitumi vergini, bitumi invecchiati con l'utilizzo del "Rolling Thin Film Oven Test", che consente di riprodurre l'invecchiamento a breve termine del bitume e bitumi miscelati con degli additivi.

2.2 MATERIALI

2.2.1 Aggregati

Gli aggregati utilizzati sono stati il calcare vergine e calcare pre-bitumato.

Il calcare è una roccia sedimentaria il cui componente principale è carbonato di calcio.

La sua composizione varia molto in funzione delle condizioni di formazione: spesso alla sua formazione partecipano organismi viventi, le cui tracce restano intrappolate nella struttura rocciosa, spesso presenta anche stratificazioni e affioramenti rocciosi più compatti.

Fra i numerosissimi utilizzi del calcare ricordiamo le costruzioni stradali, la produzione di calcestruzzo, nell'industria dell'acciaio, della chimica e del cemento.

Gli aggregati **vergini** tradizionali utilizzati sono costituiti da delle piccole lastre di calcare, dallo spessore di circa 1 cm, il quale viene estratto da cava in blocchi abbastanza regolari, non necessariamente segati in un successivo momento. Può essere spaccato su macchine manuali se si presenta come blocco informe oppure in macchine automatiche se è stato precedentemente segato. In funzione della sua composizione, può necessitare di forze e lame di spacco diverse per ottenere un prodotto finito di alta qualità.





Figura 6 e 7: lastra di aggregato di calcare

Gli aggregati calcarei **pre-bitumati** sono stati realizzati in laboratorio con lo scopo di ricreare il materiale proveniente da vecchie pavimentazioni stradali.

Questi aggregati sono stati ottenuti applicando uno strato omogeneo di bitume SR o VB, precedentemente riscaldati a 170° per un'ora, su una faccia delle lastre di calcare, anche queste precedentemente riscaldate a 170° per due ore.

Dopo aver steso il bitume su una delle due facce dell'aggregato, si è proceduto all'invecchiamento mettendoli in forno a 135° per 4 ore e poi a 85° per 3 giorni, in accordo con quanto previsto dalla normativa AASHTO Standard R30.

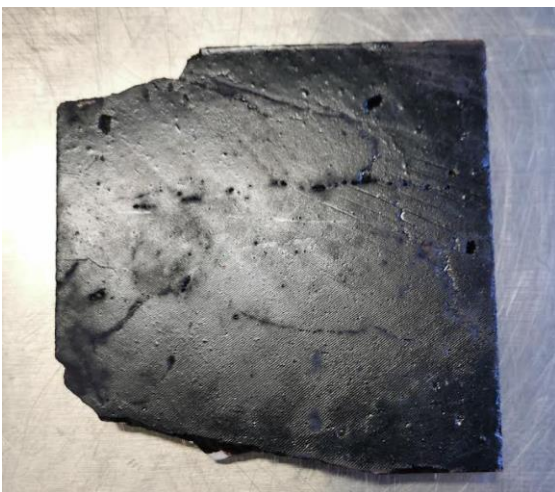


Figura 8 e 9: esempio di aggregato calcareo pre-bitumato

2.2.2 Bitume

Nell'indagine sperimentale in questione sono stati utilizzati bitumi artificiali tradizionali aventi classe di penetrazione a 25 °C del valore 50/70, ma ricavati da differenti processi di distillazione del petrolio greggio, del tipo **Primario** o **Straight-run (S)** e **Visbreaking (V)**.

I leganti bituminosi si dividono in bitumi tradizionali e in bitumi modificati. I bitumi tradizionali, detti anche di base o tal quali (TQ), sono classificati in funzione alla caratteristica di penetrazione a 25 °C. I bitumi modificati si ottengono aggiungendo al bitume tradizionale degli agenti modificanti, generalmente polimeri; i bitumi modificati si dividono a loro volta in soft (SF) o hard (HD).

I bitumi artificiali tradizionali del tipo *Primario* o *Straight-run* sono i più comuni e si ottengono dal processo di distillazione frazionata del petrolio greggio. Questo processo consiste appunto nel frazionare le varie componenti del greggio, ognuna avente un proprio punto di ebollizione differente, viene eseguito nelle torri di frazionamento degli impianti di raffinazione del petrolio. Nel dettaglio, si ha una prima fase di distillazione a pressione atmosferica del greggio riscaldato a 350 ÷ 400 °C e introdotto in una prima torre di frazionamento nella quale si separano le componenti più leggere a diverse altezze della torre aventi temperature che oscillano dai 400 °C fino ai 15 °C; successivamente, si procede con la seconda fase di distillazione in una seconda torre questa volta eseguita sottovuoto sul residuo della prima fase. Dal residuo della seconda fase eseguita nella seconda torre si ottiene il bitume primario per uso stradale costituito appunto dalle componenti più pesanti del greggio. In seguito, è possibile effettuare al residuo della seconda fase dei trattamenti aggiuntivi per ottenere dei prodotti differenti dal bitume primario.

Il termine *visbreaking* è dato dall'unione delle parole in lingua inglese viscosity e breaking, che significano riduzione della viscosità. Infatti, il visbreaking è un processo di raffineria di decomposizione termica, eseguito a una temperatura tra i 430 ÷ 485 °C, del residuo viscoso risultante dalla distillazione frazionata a pressione atmosferica o sottovuoto del petrolio greggio. Durante questo processo avviene una diminuzione delle dimensioni delle molecole più grandi del residuo di distillazione frazionata ottenendo, come risultato, una riduzione della sua viscosità e del suo quantitativo finale. Infatti, dal processo di visbreaking si ricava il residuo

in fase liquida e ulteriori prodotti più leggeri dalla generazione dei vapori derivanti dalle reazioni di cracking, questi sono: benzina, gasolio, naphtha e gas. Gli impianti di visbreaking si dividono in due tipologie: unità *coil visbreaking* e unità *soaker visbreaking*. Nel primo impianto le reazioni avvengono all'interno di tubi in un forno, nel secondo impianto all'interno di una camera di reazione.

Un aspetto da tenere in considerazione è la stabilità del residuo e il livello di severità del processo: aumentare la severità porta ad avere un residuo instabile con gli asfalteni che non sono più in dispersione colloidale grazie al potere dei malteni, ma sono attratti tra loro e flocculano. Perciò, aumentare troppo la severità del processo di visbreaking porta ad avere un residuo finale meno viscoso e più duro, ottenendo così un bitume di Visbreaking sempre più ossidato, ossidabile e più rigido già in partenza, con un comportamento molto dipendente dalla temperatura, di tipo viscoelastico tendente al fragile.

Nella seguente immagine vengono riportate le miscele di bitume utilizzate:

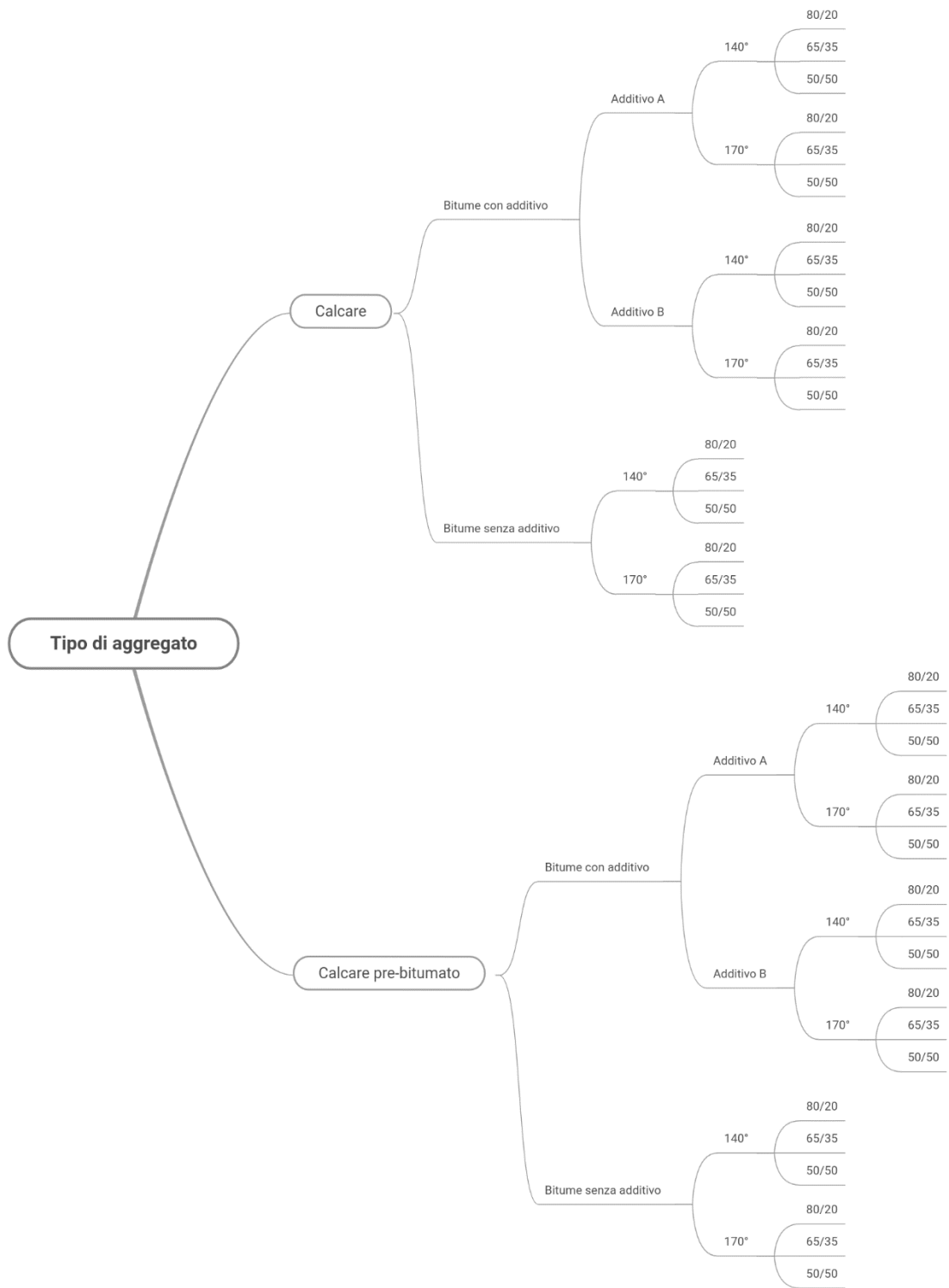


Figura 10: schema miscele di bitume utilizzate

2.2.3 Additivi

Per rigenerare il bitume invecchiato nel fresato vengono usati degli additivi detti, appunto, rigeneranti che permettono di ridurre la quantità di bitume vergine da dover utilizzare nel conglomerato bituminoso. Il bitume ossidato risulterà più rigido e fragile e riattivandosi tende a fondersi con quello vergine, influenzando negativamente il comportamento reologico della miscela.

Nel caso di questa indagine sperimentale sono stati utilizzati due tipi di additivi, denominati *additivo A* e *additivo B*.

2.2.3.1 Additivo A

L'additivo A è un additivo liquido, di colore bruno, polifunzionale a elevato potere rigenerante di nuova generazione, composto da una miscela di poliammine e oli vegetali, privo di oli aromatici tossici ed ha un basso impatto odorigeno. Risulta possedere le caratteristiche di antiossidante, plastificante, rigenerante, bagnante, diluente, disperdente e attivante di adesione per i bitumi.

Questo additivo presenta una densità apparente a 25° tra 0,8 e 0,1 g/cm³, una viscosità a 25° tra i 60 e 10cP, punto di infiammabilità maggiore di 150° e pour point maggiore a -5°.

L'applicazione dell'additivo avviene direttamente nel bitume vergine, nelle cisterne di stoccaggio o durante il ciclo produttivo mediante dosatori. Il dosaggio varia in funzione delle condizioni operative di lavoro e della percentuale di fresato impiegato, la scheda tecnica consiglia di impiegare una percentuale di additivo pari allo 0,20% ÷ 0,40% sul peso del fresato presente nel conglomerato bituminoso confezionato.

Nel lavoro sperimentale trattato in questa tesi, l'additivo liquido 'A' è impiegato nelle miscele e con le caratteristiche riportate nella sottostante Tabella 1.1:

	bitume[g]	additivo[g]
aged VB+A	30	2.7
aged SR+A	30	2.7
Modalità di applicazione	aggiunto nel bitume vergine allo stato liquido e poi miscelati insieme	

Le miscele di progetto realizzate vengono riportate nella seguente Tabella 1.2:

Bitume	Temperatura (°C)	Aggregato	Proporzione tra bitume vergine e invecchiato	Additivo
VB	140	Calcere	80/20	A
VB	140	Calcere	65/35	A
VB	140	Calcere	50/50	A
VB	140	RAP	80/20	A
VB	140	RAP	65/35	A
VB	140	RAP	50/50	A
VB	170	Calcere	80/20	A
VB	170	Calcere	65/35	A
VB	170	Calcere	50/50	A
VB	170	RAP	80/20	A
VB	170	RAP	65/35	A
VB	170	RAP	50/50	A
SR	140	Calcere	80/20	A
SR	140	Calcere	65/35	A
SR	140	Calcere	50/50	A
SR	140	RAP	80/20	A
SR	140	RAP	65/35	A
SR	140	RAP	50/50	A
SR	170	Calcere	80/20	A
SR	170	Calcere	65/35	A
SR	170	Calcere	50/50	A
SR	170	RAP	80/20	A
SR	170	RAP	65/35	A
SR	170	RAP	50/50	A

La procedura di applicazione dell'additivo, eseguita in laboratorio, viene esposta nel dettaglio nel paragrafo del programma sperimentale.

2.2.3.2 Additivo B

L' *additivo B* è un additivo liquido, limpido e brillante, di colore dal giallo all'ambra, in grado di incrementare la resistenza alle fessurazioni indotte da gradienti termici e da fenomeni di fatica, migliora la sensibilità all'acqua, riducendo la viscosità. Viene ottenuto dai processi produttivi delle industrie di carta, dalla lavorazione del legno di pino; infatti, contiene olii e resine. Un suo impiego permette, quindi, di aumentare il quantitativo di RAP nella miscela. L'additivo è solubile in qualsiasi tipo di bitume ed è compatibile con solventi aromatici, alcolici e con chetoni. Inoltre, è compatibile con altri additivi per miscelazione a caldo.

Questo additivo ha un punto di infiammabilità maggiore a 295°C, una viscosità dinamica a 25° pari a 71mPa.s, una viscosità cinematica a 40° tra i 40 e 46 mm²/s, un valore di acidità di massimo 15 mg KOH/g e una densità pari a 0,93 ton/m³.

Nel lavoro sperimentale trattato in questa tesi, l'additivo liquido 'A' è impiegato nelle miscele e con le caratteristiche riportate nella sottostante Tabella 1.3:

	bitume[g]	additivo[g]
aged VB+A	30	2.7
aged SR+A	30	2.7
Modalità di applicazione	aggiunto nel bitume vergine allo stato liquido e poi miscelati insieme	

Le miscele di progetto realizzate vengono riportate nella seguente Tabella 1.4:

Bitume	Temperatura (°C)	Aggregato	Proporzione tra bitume vergine e invecchiato	Additivo
VB	140	Calcere	80/20	B
VB	140	Calcere	65/35	B
VB	140	Calcere	50/50	B
VB	140	RAP	80/20	B
VB	140	RAP	65/35	B
VB	140	RAP	50/50	B
VB	170	Calcere	80/20	B
VB	170	Calcere	65/35	B
VB	170	Calcere	50/50	B
VB	170	RAP	80/20	B
VB	170	RAP	65/35	B

VB	170	RAP	50/50	B
SR	140	Calcare	80/20	B
SR	140	Calcare	65/35	B
SR	140	Calcare	50/50	B
SR	140	RAP	80/20	B
SR	140	RAP	65/35	B
SR	140	RAP	50/50	B
SR	170	Calcare	80/20	B
SR	170	Calcare	65/35	B
SR	170	Calcare	50/50	B
SR	170	RAP	80/20	B
SR	170	RAP	65/35	B
SR	170	RAP	50/50	B

La procedura di applicazione dell'additivo, eseguita in laboratorio, viene esposta nel dettaglio nel paragrafo del programma sperimentale.

2.3 PROGRAMMA SPERIMENTALE

Fase 1

Nella fase 1 si è proceduto all'invecchiamento del bitume tramite le apparecchiature Rolling e PAV.

La prova RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*), presentata dalla norma UNI EN 12607 – 1, per effetto combinato dell'azione dell'aria e del calore, simula la reazione del legante bituminoso durante la miscelazione in impianto durante la preparazione del conglomerato bituminoso. La norma sottolinea che la metodologia descritta non è applicabile ad alcuni leganti modificati oppure a quelli aventi una viscosità troppo elevata poiché queste caratteristiche non permettono la creazione del film, ma senza specificare cosa fare in questo caso.

Si basa sul principio che una pellicola di legante bituminoso in movimento venga riscaldata ad una determinata temperatura in stufa, per un determinato periodo di tempo, con un flusso costante di aria. Gli effetti del calore e dell'aria sono determinati in base alla variazione della massa (%), oppure come variazione delle caratteristiche del legante bituminoso, come la penetrazione, punto di rammollimento, calcolato con la prova palla – anello e la viscosità dinamica prima e dopo la permanenza in stufa.

