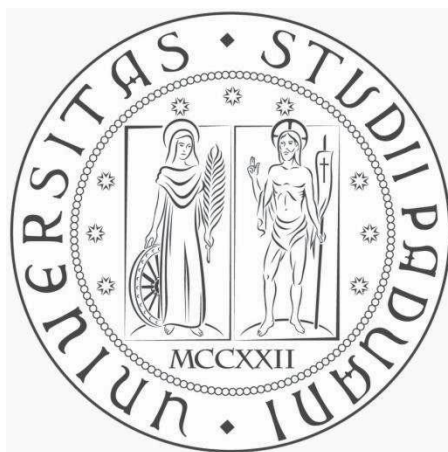


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale



Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

**L'UTILIZZO DI CONGLOMERATI
BITUMINOSI CON ELEVATO CONTENUTO DI
FRESATO NELLE REGIONI CON CLIMA
FREDDO**

RELATORE: Prof. Ing. MARCO PASETTO

CORRELATORI: Ing. GIOVANNI GIACOMELLO

LAUREANDA: NATALYA SYVA

anno accademico 2014-2015

SOMMARIO

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA	1
Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale	1
Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile	1
LAUREANDA: NATALYA SYVA	1
1 INTRODUZIONE	5
2 TECNICHE DI RICICLAGGIO	9
2.1 RICICLAGGIO A CALDO, IN IMPIANTO.	9
2.1.1 Considerazioni generali	9
2.1.2 Impianto discontinuo.....	10
2.1.3 Modifica per il riciclaggio.....	13
2.1.4 Impianto continuo	16
2.1.5 Modifica dell’impianto continuo per il riciclaggio	20
2.2 RICICLAGGIO A CALDO, IN SITU	22
2.2.1 Considerazioni generali.	22
2.2.2 Treni di riciclaggio.....	24
2.2.3 Tecnologia Marini	24
2.2.4 Tecnologia Martec	25
2.2.5 Tecnologia Wirtgen.....	28
2.2.6 Tecnologia Pavirec.....	30
2.3 RICICLAGGIO A FREDDO, IN IMPIANTO	33
2.3.1 Considerazioni generali	33
2.3.2 Le emulsioni bituminose.....	35
2.3.3 Il bitume schiumato	38
2.4 RICICLAGGIO A FREDDO, IN SITU	40
2.4.1 Considerazioni generali	40
2.4.2 Treni di riciclaggio.....	42
2.5 TECNOLOGIE INNOVATIVE A TIEPIDO	45
2.5.1 Considerazioni generali	45
2.5.2 Descrizione delle tecniche WMA.....	47
3 QUADRO NORMATIVO ITALIANO IN TEMA DI RIFIUTI E MARCATURA CE	51
3.1 DAL DECRETO RONCHI AL D. LGS 152/2006.....	51
3.2 FRESATO D’ASFALTO: RIFIUTO O SOTTOPRODOTTO?.....	52

3.3	MARCATURA CE	54
4	MATERIALI PER INFRASTRUTTURE STRADALI	60
4.1	GLI AGGREGATI	61
4.2	IL FRESATO	63
4.3	IL FILLER	65
4.4	IL BITUME	66
4.5	PRODOTTI CHIMICI UTILIZZABILI NELLA PRODUZIONE DEI CONGLOMERATI	68
5	PROGRAMMA SPERIMENTALE	70
5.1	ARTICOLAZIONE GENERALE DEL PROGRAMMA	70
5.2	DENOMINAZIONE DEI PROVINI	71
6	PARTE SPERIMENTALE	72
6.1	DESCRIZIONE DEI MATERIALI UTILIZZATI	72
6.1.1	Gli Aggregati	72
6.1.2	IL fresato	76
6.1.3	Il filler	77
6.1.4	Il bitume	78
6.1.5	Gli additivi	78
6.1.6	Confronto delle caratteristiche del pietrisco e del fresato	80
6.2	MIX DESIGN	87
6.3	PREPARAZIONE DEI PROVINI	92
6.3.1	Confezionamento dei provini con Pressa a taglio Giratoria	94
	(UNI EN 12697-31)	94
6.3.2	Confezionamento dei provini con compattatore a rullo	95
	(UNI EN 12697-33)	95
6.4	PROCEDURA PER IL CALCOLO DELL'INDICE CEI	97
6.4.1	Indice CEI	98
6.5	CONTENUTO DEI VUOTI	98
6.6	TRAZIONE INDIRETTA: INDIRECT TENSILE STRAIGHT (ITS) TEST	100
6.6.1	Descrizione delle modalità e delle procedure operate	100
6.7	MODULO: INDIRECT TENSILE STIFFNESS MODULUS (ITSM) TEST	102
6.7.1	I test di laboratorio per la determinazione dei moduli dinamici	102
6.7.2	Descrizione delle modalità e delle procedure operative	106
6.7.3	UNI EN 12697-26 - ANNESSO C	107
6.7.4	UNI EN 12697-26 - ANNESSO B	110
7	RISULTATI E ANALISI DI DATI	114

7.1	RISULTATI DEI CONTENUTI DI VUOTI.....	114
7.1.1	Densità massima.....	114
7.1.2	Bulk density	117
7.1.3	Contenuto dei vuoti.....	118
7.1.4	Osservazioni.....	119
7.2	RISULTATI PRESSA A TAGLIO GIRATORIA	120
7.2.1	Grado di compattazione	120
7.2.2	Calcolo indice CEI.....	131
7.2.3	Osservazioni.....	135
7.3	RISULTATI DELLA PROVA A TRAZIONE INDIRETTA.....	136
7.3.1	Osservazioni.....	137
7.4	ANALISI E DESCRIZIONE DEI RISULTATI DEI MODULI USANDO L'ANNESSO C.....	138
7.4.1	Osservazioni.....	140
7.5	ANALISI E DESCRIZIONE DEI RISULTATI DEI MODULI USANDO L'ANNESSO B.....	141
7.5.1	Osservazioni.....	146
8	CONCLUSIONI	147
9	BIBLIOGRAFIA	149

1 INTRODUZIONE

Nel corso degli ultimi decenni le infrastrutture hanno avuto uno sviluppo notevole: il trasporto su strada è aumentato, in particolar modo il volume relativo ai veicoli pesanti, che movimentano le merci con maggior rapidità e flessibilità rispetto al trasporto su rotaia; la tecnologia stessa dei veicoli è cambiata, ed il carico per asse di un mezzo pesante, è di gran lunga maggiore rispetto al passato; il deterioramento già presente sulle strade, viene in questo modo ad accentuarsi, rendendo inevitabili gli interventi di manutenzione. Queste considerazioni valgono per la maggior parte dei paesi Europei, che dovranno dedicare in futuro un budget sempre più elevato alla manutenzione stradale: nel caso in cui, per mancanza di fondi, non si sia intervenuto prima sulla pavimentazione, con conseguente ed irreversibile deperimento della rete stradale, potrebbe essere necessario il rifacimento totale delle stesse strade, con costi notevolmente maggiori.

Le principali cause di deterioramento della pavimentazione stradale sono il traffico e le condizioni ambientali.

Tuttavia con la crisi economica che in questo periodo si sta affrontando, si rende necessario aumentare la redditività dei ridotti budget disponibili da parte dei singoli paesi. Se si considera anche il fatto che gli interventi di manutenzione comportano notevoli consumi di risorse pregiate e non rinnovabili, quali aggregati lapidei e bitume, e che vengono contestualmente prodotte ingenti quantità di materiali di risulta, con costi sia economici di dismissione, che ambientali di inquinamento, si rende ancora più necessaria la ricerca di una soluzione alternativa al problema.

Le attuali esigenze di salvaguardia dell'ambiente hanno sempre più indirizzato gli sforzi dei Progettisti alla realizzazione di opere che possono coesistere in armonia con l'ambiente circostante tramite l'uso di tecnologie costruttive a basso impatto ambientale e, al tempo stesso, risultino sicure e durevoli.

Il raggiungimento di questi obiettivi dipende, in particolare, da un appropriato impiego dei materiali sia tradizionali sia innovativi, da un corretto dimensionamento strutturale della pavimentazione e da una manutenzione adeguatamente programmata che ne garantisca la conservazione.

Questa soluzione arriva con il *riciclaggio*; nel settore della pavimentazioni stradali con il termine “riciclare”, si intende la possibilità di recuperare e riutilizzare il materiale fresato (aggregato e bitume invecchiato -“*Reclaimed Asphalt Pavement*” – RAP) dalla pavimentazione esistente in situ per la produzione di un nuovo conglomerato bituminoso. Le motivazioni che spingono verso questa direzione, sono molteplici:

- riduzione dell’impiego di materie prime vergini;
- riduzione dei territori da destinare a discarica;
- limitazione dell’inquinamento del suolo e dell’atmosfera, derivante dal trasporto e dall’incenerimento dei rifiuti;
- conservazione dell’energia;
- vantaggi economici;
- vantaggi tecnici.

Le tecniche oggi a disposizione nell’ambito del riciclaggio, possono essere macroscopicamente divise in:

- riciclaggio in impianto fisso;
- riciclaggio in situ.

Un’altra differenziazione può essere fatta in relazione agli scambi energetici presenti all’atto del confezionamento del nuovo conglomerato:

- riciclaggio a caldo;
- riciclaggio a freddo.

A queste due ultime tipologie, se ne aggiunge una terza, relativa a miscele bituminose tiepide.

La Figura 1 seguente mostra una classificazione di tutte le tecniche attualmente presenti sul mercato, in base alle diverse temperature delle miscele bituminose. Si possono distinguere:

- miscele calde (*Hot Mix Asphalt* - HMA), prodotte e miscelate a temperature comprese tra i 140°C e i 190°C; le temperature di produzione degli HMA dipendono dal bitume utilizzato.
- miscele fredde (*Cold Mix Asphalt* - CMA), prodotte con aggregati non riscaldati e emulsione bituminosa o bitume schiumato;

- miscele semi-tiepide (*Half Warm Asphalt* - HWA), prodotte e miscelate con aggregati riscaldati, a temperature inferiori ai 100°C, ma superiori a quelle relative ai CMA;
- miscele tiepide (*Warm Mix Asphalt* - WMA), prodotte e miscelate a temperature superiori ai 100°C, ma inferiori a quelle relative agli HMA.

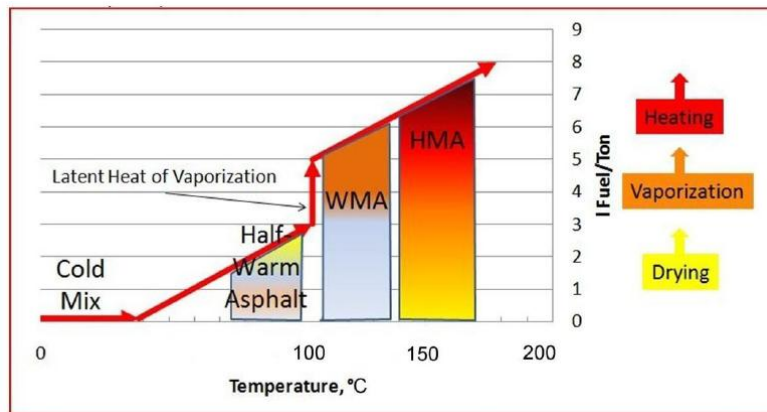


Figura 1 Temperature operative per le diverse tecniche di riciclaggio

Nonostante il fresato sia riciclabile al 100%, nella pratica il suo utilizzo si limita al 20% del totale. La principale problematica legata all'impiego del fresato in miscele di nuova realizzazione è l'elevato stato di ossidazione in cui si trova il bitume in esso contenuto. Tale stato ossidativo è causato dal duplice invecchiamento che il legante subisce in opera: il primo per effetto del confezionamento e della stesa (invecchiamento a breve termine – “*Short Term Aging*”), il secondo prodotto dall'azione ossidante degli agenti atmosferici (invecchiamento a lungo termine – “*Long Term Aging*”). L'ossidazione produce una riduzione della matrice oleosa con conseguente modifica della lavorabilità e viscosità rispetto alle condizioni originarie. Il bitume contenuto nel fresato si presenta come un legante rigido che a basse temperature può presentare problemi di fessurazione termica (“*Thermal Cracking*”), mentre alle temperature di produzione e stesa del conglomerato può presentare problemi di lavorabilità. Di conseguenza, l'aumento della percentuale di fresato nella miscela potrebbe provocare problemi legati con il “*Thermal Cracking*” nelle regioni con clima freddo.

Esistono degli additivi di tipo rigenerativo (“rigeneranti”, che fanno parte della famiglia degli Additivi Chimici Funzionali – ACF) che aggiunti alla miscela permettono di

ridurre la rigidità della miscela stessa. Questi prodotti sono in grado di ripristinare proprietà reologiche e chimiche del legante invecchiato. I rigeneranti potrebbero permettere di aumentare significativamente la percentuale di fresato nella miscela, e forse, potrebbero permetterne anche riciclo totale.

2 TECNICHE DI RICICLAGGIO

2.1 RICICLAGGIO A CALDO, IN IMPIANTO.

2.1.1 Considerazioni generali

Per riciclaggio a caldo si intendono tutte quelle tecniche che permettono il riutilizzo del conglomerato bituminoso in cui l'aggregato lapideo di primo impiego, aggiunto all'atto del confezionamento, sia preventivamente riscaldato e portato ad un'idonea temperatura, ossia oltre i 150°C. Tutte le restanti tecniche sono da considerarsi "a freddo" o "tiepide".

La tecnologia a caldo permette di confezionare miscele composte da:

- aggregati lapidei vergini;
- fresato in proporzioni variabili (come se fosse un aggregato);
- bitume tradizionale o modificato;
- eventuali ACF, per ringiovanire il bitume invecchiato.

Questa tipologia di miscela è confezionata in impianti fissi di produzione, le cui caratteristiche sono note, grazie ad un corretto dosaggio dei componenti; la tecnica è senza dubbio quella che conferisce prestazioni più elevate al conglomerato, e che lo rende idoneo per ogni tipo di impiego, dallo strato di base a quello di usura.

Gli impianti possono essere suddivisi in due categorie, a seconda che la miscelazione sia realizzata in modo discontinuo o continuo.

Nel primo caso, gli inerti, dopo essere stati essiccati, vagliati e pesati, vengono mescolati tra loro e col bitume fino ad ottenere un impasto omogeneo; il conglomerato ottenuto viene poi scaricato dal mescolatore.

Nel secondo caso, gli aggregati, dopo i preliminari trattamenti, vengono prelevati direttamente dai silos mediante saracinesche e alimentatori a nastro ed immessi, insieme al bitume, in un mescolatore ad azione continua.

La miscela, in entrambi i casi, fuoriesce dalla zona di mescolamento mediante un apposito convogliatore, e può essere trasportata alle tramogge di carico e quindi direttamente agli automezzi, oppure inviata ad un silos per lo stoccaggio provvisorio.

2.1.2 Impianto discontinuo



Figura 1 Impianto discontinuo

L'impianto discontinuo per la produzione di conglomerato bituminoso è certamente il più diffuso in Europa, consente una maggior flessibilità di utilizzo, ma anche una miglior qualità del prodotto finito; si riesce ad avere anche un controllo superiore dell'immissione dei fumi, grazie alla presenza di filtri nei camini.

Negli impianti moderni il processo produttivo è completamente automatico.

Di contro, quello in esame è un impianto molto costoso, a causa della presenza della torre di miscelazione, del vaglio vibrante, degli elevatori a caldo per il filler e per gli aggregati; inoltre, a parità di condizioni iniziali, è caratterizzato da una produttività inferiore.

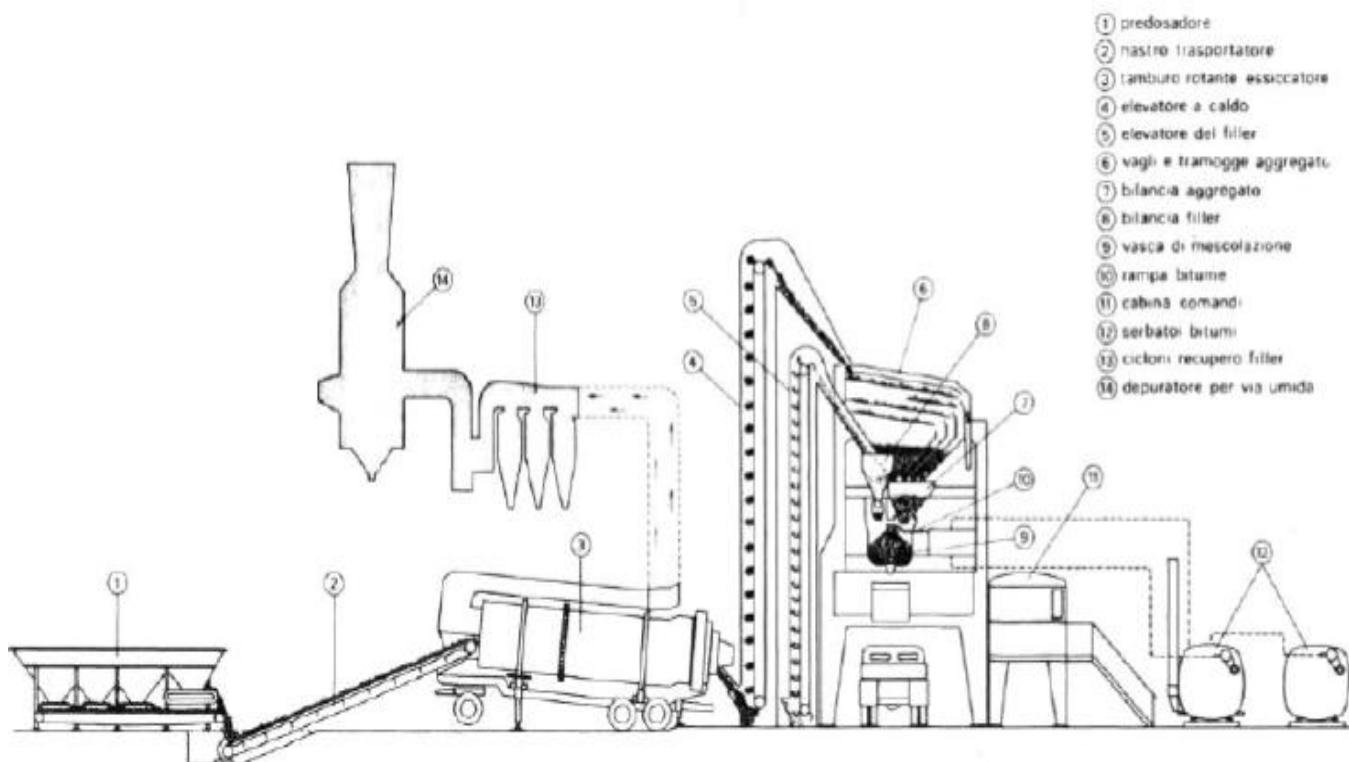


Figura 2 Schema impianto discontinuo

Anche la modalità di introduzione del fresato nella miscela può essere eseguita sia a caldo che a freddo.