L'apparecchiatura di prova è sostanzialmente composta da:

- **STUFA** a forma di parallelepipedo, con pareti doppie e riscaldato elettricamente. Le dimensioni interne, esclusa la camera di circolazione dell'aria, devono essere di 340 ± 15 mm in altezza, 405 ± 15 mm in larghezza e di profondità di 445 ± 15 mm. Lo sportello frontale deve avere una finestra centrale simmetrica di larghezza pari a 320 ± 15 mm ed un'altezza di 215 ± 15 mm, con due lastre di vetro resistenti al calore e separate da una intercapedine di aria e deve permettere una completa visuale dell'interno. La stufa deve essere ventilata con correnti di convezione di aria, per tale motivo deve presentare fori di ingresso per l'aria verso il basso della stufa posizionati in modo da consentire la circolazione dell'aria intorno agli elementi riscaldati, e la loro superficie totale aperta deve essere di $15 \text{ cm}^2 \pm 1 \text{ cm}^2$, e fori d'uscita per l'evacuazione dei gas caldi devono essere posizionati nella parte più alta della stufa e la loro superficie totale aperta deve essere di $10 \text{ cm}^2 \pm 1 \text{ cm}^2$.

La norma, oltre a queste ultime, prescrive ulteriori dimensioni standard che la macchina deve rispettare.

- **FLUSSIMETRO**, in grado di misurare un flusso di aria ad una portata di $4000 \text{ ml/min} \pm 200 \text{ ml/min}$ a temperatura e pressione ambiente;

- **TERMOMETRO**, a stelo, a dilatazione di solido (a mercurio). È possibile utilizzare termometri alternativi purché siano tarati in modo da leggere le stesse temperature di questo di riferimento, riconoscendo e tenendo conto delle variazioni termiche nei tempi di risposta rispetto ai termometri con mercurio.
- **CONTENITORI IN VETRO**, resistenti al calore, nei quali viene messo il campione di legante bituminoso sottoposto alla prova. Questi contenitori devono garantire le dimensioni normative.
- **BILANCIA**, precisa fino a ± 10 mg, leggibile con un arrotondamento fino al più prossimo 1 mg.

La prova RTFOT consiste nel sottoporre una quantità di bitume nota di $35 \pm 0,5$ g, all'interno contenitori in vetro (precedentemente pesati vuoti) posti orizzontalmente all'interno della stufa, avente un tamburo rotante che ruota ad una velocità di 15 ± 2 giri/min, preriscaldata almeno per un'ora alla temperatura di prova pari a $163 \pm 1^\circ\text{C}$, i campioni vengono sottoposti per 75 minuti continui ad un getto di aria controllato con portata di 4000 ml/min.



Figura 11 e 12: macchinario per la prova RTFOT

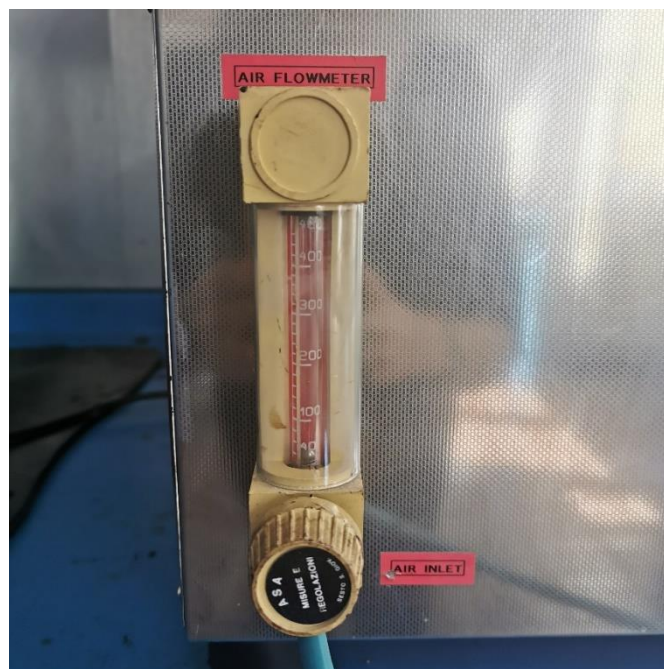


Figura 13: flussimetro

Invece tramite il **Pressure Aging Vessel test** (invecchiamento in serbatoio a pressione), si vuole simulare l'invecchiamento che il legante subisce nei primi 7-10 anni di vita della pavimentazione, vale a dire l'invecchiamento a lungo termine.

A questo scopo sono state create due apparecchiature per l'invecchiamento a pressione: il primo consiste in un serbatoio a pressione separato dalla camera di riscaldamento, mentre il secondo apparecchio raggruppa i due elementi in un'unica soluzione.

Il serbatoio può contenere al suo interno un cestello nel quale devono poter trovare posto almeno 10 campioni di legante, che vengono colati su degli speciali piatti. La pressione all'interno del serbatoio è ottenuta da un contenitore d'aria compressa e preventivamente deumidificata e purificata. Sulla sommità del serbatoio, sono presenti l'attacco per l'aria compressa e un trasduttore di temperatura che permette, tramite un indicatore digitale, il controllo continuo della temperatura durante il processo d'invecchiamento.

Come camera di riscaldamento si utilizza un forno a flusso forzato, che deve permettere un controllo della temperatura con uno scarto di 0,5° C.



Figura 14: apparecchiatura per PAV

Per prima cosa si è proceduto a riscaldare i due bitumi VB e SR in forno a 170°C per un'ora; quando il bitume si è sciolto, sono stati trasferiti 35 grammi del bitume VB negli appositi “bicchieri” per la prova rolling:



Figura 15: bicchieri per prova Rolling

Poi si è proceduto a inserire tutti gli otto bicchieri all'interno del supporto della macchina, all'interno della quale sono rimasti per 85 minuti.

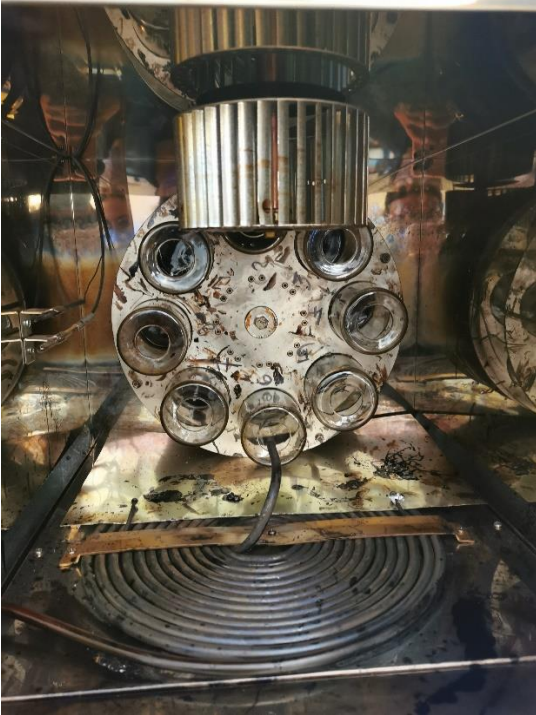


Figura 16 e 17: bicchieri collocati all'interno del supporto della macchina per la prova Rolling

Terminati gli 85 minuti, il bitume presente all'interno dei bicchieri è stato svuotato su dei piattini di acciaio fino a raggiungere 50 grammi di bitume per ciascun piattino:



Figura 18: momento in cui il bitume è stato trasferito sul piattino

In questo modo sono stati riempiti quattro piattini, ciascuno con 35 grammi di bitume VB, i quali sono stati collocati nell'apposito supporto per il macchinario PAV; successivamente è stata fatta la stessa procedura per il bitume SR e sono stati collocati i restanti piatti nel supporto:

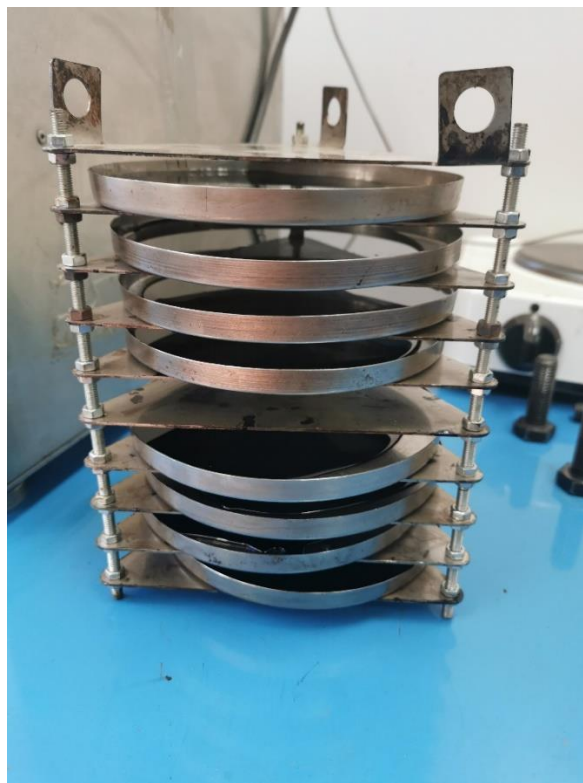


Figura 19: supporto per PAV con i piattini riempiti di bitume

Successivamente il supporto è stato inserito all'interno della macchina per il PAV, ad una pressione di 2,1 MPa e una temperatura di 100°C per 20 ore:



Figura 20: inserimento del supporto nel macchinario

Trascorse le 20 ore è stato estratto il supporto e si è ottenuto il bitume invecchiato, il quale presentava delle bolle:



Figura 21: bolle presenti nel bitume

Per eliminare queste bolle, il supporto con i piattini è stato collocato in forno a 170°C per mezz'ora.

Successivamente sono stati colati, separatamente, i bitumi invecchiati, VB e SR, all'interno di contenitori di alluminio:



Figura 22 e 23: contenitori in alluminio, detti muffin, dove sono stati versati i bitumi invecchiati

per poi aggiungere una certa quantità di additivo A o B di cui si è parlato precedentemente. La quantità di additivo è stato aggiunto in base alla Tabella 1.5 di seguito riportata:

	Bitume (g)	Additivo (g)
Aged VB+A	30	2,7
Aged VB+B	30	1,8
Aged SR+A	30	2,7
Aged SR+B	30	1,8

Una volta aggiunti gli additivi, sono state realizzate le miscele di cui si ha avuto bisogno, in base a delle percentuali previste dalla Tabella 1.6 di seguito riportata:

	Vergine (g)	Aged (g)
VB 80/20 NO	8	2
VB 80/20 A	8	2
VB 80/20 B	8	2
VB 65/35 NO	6,5	3,5
VB 65/35 A	6,5	3,5

VB 65/35 B	6,5	3,5
VB 50/50 NO	5	5
VB 50/50 A	5	5
VB 50/50 B	5	5
SR 80/20 NO	8	2
SR 80/20 A	8	2
SR 80/20 B	8	2
SR 65/35 NO	6,5	3,5
SR 65/35 A	6,5	3,5
SR 65/35 B	6,5	3,5
SR 50/50 NO	5	5
SR 50/50 A	5	5
SR 50/50 B	5	5

Ottenute le miscele, sono stati realizzati dei “filamenti” di bitume, come nella seguente foto:



Figura 24: filamenti di bitume

Fase 2

In questa fase si è provveduto alla preparazione dei provini necessari alla prova, in particolare all'invecchiamento delle piastrine di calcare e all'incollaggio dei supporti con il bitume sulle piastrine.

Per prima cosa sono stati messi gli aggregati di calcare in forno, per due ore, a 170° o 140°, in base alla miscela che si vuole testare, come riportato nella Tabella 1.4. Nel caso degli aggregati pre-bitumati, indipendentemente dal bitume utilizzato, il riscaldamento in forno è stato fatto sempre per due ore ma ad una temperatura inferiore pari a 60°C.

Queste piastrine devono rimanere in forno per due ore. Successivamente sono state prelevate, da dei filamenti precedentemente realizzati, delle “palline” di bitume del peso di 0.08 grammi pesate tramite una bilancia di precisione:



Figura 25: bilancia

Queste “palline” poi sono state poste sulla sommità dei *pull stub*, ovvero i supporti utilizzati in questa prova di cui se ne parlerà nel dettaglio successivamente.

Questi supporti sono stati posizionati con la testa verso l'alto su delle rastrelliere per evitarne il rovesciamento.



Figura 26: pull stub su supporto

In seguito le rastrelliere sono state poste in forno per trenta minuti alla temperatura prestabilita in modo da permettere al bitume di distendersi ed andare ad occupare tutta la superficie del pull stub.

Ciascun pull stub è costituito da un bordo che trattiene il bitume fluido evitando che fuoriesca dalla testa dello stesso



Figura 27: pull stub dopo essere stati in forno

Terminata l'operazione di riscaldamento degli aggregati e del bitume si è proceduto all'incollaggio dei pull stub sul supporto.

In questa fase i pull stub sono stati prelevati uno ad uno dalle rastrelliere mantenendoli in posizione verticale e portati in prossimità dell'aggregato caldo precedentemente estratto dal forno, quindi sono stati capovolti, e premuti contro la superficie dell'aggregato in modo da consentire al bitume in eccesso di fuoriuscire dalle aperture laterali.

Terminate le operazioni di incollaggio i provini confezionati sono stati lasciati raffreddare all'aria a temperatura ambiente per un'ora, in modo da permettere al bitume di sviluppare l'adesione con il supporto.



Figura 28 e 29: pull stub incollati sulle piastrine di calcare

Successivamente i provini ottenuti sono stati condizionati per 20 ore in camera climatica a 25°C.



Figura 30: pull stub in camera climatica a 25°

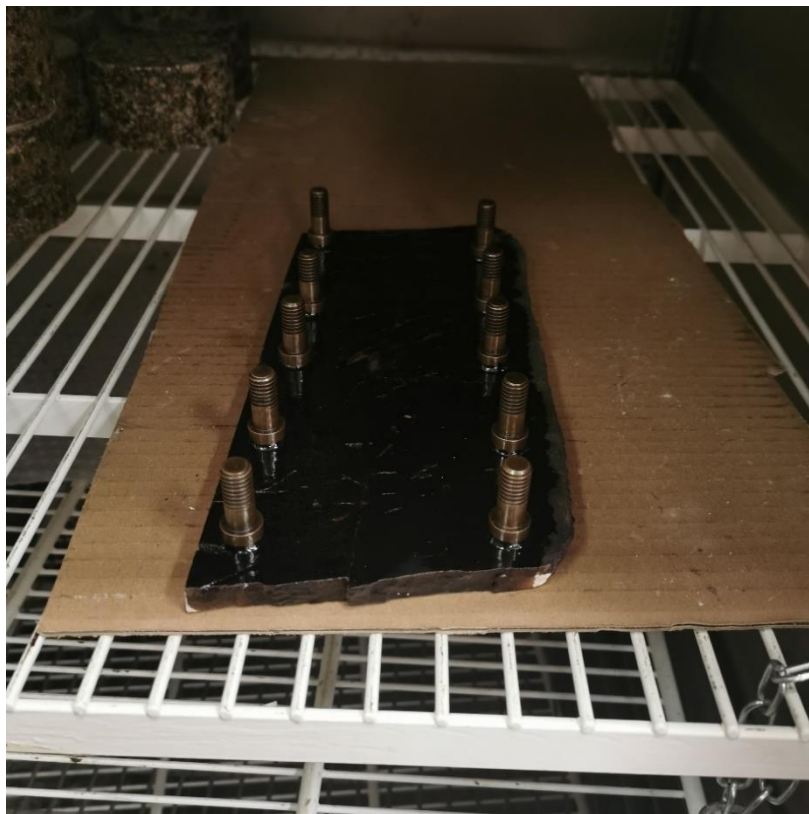


Figura 31: pull stub in camera climatica a 25°

Fase 3

In questa fase è stata eseguita la prova per la valutazione di adesione-coesione tramite lo strumento PATTI (Pneumatic Adhesion Tensile Testing Instrument), messo a punto dall'Istituto Nazionale degli Standards e delle Tecnologie americano NIST (National Institute of Standards and Technology).

Questo strumento consente di misurare la resistenza a trazione del legame tra bitume e un substrato solido, mediante l'applicazione di una forza di trazione crescente linearmente fino al raggiungimento della condizione di rottura (pull-off) su appositi pistoncini incollati al substrato attraverso un prefissato quantitativo di bitume pari a 0.08 grammi.

Inizialmente questo strumento veniva utilizzato per misurare l'adesione delle vernici ai supporti e successivamente è stato modificato da Youtcheff nel 1997, per valutare la perdita di adesione dei sistemi aggregato-bitume esposti all'azione dell'acqua.

La prima modifica del PATTI, eseguita da Youtcheff, consiste nella creazione di un determinato spessore tra aggregato e pistoncino, poiché nel testare i bitumi, a differenza delle vernici per le quali è sufficiente un sottile film nell'ordine di micron, è necessaria la formazione di un film di decimillimetri e quindi più elevato in modo da riprodurre le condizioni reali che si hanno all'interno di un conglomerato bituminoso.

Pertanto, i pistoncini vennero leggermente modificati mediante l'aggiunta di due blocchetti di metallo con dimensione 0,25 x 0,25 x 0,5 pollici interposti tra aggregato e pistoncino in modo da garantire che tra la superficie del pistoncino e quella dell'aggregato si venisse a localizzare uno spessore di bitume idoneo.