Vediamo a grandi linee come è fatto un impianto e in cosa consiste il processo produttivo.

Le materie prime da immettere nel ciclo produttivo non sono confezionate in loco, ma vengono generalmente comprate da ditte esterne e stoccate in apposite aree ai margini dell'impianto stesso. Da qui vengono dosati i quantitativi per le singole pezzature, destinate alla miscelazione con il bitume, trasportate mediante pale meccaniche e successivamente caricate in apposite tramogge (predosatori), che alimentano con nastri trasportatori un essiccatore, ovvero un forno a tamburo.

Negli impianti a mescolamento discontinuo la dosatura degli inerti viene effettuata solitamente a peso: il dosatore è costituito da una tramoggia a bilico.

Il forno essiccatore, si presenta come un cilindro d'acciaio rotante, inclinato nel senso di avanzamento del materiale, con apposita palettatura interna che solleva il materiale stesso e lo fa cadere attraverso la fiamma del bruciatore, riscaldandolo e liberandolo

dall'umidità. Essa rappresenta il cuore del sistema di produzione: infatti, dall'efficienza dell'essiccatore dipende interamente la capacità produttiva dell'impianto.

La funzione principale dei forni è quella di eliminare l'umidità contenuta negli inerti, in prima fase, e di portarli, in seguito, alla temperatura di miscelazione voluta.

I forni a tamburo rotante sono costituiti da un cilindro rotante e da un bruciatore, e sono in grado di operare sia in "equicorrente" che in "controcorrente"; generalmente gli equicorrente vengono utilizzati per impianti di asfalto di tipo "continuo", mentre i controcorrente vengono utilizzati negli impianti tradizionali o di tipo "discontinuo", come nel nostro caso.

Un forno a tamburo rotante che operi in controcorrente può essere schematicamente diviso in tre zone:

- nella prima, gli inerti vengono riscaldati fino a raggiungere la temperatura di ebollizione dell'acqua, ma non perdono umidità;
- nella seconda, gli inerti perdono tutta l'umidità contenuta, essiccandosi: in questa zona la temperatura non aumenta, ma rimane costante;
- nella terza, la temperatura degli inerti, oramai completamente essiccati, aumenta fino a che il materiale non esce dal cilindro.

Durante la fase di lavorazione, all'interno del tamburo, si forma una considerevole quantità di gas contenenti aria, polveri e prodotti della combustione, che vengono espulsi in atmosfera, previa purificazione, attraverso un condotto collegato alla ciminiera.

Quando gli aggregati caldi (150-160°C) lasciano l'essiccatore, cadono in un elevatore a tazze che li trasporta nella parte più alta della torre di miscelazione contenente il vaglio vibrante, a seguito del quale è collocato il mescolatore.

Il bitume viene invece trasportato in stato semisolido da autocisterne, ed è stoccato in serbatoi metallici, coibentati con lana di roccia ad alta densità e rivestiti con un mantello di alluminio, posti in aree ben delimitate; inoltre sono predisposte con lo scarico di fondo, per un eventuale collegamento in serie di più cisterne tra loro.

Il bitume viene riscaldato a 130-150°C dalla caldaia oleotermica alimentata con olio combustibile B.T.Z. (olio denso a Basso Tenore di Zolfo) e successivamente mantenuto a temperatura costante con olio diatermico per omogeneizzarne la composizione.

Tramite una pompa volumetrica viene poi inviato e dosato nel mescolatore.

Una volta ottenuti le richieste quantità di bitume e aggregati vergini, si passa alla miscelazione vera e propria del materiale: un recipiente ospita un doppio albero a palette controrotanti, che agitano la miscela di pietrisco, bitume e filler per un tempo variabile da 35 a 50 secondi, in base alla potenzialità della macchina e all'umidità residua; i miscelatori sono in genere costituiti da vasche con il fondo apribile per lo scarico del materiale impastato, che mediante un apposito convogliatore, può essere trasportato alle tramogge di carico e quindi direttamente agli automezzi, oppure inviato ad un silos per lo stoccaggio provvisorio.

2.1.3 Modifica per il riciclaggio

E' evidente come gli impianti discontinui sopra descritti possano essere facilmente modificati nel caso di riciclaggio a caldo; ciò che si deve evitare in questo caso è il passaggio del materiale fresato, contenente bitume, attraverso la fiamma del bruciatore del cilindro essiccatore (si rischia di "crackizzare" il bitume e di immettere in atmosfera sostanze nocive).

Le percentuali di materiale riciclabile nella miscela variano in relazione all'impianto utilizzato e agli equipaggiamenti di cui lo stesso dispone, alla natura del RAP e alle sue condizioni operative (temperatura e umidità), ed infine alla modalità di immissione nella miscela, a freddo o a caldo, a seconda che sia previsto o meno, il riutilizzo del RAP mediante riscaldamento.

Le soluzioni di riciclaggio utilizzate più largamente sono di seguito riportate.

- Introduzione del riciclato freddo al piede dell'elevatore caldo, normalmente impiegato per percentuali fino al 15-20%. Sono sufficienti un dosatore volumetrico o ponderale ed un nastro trasportatore. Il vaglio ri-selezionatore dell'impianto viene escluso.

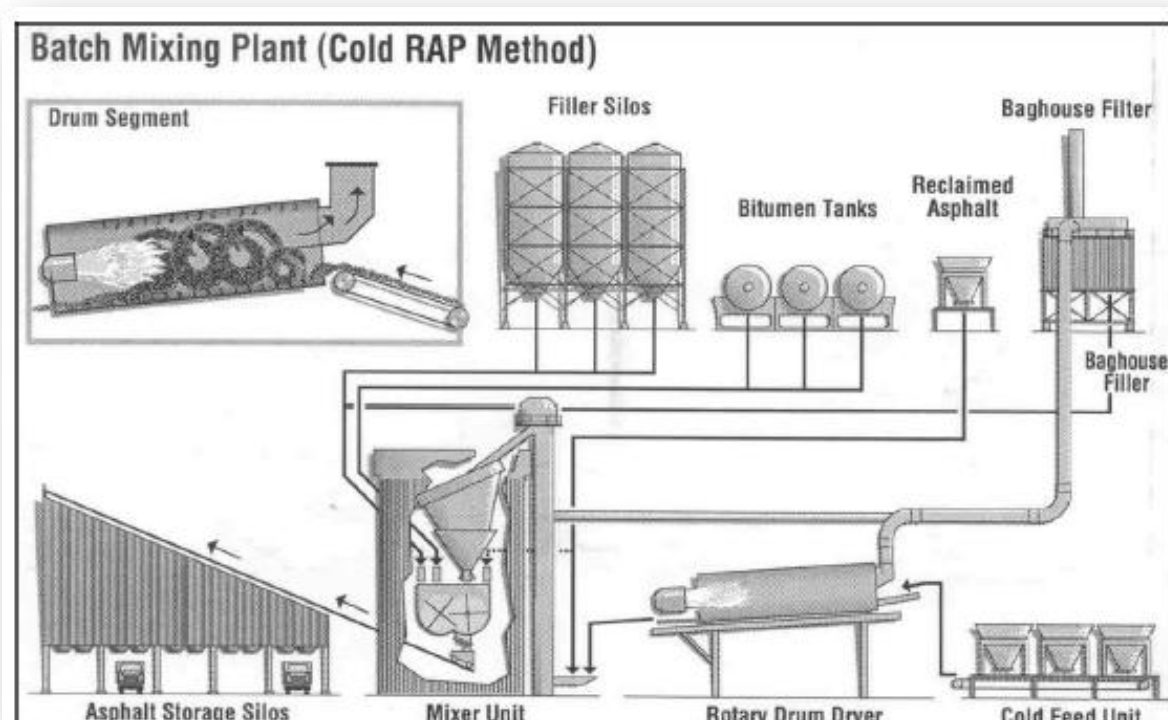


Figura 3 Impianto di riciclaggio a caldo con introduzione del RAP al piede dell'elevatore

- Introduzione del riciclato a freddo, ossia a temperatura ambiente, nella vasca di miscelazione, attraverso una tramoggia tampone installata sulla torre (di miscelazione). La tramoggia viene alimentata mediante un dosatore, un nastro trasportatore ed un elevatore a tazza. Nel miscelatore, insieme al fresato, vengono aggiunti gli aggregati vergini surriscaldati; qui avviene lo scambio termico tra i due materiali, con diminuzione della temperatura del prodotto finale, in funzione del tasso di materiale riciclato utilizzato, della sua umidità e della stessa temperatura ambiente. Il metodo è utilizzato per percentuali di fresato fino al 10-20%.
- Introduzione del riciclato nel cilindro essiccatore, attraverso un apposito anello di riciclaggio, che consente di raggiungere percentuali fino al 35%. L'alimentazione viene effettuata mediante un dosatore ed un nastro trasportatore ed è possibile garantire le esatte proporzioni di materiale vergine e riciclato, inserendo sui rispettivi nastri alimentatori stazioni di pesatura interconnesse.

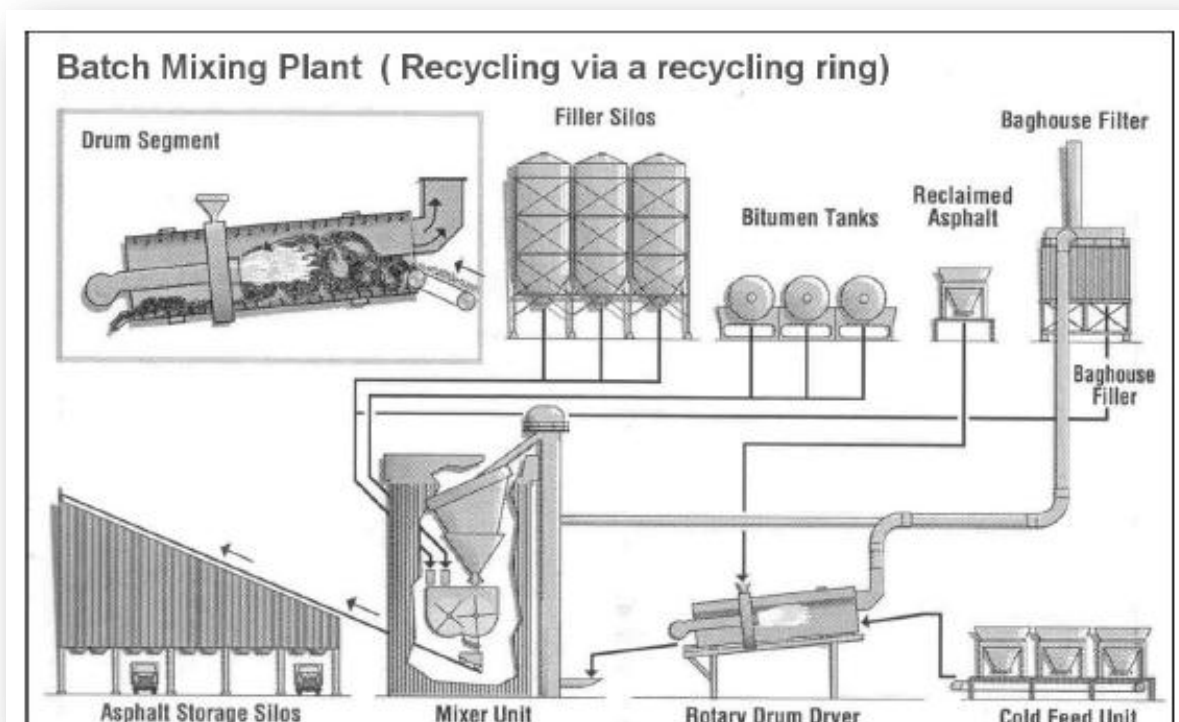


Figura 4 Impianto di riciclaggio a caldo con introduzione del RAP attraverso un apposito anello

- Combinazione ed utilizzo contemporaneo dei due metodi suddetti (RAP nell'anello del cilindro essiccatore e RAP freddo nel mescolatore) per raggiungere complessivamente percentuali di riciclato fino al 40% complessivi.
- Essiccazione e riscaldamento del riciclato, fino a 110-130°C, in uno speciale essiccatore in equicorrente, provvisto di camera di combustione esterna per salvaguardare al meglio le caratteristiche del bitume nella fase di scambio termico. Il materiale scaricato dall'essiccatore viene immesso in una tramoggia tampone riscaldata e coibentata, e di qui dosato nella tramoggia di pesatura degli inerti vergini. Viene successivamente immesso nella vasca di miscelazione insieme agli aggregati nuovi, leggermente surriscaldati, affinché il prodotto finale raggiunga una temperatura di circa 160°C. Si ottengono percentuali di riciclaggio attorno al 50%, sempre in relazione alla quantità del fresato.

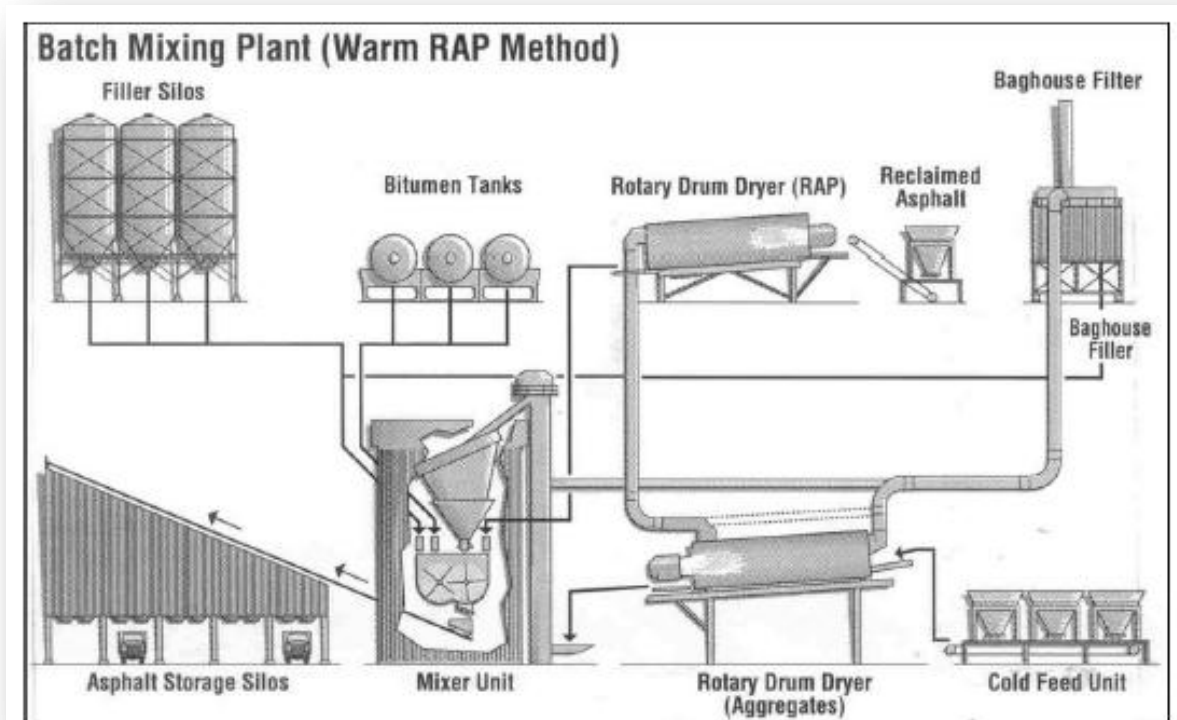


Figura 5 Impianto di riciclaggio a caldo con speciale essiccatore in equicorrente per il RAP

2.1.4 Impianto continuo

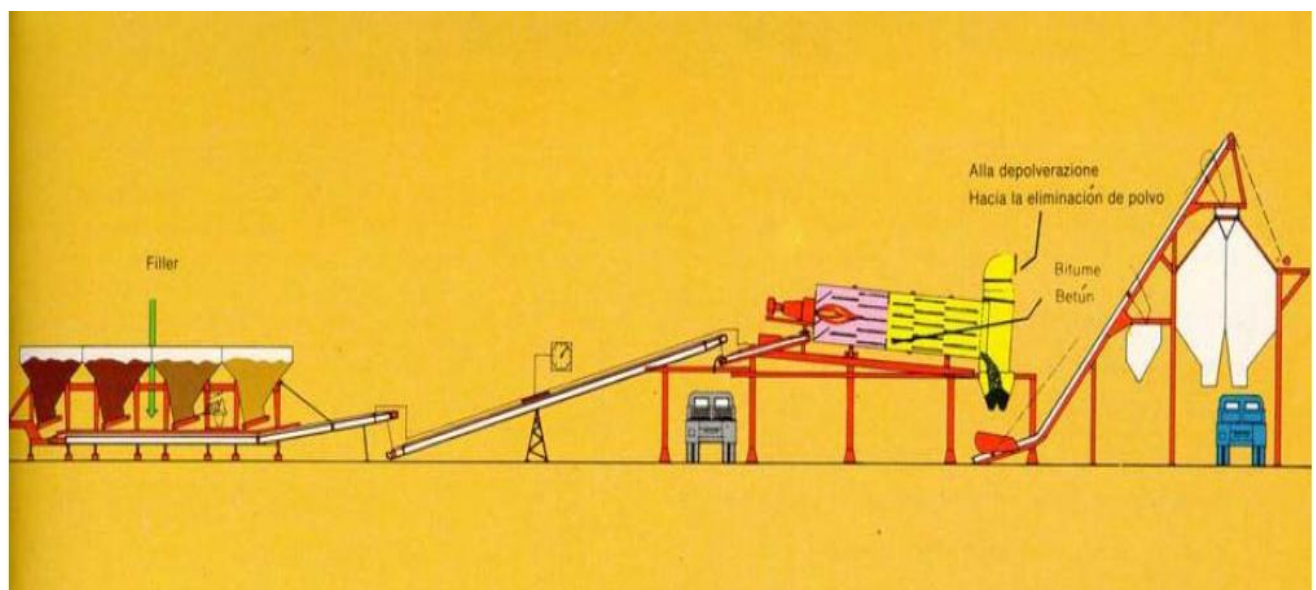


Figura 6 Impianto continuo

Lo scopo di questo impianto è quello di produrre conglomerato bituminoso seguendo un processo di tipo continuo, nel quale la produzione si svolge in sostanza in un'unica unità operativa.

Nell'impianto continuo, tipo "Drum Mixer", per la produzione di conglomerato bituminoso, diversamente dal discontinuo, la miscelazione del materiale avviene all'interno del tamburo essiccatore, che per ovvi motivi è assai più lungo, dovendo essere contemporaneamente essiccatore e miscelatore.

Anche in questo tipo di impianto, il processo produttivo consiste nel riscaldare ed asciugare gli aggregati che vengono mescolati in continuo all'interno del tamburo, assieme a bitume e filler.

Non essendoci però la torre di miscelazione, né il vaglio vibrante per la selezione degli aggregati, i costi di impianto sono notevolmente ridotti, e la sua produttività è maggiore rispetto al caso discontinuo.

I vantaggi di "Drum Mixer", rispetto a quelli tradizionali, risiedono oltre che nell'estrema semplicità concettuale, nel maggiore rendimento termico e nel minor numero di macchine presenti nell'impianto, con ridotte necessità d'energia elettrica e di manutenzione.

Tra gli svantaggi abbiamo, però, una qualità del prodotto finito inferiore, a causa dei minori controlli effettuati in fase di produzione, ed inoltre inconvenienti legati all'inquinamento: infatti, la presenza del bitume in prossimità di zone ad elevata temperatura provoca la formazione di vapori volatili ed oleosi difficilmente filtrabili.

Vediamo nel dettaglio com'è composto un impianto continuo, di tipo "Drum Mixer".

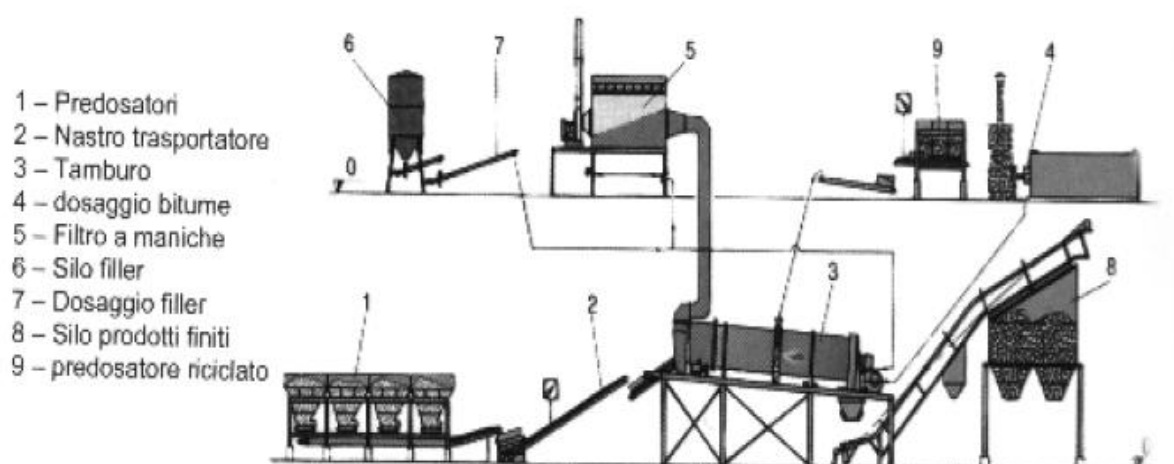


Figura 7 Schema impianto continuo

Questi impianti sono enormemente semplificati rispetto ad un impianto a ciclo discontinuo: gli aggregati vergini entrano dal lato del bruciatore e nella parte iniziale del cilindro avviene il loro riscaldamento, mentre nella rimanente parte viene spruzzato il bitume (già reso fluido) ed immesso il filler, in modo da poter consentire il mescolamento del conglomerato.

Il ciclo produttivo ha inizio dalle tramogge-alimentatori degli inerti; è necessario proporzionare la miscela in funzione della capacità del tamburo. Si può avere un controllo totale degli alimentatori, regolando la velocità dei nastri trasportatori e mantenendo le proporzioni desiderate: in questo modo la portata complessiva degli inerti che va nel tamburo miscelatore-essiccatore può essere facilmente aumentata o diminuita.

A questo punto del ciclo produttivo si rende necessario un controllo sulla qualità degli inerti, che devono essere stati preventivamente separati, per evitare una possibile miscelazione, con conseguente confusione delle granulometrie.

Dall'alimentatore, gli inerti vengono portati, mediante nastro trasportatore, al sistema di pesatura, che fornisce istante per istante il peso degli inerti, permettendo così di poter regolare al meglio il rapporto inerte - bitume: gli stessi sistemi di pesatura degli inerti e del bitume sono interconnessi tra loro, affinché il conglomerato prodotto sia uniforme e i rapporti tra i due materiali rimangano costanti.

Gli aggregati a questo punto entrano nel tamburo di miscelazione alla fine del bruciatore, affinché possano muoversi al suo interno nella stessa direzione dei gas (essiccatore in equicorrente); con questo principio i gas più caldi si sviluppano nella fase finale del tamburo di miscelazione e pertanto il bitume risulta protetto dagli effetti nocivi che deriverebbero dalla sua ossidazione e dal contatto diretto con la fiamma di combustione. Una delle principali differenze tra il sistema di miscelazione tradizionale, e quello di miscelazione nel tamburo, consiste nella diversa modalità di rivestimento dell'inerte. Le fasi che accompagnano questo processo sono le seguenti:

- gli inerti entrano nel tamburo di miscelazione; nella fase iniziale del riscaldamento l'umidità superficiale inizia a essere rilasciata dagli inerti con l'aumentare della temperatura;
- successivamente avviene il maggior incremento di temperatura, in quanto gli inerti raggiungono temperature attorno ai 77-82°C; in questo modo la maggior parte dell'umidità viene eliminata ed la velocità di incremento della temperatura della miscela, si stabilizza;
- quando la temperatura della miscela raggiunge gli 82-93°C, viene introdotto anche il legante; l'umidità rilasciata in questa fase produce un'espansione molto rapida del bitume, che provoca una significativa dilatazione superficiale del legante stesso, che "intrappola" le polveri e le particelle più grandi, provocando un rapido rivestimento degli inerti;
- eliminata la maggior parte dell'umidità degli aggregati e ricoperto l'inerte, la temperatura del conglomerato continua a salire fino al valore desiderato (valore di progetto); una volta raggiunta, il conglomerato viene scaricato tramite un nastro trasportatore inclinato, viene portato in un silos o in un serbatoio di stoccaggio, e mantenuto ad una temperatura costante fino al momento dell'uso.

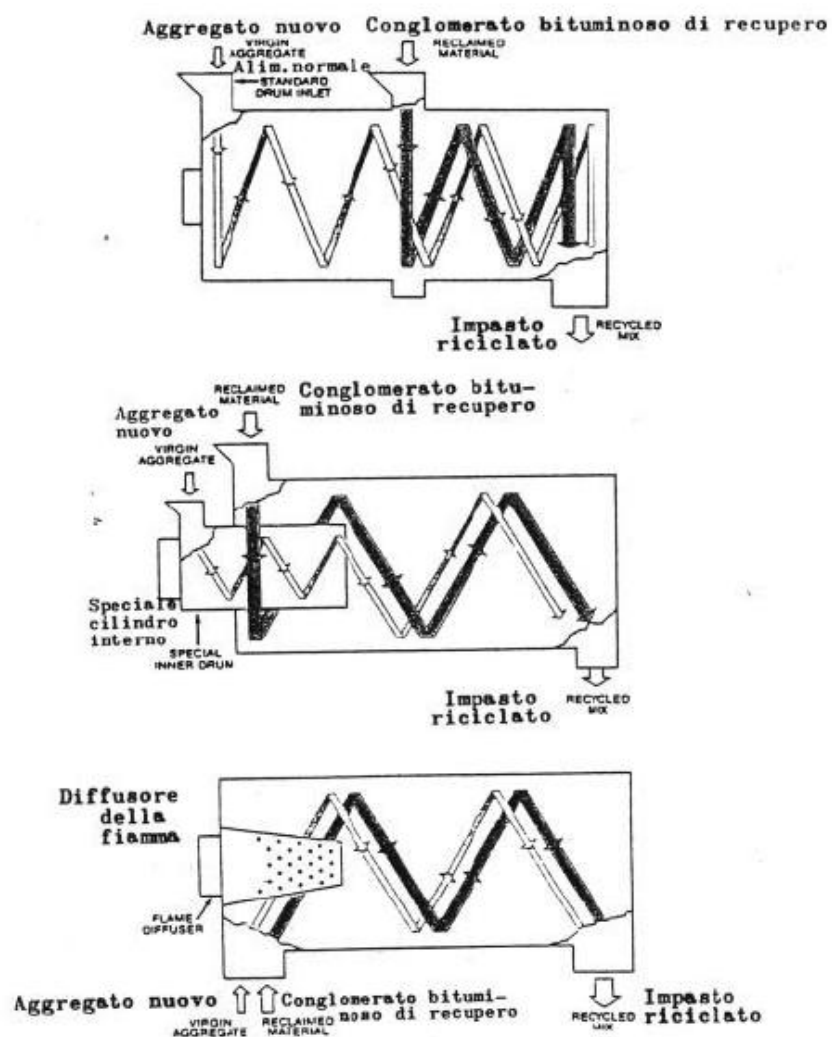
2.1.5 Modifica dell'impianto continuo per il riciclaggio

Questa tipologia di impianto, è quella che si presta maggiormente ad essere modificata, nel caso in cui si debbano produrre conglomerati con notevoli percentuali di materiale fresato (fino a 70%).

In questo caso, però, bisogna impedire che il bitume residuo ed il bitume nuovo in aggiunta vengano a diretto contatto con la fiamma del bruciatore, evitando così qualsiasi rischio di ossidazione del legante stesso.

Per scongiurare questo pericolo sono stati studiati diversi sistemi:

- sistema a doppia alimentazione (*dual-feed*): il materiale vergine viene immesso all'altezza del bruciatore ed inizia il suo riscaldamento; il RAP viene invece introdotto a metà cilindro, dove la fiamma del bruciatore non può più danneggiarlo; il riscaldamento del fresato avviene dunque per contatto, grazie al mescolamento con gli inerti vergini, nella seconda metà del cilindro;
- sistema del “cilindro nel cilindro” (*drum-in-drum*): il materiale vergine viene immesso all'altezza del bruciatore in uno speciale cilindro, interno al principale, ma più piccolo; il fresato, invece, viene introdotto poco dopo tra i due cilindri ed inizia a riscaldarsi, rimanendo tuttavia protetto dalla fiamma, grazie al cilindro interno che si interponendone tra i due ed evita loro qualsiasi possibile contatto; ad una certa distanza di sicurezza dalla fiamma, il cilindro interno termina e i due materiali (quello vergine e il fresato) si miscelano nella rimanente parte del cilindro principale;
- sistema *Pyrocone* (o a diffusione di fiamma): è un sistema di contatto della combustione e quindi della temperatura; la fiamma è completamente schermata da un cono taglia-fiamma costituito da materiale altamente refrattario, dotato di speciali fori;
- sistema “*shield*” (a schermo): uno schermo metallico è sistemato di fronte alla fiamma ed il fresato è immesso dalla parte opposta;
- in un quinto sistema il RAP viene inserito nel tamburo dalla parte opposta a quella del bruciatore ed ivi mantenuto per mezzo di speciali nervature.



Riciclaggio dei conglomerati bituminosi in centrale:
 In alto: schema dell'impianto «drum-mixer» con sistema a doppia alimentazione;
 in centro: schema dell'impianto «drum-mixer» con sistema a cilindro nel cilindro;
 in basso: schema dell'impianto «drum-mixer» con sistema a diffusione della fiamma («Pyrocone»).

Figura 8 Diverse modalità di introduzione del RAP

2.2 RICICLAGGIO A CALDO, IN SITU

2.2.1 Considerazioni generali.

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

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 altro materiale a quello recuperato: bitume nuovo, agenti attivanti per rigenerare il bitume invecchiato, eventuali inerti vergini per la correzione granulometrica della miscela. Dopo le aggiunte, il materiale è pronto per essere steso e compattato.

Questa tipologia di intervento è però limitata ai soli strati superficiali, potendo agire su una profondità di circa 5-6cm, per cui non può essere utilizzata per pavimentazioni che presentino anche danni strutturali negli strati più profondi. In questo modo, potendo intervenire solo su spessori ridotti, vengono eliminate alcune forme di ammaloramento, come le fessure superficiali, si ripristinano la tessitura e l'aderenza, con conseguente risvolto positivo sulla sicurezza stradale.

Nel caso di fresatura a caldo, 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; appositi pannelli (anche detti preriscaldatori) permettono di far raggiungere alla superficie una temperatura di circa 110°C, per agevolare le operazioni di scarifica; il materiale fresato raggiungerà successivamente una temperatura indicativa di 170°C, alla quale potrà essere lavorato senza però danneggiare il legante. In questa fase operativa la composizione granulometrica non viene alterata ed il bitume (anche se modificato) non viene rovinato; inoltre anche lo sviluppo di fumi dovuti all'umidità presente nella pavimentazione, e di

gas prodotti dal bitume stesso alle alte temperature, è sensibilmente ridotto, e ciò comporta una maggior sicurezza anche dal punto di vista lavorativo, per gli operai del settore.

Il riciclaggio in situ a caldo presenta notevoli vantaggi, tra cui:

- risparmio in relazione al trasporto del materiale; questi impianti, seppur comportino un notevole impatto ambientale, permettono di ridurre al contempo i percorsi ed il numero di mezzi di trasporto che producono gas di scarico, polveri sottili e rumore;
- risparmio di combustibile; il materiale appena fresato presenta infatti una minore quantità di umidità rispetto a quello presente nei silos di stoccaggio, pertanto i materiali trattati in sito, saranno sottoposti ad un preriscaldamento minore;
- risparmio relativo alle spese di stoccaggio del materiale fresato, e la conseguente copertura dei cumuli per proteggerli dalle intemperie;
- minor disturbo al traffico veicolare, in quanto i trasporti necessari sono relativi solo a pochi materiali d'apporto, quali inerti vergini di aggiunta, bitume nuovo ed eventuali additivi per ringiovanire il bitume;
- risparmio relativo alla quantità di bitume nuovo, potendo utilizzare maggiori percentuali di conglomerato bituminoso fresato (anche il 100%), rispetto ad una tecnologia in impianto fisso.

Di conto possono presentarsi anche i seguenti svantaggi:

- eccessivo inquinamento causato dall'impossibilità pratica di portare su strade depuratori efficaci, a causa dell'enorme ingombro che essi rappresenterebbero: proprio per questo motivo, ad esempio, la tecnologia non è utilizzabile nelle gallerie;
- enorme difficoltà di ottenere una correzione granulometrica esatta: gli aggregati vergini devono essere preventivamente stesi sulla pavimentazione per mezzo di una spandigraniglia, ed in seguito al passaggio della fresatrice, devono rimanere, assieme al fresato, in forma di cordone davanti all'impianto in movimento, sulla strada stessa. Per questo motivo il riciclaggio in situ diventa antieconomico e tecnicamente non consigliabile, nel caso in cui debba essere effettuata una correzione granulometrica superiore al 30%.

2.2.2 Treni di riciclaggio

Il riciclaggio a caldo si effettua in sito mediante appositi “treni di riciclaggio”, che, come già accennato prima, prevedono una serie di attrezzature che hanno lo scopo di svolgere le seguenti operazioni:

- scarifica della pavimentazione, preriscaldata o meno, fino alla profondità voluta;
- riscaldamento del materiale fresato, all'interno del tamburo essiccatore;
- aggiunta di materiali vergini (bitume e inerti lapidei);
- miscelazione del conglomerato riciclato;
- stesa del conglomerato riciclato per mezzo di barra finitrice e compattazione con rullo tradizionale.

Tuttavia i sistemi di riciclaggio che tratteremo in questa sede, si differenziano tra loro per il tipo di fresatura che viene effettuata, per il tipo di pavimentazione che si va a scarificare e per il tipo di pavimentazione che si vuole ottenere.

2.2.3 Tecnologia Marini

Nel campo delle tecnologie di riciclaggio a caldo in sito di pavimentazioni flessibili, la Marini, in collaborazione con la Pavimental, ha sviluppato tecnologie innovative, che agli inizi degli anni '80, si sono concretizzate sui cantieri di manutenzione stradale, attraverso il treno di riciclaggio Marini ART 220.

L'ART 220 è composto da:

- un trattore semovente attrezzato per raccogliere il materiale fresato da terra, e trasferirlo al rimorchio. Sul trattore sono anche installati il deposito del bitume modificato e la caldaia oleotermica per riscaldamento del legante e dei relativi circuiti;
- un rimorchio attrezzato con:
 - dosatore ponderale in continuo del materiale fresato;
 - dosatore ponderale in continuo del bitume modificato;

- tamburo riscaldatore-mescolatore, utilizzato per surriscaldare il materiale fresato, fino alla temperatura ottimale per la miscelazione con il nuovo legante;
- un gruppo elettrogeno per l'alimentazione elettrica generale.

Il processo di riciclaggio ha inizio con una fresa a freddo, che scarifica la pavimentazione. Successivamente il materiale fresato insieme agli inerti per la correzione granulometrica, precedentemente disposti sulla pavimentazione mediante uno spandigraniglia, entrano nel drum-mixer, tamburo essiccatore-mescolatore, precedentemente descritto per gli impianti fissi di tipo continuo. Nel tamburo, il materiale fresato si unisce al bitume nuovo, mescolandosi per un tempo complessivo di circa sei minuti; alla fine di questa fase il conglomerato prodotto, ad una temperatura di circa 135°C, viene steso sulla pavimentazione e successivamente rullato.

Le macchine ART, purtroppo, hanno un grosso svantaggio: producono un fumo blu, derivante dal contatto fra la fiamma del bruciatore e il materiale fresato.

2.2.4 Tecnologia Martec

Il treno AR 2000 Martec è nato all'inizio degli anni '90, per la realizzazione di interventi superficiali di riciclaggio di pavimentazioni in conglomerato di bitume non modificato, previa fresatura a caldo.