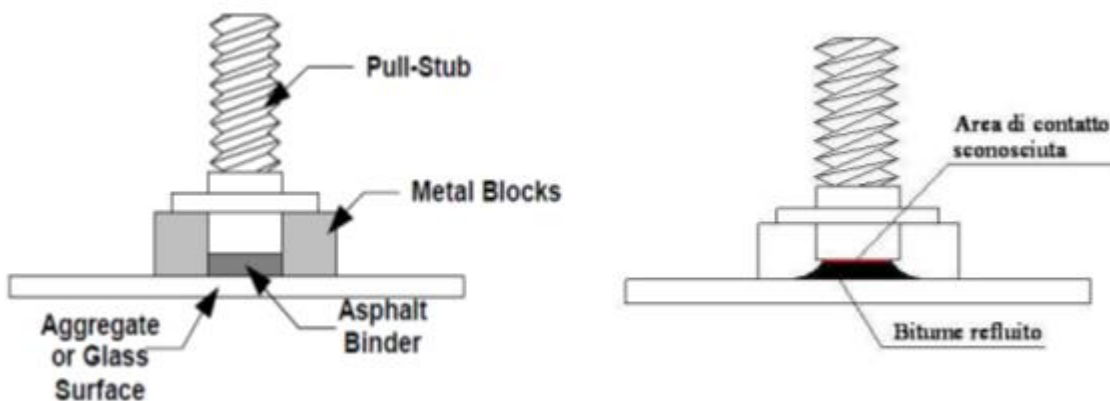


Figura 32: schema pull stub

Dopo questa modifica però, si è notato che le prove eseguite, producevano dati non ripetibili per le difficoltà di controllo delle variabili di prova poiché parte del bitume non confinato refluvia lateralmente, riducendo così l'area di contatto con il pistoncino, quindi, la forza di trazione che si leggeva dal modulo di controllo, si riferiva alla superficie di contatto di area sconosciuta.

Per questo motivo è stato realizzato un nuovo tipo di pistoncino dotato sul perimetro di un bordo munito di una serie di scanalature che avevano lo scopo di contenere il bitume applicato permettendo allo stesso tempo di far refluire quello in eccesso.

In questo modo su tutti i provini si riusciva ad ottenere la stessa quantità di bitume disposta sulla medesima area di contatto e quindi i risultati non dipendevano più da questa variabile

Le dimensioni dei nuovi pistoncini sono:

Diametro interno 0,5 pollici = 127 mm.

Diametro esterno = 137 mm.

Profondità (spessore bitume) = 3 mm.

Larghezza bordo = 0,5 mm



Figura 33 e 34: pull stub visto dall'alto e di lato

L'apparecchiatura di prova è costituita da un'unità di controllo digitale alimentata mediante aria compressa (massimo 200 psi) tramite un tubo flessibile giallo munito di

attacco rapido e da un pistone collegato all'unità di controllo tramite un tubo flessibile di colore azzurro.

Il pistone a sua volta è costituito da una sede cilindrica a cui si collega il tubo in entrata di colore azzurro e all'interno della quale scorre una guarnizione di colore azzurro.

Per effetto dell'applicazione dell'aria compressa tramite il tubo di colore azzurro la guarnizione tende a salire verso l'alto ma questo movimento viene impedito dal piatto di reazione posto in sommità a cui, tramite un foro filettato situato nel centro, si avvita il pistoncino (pull stub) che risulta incollato al supporto da testare.

In questo modo, quando il pistone entra in pressione, il piatto di reazione tira il Pull stub verso l'alto e, incrementando progressivamente la pressione applicata, si riesce a raggiungere la rottura del sistema con conseguente distacco del pistoncino dal supporto.

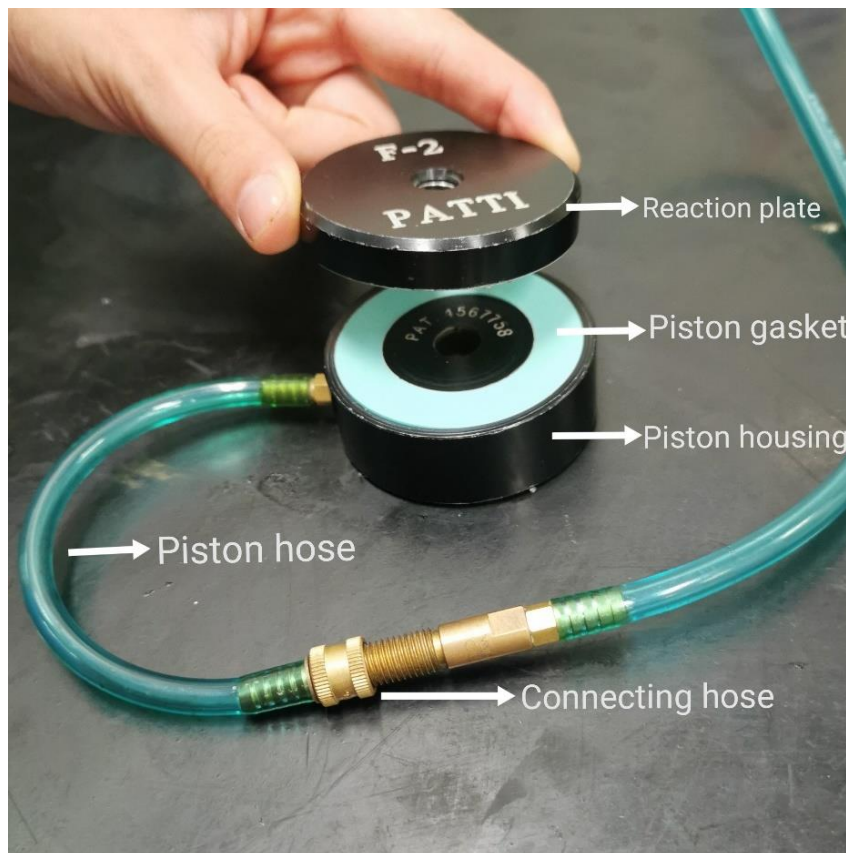


Figura 35: parte dell'apparecchiatura PATTI

Attraverso il modulo di controllo è possibile misurare in tempo reale il valore della pressione applicata BP (burst pressure) in psi, inoltre, lo strumento è in grado di registrare il valore minimo e massimo di pressione raggiunti durante la prova.

Nota il valore massimo di BP misurato durante la prova si passa al valore del POTS (Pull-off Tensile Strength) tramite la seguente relazione riportata nella normativa AASHTO TP-91-13:

$$\text{POTS} = ((B_P * A_g) - C) / A_{PS}$$

dove:

POTS (Pull-Off Tensile Strength) = Forza di trazione del tiraggio (psi);

BP (Burst Pressure) = Pressione di rottura (psi);

A_g = Area di contatto tra guarnizione e piatto di reazione = 1,914 pollici² per pistone F-2;

C = Costante del pistone = 0,180 +/- 1,5% per pistone F-2;

A_{ps} = Area del pistoncino = 0,1963 pollici².

Successivamente si passa dal valore del POTS in psi a quello in kPa moltiplicando per il fattore di conversione.

$$\text{POTS[kPa]} = \text{POTS[psi]} * 6.8947573$$

La prova prevede anche che venga condotta un'analisi di tipo visivo della superficie di rottura in modo da stabilire se questa è di tipo coesivo, adesivo o intermedia tra le due.

In particolare:

- Sono *rotture coesive* quelle in cui la superficie di rottura viene a localizzarsi all'interno dello strato di bitume compreso tra la superficie dell'aggregato e la superficie del pistoncino senza che si verificano distacchi da entrambe le interfacce.
- *rotture adesive* quelle in cui la superficie di rottura viene a localizzarsi in corrispondenza di quella dell'aggregato con conseguente distacco dal supporto.
- "*rottura coesiva/adesiva o ibrida*" quelle mista tra le due precedenti:



Figura 36: rottura adesiva



Figura 37: rottura coesiva



Figura 38: rottura adesiva-coesiva

Qualora ci siano superfici di rottura con forti distacchi del bitume dal pistoncino, bisogna scartare la misura perché in questo modo si valuterebbe la forza di adesione del legante al pistoncino. Solitamente questo tipo di problematiche si riscontrano quando sul pistoncino sono presenti residui di solventi o altre sostanze utilizzate per la pulizia o in caso di errori dell'operatore durante il confezionamento del provino.



Figura 39: distacco del bitume

Di seguito viene riportata un'immagine illustrativa di cosa è composta l'apparecchiatura PATTI:

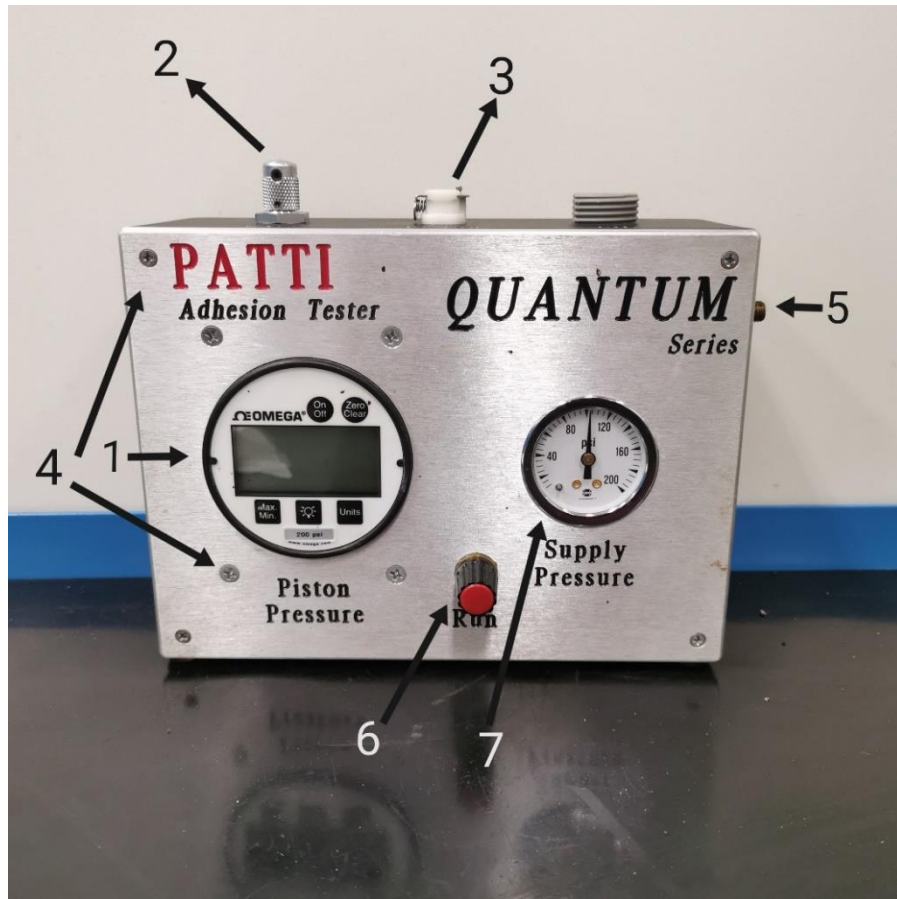


Figura 40: apparecchiatura PATTI

Dove:

1. Manometro con display digitale
2. Valvola RATE
3. Connettore di uscita al pistone
4. Viti piastra frontale per l'accesso alla sede della batteria
5. Valvola di ingresso aria compressa (max 200 psi)
6. Bottone RUN
7. Manometro di alimentazione

Per l'esecuzione della prova per prima cosa si inserisce il tubo di alimentazione dell'apparecchiatura (PATTI QUANTUM) nella valvola alloggiata sul fianco destro indicata con il punto 5 nella figura precedente, dopodiché si collega il tubo all'impianto dell'aria compressa.

Si accende lo strumento premendo il tasto ON-OFF collocato in prossimità del display digitale. Tramite il regolatore di pressione indicato con il punto 2 in figura è possibile scegliere la velocità di incremento della pressione durante la prova che nel nostro caso è stata fissata a 2 psi al secondo e lasciata costante per tutte le prove.

Si va a collocare il corpo del pistone sul pull stub da testare quindi si va ad avvitare il piatto di reazione portandolo a contatto con la guarnizione blu.

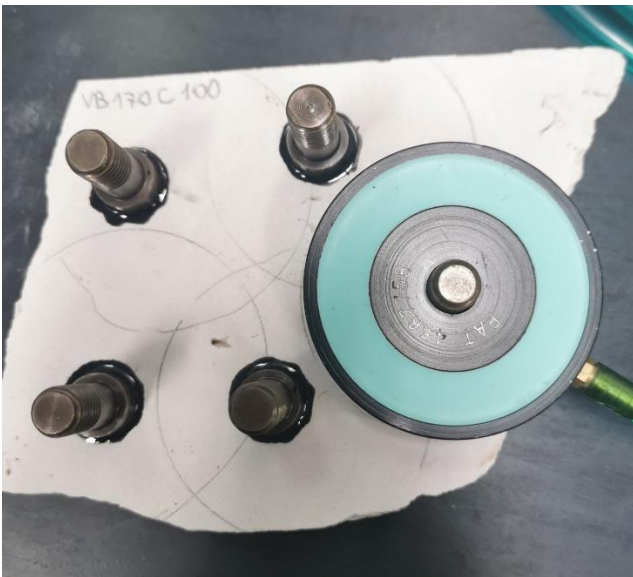


Figura 41 e 42: posizionamento corpo del pistone su pull stub e piatto al pistone

In questa fase è molto importante non serrare troppo il piatto per evitare di precaricare il provino e quindi alterare i risultati della prova. Si inserisce il tubo di alimentazione del pistone (di colore blu) al connettore di uscita 3 indicato nella figura. Se il connettore è correttamente inserito si sente un “clic” provenire dalla valvola.

Si richiamano sul display gli ultimi valori di pressione massima e minima misurati agendo sul pulsante Max Min e li si azzerà premendo il tasto zero clear.

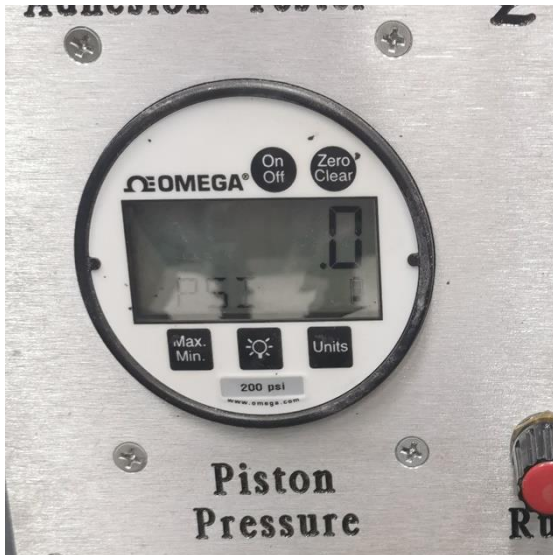


Figura 43 e 44: azzeramento PSI e MAX

Si dà inizio alla prova e mentre con una mano si tiene premuto il tasto run sullo strumento con l'altra si preme la base del corpo del cilindro sull'aggregato avendo cura di non interferire con il piatto di reazione per evitare di falsare le misure.

Non appena si sente un rumore sordo provenire dal pistone, che sta ad indicare che il pull stub si è staccato dal' aggregato, si lascia il pulsante Run e si interrompe la prova.

Quindi agendo nuovamente sul tasto Max e Min si va a leggere il valore di pressione massima raggiunta dal provino. Infine, si scollega il tubo di alimentazione del pistone si fa rientrare la guarnizione blu all'interno della sua sede spingendo sul piatto di reazione, si svita lo stesso dal pull stub e si va ad osservare il tipo di rottura ottenuta che potrà essere coesiva adesiva o ibrida tra le due.

Le immagini riportate di seguito mostrano la sequenza delle operazioni da compiere nella rottura di un provino:

1



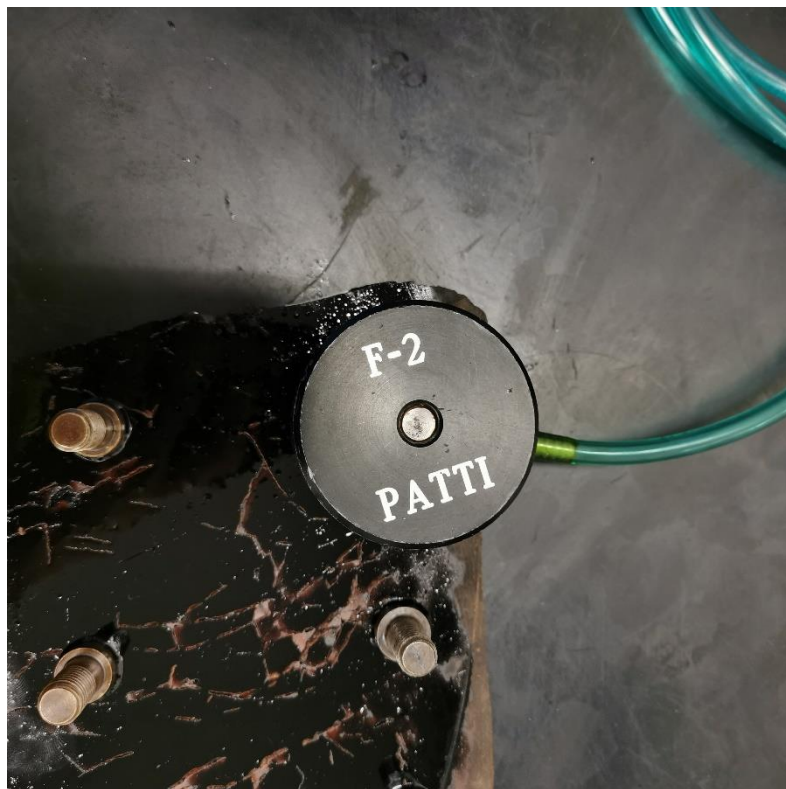
2



3



4

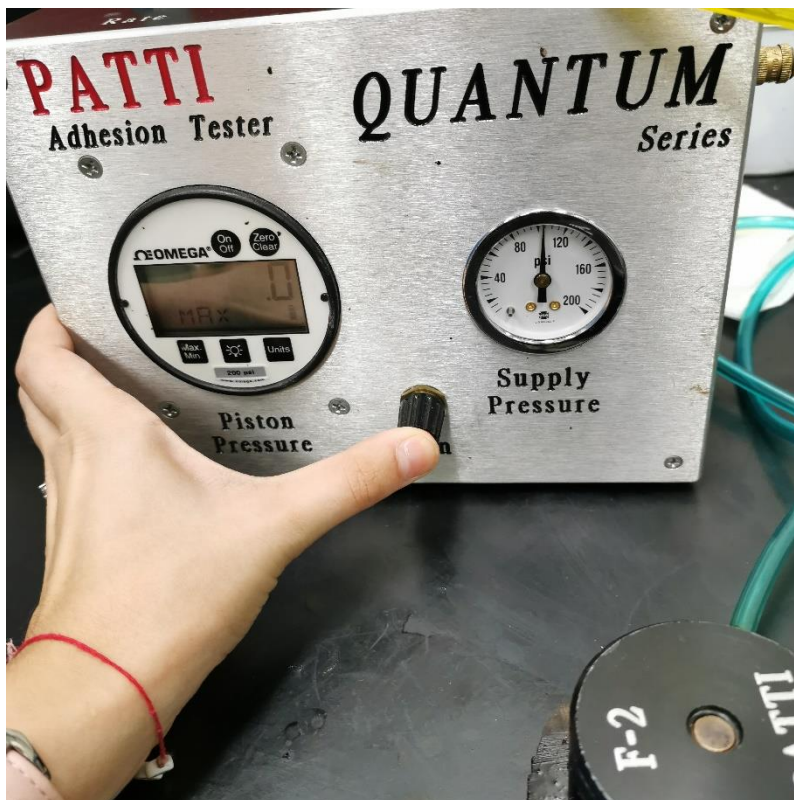


59

5



6



60



3 RISULTATI

In questo capitolo sono riportati ed elaborati i risultati sperimentali ottenuti dalle prove in laboratorio, con l'obiettivo di valutare l'influenza delle variabili in gioco.

La rappresentazione dei dati sarà sia di tipo tabulare che grafica attraverso l'utilizzo di istogrammi in cui:

- in ascisse verranno indicati i vari tipi di aggregato e bitume utilizzato con specificata la temperatura
- in ordinate saranno riportati i valori medi di adesione.

Le variabili che verranno prese in considerazione sono:

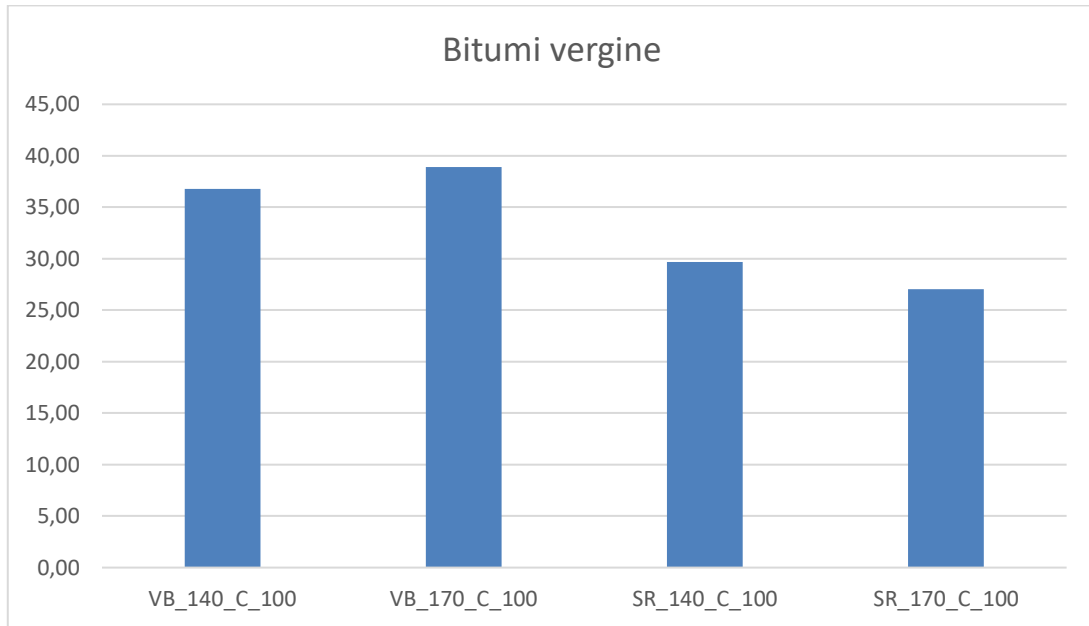
1. Tipo di aggregato:
 - Aggregati calcarei
 - Aggregati pre-bitumati RAP.
2. Tipo di bitume:
 - bitume vergine
 - bitume 80/20
 - bitume invecchiato 65/35
 - bitume invecchiato 50/50
 - bitume invecchiato con additivo A
 - bitume invecchiato con additivo B
3. Temperatura
 - 140°
 - 170°

I risultati ottenuti dalle prove eseguite, tenendo conto di tutte le variabili, vengono riportati nella tabella seguente:

Bitume	Temperatura	Aggregato	Proporzione	Additivo	Per piastrina					Media
					Pull stub 1	Pull stub 2	Pull stub 3	Pull stub 4	Pull stub 5	
VB	140	Calcare	100/0	No	35,2	34,1	37,1	36,0	41,4	36,76
VB	140	Calcare	80/20	No	38,4	51,4	55,4	53,6	62,0	52,16
VB	140	Calcare	80/20	A	43,8	43,8	40,9	41,6	*	42,53
VB	140	Calcare	80/20	B	44,9	43,9	51,8	48,3	43,3	46,44
VB	140	Calcare	65/35	No	60,4	64,6	57,4	54,6	50,7	57,54
VB	140	Calcare	65/35	A	33,8	32,0	37,5	42,8	34,1	36,04
VB	140	Calcare	65/35	B	35,7	41,2	37,8	41,2	37,0	38,58
VB	140	Calcare	50/50	No	*	47,7	45,2	52,4	38,0	45,20
VB	140	Calcare	50/50	A	26,7	27,9	29,7	31,3	30,1	29,14
VB	140	Calcare	50/50	B	38,8	43,2	40,7	39,1	37,5	39,86
VB	140	RAP	80/20	No	57,9	62,3	60,2	57,6	50,9	57,78
VB	140	RAP	80/20	A	44,0	45,8	44,8	*	41,2	43,95
VB	140	RAP	80/20	B	48,4	30,7	42,3	44,6	51,8	43,56
VB	140	RAP	65/35	No	69,2	62,9	*	55,0	62,2	62,32
VB	140	RAP	65/35	A	35,7	*	38,2	40,1	*	38
VB	140	RAP	65/35	B	42,9	43,1	41,7	44,5	41,9	42,82
VB	140	RAP	50/50	No	*	55,9	68,3	49,9	45,8	54,98
VB	140	RAP	50/50	A	33,5	30,5	27,5	34,4	30,3	31,24
VB	140	RAP	50/50	B	37,2	40,7	37,3	38,1	37,7	38,20
VB	170	Calcare	100/0	No	35,0	35,5	39,4	43,9	40,8	38,92
VB	170	Calcare	80/20	No	54,2	48,6	40,4	45,4	54,9	48,70
VB	170	Calcare	80/20	A	47,9	53,4	*	54,4	43,4	49,78
VB	170	Calcare	80/20	B	57,3	45,4	43,4	52,1	49,3	49,50
VB	170	Calcare	65/35	No	57,5	65,2	61,9	45,8	50,5	56,18
VB	170	Calcare	65/35	A	35,5	39,9	47,9	43,0	42,1	41,68
VB	170	Calcare	65/35	B	34,1	22,4	*	36,9	41,0	33,60
VB	170	Calcare	50/50	No	39,0	76,3	48,6	69,6	60,4	58,78
VB	170	Calcare	50/50	A	22,4	20,2	23,2	20,7	19,3	21,16
VB	170	Calcare	50/50	B	34,0	33,7	38,1	33,4	42,0	36,24
VB	170	RAP	80/20	No	61,4	62,1	64,0	63,2	58,2	61,78
VB	170	RAP	80/20	A	44,5	43,3	45,1	51,2	47,7	46,36
VB	170	RAP	80/20	B	37,9	44,6	39,9	44,3	43,0	41,94
VB	170	RAP	65/35	No	63,3	55,3	59,5	49,8	59,3	57,44
VB	170	RAP	65/35	A	48,6	43,6	45,6	43,2	46,0	45,40
VB	170	RAP	65/35	B	73,7	60,1	64,9	52,9	68,4	64,00
VB	170	RAP	50/50	No	38,1	44,0	41,6	33,4	36,7	38,76
VB	170	RAP	50/50	A	44,5	38,8	33,7		32,6	37,40
VB	170	RAP	50/50	B	37	44,8	41,5	40,4	41,2	40,98
SR	140	Calcare	100/0	No	26,8	34,2	26,5	28,8	32,2	29,70
SR	140	Calcare	80/20	No	42,9	42,9	39,3	40,1	38,1	40,66

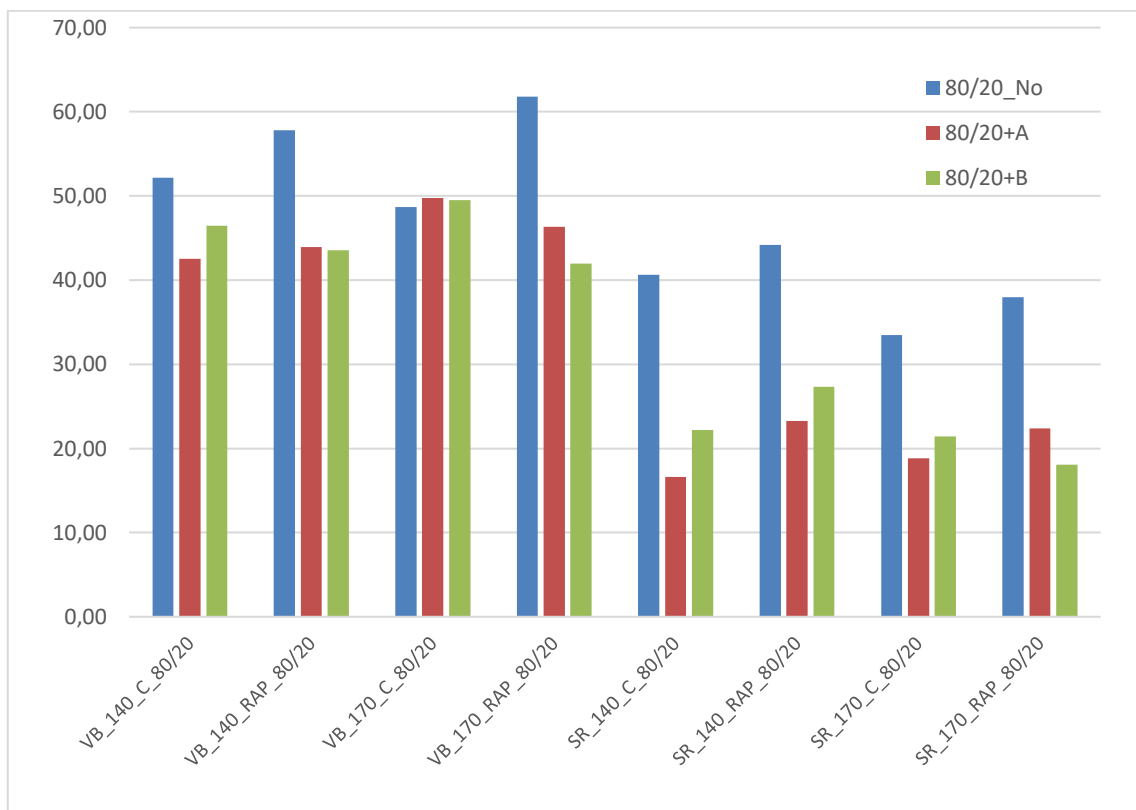
Bitume	Temperatura	Aggregato	Proporzione	Additivo	Pull stub 1	Pull stub 2	Pull stub 3	Pull stub 4	Pull stub 5	Media
SR	140	Calcare	80/20	A	14,9	17,4	18,7	16,9	15,3	16,64
SR	140	Calcare	80/20	B	23	23,8	23,2	19,3	21,8	22,22
SR	140	Calcare	65/35	No	47,2	48,8	46,9	49,3	41,1	46,66
SR	140	Calcare	65/35	A	18,7	14,5	17,9	14,1	19,2	16,88
SR	140	Calcare	65/35	B	51	51,2	48,5	50,9	44	49,12
SR	140	Calcare	50/50	No	29,5	26,6	26,5	28,8	27,9	27,86
SR	140	Calcare	50/50	A	14,2	12,8	16,1	17,8	16,3	15,44
SR	140	Calcare	50/50	B	*	32,5	26,1	31,8	28,8	29,8
SR	140	RAP	80/20	No	46,3	35	47,3	49,3	42,9	44,16
SR	140	RAP	80/20	A	26,3	24,1	25,5	23,2	17,2	23,26
SR	140	RAP	80/20	B	35,1	30,9	22,5	23,4	24,8	27,34
SR	140	RAP	65/35	No	52,6	46,3	42,7	39,6	45,6	45,36
SR	140	RAP	65/35	A	31,3	22,6	29,6	32,6	18,8	26,98
SR	140	RAP	65/35	B	28,5	17,8	25,7	*	22,8	23,70
SR	140	RAP	50/50	No	55	53,1	48,9	45,4	45,6	49,60
SR	140	RAP	50/50	A	18,9	19,8		21,3	21,7	20,43
SR	140	RAP	50/50	B	29,5	30,5	26,6	32	28,7	29,46
SR	170	Calcare	100/0	No	25,5	26,5	27,6	26,7	29	27,06
SR	170	Calcare	80/20	No	37,5	33,7	23,5	38,3	34,5	33,50
SR	170	Calcare	80/20	A	20,3	18,3	20,4	20,3	14,7	18,80
SR	170	Calcare	80/20	B	21,7	24,3	18,7	23,6	18,8	21,42
SR	170	Calcare	65/35	No	50,7	48,9	47	34,8	40,4	44,36
SR	170	Calcare	65/35	A	12,2	15,7	14,9	11,9	9,3	12,80
SR	170	Calcare	65/35	B	32,8	32	35	30,4	36,2	33,28
SR	170	Calcare	50/50	No	57,9	64,8	42,2	49,3	*	53,55
SR	170	Calcare	50/50	A	27,9	24,2	23,3	21,7	25,9	24,60
SR	170	Calcare	50/50	B	32,4	20,7	30,7	30,7	25,3	27,96
SR	170	RAP	80/20	No	38,9	38,4	34,4	40,1	37,9	37,94
SR	170	RAP	80/20	A	19,9	21	23	26,6	21,4	22,38
SR	170	RAP	80/20	B	12,6	18,3	14,4	23	22,1	18,08
SR	170	RAP	65/35	No	48,1	46,7	49,8	39,9	48	46,50
SR	170	RAP	65/35	A	15,2	20,4	16,4	17	19,3	17,66
SR	170	RAP	65/35	B	29,4	29,8	30,4	30,9	26,5	29,40
SR	170	RAP	50/50	No	44,5	40,8	45	47,4	45,4	44,62
SR	170	RAP	50/50	A	14,1	13,7	17,4	16,6	16,6	15,68
SR	170	RAP	50/50	B	25,6	28,2	25,8	27,1	31,1	27,56

Nei grafici riportati di seguito sono presentati sottoforma di istogrammi i dati riassunti nelle tabelle precedenti:



Si può osservare come il bitume vergine VB abbia una maggiore adesione all'aggregato vergine ad entrambe le temperature di prova. Con tale bitume l'adesione sembra aumentare con l'aumentare della temperatura di incollaggio, mentre con il bitume SR l'andamento sembrerebbe essere opposto.