Nella sua configurazione, il treno Martec si compone:

- due Preriscaldatori;
- un Preriscaldatore/Fresa;
- un Preriscaldatore/ Essiccatore/Mescolatore.

Nel ambito delle tecnologie di riciclaggio in sito a caldo, la Martec si è dimostrata la più compatibile, oltre che la più efficiente, per interventi superficiali, grazie ad un preriscaldamento della pavimentazione, con l'utilizzo di aria forzata riciclata, preventivamente riscaldata a 700°C con gasolio, e non propano o altri gas; ciò garantiva una maggior sicurezza sul lavoro, e allo stesso tempo un minor impatto ambientale, grazie all'eliminazione di emissioni nocive.

La tecnologia di riscaldamento brevettato, comune a tutti i macchinari componenti il treno, combina aria calda forzata ad alta velocità, con basso calore di infrarossi, e garantisce un'efficace penetrazione del calore stesso per evitare che gli aggregati si fratturino durante la fresatura.

Il sistema è composto da:

- un bruciatore diesel;
- un soffiatore a turbina dell'aria di combustione;
- un soffiatore per l'aria calda di circolazione;
- un plenum di riscaldamento in acciaio inossidabile.

Il bruciatore riscalda un notevole quantitativo d'aria all'interno della camera di combustione, in acciaio inossidabile, termosaldato; da qui l'aria calda viene forzata all'interno dei tubi di riscaldamento collocati nel plenum, anch'esso isolato termicamente.

Sul fondo dei tubi sono presenti migliaia di piccoli fori, attraverso i quali l'aria calda viene soffiata, ad alta velocità, sulla superficie stradale.

La maggior parte dell'ossigeno dell'aria fresca viene usato per la combustione, per cui l'aria calda usata per il riscaldamento ha un basso contenuto di ossigeno, e ciò evita l'ossidazione del legante bituminoso.

L'aria calda viene a questo punto aspirata dalla superficie stradale e soffiata all'interno della camera di combustione, per essere nuovamente riscaldata; durante questo processo il 10% dell'aria viene scaricato per far spazio ad aria fresca, necessaria alla combustione, e ciò viene garantito dal soffiatore a turbina.

Per regolare la posizione del plenum di riscaldamento, vengono usati quattro cilindri di sollevamento e due cilindri di inclinazione.

Il sistema di gestione della fiamma è completamente computerizzato, e combinato ad un sistema avanzato di controllo del combustibile, che garantisce così l'affidabilità della fase operativa stessa, per un funzionamento sicuro e continuo.

L'operatore può monitorare ed eventualmente regolare la temperatura dell'aria calda, dal posto di guida.

La combinazione tra combustibile diesel e sistema di riscaldamento ad aria calda, permette di realizzare consistenti economie, ambiti lavorativi molto più sicuri e più sani, nonché un risparmio energetico e di risorse naturali.

Il sistema di riscaldamento brevettato, comune a tutte le unità componenti il treno di riciclaggio, garantisce un'efficace penetrazione del calore, che prepara la pavimentazione per gli ulteriori trattamenti.

Il Preriscaldatore/Fresa, è stato progettato per scaldare e ammorbidire la pavimentazione stradale, e fresarla fino alla profondità stabilita. Sulla stessa unità è installato un sistema per aggiungere, direttamente sul materiale da fresare, additivi e rigeneranti, mediante controllo computerizzato.

La macchina comprende tre tamburi fresanti, ed i suoi componenti sono assemblati e saldati su una struttura rigida e robusta. I due tamburi laterali anteriori e quello centrale posteriore, possono essere facilmente regolati, per ottenere larghezze di fresatura differenti. I rulli della fresa sono dotati di un meccanismo idraulico flessibile, per controllarne i movimenti.

La profondità è regolata con precisione grazie ad un sistema automatico di controllo.

L'ultima parte del treno di riciclaggio è costituita dal Preriscaldatore/Essiccatore/Miscelatore.

Eventuale materiale vergine può essere aggiunto per soddisfare le prescrizioni tecniche del prodotto finale.

L'umidità, sempre presente nelle pavimentazioni deteriorate, viene così eliminata. La miscela viene successivamente sollevata da un nastro convogliatore e trasferita al miscelatore a doppio albero per il confezionamento finale prima della stesa e della compattazione, ed il prodotto che ne deriva è di qualità paragonabile ad un conglomerato confezionato a caldo in impianto fisso.

Il Preriscaldatore/Essiccatore/Miscelatore, è dotato di una tramoggia per gli inerti aggiuntivi, la cui quantità viene regolata da un dispositivo di misurazione controllato dall'operatore, in funzione del tipo di intervento e della sua formulazione di progetto.

Il materiale fresato viene movimentato da due sistemi di coclee: quelle anteriori miscelano e spandono il cumulo sotto il plenum di riscaldamento, mentre quelle

posteriori predispongono la miscela riscaldata affinché sia raccolta dal nastro convogliatore per alimentare il gruppo miscelatore.

La velocità del nastro convogliatore può essere regolata per renderla compatibile con la velocità di avanzamento dei lavori.

Il miscelatore a doppio albero ha una capacità di 300 t/h e può miscelare perfettamente il materiale riciclato nell'arco di tempo 15-30 secondi.

2.2.5 Tecnologia Wirtgen



Figura 9 Treno di riciclaggio Wirtgen

La tecnologia ha un basso impatto sulle risorse naturali, in quanto riutilizza al 100% i preziosi materiali di partenza e richiede solo pochi materiali da costruzione vergini, con conseguente riduzione dei costi.

Le efficienti macchine di grossa taglia eliminano, in tempo molto breve, numerosi ed estesi ammaloramenti superficiali fino a 6 cm di profondità, quali ormaiamenti, fessurazioni, sgranamenti e lisciature del piano stradale, composizione granulometrica errata o contenuto di bitume eccessivo.

Nella prima fase dell'innovativo processo di rigenerazione, la riscaldatrice semovente precede immediatamente il remixer, riscaldando con radiatori a infrarossi il manto bituminoso. Grazie alla potenza termica regolabile, il manto stradale ammalorato viene portato con delicatezza alla temperatura di riplastificazione desiderata. La combustione

ottimizzata del propano garantisce un'elevata potenza termica e contenuti consumi di gas.

La larghezza operativa totale dei pannelli radianti è variabile in continuo fino a un massimo di 4,5 m. I gruppi radianti brandeggiabili e l'idroguida leggera in manovra, che permette di sterzare tutte quattro le ruote, consentono di ottenere risultati ottimali nelle curve strette.

Il remixer semovente riscalda, scarifica, mescola e ripone in opera il materiale del manto stradale. In funzione dello specifico ammaloramento superficiale, nel processo di rigenerazione vengono aggiunti del conglomerato vergine e dei leganti. Una capace tramoggia accoglie il conglomerato vergine scaricato dal camion. Da lì, un nastro trasportatore provvede ad addurlo al processo attraverso un serbatoio dosatore. Una cisterna termica consente di immagazzinare a bordo della macchina il bitume caldo.

Esistono due varianti di stesa Remix e Remix Plus.

Nel metodo Remix gli alberi scarificatori rotanti del remixer scarificano il manto bituminoso riscaldato, mentre viene iniettato del legante. Una lama raschiatrice asporta il materiale con precisione e lo convoglia nel mescolatore, dove il conglomerato bituminoso della pavimentazione esistente viene impastato omogeneamente con il conglomerato vergine aggiunto attraverso il nastro convogliatore. La coclea distributrice depone quindi il conglomerato rigenerato sul piano di posa preriscaldato per farlo stendere e precompattare dal banco nel piano rispetto delle quote e della sagoma prescritte.

Anche il metodo Remix Plus prevede il riciclaggio del manto deformato e la stesa del materiale rigenerato. Al tempo stesso, però, il nastro convogliatore vi depone sopra il conglomerato vergine di qualità dietro al rasatore e la seconda coclea lo distribuisce. Infine il banco di stesa lo compatta.

L'automatismo di levigazione integrato assicura il rispetto delle quote plano-altimetriche prescritte. Una coclea distributrice controllata da sensori distribuisce uniformemente il materiale deposto su tutta la larghezza operativa davanti al banco. I sistemi idraulici di tamper e vibrante garantiscono la precompattazione affidabile dello strato d'usura. Dopo la compattazione finale a mezzo di rulli, il nuovo manto è transitabile dal traffico veicolare non appena si è raffreddato.

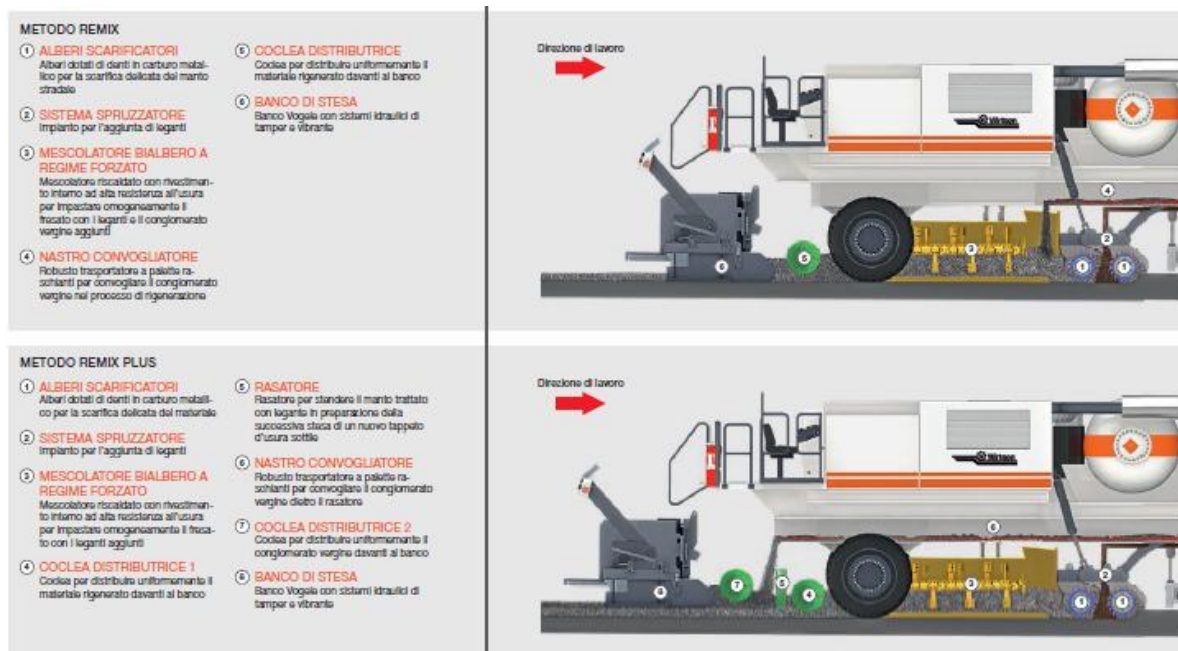


Figura 10 Remix e Remix Plus

2.2.6 Tecnologia Pavirec



Figura 11 Macchinari in opera per l'esecuzione di riciclaggio a caldo

Tra le tecnologie disponibili spicca oggi Pavirec (Socotherm Infraviab), tecnica avanzatissima brevettata per il riciclaggio a caldo in opera delle pavimentazioni deteriorate in asfalto. Il sistema consiste nella rimozione della pavimentazione vecchia, tramite riscaldamento, mescolando materiali aggiuntivi direttamente sul posto, con un miscelatore verticale che evita la rottura degli aggregati. Questo sistema permette quindi di riutilizzare al 100% il materiale esistente, ottenendo risparmi sia in termini economici che ambientali.

L'attuale tecnologia e l'attrezzatura impiegata sono ancora in fase di prototipo e fungono da base per un ulteriore sviluppo progettuale.

Il sistema in esame, rispetto a quelli tradizionali, offre vantaggi innegabili in quanto permette di:

- risparmiare sull'impiego di nuovo inerte, in quanto il materiale viene completamente riutilizzato, riducendo così l'impatto ambientale;
- ridurre del 75-80% l'apporto di nuovo bitume; con questo fattore implica notevoli risparmi di prodotti petroliferi;
- eliminare i costi legati all'esportazione, al trasporto e allo smaltimento del vecchio materiale e alla riduzione del trasporto di nuovi materiali;
- eliminare gli scarti di fresatura;
- evitare operazioni di pulizia delle superfici di posa dello strato di ancoraggio, in quanto viene effettuata esclusivamente una saldatura a caldo degli strati esterni sopra allo strato esistente senza utilizzo di alcun tipo di membrana elastomerica di ancoraggio;
- eseguire l'operazione in una fase operativa unica, realizzata al 100% in cantiere da un unico impianto mobile (rimozione del vecchio asfalto, integrazione del materiale nuovo di aggiunta, produzione di nuovo conglomerato rigenerato, relativa stesa);
- ridurre i tempi di lavoro con buona capacità di produzione giornaliera;
- ricostruire la curva granulometrica di progetto con la possibile correzione della granulometria.

La novità proposta da Socotherm prevede sette fasi, portate a termine da un solo treno di macchinari lungo 62,7 m.



Figura 12 | treno di macchinari utilizzato per le fasi di lavorazione

Le fasi del processo in dettaglio sono le seguenti:

- riscaldamento della pavimentazione mediante preriscaldatori radianti: il treno è composto da preriscaldatori equipaggiati con una camera di combustione a onde radianti; il mezzo di scambio, costituito da una miscela di gas combusti, permette al sistema di riscaldare uniformemente lo strato superiore della pavimentazione fino alla temperatura ottimale;
- disaggregazione: una fresa rotante trasversale de-coesiona il conglomerato riscaldato con l'eventuale miscelazione degli aggregati pre-bituminati;
- additivazione del legante e miscelazione: si aggiunge il legante, e un miscelatore particolarmente elaborato ed efficace agisce su tutta la larghezza e lo spessore da trattare; è in grado di assicurare una miscelazione per una durata superiore al minuto;
- distribuzione: un sistema di distribuzione del legante per rigenerazione, da una parte e dall'altra del miscelatore, distribuisce tale legante su tutta la larghezza da trattare in costante relazione con carrello miscelatore;
- stesa: una barra finitrice tradizionale, riscaldata elettricamente, stende in maniera uniforme il conglomerato riciclato;
- rullatura: un rullo esegue la compattazione finale;
- controllo con prove in situ e laboratorio.

2.3 RICICLAGGIO A FREDDO, IN IMPIANTO

2.3.1 Considerazioni generali

Per riciclaggio a freddo intendiamo qualsiasi tecnica che permette il riutilizzo del conglomerato bituminoso, in cui l'aggregato lapideo di primo impiego, aggiunto all'atto del confezionamento, non è preventivamente riscaldato, ma aggiunto a temperatura ambiente.

Il RAP, ottenuto dalla fresatura della vecchia pavimentazione, viene miscelato con emulsione bituminosa o bitume schiumato, agenti rigeneranti ed eventualmente inerti vergini (per l'eventuale correzione della curva granulometrica). L'emulsione bituminosa e il bitume schiumato lavorano in modo diverso, e, pur presentando tempi di maturazione differente, raggiungono risultati molto simili.

Il riciclaggio a freddo in impianto fisso, può essere effettuato sia con macchine ed attrezzature specifiche installate in modo permanente, sia con particolari impianti semoventi posti nei cantieri; possono anche essere utilizzati impianti per la produzione di misto cementato opportunamente modificati.

Negli impianti fissi, nati esplicitamente per questa tipologia di riciclaggio, i dosaggi del RAP, del bitume nuovo e degli aggregati, possono essere effettuati con maggior precisione, ed anche in base alle caratteristiche del fresato, possono essere variate le componenti della miscela; la produttività è circa 100-150 t/h.

La scelta di riciclare a freddo, si effettua soprattutto quando si ha la necessità di utilizzare del materiale fresato, precedentemente accumulato in cantiere o depositi temporanei.

La *fresatura a caldo* richiede l'immediato re-impiego del conglomerato bituminoso recuperato che, con il raffreddamento, non sarebbe più lavorabile, e può essere quindi utilizzato solo nei processi di riciclaggio in sito; la *fresatura a freddo*, invece, fornisce un conglomerato di recupero che resta sciolto e lavorabile e può, quindi, essere riutilizzato sia nei processi di riciclaggio in sito che in quelli in centrale.

Inoltre, uno dei vantaggi del riciclaggio a freddo, consiste nel non dover ricorrere ad energia termica nei processi di produzione: ciò comporta notevoli vantaggi dal punto di vista economico, energetico ed ambientale.

Un altro importante vantaggio che deriva da questo tipo di impianti, consiste nella facilità di smobilitazione, che ne permette il posizionamento vicino alla zona di intervento, riducendo i costi ed il dispendio energetico derivante dai trasporti.

Anche in questo caso esistono due tipologie di impianto: continuo e discontinuo.

La differenza fondamentale è rappresentata dalla modalità di dosaggio degli inerti e del legante; nel primo caso il ciclo sarà, per l'appunto, discontinuo, poiché il materiale verrà pesato, e raggiunto un determinato quantitativo, verrà inviato nel ciclo produttivo: la produzione oraria risulterà nettamente inferiore, ma a vantaggio della precisione del dosaggio stesso.

Nel secondo caso, invece, l'alimentazione dell'impianto avverrà in maniera continua, tramite l'immissione su nastri trasportatori degli inerti, in base a volumi prestabiliti: in questo caso la produzione oraria sarà sicuramente maggiore, ma con una minor precisione del dosaggio dei materiali.

Nel riciclaggio a freddo le miscele sono composte da:

- materiale di recupero, proveniente dalla fresatura o scarifica di una pavimentazione;
- legante bituminoso, sotto forma di emulsione bituminosa o bitume schiumato;
- filler (additivi);
- acqua di aggiunta, per un miglioramento della lavorabilità;
- aggregati vergini di integrazione, per correggere la curva granulometrica degli inerti provenienti dal materiale di recupero .

Va posta particolare attenzione alla determinazione delle caratteristiche del fresato, che permetterà conseguentemente regolare la quantità/qualità degli altri componenti della miscela, con lo scopo di ottenere il miglior prodotto finale possibile.

L'impianto fisso è solitamente composto da:

- un sistema di frantumazione e ri-selezione del fresato;
- due o più predosatori per il fresato e per gli aggregati di integrazione;
- un silos per il cemento con abbinata una coclea a velocità variabile;
- un serbatoio di stoccaggio dell'emulsione bituminosa o del bitume schiumato;
- un serbatoio per l'acqua con misuratore di portata;
- rampa per l'emulsione;

- attrezzature e strumenti di controllo e pesatura, al fine di garantire un costante controllo di processo;
- un nastro di carico del prodotto finito sull'autocarro, o apparecchiatura di scarico dal mescolatore.