In questo istogramma, vengono riportati i risultati dei bitumi VB ed SR, entrambi 80/20, con e senza additivo, ad una temperatura sia di 140 che 170 gradi, nel caso di aggregato calcareo e pre-bitumato:

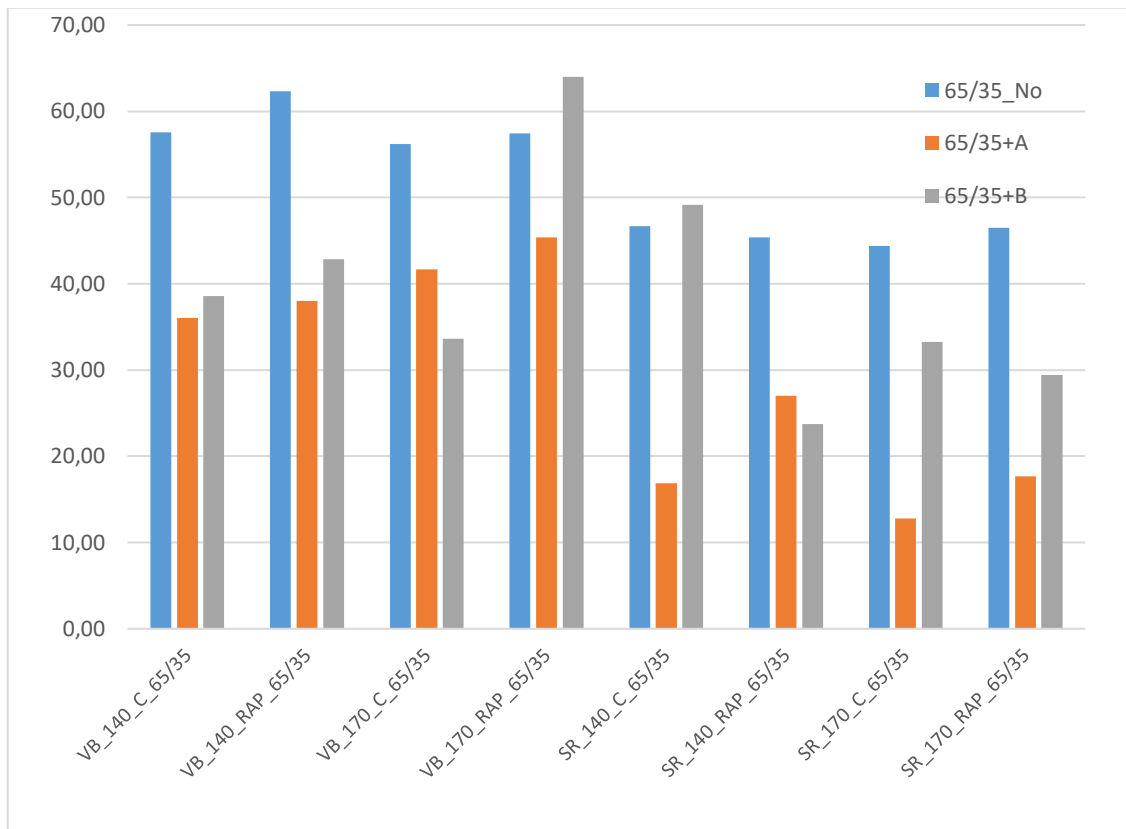


Si può notare, anche qui, come i bitumi VB abbiano una maggiore adesione rispetto ai bitumi SR in tutte le condizioni; inoltre, per tutte le condizioni di incollaggio, le miscele senza additivo hanno riportato una adesione maggiore rispetto a quelle miscelate con additivo.

Laddove non è stato inserito alcun additivo, l'aggregato pre-bitumato ha ottenuto sempre proprietà adesive migliori di quelle dell'aggregato calcareo. La presenza di additivo sembra annullare tale effetto.

Nel caso dei bitumi VB non si nota una grande differenza di adesione tra gli additivi; invece, questa differenza può essere notata nei bitumi SR, i quali presentano una minore adesione nel caso in cui è stato aggiunto l'additivo A.

In questo istogramma, vengono riportati i risultati dei bitumi VB ed SR, entrambi 65/35, con e senza additivo, ad una temperatura sia di 140 che 170 gradi, nel caso di aggregato calcareo e pre-bitumato:



Si può notare, anche qui, come i bitumi VB abbiano una maggiore adesione rispetto ai bitumi SR in tutte le condizioni; inoltre, per tutte le condizioni di incollaggio, le miscele senza additivo hanno riportato una adesione maggiore rispetto a quelle miscelate con additivo.

Laddove non è stato inserito alcun additivo, l'aggregato pre-bitumato ha ottenuto sempre proprietà adesive leggermente migliori di quelle dell'aggregato calcareo. Tale differenza però è meno marcata rispetto alle miscele 80/20.

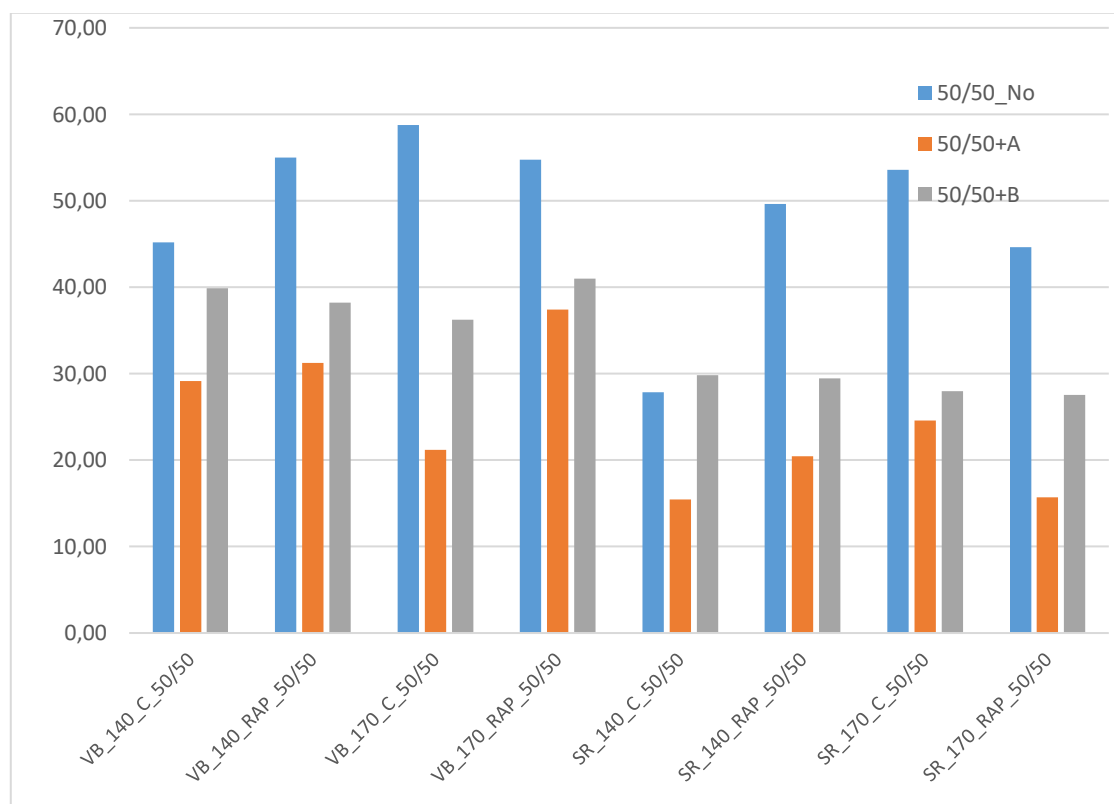
Si può osservare come il bitume VB con additivo B, invecchiato ad una temperatura di 170°, risulti quello con adesione migliore con l'aggregato pre-bitumato, molto più alta rispetto agli altri bitumi con additivo B. Anche qui, il bitume senza additivo risulta avere un'adesione maggiore rispetto a quelli con additivo, eccetto nel caso del

bitume precedentemente nominato. Molto bassa risulta essere l'adesione dei bitumi SR 65/35 con additivo A.

Per i bitumi VB miscelati con additivo A, l'adesione risulta migliore nel caso di invecchiamento ad una temperatura di 170°; invece per quelli miscelati con additivo B, risulta più alta ad una temperatura di 140°, eccetto nel caso del RAP a 170°.

Per i bitumi SR miscelati con additivo A, l'adesione risulta migliore nel caso di una temperatura di 140°; invece per quelli miscelati con additivo B risulta migliore ad una temperatura di 170°, eccetto per il bitume SR a 140° con il calcare.

In questo istogramma, vengono riportati i risultati dei bitumi VB ed SR, entrambi 50/50, con e senza additivo, ad una temperatura sia di 140 che 170 gradi, nel caso di aggregato calcareo e pre-bitumato:



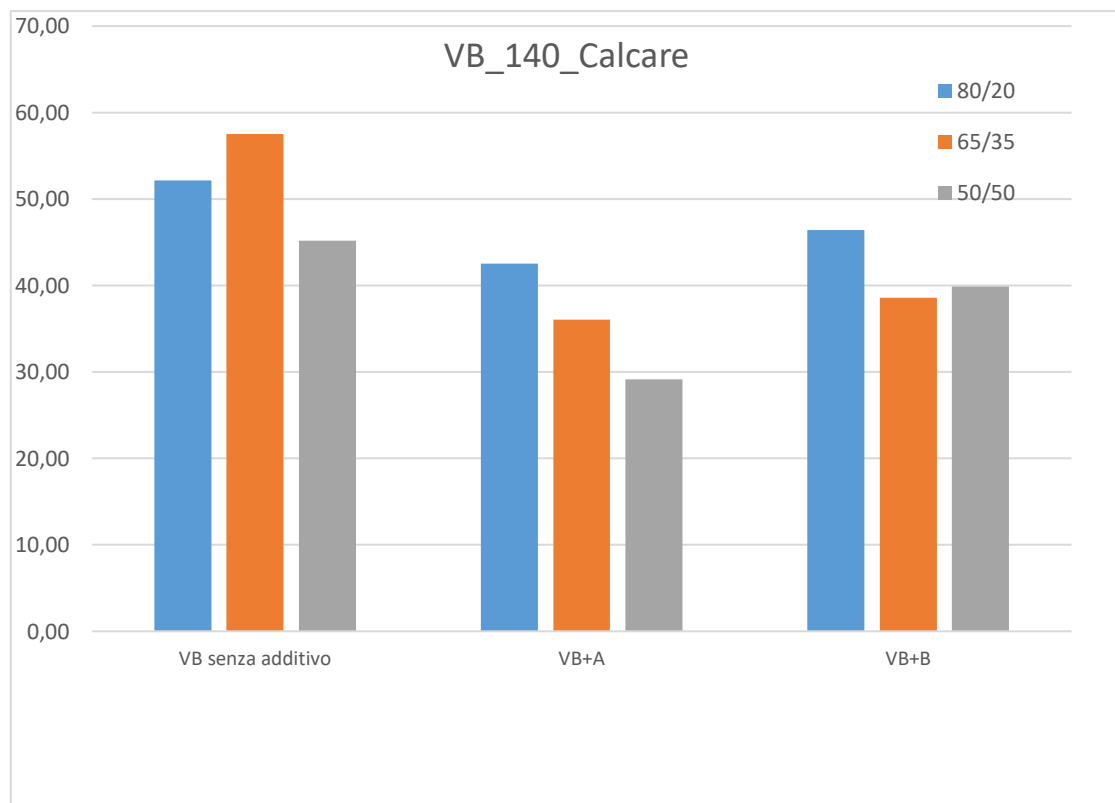
Si può notare, anche qui, come i bitumi VB abbiano una maggiore adesione rispetto ai bitumi SR in tutte le condizioni; inoltre, per tutte le condizioni di incollaggio, le

miscele senza additivo hanno riportato una adesione maggiore rispetto a quelle miscelati con additivo.

Dove non è presente alcun additivo, l'adesione cresce con l'utilizzo dell'aggregato pre-bitumato a 140°C mentre cala quando la temperatura di incollaggio è fissata a 170°C. Non si riscontrano particolari andamenti quando sono stati inseriti gli additivi.

Per entrambi i tipi di bitumi, l'additivo B presenta un'adesione sempre superiore rispetto all'additivo A.

In questo istogramma, vengono riportati i risultati dell'adesione dei bitumi VB, con o senza additivo, ad una temperatura di 140°, con l'aggregato calcareo:

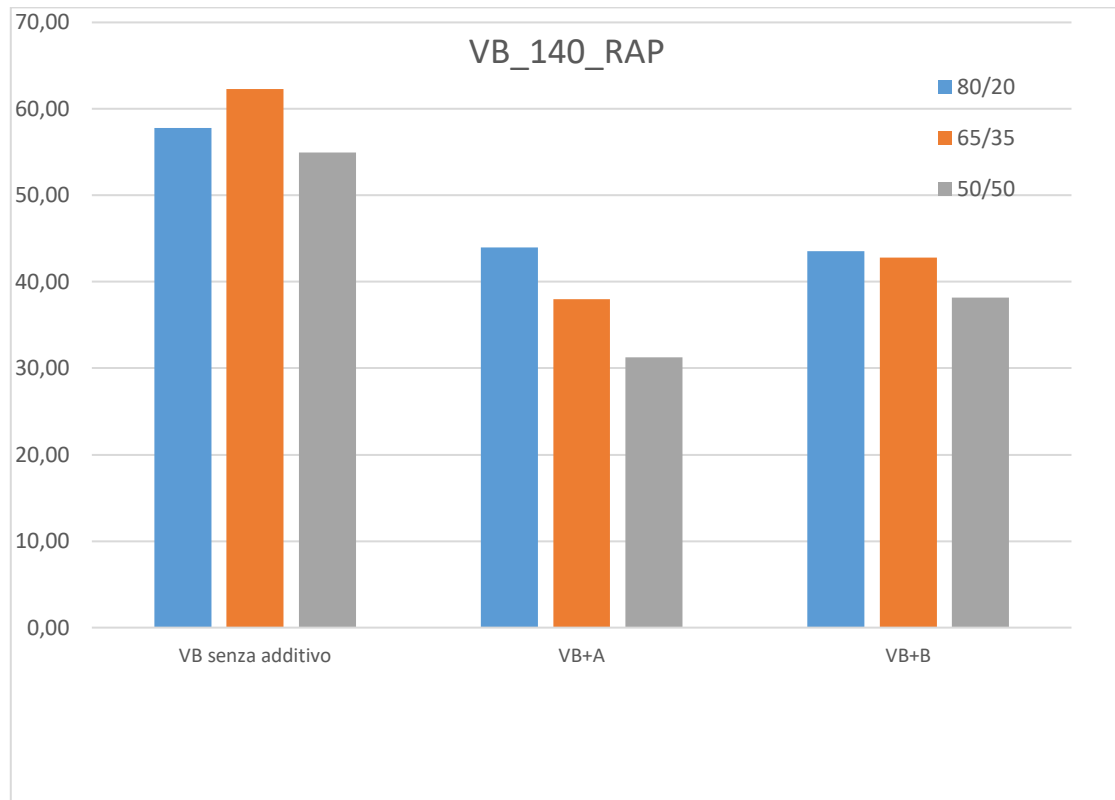


Dal grafico, è possibile notare come il bitume VB 65/35 senza additivo, abbia l'adesione più alta rispetto agli altri bitumi.

Nel caso dei bitumi 80/20, anche qui, l'adesione risulta migliore nel caso di assenza di additivo; così come nel caso di bitume 50/50.

L'adesione risulta più bassa nel caso di bitume VB 50/50 con additivo A.

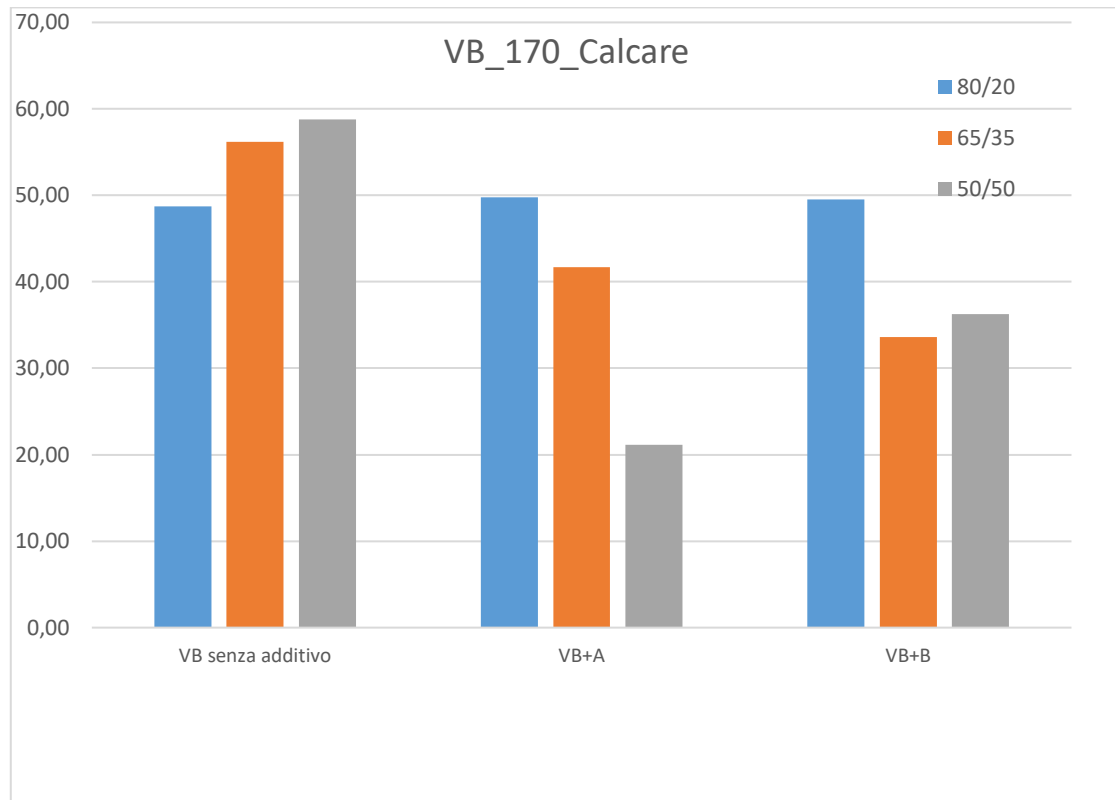
In questo istogramma, vengono riportati i risultati dell'adesione dei bitumi VB, con o senza additivo, ad una temperatura di 140°, con l'aggregato calcareo pre-bitumato:



In questo caso, il bitume con migliore adesione con l'aggregato pre-bitumato, è il 65/35 senza additivo. Per quanto riguarda i bitumi con additivo A, quello con migliore adesione è l'80/20; nel caso di bitumi con additivo B, l'adesione è più alta per il bitume 80/20 e 65/35.