Dopo una preventiva frantumazione e ri-selezione del fresato, quest'ultimo e gli aggregati vergini di apporto necessari per la correzione della curva granulometrica, vengono convogliati al mescolatore, per mezzo di nastri trasportatori. Qui avviene la miscelazione, assieme al legante, che può essere sotto forma di emulsione bituminosa o bitume schiumato, in percentuali che vanno dal 3% al 6%, assieme all'acqua di aggiunta, utile per migliorare la lavorabilità della miscela, e al filler; i possibili additivi possono essere calcarei o silicei, ma indubbiamente il più utilizzato è il cemento, in percentuali che vanno dall'1 al 3%; la sua funzione è quella di migliorare le caratteristiche del conglomerato in termini di resistenza, e di essere un catalizzatore per favorire la rottura nel caso dell'emulsione.

Una volta pronta la miscela, il conglomerato bituminoso viene caricato sui mezzi e portato in cantiere, per essere successivamente posto in opera e compattato, ricostituendo così la pavimentazione originaria.

2.3.2 Le emulsioni bituminose

Il bitume, a temperatura ambiente, è un liquido estremamente viscoso, per cui difficilmente lavorabile; tuttavia una modalità, oltre al riscaldamento, che permette di ovviare a questo inconveniente, consiste nell'emulsione con acqua. I vantaggi di questa tecnica sono notevoli, perché oltre a non dover riscaldare preventivamente il bitume, l'emulsione può essere utilizzata con inerti freddi o umidi: da ciò ne deriva un notevole risparmio in termini economici, energetici ed ambientali.

Un'emulsione è composta da due liquidi immiscibili, uno disperdente (l'acqua) e l'altro disperso (il bitume) sotto forma di goccioline.

La presenza di una sostanza attiva in superficie, un emulsionante, impedisce alle particelle di bitume di raggrupparsi, formando attorno a loro un film protettivo; si creano quindi delle forze repulsive che mantengono le particelle di bitume disperse nella

fase acquosa continua; in genere la quantità di bitume nell'emulsione, si aggira attorno al 60% del volume totale, mentre il rimanente 40% è costituito da acqua.

Successivamente alla miscelazione con il materiale, l'acqua viene eliminata e le particelle di bitume si aggregano, formando una pellicola ininterrotta che, depositandosi sulla superficie dell'inerte, lo riveste. Si parla in questo caso di “rottura” (dell'emulsione).

E importante, inoltre, che l'emulsione stessa sia “tagliata su misura”, cioè adeguata ai materiali e alle modalità operative del singolo caso. Infatti, quando si verifica la “rottura” ed il bitume si separa dalla sospensione acquosa, la viscosità del liquido aumenta in modo significativo; la sottile pellicola di legante, che ora riveste le singole particelle del materiale, rende però più difficoltosa la fase di costipamento, proprio a causa della sua viscosità e della sua bassa temperatura. Perciò, per una buona riuscita del trattamento, sono necessarie emulsioni la cui rottura dovrebbe avvenire solo dopo o durante la fase di compattazione.

Il fenomeno della “rottura” si articola in tre stadi:

- *decantazione*: le goccioline di bitume sedimentano;
- *flocculazione*: le particelle di bitume si avvicinano;
- *coagulazione*: le particelle di bitume fondono tra loro.

Successivamente alla rottura si verifica la presa, ossia la fase in cui il bitume perde l'acqua rimasta al suo interno, e si stringe sempre più intorno all'inerte. Quando il bitume, totalmente anidro, disperde le componenti più volatili in esso contenute, l'adesione è completa, ed il legante che rimane è costituito solamente da idrocarburi non volatili.

Questo fenomeno può avvenire per diversi motivi:

- perdita di acqua per evaporazione o per assorbimento da parte degli aggregati;
- coagulazione chimica dovuta ad un processo di reazione tra l'emulsione e l'aggregato;
- disturbi meccanici provocati da elevate pressioni di pompaggio, processi di miscelazione e sforzi di costipamento;
- composizione chimica dell'emulsione.

La stessa velocità di rottura è influenzata da molti fattori, come ad esempio la temperatura dell'emulsione, quella dell'ambiente, la natura degli inerti, le dimensioni delle particelle di bitume disperse, le modalità di esecuzione degli lavori.

Si distinguono a riguardo emulsioni:

- a rottura super rapida (RR);
- a rottura rapida (ER);
- a rottura media (EM);
- a rottura lenta (EL);
- a rottura sovrastabilizzata (LL).

Dal punto di vista chimico invece, esistono emulsioni di due tipi, quelle anioniche (o basiche) e quelle cationiche (o acide), la cui differenza fondamentale è relativa alla carica polare che si fissa sulla superficie del globulo di bitume: in un'emulsione anionica gli ioni assumono una carica negativa in una fase alcalica, mentre in un'emulsione cationica assumono una carica positiva in una fase acida.

Si sostiene che un'emulsione anionica si “rompe” solo quando l'acqua che contiene il bitume in sospensione evapora o viene assorbita (dall'aggregato o dal cemento). Le emulsioni cationiche si rompono “chimicamente”; ciò implica che vengono aggiunti, durante il processo di produzione, particolari prodotti chimici i quali provocheranno la separazione del bitume dall'acqua dopo un determinato periodo di tempo. Effettivamente però entrambi i tipi di emulsione si comportano nello stesso modo: “si rompono” quando l'acqua viene materialmente eliminata e se la carica sulle particelle di aggregato è opposta rispetto a quella sulle particelle bituminose, determinando così un fenomeno di attrazione.

Nel caso di emulsione anionica e aggregato acido (silice, quarziti, porfido e basalto), non si verifica spontaneamente la rottura dell'emulsione, e di conseguenza non sussiste adesione tra legante e aggregato; proprio per questo motivo l'uso di emulsioni basiche è sempre minore, seppur queste ultime siano più economiche e di più facile produzione; le emulsioni acide inoltre rispondono molto meglio a esigenze tecniche.

Seppur le miscele a freddo si caratterizzano per ridotti consumi energetici e per i bassi livelli di emissioni, le emulsioni bituminose, che hanno lo scopo di veicolare il bitume tra gli inerti, presentano anche i seguenti svantaggi:

- il rivestimento degli inerti ha inizio solo dopo la “rottura” dell’emulsione (che tuttavia può richiedere anche dei mesi), affinché vengano raggiunte le necessarie caratteristiche meccaniche nel periodo di maturazione della miscela stessa;
- l’emulsione bituminosa può rivestire solo parzialmente le pezzature più grandi.

2.3.3 Il bitume schiumato

Il procedimento alla base della tecnologia del bitume schiumato è molto semplice. Si inietta acqua fredda (generalmente il 2-3%) nel bitume riscaldato a circa 180°C in un’apposita camera di espansione. Quando l’acqua entra in contatto con il bitume caldo, per effetto della conduzione del calore, si riscalda fino a diventare vapore, passando così dallo stato liquido allo stato gassoso mediante una reazione di espansione; difatti, le bolle di vapore coperte da una pellicola di bitume fanno assumere al legante una consistenza schiumosa (tipo “mousse”), con aumento di volume, rispetto a quello allo stato fluido, di circa 15-20 volte, in funzione della percentuale d’acqua e del tipo di bitume utilizzato. Quando le bolle scoppiano, a causa dell’instabilità della massa schiumosa, i frammenti di bitume si disperdono tra gli aggregati lapidei e aderiscono alla frazione fine, creando una malta che lega gli elementi più grossolani.

A seguito del processo di espansione, che può essere agevolato dall’eventuale insufflazione di aria, la viscosità del legante viene sensibilmente ridotta, per cui il bitume risulta, a questo punto, adatto ad essere distribuito uniformemente nella miscela di materiali da costruzioni (fresato e aggregati vergini).

I notevoli vantaggi che il bitume offre rispetto alle emulsioni bituminose, sono:

- diminuzioni dei costi sostenuti per il legante e il suo trasporto, ed in generale del processo produttivo;
- garanzia di un buon ricoprimento degli aggregati;
- buone prestazioni meccaniche;
- dopo la miscelazione con bitume espanso, il materiale ottenuto può essere immediatamente steso e compattato;
- il materiale trattato con il legante schiumato risulta lavorabile per lunghi periodi.

Il bitume espanso viene caratterizzato attraverso due parametri: il *rapporto di espansione* (“*expansion ratio*”), ossia il rapporto tra volume massimo del bitume allo stato espanso e quello allo stato originario, e il *tempo di semitrasformazione* (“*half life*”), inteso come il tempo, misurato in secondi, che occorre affinché la schiuma si depositi, fino a raggiungere la metà del volume massimo ottenuto.

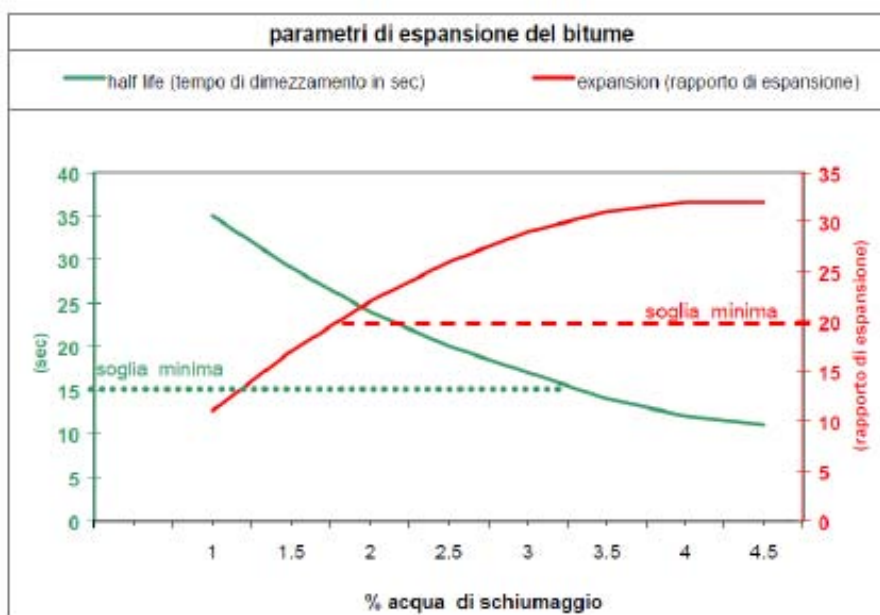


Figura 13 Rapporto di espansione e tempo di semitrasformazione

Entrambe le caratteristiche dipendono dalla temperatura del bitume, dalla quantità di acqua addizionata, dalla pressione di iniezione del legante nella camera di espansione, dalla presenza di sostanze antischiuma, come depositi di silicio; le schiume migliori sono in genere quelle che riescono ad ottimizzare sia l’espansione che il tempo di semitrasformazione; inoltre i bitumi più morbidi possiedono in genere caratteristiche schiumogene migliori, mentre quelli più duri si utilizzano preferibilmente in condizioni climatiche con elevate temperature. Relativamente alla qualità del legante, i bitumi con alti valori di viscosità, si espandono più facilmente, e hanno rapporti di espansione e tempi di semitrasformazione maggiori rispetto a quelli di bitumi meno consistenti.

Inoltre, il bitume schiumato, interagendo con il filler, forma una vera e propria matrice, che sostiene la struttura degli aggregati lapidei, e conferisce ottime caratteristiche prestazionali alla miscela finale.

2.4 RICICLAGGIO A FREDDO, IN SITU

2.4.1 Considerazioni generali

Il riciclaggio a freddo in sito presenta notevoli vantaggi ambientali: il materiale recuperato a freddo in sito si aggira attorno a 100%, con conseguente azzeramento di aree destinate a discarica e minimo apporto possibile di materiali vergini; le emissioni nocive prodotte dal riscaldamento del bitume, sono quasi totalmente annullate, in quanto non vi sono operazioni di preriscaldamento della pavimentazione da fresare. Inoltre vi è anche un notevole risparmio energetico, grazie alla riduzione delle operazioni di trasporto.

Lo strato riciclato possiede buone caratteristiche prestazionali. La modalità di realizzazione ed il controllo delle varie fasi di miscelazione, nonché della stessa e della posa in opera del materiale riciclato, ne garantiscono prestazioni elevate.

I moderni treni di riciclaggio, hanno una produttività elevata, riducendo notevolmente i tempi di costruzione della pavimentazione rispetto a quelli tradizionali.

Grazie alla collocazione in una sola corsia stradale del treno di riciclaggio, con conseguente minimizzazione dei fastidi che derivano dalla presenza di un cantiere, soprattutto in termini di circolazione, le fasi esecutive risultano più agevoli e sicure.

Il riciclaggio a freddo viene realizzato in sito mediante l'utilizzo, anche in questo caso, di apposite apparecchiature, che permettono la miscelazione in continuo del fresato, con emulsione bituminosa o bitume schiumato, sostanze stabilizzanti cementizie, acqua e aggregati vergini di integrazione per la correzione del fuso granulometrico, in caso di necessità.

Le possibili miscele utilizzate sono rappresentate dalle seguenti combinazioni: emulsione bituminosa e cemento, bitume schiumato e cemento, solo emulsione, solo bitume schiumato o solo cemento.

Tuttavia le modalità di riciclaggio a freddo principalmente utilizzate, in relazione alla manutenzione stradale, sono:

- con bitume schiumato e cemento;
- con emulsione bituminosa e cemento.

Macchinari appositamente progettati, fresano la vecchia pavimentazione.

Nel primo caso, il bitume caldo, portato a 160-180°C, viene messo a contatto con acqua a temperatura ambiente (2% circa), in una specifica camera di espansione; si genera così vapore, che causa un immediato aumento di volume del legante, con formazione di schiuma di bitume, che ne incrementa la superficie specifica e conferisce maggior lavorabilità a contatto con inerti; successivamente, al materiale fresato viene incorporato il bitume espanso (che rappresenta il 3-5% della massa dell'inerte), cemento e acqua, e si effettua una miscelazione molto energica ed estremamente rapida, che tiene certamente conto del tempo di decadimento della schiuma di bitume; la miscela riciclata viene immediatamente posta in opera e compattata.

I vantaggi di questa tecnologia possono riassumersi in:

- minimo inquinamento atmosferico;
- possibilità di applicazione del legante con inerti freddi e umidi;
- ridotto contenuto ottimale di bitume;
- minor invecchiamento del legante, grazie alle minori temperature degli inerti con cui viene a contatto;
- minori problemi di compattazione e di umidità con la schiuma;
- posa in opera anche in condizioni climatiche non ottimali.

Di contro gli svantaggi possono essere:

- scarsa esperienza sul confezionamento della miscela;
- l'aggiunta di antischiumanti durante il processo di raffinazione, ne impedisce l'utilizzo nell'eventuale fase di schiumatura; devono pertanto essere utilizzati bitumi idonei;
- necessità di disporre di bitume caldo.

Nel secondo caso, invece, si aggiunge al fresato, una miscela di bitume, acqua, emulsionanti, che assicura coesione, stabilità e flessibilità al nuovo conglomerato.

Le emulsioni sono mediamente costituite dal 60% di bitume e 40% di acqua, e sono presenti nel conglomerato con una percentuale del 5% circa rispetto alla massa degli inerti.

I vantaggi di questa tecnologia sono:

- facile reperibilità delle emulsioni;
- possibilità di applicazione del legante con inerti freddi e umidi;

- facilità di applicazione.

Gli svantaggi invece sono:

- trattamento più costoso rispetto all'utilizzo di bitume schiumato;
- formulazione dell'emulsione compatibile con il materiale riciclato, quindi con un opportuno tempo di rottura;
- trattamento problematico se in sito è presente un elevato tasso di umidità, con possibilità di rigonfiamento dello strato riciclato;
- temperatura di stesa $> 10^{\circ}\text{C}$;

La tecnica del riciclaggio a freddo esclusivamente con cemento, invece, presenta sicuramente una maggiore facilità di applicazione, e molto meno costosa rispetto all'emulsione bituminosa o al bitume schiumato e in presenza di umidità migliora la resistenza del conglomerato; di contro la formazione delle fessure può rappresentare un problema, ed inoltre richiede una manutenzione adeguata.

2.4.2 Treni di riciclaggio

Un treno di riciclaggio è costituito da un insieme di macchine operatrici semoventi, che possono differenziarsi in base al tipo di macchine utilizzati, in funzione delle modalità previste per intervento; sarà composto da:

- fresatrice-riciclatrice;
- mescolatrice (cisterna per l'acqua, dosatore e mescolatore, eventuali silos del cemento e spandi-cemento);
- autocisterna contenente bitume caldo;
- autocisterna per rifornimento di acqua (di solito posta davanti alla riciclatrice);
- rullo vibrante per la compattazione.

Generalmente la cisterna d'acqua è presente quando si effettua il riciclaggio con bitume schiumato, e in tutti i casi in cui ci sia anche o solo la sostanza stabilizzante cementizia; tuttavia può anche essere presente in tutti quei casi che richiedano acqua di aggiunta per migliorare la lavorabilità della miscela.

Le cisterne del bitume e dell'emulsione, sono specifiche invece del riciclaggio con sostanze bituminose, con o senza cemento.

Nel corso degli anni si è poi passati dalle frese e dalle stabilizzatrici alle attuali riciclatrici specializzate: si parla in questo caso di sistema “*single unit*”, nel quale la miscelazione del nuovo conglomerato riciclato avviene nella stessa unità nella quale avviene la fresatura, che si differenzia dal sistema “*multi train*”, nel quale invece la fresatrice e la mescolatrice sono due unità distinte. In particolare in quest’ultima tipologia, la pavimentazione viene prima demolita e successivamente accumulata sotto il treno di riciclaggio, sotto forma di cordolo continuo lungo l’asse stradale, che verrà raccolta dalla miscelatrice che segue: questa macchina è provvista nella parte anteriore di un nastro trasportatore, che permette di convogliare il materiale per una ulteriore frantumazione ed una successiva vagliatura, arrivando infine al mescolatore insieme al legante e agli additivi.

Il “cuore” di queste macchine è costituito da un tamburo di fresatura/miscelatura munito di un elevato numero di appositi utensili da taglio. Il tamburo, mentre ruota, fresa il materiale della pavimentazione stradale preesistente.