L'adesione minore la ha il bitume 50/50 con additivo A.

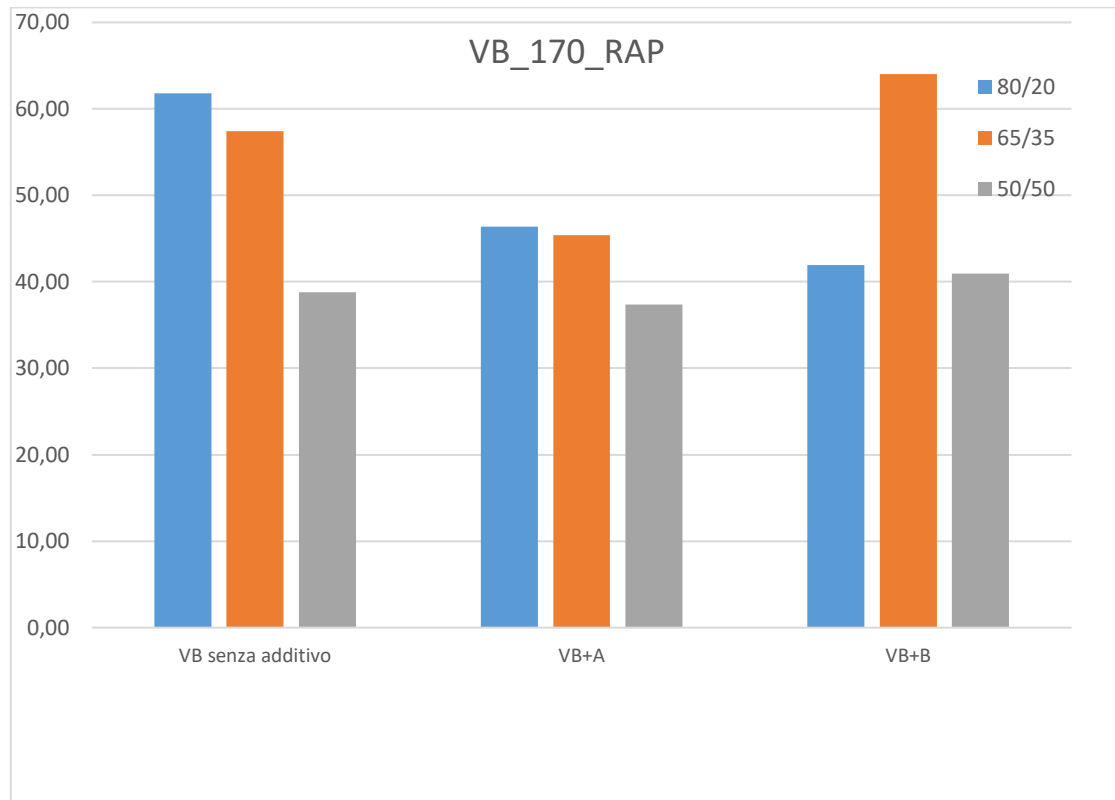
In questo istogramma, vengono riportati i risultati dell'adesione dei bitumi VB, con o senza additivo, ad una temperatura di 170°, con l'aggregato calcareo:



I bitumi 80/20 risultano avere una maggiore adesione all'aggregato, eccetto per l'80/20 senza additivo, infatti nel caso di bitumi senza additivi risulta avere una migliore adesione il 50/50.

Il bitume con minore adesione sembra essere il 50/50 con additivo A.

In questo istogramma, vengono riportati i risultati dell'adesione dei bitumi VB, con o senza additivo, ad una temperatura di 170°, con l'aggregato calcareo pre-bitumato:



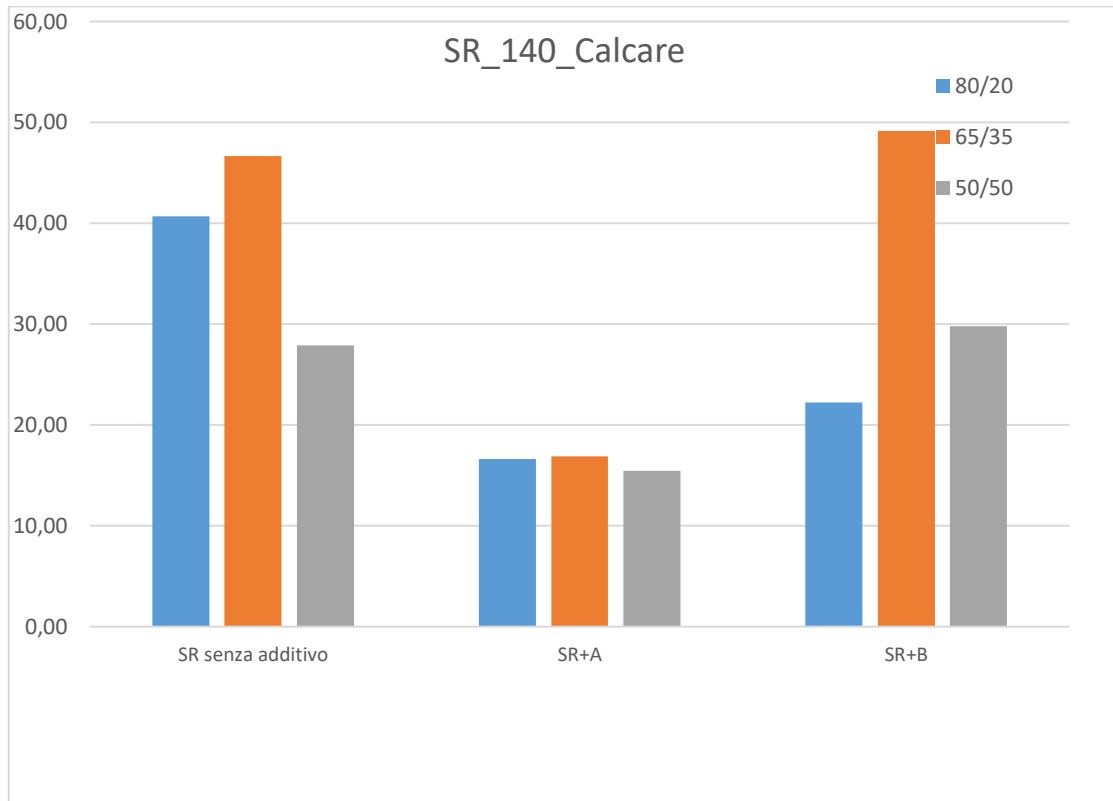
Si può notare come il bitume SR 65/35 con additivo B sia quello con miglior adesione.

Per i bitumi senza additivo l'80/20 sembra essere il migliore.

Bassa, invece, risulta essere l'adesione del bitume 50/50 senza additivo.

Nel caso di bitumi con additivo A, il bitume migliore è l'80/20.

In questo istogramma, vengono riportati i risultati dell'adesione dei bitumi SR, con o senza additivo, ad una temperatura di 140°, con l'aggregato calcareo:

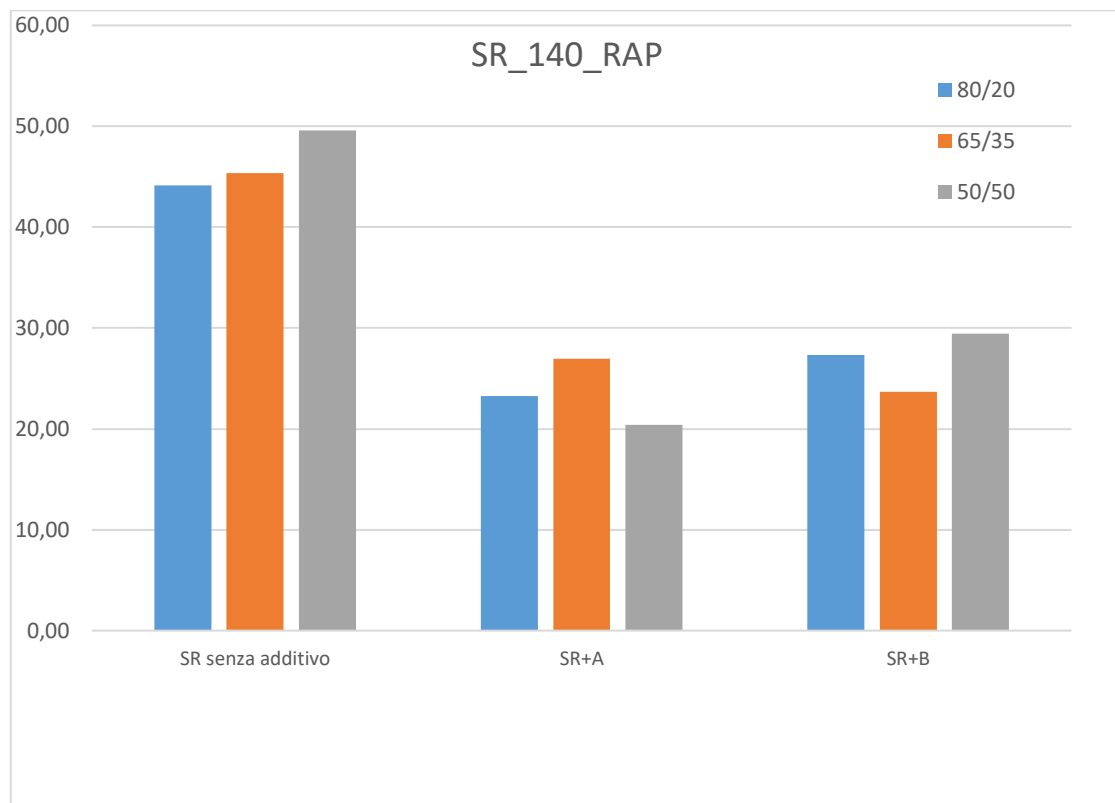


In questo caso i bitumi SR 65/35 senza additivo e con additivo B, risultano i migliori.

Molto bassa è l'adesione dei bitumi con additivo A.

In quelli senza additivo il peggiore è il 50/50.

In questo istogramma, vengono riportati i risultati dell'adesione dei bitumi SR, con o senza additivo, ad una temperatura di 140°, con l'aggregato calcareo pre-bitumato:

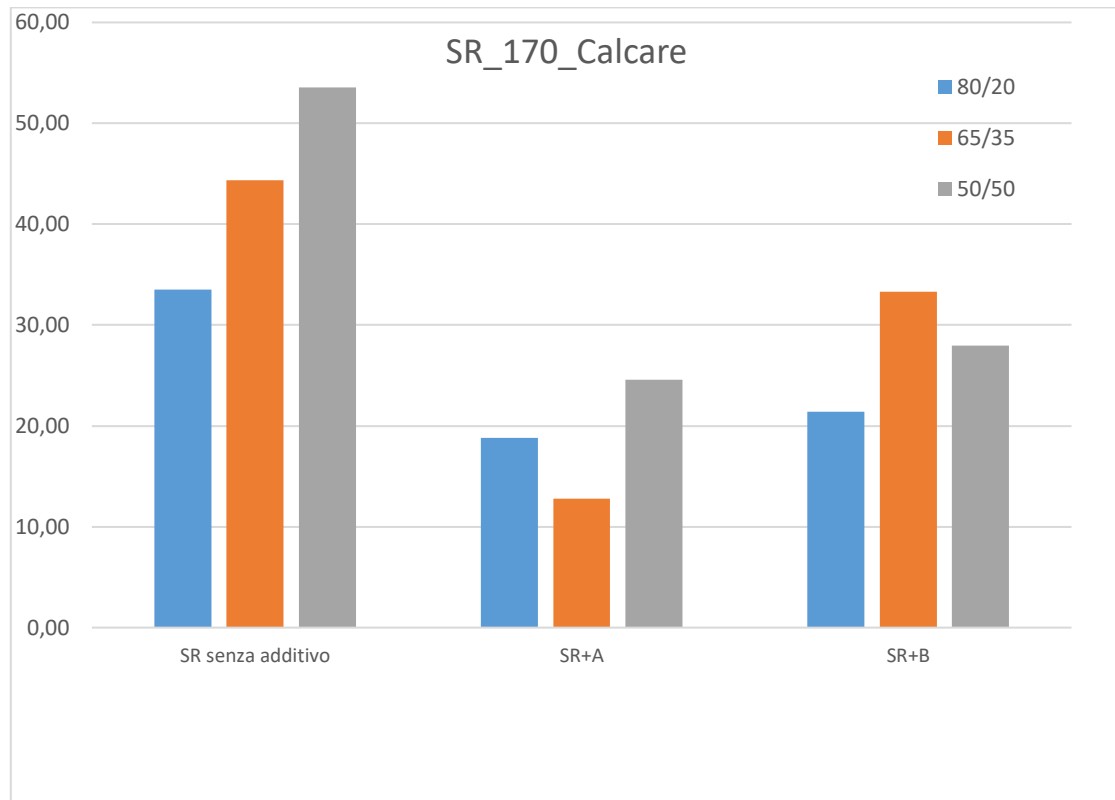


I bitumi senza additivo risultano avere un maggiore adesione, in particolare il bitume migliore risulta il 50/50 senza additivo.

Per i bitumi con additivo B, il migliore risulta il 65/35 e il peggiore il 50/50.

Nel caso dei bitumi con additivo B, quello con adesione migliore è il 50/50.

In questo istogramma, vengono riportati i risultati dell'adesione dei bitumi SR, con o senza additivo, ad una temperatura di 170°, con l'aggregato calcareo:

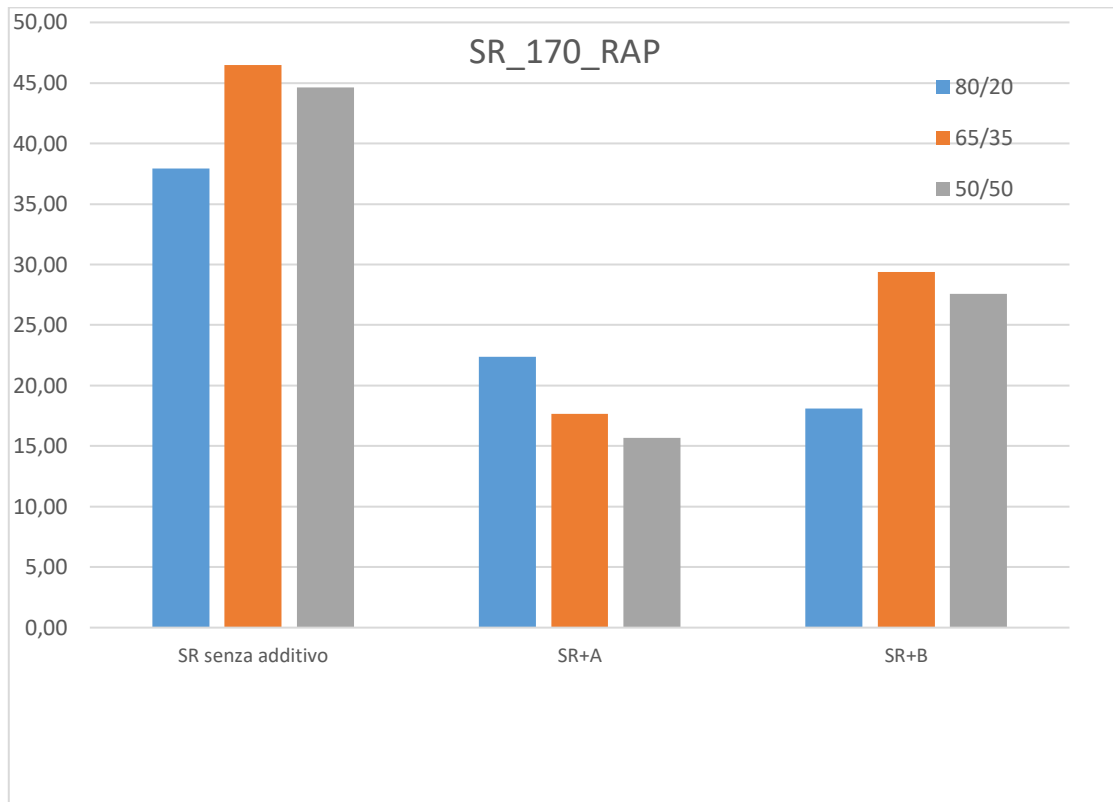


In questo caso, il bitume con migliore adesione risulterebbe il 50/50 senza additivo. Questi bitumi senza additivi hanno adesione maggiore rispetto agli altri.

L'adesione del bitume 65/35 con additivo A, ha l'adesione più bassa.

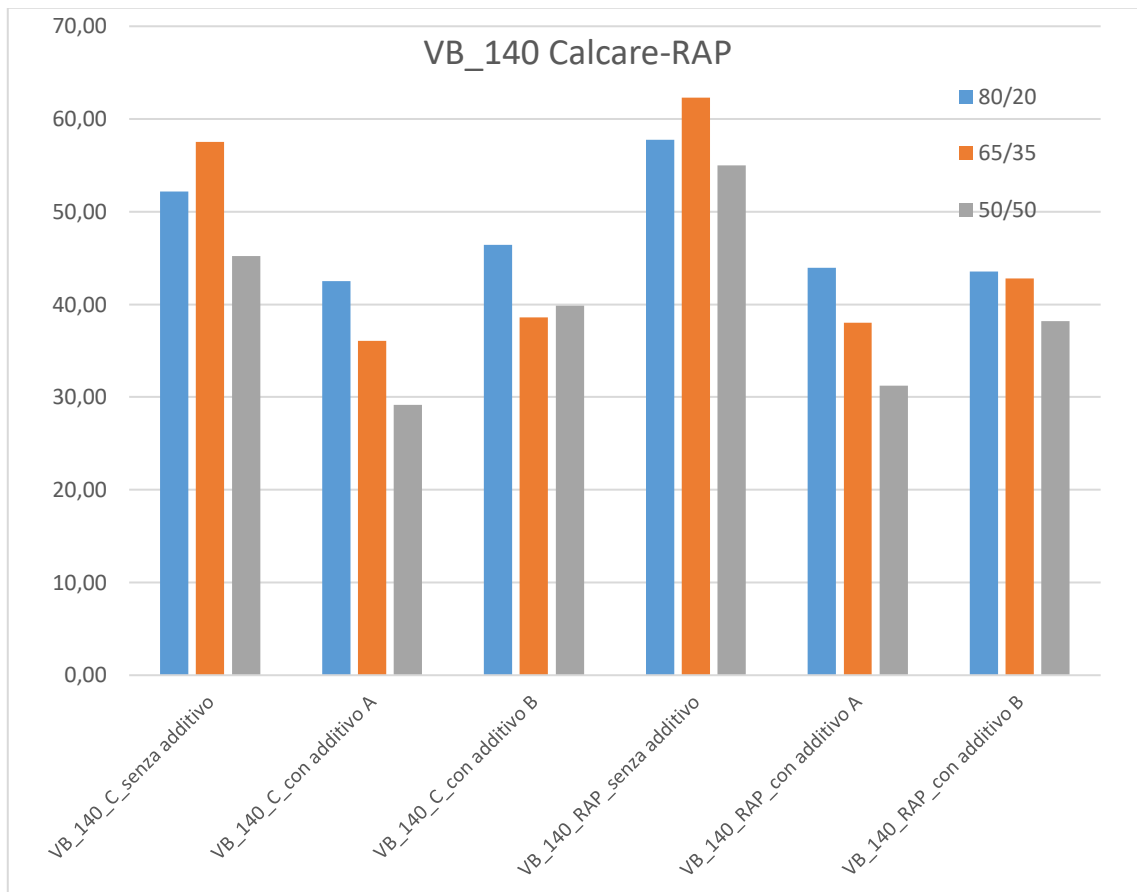
Nel caso dei bitumi con additivo B, il migliore risulta il 65/35.

In questo istogramma, vengono riportati i risultati dell'adesione dei bitumi SR, con o senza additivo, ad una temperatura di 170°, con l'aggregato calcareo pre-bitumato:



Anche qui i bitumi migliore risultano quelli senza additivi, in particolare il 65/35. Invece, quelli con additivo A sono i peggiori; tra quelli con additivo B, il 65/35 risulta avere un'adesione maggiore.

In questo istogramma, vengono riportati i risultati dell'adesione dei bitumi VB, con o senza additivo, ad una temperatura di 140°, con l'aggregato calcareo e calcare pre-bitumato:



Dall'istogramma, il bitume VB 65/35 senza additivo, ad una temperatura di 140°, risulta avere una migliore adesione con aggregato bitumato, rispetto all'adesione con aggregato calcareo senza bitume.

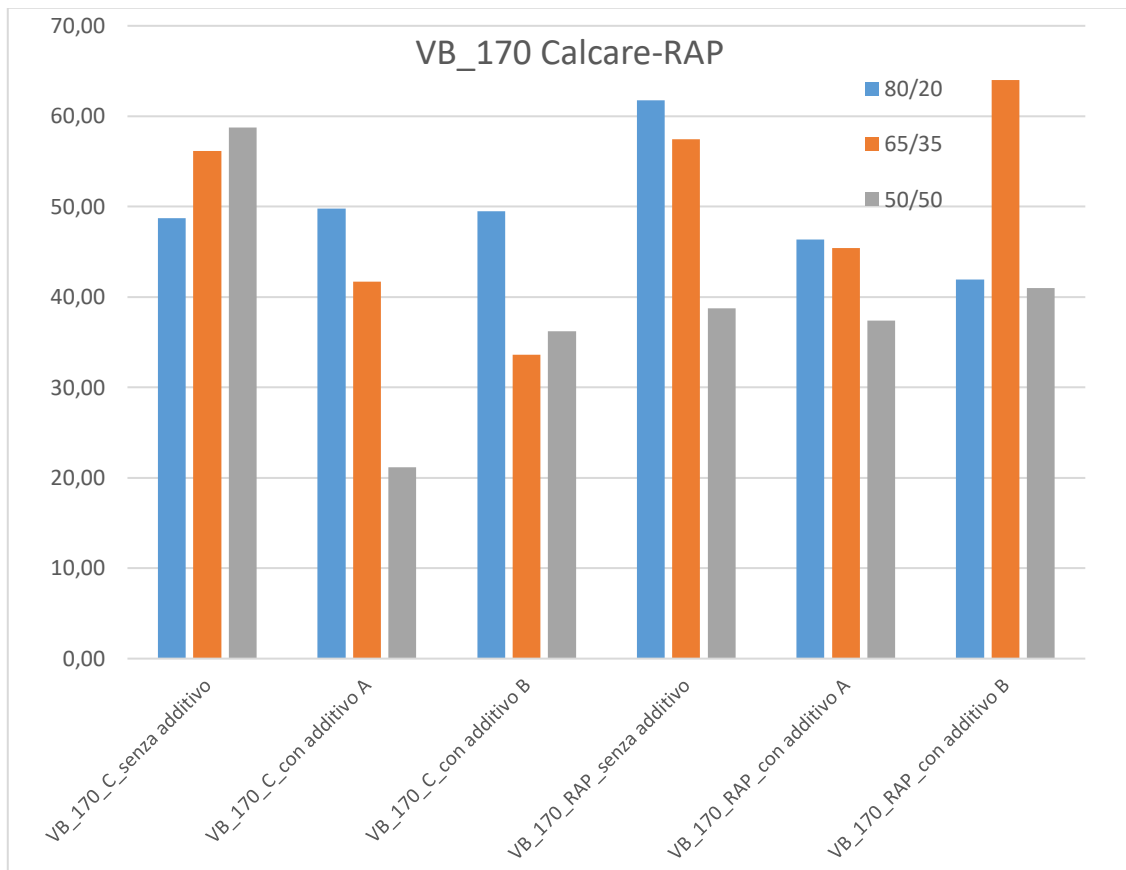
I bitumi senza additivi risultano avere una migliore adesione rispetto agli altri.

In particolar modo, i bitumi 80/20 hanno un'adesione più alta rispetto agli altri, eccetto nel caso dell'adesione tra il bitume 65/35 senza additivo e il calcare e tra il bitume 65/35 senza additivo e il calcare pre-bitumato.

Nel caso dell'adesione tra bitumi con additivo e aggregato calcareo, risulta migliore quella del bitume miscelato all'additivo B.

Per l'adesione tra bitumi e aggregato pre-bitumato, risulta migliore, anche qui, quella con additivo B.

In questo istogramma, vengono riportati i risultati dell'adesione dei bitumi VB, con o senza additivo, ad una temperatura di 170°, con l'aggregato calcareo e calcare pre-bitumato:

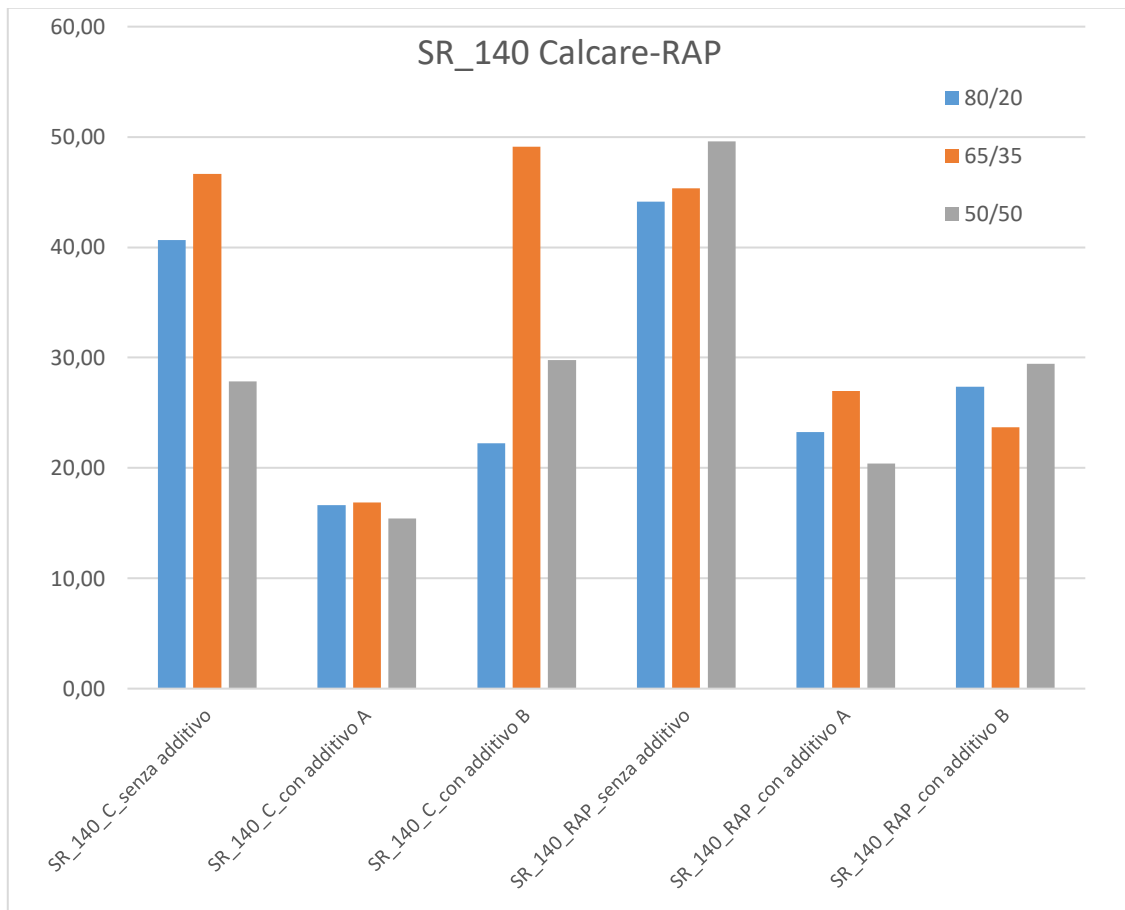


Dall'istogramma risulta che l'adesione tra il bitume VB 65/35 con additivo B e l'aggregato pre-bitumato è la migliore. Anche l'adesione del bitume 80/20 senza additivo, con l'aggregato pre-bitumato, risulta essere molto alta.

Molto bassa, invece, risulta essere l'adesione del calcare 50/50 con additivo A all'aggregato calcareo.

In linea di massima, anche qui, l'adesione dei bitumi senza additivi, risulta migliore rispetto a quelli con additivo.

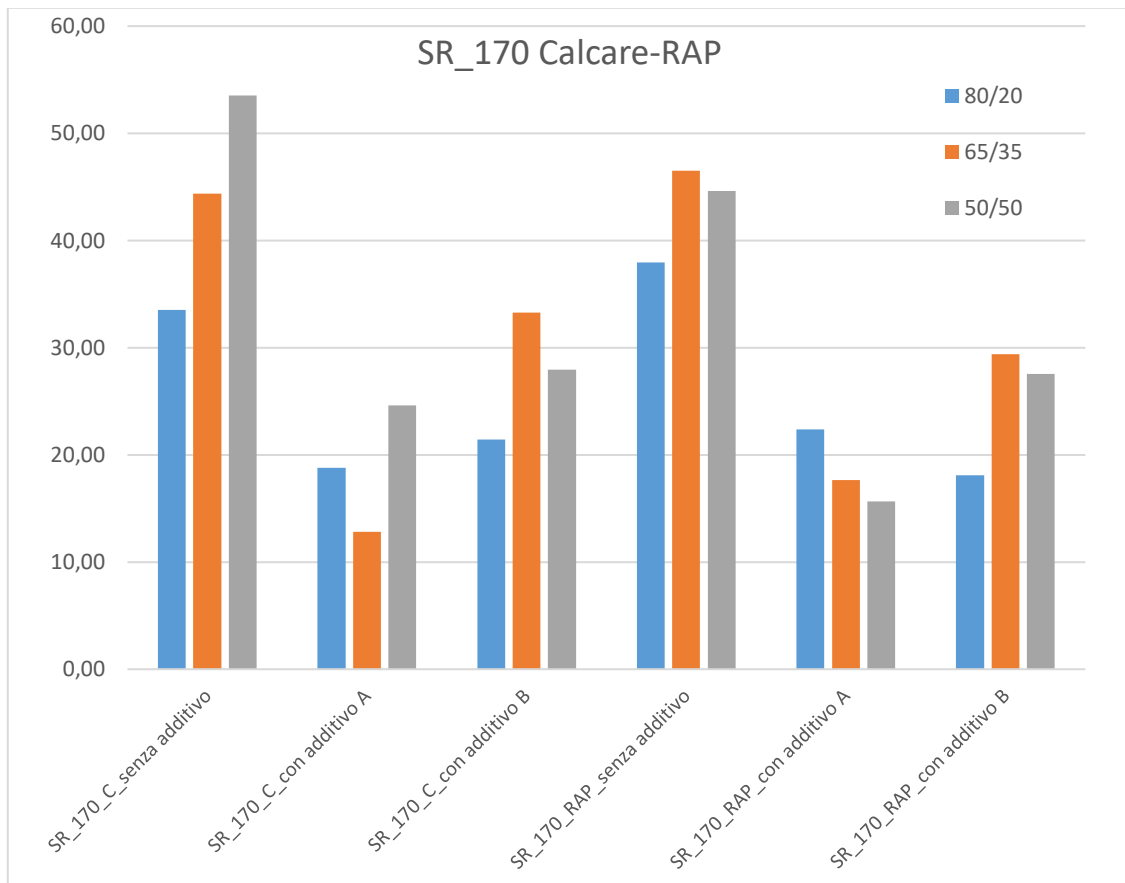
In questo istogramma, vengono riportati i risultati dell'adesione dei bitumi SR, con o senza additivo, ad una temperatura di 140°, con l'aggregato calcareo e calcare pre-bitumato:



Anche in questo caso, l'adesione dei bitumi senza additivo è migliore degli altri bitumi, eccetto nel caso dell'adesione tra il bitume 65/35 con additivo B e il calcare.

Si può notare come l'additivo A riduca molto l'adesione con il calcare; invece, nel caso dell'adesione con l'aggregato pre-bitumato, l'additivo A non la riduce così tanto.

In questo istogramma, vengono riportati i risultati dell'adesione dei bitumi SR, con o senza additivo, ad una temperatura di 170°, con l'aggregato calcareo e calcare pre-bitumato:

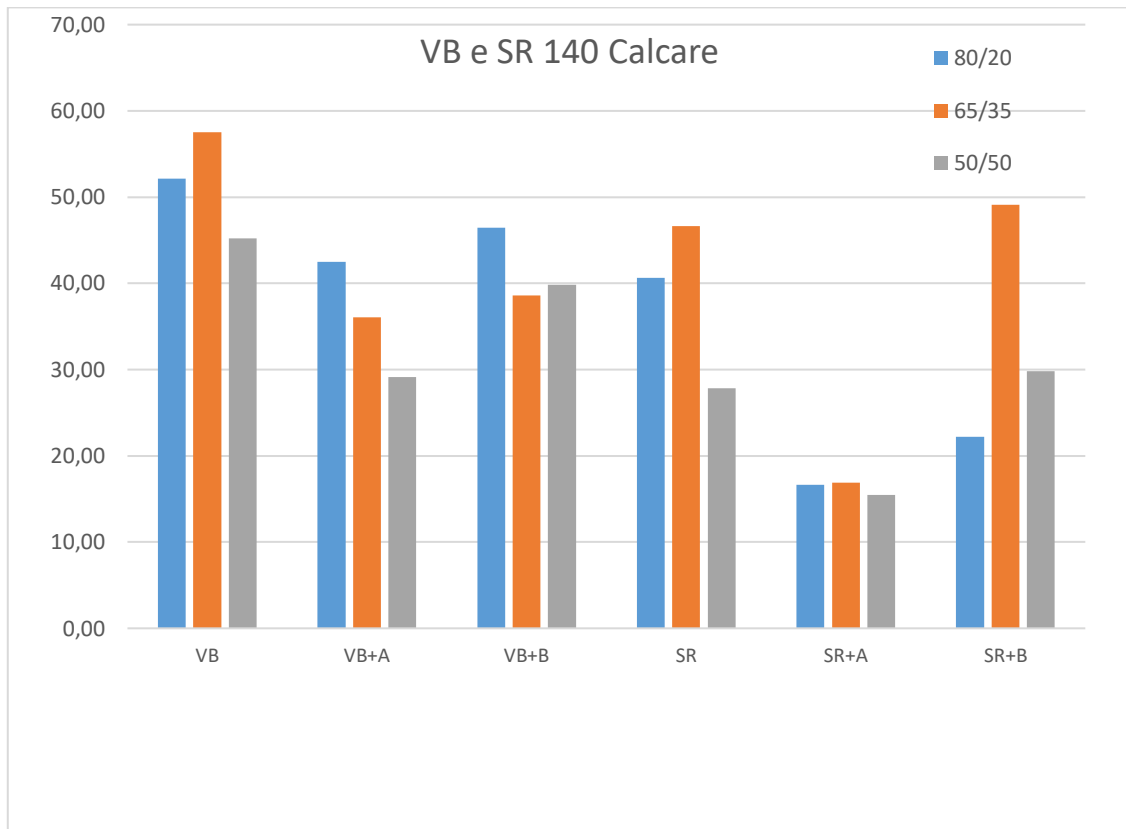


L'adesione risulta essere maggiore nel caso di bitumi senza additivi, in particolar modo l'adesione tra bitume 50/50 e calcare.