Mentre il processo di fresatura è in atto, l’acqua contenuta in una cisterna collegata alla riciclatrice, viene erogata mediante un tubo flessibile e spruzzata all’interno della camera di miscelatura della stessa. L’acqua, misurata con precisione tramite un impianto di iniezione gestito da un microprocessore, viene accuratamente miscelata con il materiale fresato onde ottenere il contenuto d’umidità ottimale per effettuare il costipamento.

Le sostanze stabilizzanti fluide, quali l’impasto liquido di cemento/acqua o l’emulsione bituminosa, singolarmente o abbinati, possono anch’essi essere introdotti direttamente nella camera di miscelatura in modo analogo. Inoltre, il bitume espanso può essere iniettato nella camera di miscelatura mediante una separata barra spruzzatrice appositamente progettata.

Gli stabilizzanti in polvere, come cemento, vengono normalmente stesi sulla superficie stradale preesistente nella parte antistante la riciclatrice. Quest’ultima passa sopra la polvere e la miscela, unitamente all’acqua, con il materiale sottostante mediante un’unica passata.

Dopo essere stato stabilizzato, il materiale viene fatto fuoriuscire dalla parte posteriore della riciclatrice; successivamente sarà soggetto ad una prima passata di un rullo

compressore che lo consolida. Di seguito, viene profilato da una motolivellatrice prima di essere costipato da un rullo vibrante.

I treni di riciclaggio possono avere configurazioni diverse a seconda del tipo di applicazione e al tipo di stabilizzante impiegato.

2.5 TECNOLOGIE INNOVATIVE A TIEPIDO

2.5.1 Considerazioni generali

Le miscele a caldo si confezionano in impianti, fissi o mobili, come visto prima, raggiungendo temperature attorno ai 150-180 °C, ma esse richiedono un notevole dispendio energetico, producendo fumi di bitume, dannosi a livello ambientale.

Le miscele a freddo, al contrario, determinano bassissimi consumi energetici e scarse emissioni nocive nell'ambiente, grazie all'impiego del legante sotto forma di schiuma o di emulsione, che favorisce il ricoprimento degli aggregati senza un loro preventivo riscaldamento.

Viene dunque da chiedersi come mai, avendo a disposizione una tecnica così vantaggiosa, ci si sia comunque orientati verso soluzioni a tiepido che riducano solo di pochi decine di gradi la temperatura nelle varie fasi operative.

Nelle tecnologie a freddo, manca la verifica del “fattore tempo”, ossia dell'effettiva durata di queste miscele, che è invece ampiamente conosciuta nel caso di conglomerati a caldo: proprio a causa di una forte esperienza consolidata nel tempo delle tecniche HMA, e per una sorta di conservatorismo tecnologico, le miscele a freddo tardano a farsi strada nel settore.

Un punto di criticità è rappresentato dal ricoprimento degli inerti: difatti nel caso dell'emulsione, ha inizio solo dopo la sua “rottura”, la quale può verificarsi dopo molto tempo, addirittura mesi, ed inoltre difficilmente può essere “completa” : spesso, infatti, le pezzature più grossolane non sono totalmente ricoperte.

Anche il processo di schiumatura, che presenta tutti i vantaggi del riciclaggio a freddo, risulta particolarmente efficace solo sulle frazioni fini, ed esclude alcune tipologie di bitume che utilizzano antischiumanti durante il processo di raffinazione.

La soluzione al problema arriva con la “nascita” delle tecnologie per produrre il conglomerato tiepido.

Con l'acronimo WMA (*Worm Mix Asphalt*, ossia Miscela Bituminosa Tiepida), definiamo il conglomerato bituminoso ottenuto, per appunto, da processi produttivi in cui le temperature operative risultano inferiori di decine di gradi rispetto a quelle usuali delle produzioni a caldo, ma che utilizzano la stessa tipologia di macchinari .

Le tecniche WMA in quest'ottica, rappresentano i risultati di una lunga ricerca, volta a gestire le caratteristiche chimico-fisiche dei bitumi, ottenendo un legante che presenti un'ottima lavorabilità durante la fase produttiva, ma che possa rapidamente assumere le caratteristiche meccaniche necessarie a sopportare gli sforzi dovuti al carico veicolare, a cui una pavimentazione stradale è sottoposta.

Seppur i risultati siano notevolmente soddisfacenti, l'ottimizzazione totale della nuova tecnica si avrà solo quando sarà possibile metterla in pratica in sito con utilizzo dei treni di riciclaggio, grazie ai quali sarà possibile un reimpiego totale del materiale fresato, e un abbattimento dei costi di trasporto.

I vantaggi delle tecniche eco-sostenibili WMA sono quindi:

- risparmio energetico e conseguente riduzione del consumo di combustibile, risorsa non rinnovabile;
- riduzione delle emissioni dovute alla combustione di carburanti, di fumi e di odori sia in fase di produzione che in fase di stesa; la riduzione delle temperature influisce non solo sulla quantità di fumi, ma anche sulla loro qualità;
- miglioramento delle condizioni di lavoro per gli operatori del settore;
- riduzione dell'invecchiamento del bitume causato dalle alte temperature;
- minor usura dei mezzi utilizzati nell'ambito del processo produttivo, derivante dall'abbattimento delle temperature;
- riduzione dei tempi di attesa per riapertura al traffico di tratti di pavimentazione appena messi in opera;
- ampliamento dell'intervallo stagionale di messa in opera (si può stendere anche in pieno inverno).
- possibilità di aumentare la distanza di trasporto, a parità di temperatura finale.

Un vantaggio altrettanto importante delle tecniche WMA, consiste nella produzione di miscele con una più alta percentuale di RAP, rispetto alle tecniche a caldo, che possiedono però lo stesso grado di lavorabilità. Un altro aspetto importante, consiste nel fatto che le temperature di produzione più basse, compensano la maggior quantità di ricupero utilizzato, quindi "invecchiato", rispetto ad un conglomerato con una maggior quantità di RAP, prodotto con tecniche a caldo.

2.5.2 Descrizione delle tecniche WMA

Esistono diverse modalità per poter classificare le tecnologie WMA, ed una di queste valuta l'entità della diminuzione della temperatura durante il processo produttivo.

I conglomerati WMA e HWMA vengono classificati sulla base della tecnologia utilizzata, attualmente presente sul mercato: ciò comporta una discussione più descrittiva dei vari processi.

.Le tipologie più significative sono le seguenti:

- tecniche che prevedono l'aggiunta di additivi fluidificanti del bitume, che a loro volta possono distinguersi in:
 - organici (cere);
 - chimici;
- tecniche schiumanti, di una parte o della totalità del legante stesso;
- tecniche a base di emulsioni bituminose.

Nel seguente elenco sono riportate le tecniche WMA più diffuse sul mercato, con brevi e concise descrizioni di ciascun processo.

WMA process	Company	Description	Use Reported in	Additive	Production temperature [or reduction ranges]
Organic (wax) Additives-added to binder or mix					
Sasobit	Sasol	Fischer-Tropsch wax	Germany and 20 other countries worldwide	Yes, in Germany added on average at 2.5% by weight of binder; lower doses, 1.0-1.5%, used in U.S.	Varies, 20-30 C° (36-54 F°) drop from HMA. German guideline recommends 130-170 °C (266 to 338 °F), depending on binder stiffness
3E LT or Ecoflex (proprietary)	Colas	Water based Binder foaming + hydrophilic filler	France	Yes	Varies, 30-40 C° (54-72 F°) drop from HMA
Asphaltan-B (Montan wax)	Romonta	Proprietary	Germany	Yes, in Germany added on average at 2.5% by weight of binder	Varies, 20-30 C° (36-54 F°) drop from HMA. German guideline recommends 130-170 °C (266-338 °F), depending on binder stiffness
Licomont BS 100 (additive) or Sübit (binder) (fatty acid amides)	Clariant	Fatty acid amide	Switzerland	Yes, about 3% by weight of binder	Varies, 20-30 C° (36-54 F°) drop from HMA. German guideline recommends 130-170 °C (266-38 °F), depending on binder stiffness

Figura 14 Tecnologie WMA con additivi organici

WMA process	Company	Description	Use Reported in	Additive	Production temperature [or reduction ranges]
Chemical					
Interlow T	Interchimica Srl	Surfactants	Italy	0,3-1,0 % of bitumen weight	120°C
Rediset WMX	Akzo Nobel	Cationic surfactants and organic additive	Netherlands U.S., Norway	1.5-2% of bitumen weight	[≥30°C]
REVIX	Mathy-Ergon	Surface-active agents, waxes, processing aids, polymers	Netherlands U.S.	Not specified	[15-26°C]
CECABASE RT	CECA Arkema group	Chemical package	U.S., France	0.2-0.4% by mixture weight	120°C
Evotherm ET	Mead-Westvaco	Chemical bitumen emulsion	U.S., France, worldwide	Delivered in form of bitumen emulsion	[50-75°C]
Evotherm DAT	Mead-Westvaco	Chemical package plus water	U.S., France, worldwide	30% by weight of binder	[45-55°C]
Evotherm 3G	Mead-Westvaco	Water free chemical package	U.S.	Not Specified	[33-45°C]

Figura 15 Tecnologie WMA con additivi chimici

WMA process	Company	Description	Use Reported in	Additive	Production temperature [or reduction ranges]
Water related techniques (foaming and emulsions)					
Aspha-Min	Eurovia	Water containing Zeolite	U.S.; France, Germany	Yes, about 0.3% by total weight of mix	Varies, 20-30 °C (36-54 °F) drop from HMA. German guideline recommends 130-170 °C (266-338 °F), depending on binder stiffness
Advera	PQ Corporation	Water containing Zeolite	U.S.	0.25% by mixture weight	Varies, 20-30 °C (36-54 °F) drop from HMA. German guideline recommends 130-170 °C (266-338 °F), depending on binder stiffness
WAM-Foam	Shell and Kolo- Veidekke	Foaming process using two binder grades	U.S., Norway	Antistripping agents could be added to soften binder could be added to soften binder	110-120 °C (230-248 °F)
LEA, also EBE and EBT	LEACO	Water based Hot coarse aggregate mixed with wet sand	France, Spain, Italy, and U.S.	Yes, ±0.5% of bitumen weight of coating and adhesion additive	100 °C (212 °F)
LEAB	BAM	Water based Mixing of aggregates below water boiling point	Netherlands	Yes, added at 0.1% by weight of binder to stabilize foam, aid in coating, and promote adhesion	90 °C (194 °F)
LT Asphalt	Nynas	Water based Binder foaming + hydrophilic filler	Italy, Netherlands	Yes, added 0.5-1.0% of a hygroscopic filler	90 °C (194 °F)
Double-Barrel Green	Astec	Water based foaming process	U.S.	Not necessary; an antistripping agent may be added similar to normal HMA	116-135 °C (240-275 °F)
Aquablack WMA	MAXAM equipment	Water based foaming process	U.S.	Not necessary	Not specified
Warm Mix Asphalt System	Terex Roadbuilding	Water based foaming process	U.S.	Not necessary	[<32°C]
Ultrafoam GX	Gencor Industries	Water based foaming process	U.S.	Not necessary	Not specified
ECOMAC	Screg	cold mix warmed before laying	France	Yes (unknown type/quantity)	Placed at about 45 °C (113 °F)

Figura 16 Tecnologie WMA correlate all'utilizzo di acqua: schiumatura ed emulsione

Generalmente, per la produzione di conglomerati WMA sono utilizzati gli stessi impianti (continui o discontinui) nei quali si produce il conglomerato HMA. Per

l'adeguamento alle nuove tecnologie possono essere necessarie alcune modifiche, come ad esempio una strumentazione supplementare, l'installazione di sistemi di schiumatura del bitume, un sistema di aggiunta degli additivi, la messa a punto del bruciatore dell'impianto per un funzionamento a temperature più basse.

Questi cambiamenti non sono, generalmente, necessari nel caso di additivi chimici o organici, in quanto possono essere addizionati al legante o direttamente nella camera di miscelazione, grazie alla loro consistenza molto fine, assimilabile a quella di un filler.

L'asfalto tiepido è la terza via, quella che già oggi rappresenta un primo passo avanti verso un futuro ancor più sostenibile. La tecnologia consente infatti di produrre lo stesso tipo di materiale utilizzando le stesse macchine, ma con temperature decisamente più basse.

3 QUADRO NORMATIVO ITALIANO IN TEMA DI RIFIUTI E MARCATURA CE

3.1 DAL DECRETO RONCHI AL D. LGS 152/2006

Con la pubblicazione sulla Gazzetta Ufficiale del “Decreto Legislativo n.22 del 5 Febbraio 1997”, si è dato il via ad una graduale e radicale riforma delle regole che disciplinano in Italia il trattamento dei rifiuti.

In particolare il Decreto ha recepito ben tre Direttive Comunitarie:

- la 91/156/CEE sui rifiuti;
- la 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi;
- la 94/62/CEE sugli imballaggi e sui rifiuti da imballaggio.

Tuttavia vennero ben presto apportate delle modifiche, prima con il provvedimento conosciuto come Ronchi Bis, D.Lgs. dell’8 Novembre 1997, e successivamente con il Ronchi Ter, Legge n.426 del 9 Dicembre 1998, che prevedeva nuovi interventi in campi ambientali.

Il D.Lgs. 22/97, con i suoi decreti attuativi (D.M. 5/02/98), recepiva totalmente il principio della gerarchia dei rifiuti, adottato a livello europeo, in cui le forme di prevenzione, dallo sviluppo di tecnologie pulite alla promozione di strumenti economici, dalle azioni di informazione e comunicazione agli accordi di programma, doveva essere privilegiata rispetto alle forme di gestione.

Una volta favorita la prevenzione, la politica di gestione esortava ogni attività di recupero, ossia qualsiasi forma di reimpiego e riciclaggio, che permettesse ai rifiuti di essere utilizzati come materie prime secondarie, o come combustibile o altro mezzo per produrre energia.

Infine, l’intera gestione si concludeva con lo smaltimento (messa in discarica e incenerimento), fase a questo punto necessaria ed inevitabile, ma che vantava il pregio di essere minimizzata grazie al potenziamento delle prime fasi della gestione.

Anche dopo il Decreto Ronchi, la disciplina si è comunque mostrata più complessa di quello che sembrava: proprio per questo si è fatto un tentativo di redigere un Testo Unico con il D.Lgs 3/4/2006, n.152, che detta norme in materia ambientale (anche detto “Codice ambientale”).

Nella parte IV si trattano le “Norme in materia di gestione dei rifiuti e di bonifica dei siti inquinanti”, che abrogano nel contempo diversi, ma non tutti, i provvedimenti prima elencati; quindi il D.Lgs. 152/2006 costituisce, anche per i rifiuti, una sorta di “Testo unico”.

Il D.Lgs 152/2006 non apporta novità nella definizione di rifiuti, ma introduce la nuova definizione (non prevista da Ronchi) di “sottoprodotto”: i sottoprodotti sono i prodotti dell’attività di impresa che, pur non costituendo l’oggetto dell’attività principale, scaturiscono in via continuativa dal processo industriale della stessa e sono destinati ad ulteriore impiego e al consumo. I sottoprodotti non sono soggetti alla normativa sui rifiuti, se impiegati direttamente dall’impresa che li produce, o commercializzati dalla stessa, in modo economicamente vantaggioso, per un impiego da parte di terzi.

3.2 FRESATO D’ASFALTO: RIFIUTO O SOTTOPRODOTTO?

Con la sentenza n. 4151 del 6 agosto 2013, il Consiglio di Stato ha chiarito, in modo univoco, che il fresato d’asfalto, originato dai lavori di manutenzione/ricostruzione della pavimentazione stradale, può essere considerato come “sottoprodotto”.

Il fresato d’asfalto può essere qualificato come sottoprodotto e non come rifiuto speciale, purché sussistano determinati condizioni: è quanto ha affermato il Consiglio di Stato con la sentenza n. 4978 del 6 ottobre 2014, ribadendo l’orientamento già espresso in occasione della sentenza 4151/2013.

In particolare, il Consiglio di Stato ha chiarito che il fresato d’asfalto rimosso dal manto stradale può essere considerato sottoprodotto a condizione che il detentore non se ne voglia disfare e se sussistano tutti i requisiti previsti dall’art. 184 bis D.Lgs. 152/2006 (introdotto dal D.Lgs 205/2010) ossia:

- si deve trattare di una sostanza o oggetto originato da un processo produttivo il cui scopo principale non è la produzione di questa sostanza o oggetto;
- è certo il suo riutilizzo;
- il suo riutilizzo è legale;
- può essere riutilizzato direttamente senza alcun ulteriore trattamento diverso dalla normale pratica industriale.

La gestione di fresato come *sottoprodotto* è molto più semplice rispetto ai *rifiuti*. Le regole sono quelle della normale circolazione delle merci e della normale produzione di conglomerati bituminosi:

- Demolizione e produzione: nessuna prescrizione particolare se non una semplice verifica di non pericolosità del fresato generato (si fa comunque anche nel caso di *rifiuto*);
- Trasporto: basta una semplice documentazione di trasporto (bolla) che riporti il luogo di provenienza ed il luogo di destinazione; non serve alcuna iscrizione particolare ad alcun Albo;
- Recupero e trattamento in impianto: il fresato entra nel processo di produzione dei materiali come materiale costituente, in sostituzione dei materiali naturali e deve essere sottoposto ai normali controlli per la classificazione e designazione (UNI EN 13108-8).

L'impianto che utilizza il *sottoprodotto* deve essere in possesso delle autorizzazioni necessarie per la normale produzione dei materiali (concessione edilizia, emissioni in atmosfera, scarichi idrici, prelievo dell'acqua, certificato di prevenzione incendio, ecc).

I conglomerati bituminosi prodotti devono essere conformi alle specifiche norme armonizzate (marcatura CE) e consegnati sul luogo di impiego (cantiere stradale) muniti di documento di trasporto che consente la tracciabilità dei materiali.

Per la classificazione dei rifiuti esiste un modello europeo di riferimento, denominato Catalogo Europeo dei Rifiuti, che attribuisce ad ognuno di essi un codice composto da 6 cifre (Codice Europeo Rifiuti, CER).

Nelle sei cifre identificanti il codice CER, divise in tre gruppi da due, il primo gruppo è relativo al capitolo, ossia alle classi di attività generatrici dei rifiuti; il secondo gruppo è relativo al sottocapitolo, ossia al processo produttivo da cui è stato originato o sub-attività che genera i rifiuti; il terzo gruppo è costituito dai codici che identificano il singolo rifiuto prodotto.

Secondo la normativa nazionale e comunitaria, il conglomerato bituminoso di recupero (fresato) si può classificare come rifiuto speciale non pericoloso avente il codice CER 17 03 02 "miscele bituminose diverse da quelle di cui alla voce 17 03 01", distinguendolo appunto dai rifiuti pericolosi aventi codice CER 17 03 01 "miscele

bituminose contenenti catrame di carbone”. L’inclusione del fresato nel Catalogo CER non significa che sia *rifiuto*.

3.3 MARCATURA CE

L’attività di normazione europea sui materiali stradali ricade nell’ambito della direttiva 89/106/CE “Prodotti da costruzione”, recepita con D.P.R. n.246 del 21 aprile 1993, riguardante i prodotti da costruzione, e seguita dal Decreto n.156 del 5 maggio 2003, che indicava i criteri e le modalità per il rilascio dell’abilitazione degli organismi di certificazione, ispezione e prove nel settore dei prodotti da costruzione.

La direttiva 89/106/CE “CPD” mirava “ad eliminare gli ostacoli tecnici agli scambi nel campo dei prodotti da costruzione per migliorarne la libera circolazione in senso al mercato interno” e prevedeva “la definizione di norme armonizzate per i prodotti da costruzione e il rilascio di benestare tecnici europei.”

Sulla GUUE del 04.04.2011, viene pubblicato il regolamento 305/2011 che abroga la direttiva 89/106/CE, che entra in vigore dal 24.04.2011; applicabile a regime dal 01.07.2013.

Le opere di costruzione, nel complesso e nelle sue parti, devono essere adatte all’uso cui sono destinate, tenendo conto in particolare della salute e della sicurezza delle persone interessate durante l’intero ciclo di vita della opera. Le costruzioni devono soddisfare i requisiti di base di:

- resistenza meccanica e stabilità;
- sicurezza in caso di incendio;
- igiene, salute e ambiente;
- sicurezza e accessibilità nell’uso (sicurezza nell’impiego);
- protezione contro il rumore;
- risparmio energetico e ritenzione del calore;
- uso sostenibile delle risorse naturali.

La novità di maggiore interesse per gli aggregati riciclati è l’ultimo requisito: uso sostenibile delle risorse naturali. Le opere di costruzione devono essere concepite,

realizzate e demolite in modo che l'uso delle risorse naturali sia sostenibile e garantisca in particolare quanto segue:

- il riutilizzo o la riciclabilità delle opere, dei loro materiali e delle loro parti dopo la demolizione;
- la durabilità delle opere di costruzione;
- l'uso, nelle opere di costruzione, di materie prime e secondarie ecologicamente compatibili.

La possibilità di marcare CE il prodotto senza dubbio nobiliterà gli aggregati riciclati che, in un'ottica europea sono considerati al pari degli aggregati di origine naturale, a patto che rispondano agli standard definiti nelle norme.

La condizione fondamentale per l'affissione della marcatura CE su un prodotto è la dichiarazione di conformità, sottoscritta dal produttore, che rappresenta l'atto formale con cui esso dichiara, sotto la propria responsabilità, che il prodotto è conforme all'allegato della specifica norma armonizzata.

Il sistema di attestazione è la procedura pratica mediante la quale viene documentata la conformità del prodotto a tali norme e deve essere messa in opera dal produttore sotto la propria diretta responsabilità o attraverso il coinvolgimento di un organismo di certificazione, di ispezione o di un laboratorio (organismi notificati). Gli organismi notificati sono parti terze indipendenti che posseggono le competenze necessarie per poter eseguire le prove, ispezioni o altri tipi di verifica di conformità previste dalle direttive.

La legislazione comunitaria prevede differenti sistemi di attestazione fra i quali la Commissione assegna quello più idoneo da applicare al prodotto, in funzione dell'importanza e del tipo di impiego che il prodotto assumerà nella costruzione, rispetto ai requisiti essenziali.

L'attività di predisposizione delle norme armonizzate vere e proprie è stata poi svolta dal CEN (Comitato Europeo di Normazione), il quale ha agito sulla base di un preciso incarico ricevuto dalla Commissione Europea, il cosiddetto Mandato.

La norma, dopo l'approvazione in ambito CEN, viene inviata alla Commissione che ne verifica la conformità al mandato iniziale e quindi la fa pubblicare sulla "Gazzetta Ufficiale"; la norma diventa armonizzata e sostituisce tutte le norme nazionali.

Le norme armonizzate sugli aggregati, per la traduzione dei requisiti essenziali per prodotti da costruzione, previsti dalla direttiva, in requisiti tecnici specifici che permettono di caratterizzare gli aggregati, sono nate attraverso il Mandato M/125 *Aggregati naturali, da frantumazione, da processo industriale, riciclati*. Il CEN, allo scopo di rendere operativa la direttiva, ha elaborato le norme riportate nella Figura 18. I sistemi di attestazione previsti sono due: il 2+ e il 4. Il decreto ministeriale 11 aprile 2007 ha individuato, per Italia, i prodotti e i relativi metodi di conformità degli aggregati che sono il 2+, o il 4, a seconda del uso strutturale o meno.

Sistema di attestazione	Compiti del produttore	Compiti dell'organismo notificato	Condizione per la marcatura CE
4	Prove iniziali di tipo sul prodotto (ITT) Controllo del processo di fabbrica (FPC)		Dichiarazione di conformità da parte del produttore
3	Controllo del processo di fabbrica	Prove iniziali di tipo sul prodotto	Dichiarazione di conformità da parte del produttore
2	Prove iniziali di tipo sul prodotto (ITT) Controllo del processo di fabbrica (FPC)	Certificazione del controllo del processo di fabbrica sulla base di un'ispezione iniziale	Dichiarazione di conformità da parte del produttore, accompagnata dalla certificazione del controllo del processo di fabbrica
2+	Prove iniziali di tipo sul prodotto (ITT) Controllo del processo di fabbrica (FPC) Prove su campioni di prodotto secondo un programma di prove definito	Certificazione del controllo del processo di fabbrica sulla base di un'ispezione iniziale, di una sorveglianza continua, della valutazione e approvazione del controllo del processo di fabbrica	Dichiarazione di conformità da parte del produttore, accompagnata dalla certificazione del controllo del processo di fabbrica
1	Controllo del processo di fabbrica (FPC) Prove ulteriori su campioni di prodotto secondo un programma di prove definito	Prove iniziali di tipo sul prodotto Ispezione iniziale della fabbrica e del controllo del processo di fabbrica Sorveglianza continua, valutazione e approvazione del controllo del processo di fabbrica	Dichiarazione di conformità da parte del produttore, accompagnata da certificato di conformità del prodotto
1+	Controllo del processo di fabbrica (FPC) Prove ulteriori su campioni di prodotto secondo un programma di prove definito	Prove iniziali di tipo sul prodotto Ispezione iniziale della fabbrica e del controllo del processo di fabbrica Sorveglianza continua, valutazione e approvazione del controllo del processo di fabbrica Prove di verifica di campioni prelevati in fabbrica, sul mercato o in cantiere	Dichiarazione di conformità da parte del produttore, accompagnata da certificato di conformità del prodotto

Figura 17 – I diversi sistemi di attestazione previsti dalla legislazione comunitaria

UNI EN 13043 viene utilizzata con aggregati per conglomerati bituminosi. La norma specifica le proprietà di aggregati e filler da utilizzare nei conglomerati bituminosi e trattamenti superficiali di strade, aeroporti e altre aree soggette a traffico. Non riguarda l'utilizzo di conglomerati bituminosi fresati.

Norma Europea	Titolo
EN 12620	Aggregati per calcestruzzo
EN13242	Aggregati per materiali non legati e legati con leganti idraulici per l'impiego in ingegneria civile e nella costruzione stradale
EN13285	Miscele non legate: specifiche
EN 13043	Aggregati per miscele bituminose e trattamenti superficiali per strade, aeroporti e altre aree soggette a traffico
EN13450	Aggregati per massicciate ferroviarie
EN13383-1	Aggregati grossi per opere idrauliche – Parte 1: specifiche
EN13139	Aggregati per malta
EN13055-1	Aggregati leggeri – Parte 1: aggregati leggeri per calcestruzzo e malta
EN13055-2	Aggregati leggeri – Parte 2: aggregati leggeri per miscele bituminose, trattamenti superficiali e applicazioni per materiali legati e non legati, escluse applicazioni con calcestruzzo e malta

Figura 18 Norme elaborate dal CEN per rendere operativa la direttiva “Prodotti da Costruzione”

Le proprietà degli aggregati sono descritte in tre sezioni riguardanti rispettivamente:

- i requisiti geometrici;
- i requisiti fisico-meccanici;
- i requisiti chimici.

Le norme armonizzate sui conglomerati bituminosi sono nate in risposta al Mandato M/124 *Prodotti per la costruzione di strade*, che riguarda i seguenti prodotti:

- bitume ed emulsioni bituminose per conglomerati bituminosi e trattamenti superficiali;
- conglomerati bituminosi;
- trattamenti superficiali;
- sistemi di impermeabilizzazione di impalcati per ponti;
- prodotti accessori per strade in calcestruzzo.

Le caratteristiche fanno riferimento alle norme armonizzate della serie EN 13108 che comprende tutti i conglomerati bituminosi prodotti con legante tradizionale (UNI EN 12591) e modificato (UNI EN 14023).

La norma UNI EN 13108-8 definisce il fresato d'asfalto: “Conglomerato bituminoso recuperato mediante fresatura degli strati del rivestimento stradale, che può essere utilizzato come materiale costituente per miscele bituminose prodotte in impianto a caldo”.

Norma Europea	Titolo
EN 13108 – 1	Conglomerato bituminoso a caldo
EN 13108 – 2	Conglomerato bituminoso per strati molto sottili
EN 13108 – 3	Conglomerato bituminoso con bitume molto tenero
EN 13108 – 4	Conglomerato bituminoso chiodato
EN 13108 – 5	Conglomerato bituminoso antisdrucchiolo chiuso
EN 13108 – 6	Asfalto colato
EN 13108 – 7	Conglomerato bituminoso a elevato contenuto di vuoti
EN 13108 – 8	Conglomerato bituminoso fresato
EN 13108 – 20	Prove iniziali di tipo
EN 13108 – 21	Controllo di produzione in stabilimento

Figura 20 Serie EN 13108 che comprende tutti i conglomerati bituminosi

La norma individua quale unico sistema di attestazione per i conglomerati bituminosi a caldo il sistema 2+. Per la definizione dei requisiti dei materiali costituenti e delle miscele, l'insieme delle norme UNI EN 13108 rimanda puntualmente alle specifiche comprese nelle norme UNI EN 12697 che precisano i parametri e le condizioni di prove. Gli aggregati devono essere conformi ai requisiti previsti dalla norma UNI EN 13043 che, come visto, ne specifica i requisiti ai fini della marcatura CE.

Una delle principali particolarità presente nella UNI EN 13108 è costituita dalla possibilità di scegliere fra due possibili metodi di approccio:

- metodo empirico: di carattere prescrittivo, basato sulla puntuale definizione dei requisiti delle miscele e dei materiali costituenti, dai quali si possono dedurre le prestazioni dei conglomerato bituminoso (si determina una grandezza da cui è possibile evincere una prestazione in opera- *performance related*);
- metodo fondamentale: di carattere prestazionale in cui i requisiti, direttamente misurati, possono essere correlati con le prestazioni del prodotto finito (*performance based*).

La norma UNI EN, specifica anche i requisiti per la classificazione. Stabilisce i controlli da effettuare per accertare eventuali impurità del fresato con materie plastiche, legno, metallo o altri materiali non pertinenti, la frequenza di esecuzione delle prove, nonché il contenuto di legante e la determinazione della distribuzione granulometrica. Il fresato è quindi identificato in modo univoco e designato con classi e categorie di appartenenza.

E' doveroso ricordare che la marcatura CE non è l'unica condizione perché i prodotti possano essere messi in opera, in quanto il materiale deve avere anche le caratteristiche tecniche e prestazionali richieste dai vari capitolati.

4 MATERIALI PER INFRASTRUTTURE STRADALI

I conglomerati bituminosi a caldo tradizionali sono miscele, dosate a peso o a volume, costituite da aggregati lapidei di primo impiego, bitume semisolido, additivi ed eventuale conglomerato riciclato.

Da molti anni la ricerca affronta il tema dell'utilizzo dei materiali di riciclo nelle costruzioni stradali; pertanto gli studi sono sempre più orientati alla caratterizzazione chimico-fisica del prodotto, alla valutazione delle caratteristiche meccaniche delle miscele, alla verifica delle prestazioni in opera ed al potenziale inquinamento connesso all'impiego del prodotto. I materiali di scarto utilizzabili come materie prime secondarie nella costruzione di pavimentazioni stradali, possono aver origine da molteplici processi produttivi. Le principali tipologie di materie prime secondarie utilizzate per pavimentazioni stradali, sono costituite da:

- materiale proveniente da costruzione e demolizione (C&D);
- materiale proveniente da terre e rocce da scavo;
- materiale in sito (fresato).

La necessità di progettazione e costruzione di pavimentazioni in asfalto che si comportano in modo soddisfacente in condizioni climatiche e di traffico avverse, può essere raggiunta modificando l'asfalto tradizionale.

Le miscele studiate in questa sede sono essenzialmente costituite dalle seguenti componenti in quantità variabili:

- ☐ aggregati;
- ☐ fresato;
- ☐ filler;
- ☐ bitume;
- ☐ additivi rigeneranti;

Nei prossimi paragrafi verranno descritte le caratteristiche di tutti questi elementi. Saranno esaminati anche i rispettivi ruoli ed influenze nei confronti delle proprietà meccaniche della miscela confezionata.

4.1 GLI AGGREGATI

Gli aggregati, secondo la definizione data dalle norme UNI EN 13242/13043/12620, sono materiali granulari utilizzati nelle costruzioni. Possono essere di tre tipologie:

- naturali: lapidei, di origine minerale, sottoposti a lavorazione meccanica. Derivano quindi da una roccia e al più subiscono una lavorazione meccanica per essere ridotti alle dimensioni volute;
- artificiali: di origine minerale, derivanti da un processo industriale che implica una modificazione termica o di altro tipo (termomeccanica, chimica). Sono i sottoprodotti delle lavorazioni industriali (le scorie di acciaieria, ceneri di carbone..);
- riciclati: risultano dalle lavorazioni di materiale inorganico già usato nelle costruzioni, proveniente da processi di recupero (per esempio derivante da demolizione di edifici, fresato).

L'attuale normativa non fa distinzione tra i diversi tipi di aggregato: ciò significa che dal punto di vista della classificazione questi materiali sono da considerarsi identici, mentre dal punto di vista dell'impiego si tratta di valutarne le caratteristiche fisico-meccaniche per stabilire se siano realmente equivalenti. Gli aggregati possono essere equiparati sulla base di queste caratteristiche, ma la condizione che ne determina la possibilità d'impiego è che i parametri che misurano le proprietà chimiche e tossicologiche dei materiali (soprattutto nel caso di quelli artificiali e riciclati) rientrino in certi intervalli. Infatti, poiché gli aggregati artificiali e di riciclo sono residui di altre lavorazioni, non sempre è nota l'origine di questi (o più semplicemente si ritiene siano presenti inquinanti) ed è necessario che gli aggregati vengano valutati anche dal punto di vista chimico e tossicologico. In realtà il fatto di fissare l'attenzione sugli aggregati artificiali e riciclati non sarebbe del tutto giustificato perché esistono aggregati naturali che, a causa del luogo di provenienza, sono più inquinati rispetto agli aggregati artificiali e riciclati.

I minerali naturali, provenienti da frantumazione di rocce in massa o da frantumazione di materiali granulari alluvionali e no, a seconda della loro origine, vengono impiegati nei diversi strati della sovrastruttura stradale. I calcari, per esempio, sono scarsamente

utilizzati negli strati superficiali a causa della loro elevata usurabilità. I materiali granulari alluvionali sono preferiti negli strati profondi. Negli strati di usura hanno il loro dominio di elezione le rocce eruttive e metamorfiche.

In generale le rocce più utilizzate e resistenti hanno una struttura fina e una porosità quasi nulla, in compenso la microrugosità è durevole e comunque si può contare su una buona permanenza degli spigoli vivi.

Oltre ai materiali tradizionali vi sono anche i materiali alternativi che sono aggregati di tipo non convenzionale, cioè aggregati artificiali e di riciclo. Questi vengono normalmente valutati con le stesse prove e le stesse modalità di caratterizzazione previste per gli aggregati naturali.

Gli aggregati lapidei costituiscono lo scheletro di tutti gli strati che compongono una sovrastruttura stradale.

Gli inerti, oltre che per la loro origine, si classificano anche in base alle loro dimensioni. Secondo la Norma CNR 139/92, utilizzata nel settore stradale, i granuli assumono la seguente denominazione:

DIMENSIONI	DENOMINAZIONE
25-71 mm	pietrisco
10-25 mm	pietrischetto
2-10 mm	graniglia
0,075-4 mm	sabbione
0,075-2 mm	sabbia
< 0,075 mm	filler

Tabella 1 Classificazione degli aggregati

La principale caratterizzazione degli aggregati lapidei per uso stradale viene fatta in base ai seguenti parametri:

- ☐ Caratteristiche fisiche;
- ☐ Caratteristiche meccaniche;
- ☐ Caratteristiche chimiche.

Le caratteristiche fisiche che assumono maggiore rilievo sono: forma dei grani, massa volumetrica, composizione granulometrica.

Le caratteristiche meccaniche vengono determinate analizzando le resistenze alla compressione e all'abrasione, la levigabilità superficiale e la resistenza ai cicli di gelo e disgelo. Per determinare la resistenza alla frantumazione per effetto di carichi statici e dinamici o la resistenza all'abrasione sono state proposte diverse prove.

Le prove da compiere per caratterizzare gli inerti sono le seguenti:

- l'analisi granulometrica (UNI EN 933-1/2, CNR 23);
- l'indice di forma e di appiattimento (UNI EN 933-4/3, CNR 95);
- l'equivalente in sabbia (UNI EN 933-8, CNR 27);
- il coefficiente Los Angeles (UNI EN 1097-2, CNR 34);
- il coefficiente di usura Micro-Deval (UNI EN 1097-1, CNR 109);
- il coefficiente di levigabilità accelerata CLA (UNI EN 1097-8, CNR 140);
- la massa volumica apparente non addensata (CNR 62)
- la massa volumica apparente (CNR 63);
- la massa volumica reale (CNR 64) ;
- la sensibilità al gelo (CNR 80);
- il coefficiente di imbibizione (CNR 137);
- lo spogliamento (CNR 138);
- la porosità;
- l'indice dei vuoti.