L'adesione del bitume con additivo B risulta essere maggiore rispetto a quella con additivo A.

Molto bassa risulta l'adesione del bitume 65/35 con additivo A con l'aggregato pre-bitumato.

In questo istogramma, vengono riportati i risultati dell'adesione dei bitumi SR e VB, con o senza additivo, ad una temperatura di 140°, con l'aggregato calcareo:



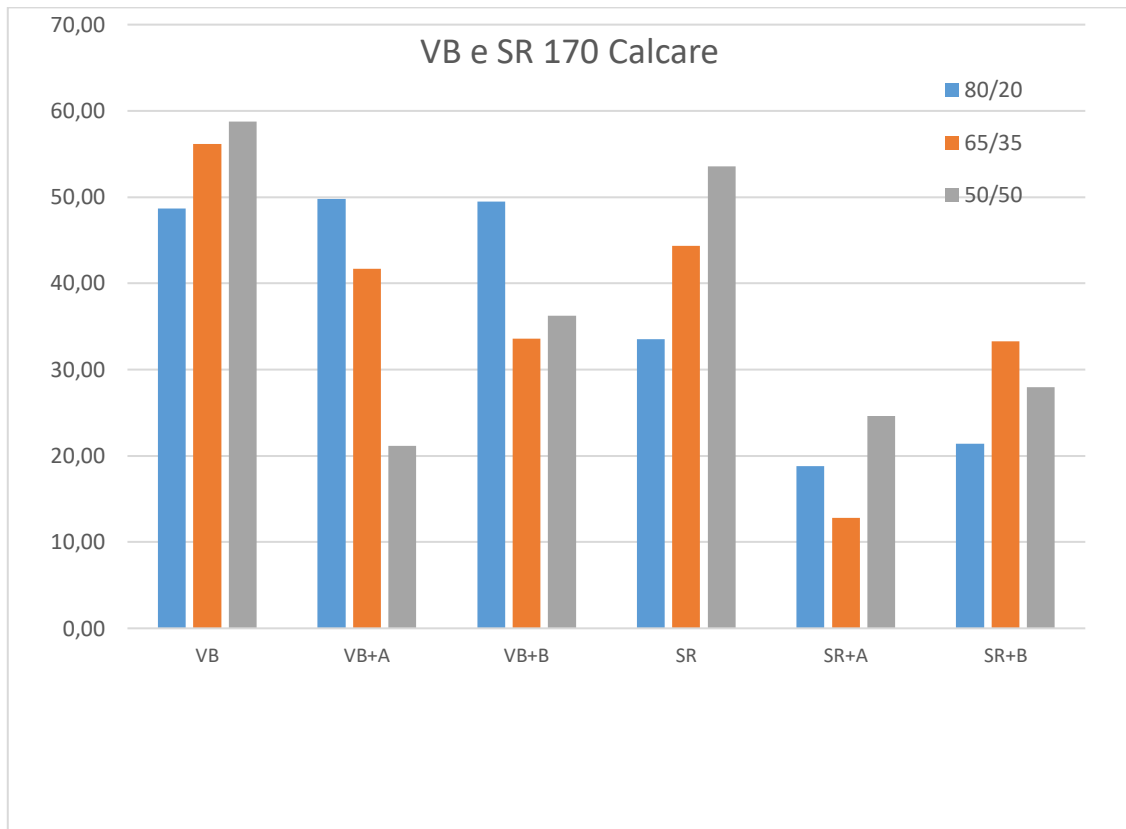
In questo grafico si può notare il confronto tra i bitumi VB e i bitumi SR.

Migliore risulta essere l'adesione del bitume VB 65/35 senza additivo. L'adesione dei bitumi VB senza additivi è maggiore rispetto agli altri bitumi VB e ai bitumi SR.

Invece, l'adesione più alta dei bitumi SR, la ha quello 65/35 senza additivo e con additivo B.

Anche qui, molto bassa risulta l'adesione dei bitumi SR con additivo A.

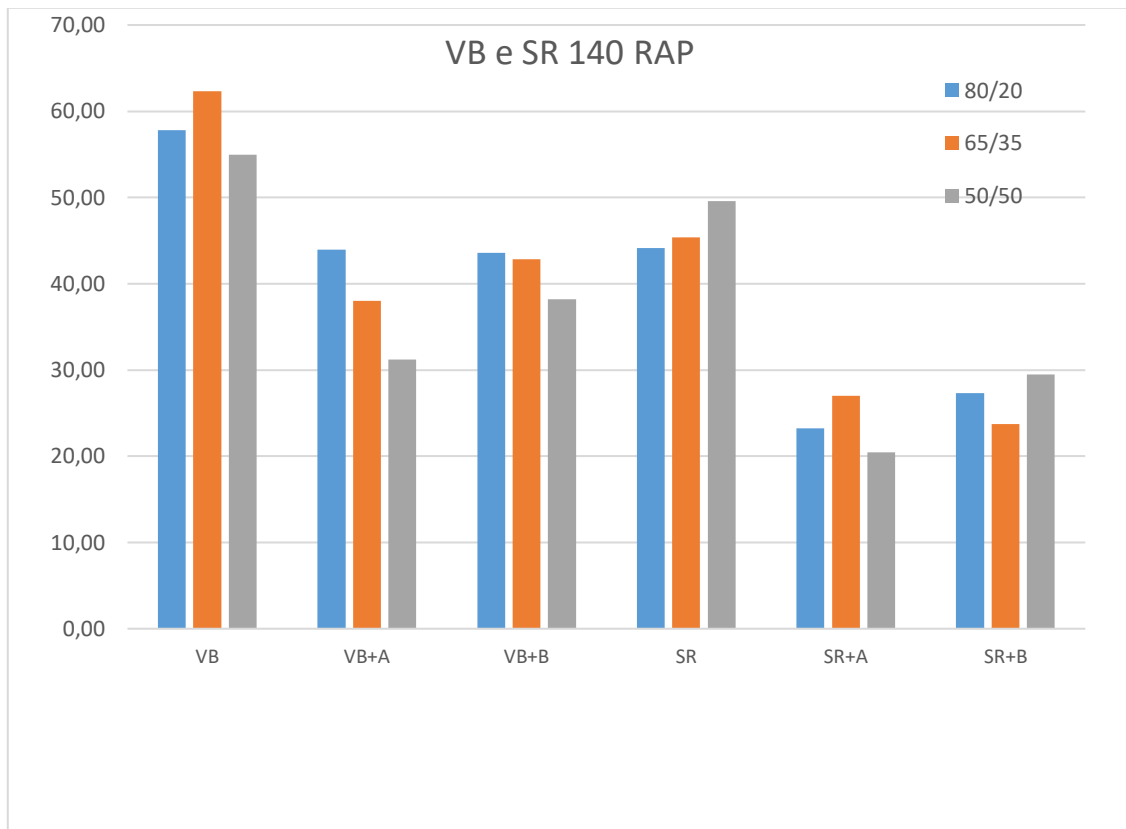
In questo istogramma, vengono riportati i risultati dell'adesione dei bitumi SR e VB, con o senza additivo, ad una temperatura di 170°, con l'aggregato calcareo:



L'adesione dei bitumi senza additivo risulta essere migliore rispetto agli altri bitumi con additivo A o B, soprattutto quella dei bitumi VB, i quali hanno un'adesione migliore anche con additivo A e B rispetto ai bitumi SR con gli stessi additivi.

Infatti, risulta molto bassa l'adesione dei bitumi SR con additivo A.

In questo istogramma, vengono riportati i risultati dell'adesione dei bitumi SR e VB, con o senza additivo, ad una temperatura di 140°, con l'aggregato calcareo pre-bitumato:

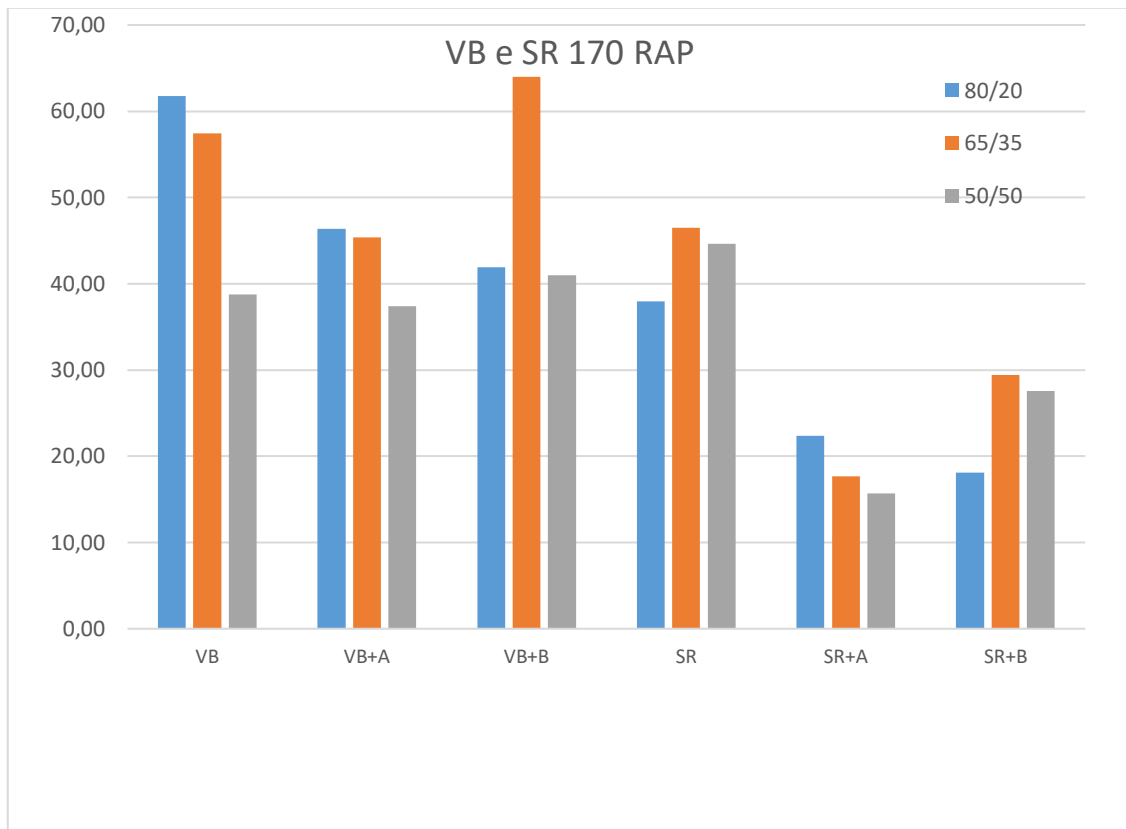


I bitumi senza additivi risultano avere un'adesione migliore, questo vale sia per i bitumi VB che per i bitumi SR.

In particolare, i bitumi VB risultano essere migliori agli SR. Il bitume VB 65/35 senza additivo ha un'adesione più alta, invece il bitume VB con adesione più bassa + il 50/50 con additivo A.

Per i bitumi SR quello con adesione migliore è il 50/50 senza additivo; quello con adesione peggiore è il 50/50 con additivo A.

In questo istogramma, vengono riportati i risultati dell'adesione dei bitumi SR e VB, con o senza additivo, ad una temperatura di 170°, con l'aggregato calcareo pre-bitumato:



I bitumi VB senza additivi sembrano essere quelli con adesione migliore, eccetto il bitume VB 65/35 con additivo B che risulta avere un'adesione più alta rispetto a tutti gli altri.

Anche per i bitumi SR, quelli senza additivo hanno un'adesione migliore; invece quelli con additivo A hanno un'adesione peggiore, soprattutto il bitume 50/50.

4 CONCLUSIONE

L'obiettivo principale di questa sperimentazione è stato quello di valutare le capacità adesive e coesive di diverse miscele di leganti bituminosi su supporti lapidei comunemente impiegati in campo stradale costituiti da calcare.

Le proprietà adesive e coesive di tutti i sistemi bitume-aggregato previsti nella sperimentazione sono state valutate tramite l'esecuzione di prove Bitumen Bond Strength (BBS) mediate l'impiego dell'apparecchiatura di prova PATTI.

In base alle diverse variabili, ovvero al tipo di aggregato, al tipo di bitume, alla temperatura e in base all'utilizzo di additivi, sono stati ottenuti diversi risultati, dai quali è stato possibile trarre una serie di conclusioni, che possiamo sintetizzare di seguito:

- i bitumi senza additivo risultano avere un'adesione migliore con l'aggregato, infatti gli additivi essendo oleosi rendono il bitume meno viscoso e quindi con minore capacità adesiva all'aggregato;
- l'additivo A provoca una maggiore riduzione di adesione rispetto all'additivo B;
- i bitumi 80/20 risultano avere un'adesione più alta rispetto alle altre miscele di bitumi, ovvero 65/35 e 50/50; questo significa che minore è il contenuto di bitume invecchiato, maggiore sarà l'adesione, infatti il bitume 80/20 contiene una percentuale di bitume invecchiato pari a 20, il bitume 65/35 ne contiene il 35%, il bitume 50/50 ne contiene il 50%;
- si è riscontrato che i bitumi VB hanno una capacità adesiva migliore ai bitumi SR;
- l'aggregato pre-bitumato garantisce una migliore adesione, perché garantendo una superficie più viscosa rispetto al semplice aggregato calcareo, il bitume riesce a fondersi meglio con l'aggregato e ad aderire maggiormente;
- per quanto riguarda la temperatura non sono state notate notevoli differenze di adesione tra una temperatura di 140° e 170°.

Sitografia

- (1) [http://www.studiocesaingegneria.it/SUPERPAVE/Test%20PAV%20\(4\)/Test%20Pav.htm](http://www.studiocesaingegneria.it/SUPERPAVE/Test%20PAV%20(4)/Test%20Pav.htm)
- (2) <https://www.docsity.com/it/prove-di-invecchiamento-sul-bitume-rtfo/5673064/>
- (3) <https://www.almapetroli.com/il-processo-produttivo#:~:text=L'impianto%20produce%20bitumi%20ossidati,all'immissione%20continua%20di%20aria.>
- (4) <https://geoconsultingitalia.com/bitume-che-cose/>
- (5) https://www.eurobitume.eu/public_downloads/Technical/EB_Technical_Information_FD_Italian_.pdf
- (6) <https://didattica-2000.archived.uniroma2.it/P&MSV/deposito/Conglomerati-Bituminosi.pdf>
- (7) <https://www.lavoripubblici.net/lincremento-vita-utile-della-pavimentazione-ruolo-dellattivante-dadesione/#:~:text=Il%20fenomeno%20dell'adesione%20bitume,propriet%C3%A0%20fisiche%20di%20differente%20origine.&text=La%20mescolazione%20di%20aggregati%20con,sono%20%22bagnati%22%20dal%20legante.>
- (8) <https://www.stradeeautostrade.it/asfalti-e-bitumi/conglomerati-bituminosi-sperimentazione-di-riciclato-a-caldo-in-ambito-urbano/>
- (9) <https://www.ingenio-web.it/4771-pavimentazioni-stradali-effetto-dellinvecchiamento-e-potenzialita-di-recupero>
- (10) <https://www.almapetroli.com/i-bitumi>
- (11) https://learn.univpm.it/pluginfile.php/261818/mod_resource/content/1/2019-20_L06_aggregati%20per%20pavimentazioni%20stradali.pdf

- (12) https://learn.univpm.it/pluginfile.php/266652/mod_resource/content/1/2019-20_L07_leganti%20bituminosi.pdf
- (13) https://learn.univpm.it/pluginfile.php/287363/mod_resource/content/1/2019-20_L18_Riciclaggio%20a%20caldo%20dei%20conglomerati%20bituminosi.pdf
- (14) https://it.wikipedia.org/wiki/Conglomerato_bituminoso
- (15) Schede tecniche degli additivi rigeneranti di bitume impiegati
- (16) Schede tecniche e manuali delle apparecchiature di laboratorio impiegate