4.2 IL FRESATO

Il fresato d'asfalto o conglomerato bituminoso di recupero, così come definito dalla norma UNI EN13108 (Miscele bituminose - Specifiche del materiale, Parte 8: conglomerato bituminoso di recupero) è un prodotto di elevate caratteristiche tecniche, totalmente riutilizzabile nel confezionamento di nuovi conglomerati bituminosi tale per cui, riutilizzato nelle dovute percentuali e metodi, permette la produzione di un

conglomerato bituminoso nuovo con le stesse caratteristiche di uno confezionato con l'impiego di tutte le componenti vergini.

Per fresato si intende un materiale solido contenente aggregati lapidei, che presentano una curva granulometrica caratterizzata da un'elevata percentuale di inerti di piccola pezzatura (fini), e bitume invecchiato; esso si ottiene dalla fresatura o frammentazione a blocchi di strati di una pavimentazione ammalorata. Può quindi essere considerato come un materiale inerte bitumato e non consolidato. Sia il materiale riciclato, derivante dalla fresa, che il nuovo, necessita dello studio e progetto della curva granulometrica degli inerti; il RAP essendo costituito per il 93-97% in peso da aggregati litici e per il resto da bitume invecchiato si deve considerare a tutti gli effetti come un materiale inerte. Inoltre è bene precisare la differenza tra fresato e RAP: per "fresato" intendiamo il materiale prodotto dalla dismissione con macchine fresatrici a tamburo, preferibilmente a freddo o con un leggero preriscaldamento, tale da non compromettere il legante presente; per "RAP" invece intendiamo il materiale risultante dalla dismissione, con qualsiasi mezzo, ripper, escavatore o martello demolitore, e successiva frantumazione degli strati bituminosi delle pavimentazioni degradate. Le due differenti modalità di demolizione della sovrastruttura, sono anche citate negli articoli Art. 1.1 e 1.2 delle "NORME TECNICHE D'APPALTO PRESTAZIONALI" (AUTOSTRADE SPA, 2004). La scelta della successiva destinazione d'uso del fresato, costituito da materiali pregiati, ossia aggregati lapidei e legante bituminoso invecchiato, è una questione di notevole rilevanza della quale si sono occupati per molto tempo i ricercatori e gli operatori del settore stradale. Per questo motivo l'opzione di messa a discarica del conglomerato bituminoso fresato, peraltro caratterizzata dai più elevati costi operativi ed ambientali, viene oggi accantonata a vantaggio di alternative che prevedono il riciclaggio nelle pavimentazioni stradali stesse, dando soluzione ad un problema di "macro-scala".

4.3 IL FILLER

Si definisce “filler” la parte più fine degli aggregati (diametro minore di 0,075 mm secondo la norma CNR 139) che si produce dalla frantumazione degli aggregati stessi o che si recupera dal sistema di depolverizzazione presente negli impianti di produzione di conglomerato bituminoso a caldo. In questo caso è normalmente definito “filler di recupero”.

Il “filler d’apporto”, invece, è quello che si acquista per integrare la curva granulometrica ed è solitamente rappresentato da carbonato di calcio, calce, cemento (non del tipo a presa rapida) o ceneri volanti, che costituiscono fillers che alterano chimicamente le proprietà della miscela e a cui perciò si riferisce il termine “attivo”, contrariamente a quanto accade ad esempio per un filler “naturale” come la farina di roccia, il cui scopo è ridotto all’integrazione della frazione fine della miscela per facilitare la dispersione del bitume.

Durante la fase di studio della miscela, è opportuno valutare tutte le caratteristiche di un filler per poter operare una scelta in sicurezza.

Si devono determinare:

- la granulometria, perché il filler deve avere una granulometria che risponda alla definizione sopra indicata;
- il coefficiente di attività che per lo più si misura o con l’equivalente in sabbia o con delle prove specifiche come il blu di metilene che servono a vedere quanto pericolosa possa essere la presenza di quel filler;
- i limiti di Atterberg;
- altre prove come lo spogliamento della roccia da cui il filler proviene;
- le prove dei vuoti Rigden (UNI EN 1097-4, CNR 123) o del Potere rigidificante: il filler aggiunto ad un bitume ha la capacità di aumentarne la rigidità e ne altera le caratteristiche reologiche per cui può consentire, trasformando il bitume in mastice, degli impieghi che altrimenti non sarebbero possibili (per esempio il bitume diventa più rigido, ha una minore penetrazione..).

4.4 IL BITUME

Il bitume utilizzato nella tecnica stradale è ottenuto industrialmente mediante la distillazione frazionata del petrolio.

Negli impieghi più frequenti il bitume appare come un liquido viscoso o un solido, essenzialmente costituito da idrocarburi la cui struttura è molto complessa.

Il bitume assolve la funzione di legante che trattiene insieme grani minerali di diversa forma e grandezza.

Il mantenimento di questo legame richiede che non vi sia distacco tra la pellicola di bitume e il singolo grano (adesione) e che non vi sia rottura all'interno della pellicola di bitume (coesione).

Una delle caratteristiche che contraddistingue il bitume è la termodipendenza. Esso può, infatti, essere solido o semi-solido a temperatura ambiente ed essere liquefatto per semplice riscaldamento. La suscettibilità termica costituisce, allo stesso tempo, per il bitume, un pregio ed anche un difetto, non consentendogli di conservare costanti le proprietà di coesione al variare della temperatura d'esercizio.

Da circa vent'anni a questa parte, in campo stradale, si assiste alla progressiva affermazione di nuovi bitumi capaci d'alte prestazioni detti "bitumi modificati" e perciò è valso l'uso, per distinguerlo, di chiamare il bitume non modificato "bitume tradizionale".

Per ciò che attiene i bitumi tradizionali per uso stradale, la normativa di riferimento, è la UNI EN 12591, riportata schematicamente nella Figura 21. Come si può facilmente osservare, la tabella prevede svariate classi di bitume, espresse dall'intervallo dei valori della penetrazione a 25°C.

Specifiche C.E.N. per bitumi stradali (estratto dalla norma EN 12591/1999)													
Grado	Metodo EN	corrisp C.N.R.	unità di misura		20/30	30/45	35/50	40/60	50/70	70/100	100/150	160/220	250/330
Caratteristiche fondamentali													
Penetrazione a 25°C	EN 1426	24/71	mm/10	min	20-30	30-45	35-50	40-60	50-70	70-100	100-150	160-220	250-330
Rammollimento	EN 1427	35/73	°C	min	55-63	52-60	50-58	48-56	46-54	43-51	39-47	35-43	30-38
Punto di infiammabilità	EN 22592 (1)	72/79	°C	min	240	240	240	230	230	230	230	220	220
Solubilità	EN 12592	48/75	%	min	99	99	99	99	99	99	99	99	99
Resistenza all'invecchiamento:	EN 12607-1	54/77											
Variazione di peso	EN 12607-1	54/77	%	max	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.8	0.8	1	1
Penetrazione residua	EN 1426	24/71	%	min	55	53	53	50	50	46	43	37	35
Rammollimento dopo invecchiamento	EN 1427	35/73	°C	min	57	54	52	49	48	45	41	37	32
Caratteristiche Nazionali (2)													
Punto di rottura Fraass	prEN 12593	43/74	°C	max	-5	-5	-5	-7	-8	-10	-12	-15	-16
Resistenza all'invecchiamento:													
Variazione massima del rammollimento (3)	EN 1427	35/73	°C	max	10	11	11	11	11	11	12	12	12

Figura 21 Specifiche UNI EN 12591 per bitumi stradali.

Il mercato italiano, preferisce bitumi con classe di penetrazione pari a 50/70 0,1/mm e 70/100 0,1/mm per le pavimentazioni stradali. Nei regioni con clima freddo si usa il bitume con classe con penetrazione più elevata.

Un bitume modificato si differenzia da uno tradizionale soprattutto per quanto riguarda:

- ☐ la penetrazione a 25°C;
- ☐ il punto di rammollimento (Palla & Anello);
- ☐ la viscosità a diverse temperature.

Tuttavia, bisogna ricordare che il parametro “viscosità” non è prescritto né dalla vecchia normativa C.N.R., né dall’attuale normativa CEN; penetrazione e punto di rammollimento sono, invece, sempre indicati e sono valori basilari che devono essere noti e determinati, soprattutto in vista di un riciclaggio del conglomerato bituminoso.

Il bitume modificato viene ottenuto nell’ambito di un processo controllato (chimico e/o meccanico), dalla miscelazione di un idoneo bitume di base (bitume pro-modifica) con compatibili polimeri modificanti. Il legante ottenuto dal procedimento ha modificato il suo comportamento reologico e la suscettività termica in forma sostanziale, assimilando

gradualmente le caratteristiche dei polimeri aggiunti.

4.5 PRODOTTI CHIMICI UTILIZZABILI NELLA PRODUZIONE DEI CONGLOMERATI

Vari additivi e modificanti sono usati nell'industria dell'asfalto. Possono essere prodotti a partire da materie prime vergini o usando materiali riciclati. Essi possono essere di natura vegetale o minerale e prodotti utilizzando fino al 90% degli oli lubrificanti usati. L'uso dei cosiddetti additivi verdi, composti di oli riciclati, consente una riduzione dell'impatto ambientale relativa al risparmio nell'uso delle materie prime.

Additivi per asfalto sono:

- attivanti;
- rigeneranti;
- flussanti.

Attivanti.

Le superfici stradali possono essere soggette a deterioramento causato da un'adesione debole tra aggregati e bitume, specialmente quando ciò avviene sullo strato in superficie. Tale danno è evidenziato dal distacco e dalla perdita di aggregati di superficie e dalla conseguente formazione di crepe e buche. In questo modo l'acqua sarà in contatto con ogni singolo strato di pavimentazione e si degraderà l'intera sezione stradale. Alcuni tipi di miscele di asfalto, compresi quelli con contenuto elevato di RAP, sono particolarmente esposti a questo fenomeno. I prodotti attivanti agiscono come agenti di protezione contro questi effetti distruttivi dell'acqua.

Rigeneranti.

Per riutilizzare il fresato con la tecnologia del riciclaggio mediante processi a caldo o freddo, è necessario rigenerare le proprietà chimiche e fisiche del bitume perse durante l'invecchiamento in servizio. Questa è la funzione di questi additivi, che rigenerano il bitume ossidato, ripristinando le frazioni volatili del legante perse durante l'invecchiamento.

Flussanti.

I flussanti sono materiali utilizzati per ammorbidire il bitume in caso di impiego sotto forma di emulsioni con mano di legante o nel processo di riparazione di buche, per migliorare lavorabilità alla miscela.

Modificanti per asfalto:

- fibre;
- polimeri;
- gomme.

Fibre.

La necessità di utilizzare un'alta percentuale di bitume modificato nell'asfalto poroso e di assicurare la durata degli strati richiede talora l'uso di additivi rinforzanti come fibre, sintetiche o naturali, che generano un reticolante interno nella struttura bituminosa. Le fibre migliorano le proprietà meccaniche dell'asfalto convenzionale migliorando la durata. Grazie alla loro capacità di creare una pellicola più spessa di legante attivo, le fibre rappresentano una soluzione valida al problema della fragilità e del dislocamento, specialmente in conglomerati con un'alta percentuale di vuoti.

Polimeri.

Composti polimerici sono una miscela di polimeri selezionati riciclati di varia natura, che sono fatti di granuli lisci o flessibili. Essi sono utilizzati per produrre tutti i tipi di miscele bituminose in cui sia necessaria una modifica del bitume per migliorare le caratteristiche del asfalto e per aumentare la resistenza meccanica.

Gomme.

Gli pneumatici usurati (cioè alla fine del ciclo di vita) possono essere usati per produrre molti tipi di gomma in granuli, che aggiunta al conglomerato, contribuisce ad abbassare il rumore prodotto dal rotolamento degli pneumatici.

5 PROGRAMMA SPERIMENTALE

5.1 ARTICOLAZIONE GENERALE DEL PROGRAMMA

La fase sperimentale di seguito descritta è stata sviluppata interamente nel laboratorio di Strade dell'Università di Padova, dove è avvenuto il confezionamento dei provini tramite il compattatore giratorio e il compattatore a rullo, con dosaggi variabili di fresato e con aggiunta di additivi diversi.

Nelle costruzioni stradali normalmente si tende ad utilizzare una differente pezzatura degli aggregati a seconda dello strato: pezzatura 0/15 per lo strato di usura, pezzatura 0/25 per lo strato di binder, pezzatura 0/40 per lo strato di base e per lo strato di fondazione in misto cementato, pezzatura 0/71 per strato di fondazione in misto granulare. Si può facilmente osservare come la dimensione massima dell'inerte si riduca progressivamente partendo dagli strati in profondità e risalendo via via verso gli strati superiori: lo spessore degli strati si riduce dal basso verso l'alto perché la qualità del materiale impiegato migliora e perché l'entità delle sollecitazioni aumenta. Dovendo inoltre garantire una certa uniformità all'interno dello strato, le dimensioni dell'aggregato non devono mai superare all'incirca la metà dello spessore dello strato in cui è contenuto.

L'esperienza pratica e le ormai numerose ricerche di laboratorio hanno portato fino ad oggi a lavorare con integrazioni pari a circa il 5% di bitume in massa della miscela.

Lo studio presente si articola in cinque fasi principali e può essere schematizzato attraverso i seguenti elementi principali, che saranno descritti nel paragrafo successivo:

- Fase 1: Organizzazione del Progetto
 - Descrizione dei materiali utilizzati
 - Mix design
- Fase 2: Analisi della compattazione
 - Preparazione e compattazione dei provini
 - Analisi dei risultati ottenuti con la pressa giratoria a taglio
 - Contenuto di vuoti
- Fase 3: Prova di trazione indiretta: Indirect Tensile Straight ITS
 - Descrizione delle modalità e delle procedure operative

- Fase 4: Prova di Modulo: Indirect Tensile Stiffness Modulus ITSM
 - I test di laboratorio per la determinazione dei moduli dinamici
 - Descrizione delle modalità e delle procedure operative
 - UNI EN 12697-26 ANNESSO C
 - UNI EN 12697-26 ANNESSO B

5.2 DENOMINAZIONE DEI PROVINI

Con i materiali prescelti sono stati confezionate 10 diverse miscele:

- RAP 0 – miscela tradizionale, composta da aggregato naturale con pezzatura richiesta dal fuso limite e bitume, con 0% di fresato e senza additivi, (miscela di controllo)
- RAP 20 – miscela, composta da aggregato naturale con pezzatura richiesta dal fuso limite, con bitume, con il 20% di fresato e senza additivi;
- RAP 50 – miscela, composta da aggregato naturale con pezzatura richiesta dal fuso limite, con bitume, con il 50% di fresato e senza additivo;
- RAP 70 - miscela, composta da aggregato naturale con pezzatura richiesta dal fuso limite, con bitume, con il 70% di fresato e senza additivo;
- RAP 20A - miscela, composta da aggregato naturale con pezzatura richiesta dal fuso limite, con bitume, con il 20% di fresato e con additivo americano (A);
- RAP 20I - miscela, composta da aggregato naturale con pezzatura richiesta dal fuso limite, con bitume, con il 20% di fresato e con additivo italiano (I);
- RAP 50A - miscela, composta da aggregato naturale con pezzatura richiesta dal fuso limite, con bitume, con il 50% di fresato e con additivo americano (A);
- RAP 50I - miscela, composta da aggregato naturale con pezzatura richiesta dal fuso limite, con bitume, con il 50% di fresato e con additivo italiano (I);
- RAP 70A - miscela, composta da aggregato naturale con pezzatura richiesta dal fuso limite, con bitume, con il 70% di fresato e con additivo americano (A);
- RAP 70I - miscela, composta da aggregato naturale con pezzatura richiesta dal fuso limite, con bitume, con il 70% di fresato e con additivo italiano (I).

6 PARTE SPERIMENTALE

6.1 DESCRIZIONE DEI MATERIALI UTILIZZATI

6.1.1 Gli Aggregati

Per confezionamento delle miscele sono stati utilizzati aggregati forniti da un Produttore locale. Siccome sono state valutate le prestazioni di un conglomerato bituminoso per strato di usura, sono state scelte le seguenti pezzature:

- calcare 0/4;
- calcare 4/8;
- calcare 8/12.

Ognuna di queste pezzature possiede proprie caratteristiche e ha una propria curva granulometrica (calcolata mediante un'analisi granulometrica). La curva granulometrica è una curva costituita da punti che rappresentano la percentuale di passante ad un determinato setaccio.

Per ottenere la curva si prende un campione di materiale ottenuto per quartatura, lo si porta ad essiccare in forno a 105-110°C fino al raggiungimento di un peso costante; poi si prendono vagli e setacci (a seconda della normativa), si impilano uno sull'altro con la dimensione delle aperture decrescenti dall'alto verso il basso, si versa il materiale sul crivello/setaccio superiore e si imprime un movimento "rotatorio-sussultorio" per facilitare il passaggio attraverso i fori. Terminata l'operazione si pesa il materiale raccolto nel fondo e quello trattenuto in ciascun setaccio e si sommano i trattenuti progressivamente. Dopodiché si disegna una curva in cui si pone sull'asse delle ascisse la dimensione delle aperture e sull'asse delle ordinate la percentuale di trattenuto.

Di seguito si riportano i risultati e i grafici ottenuti nella sperimentazione condotta su diverse pezzature di calcare:

➤ calcare 0/4:

Tipo	Apertura magli,mm	Trattenuto [g]	Trattenuto [%]	Passante [g]	Passante [%]
Crivello [mm]	60		0,00	1192	100,00
	40		0,00	1192	100,00
	25		0,00	1192	100,00
	20		0,00	1192	100,00
	15		0,00	1192	100,00
	10	0	0,00	1192	100,00
Setaccio [mm]	5	33	2,77	1159	97,23
	2	350	29,36	809	67,87
	0,4	487	40,86	322	27,01
	0,18	145	12,16	177	14,85
	0,075	84	7,05	93	7,80
	fondo	93	7,80	0	0,00
Totale		1192	100		

Tabella 2 Setacciatura calcare 0/4

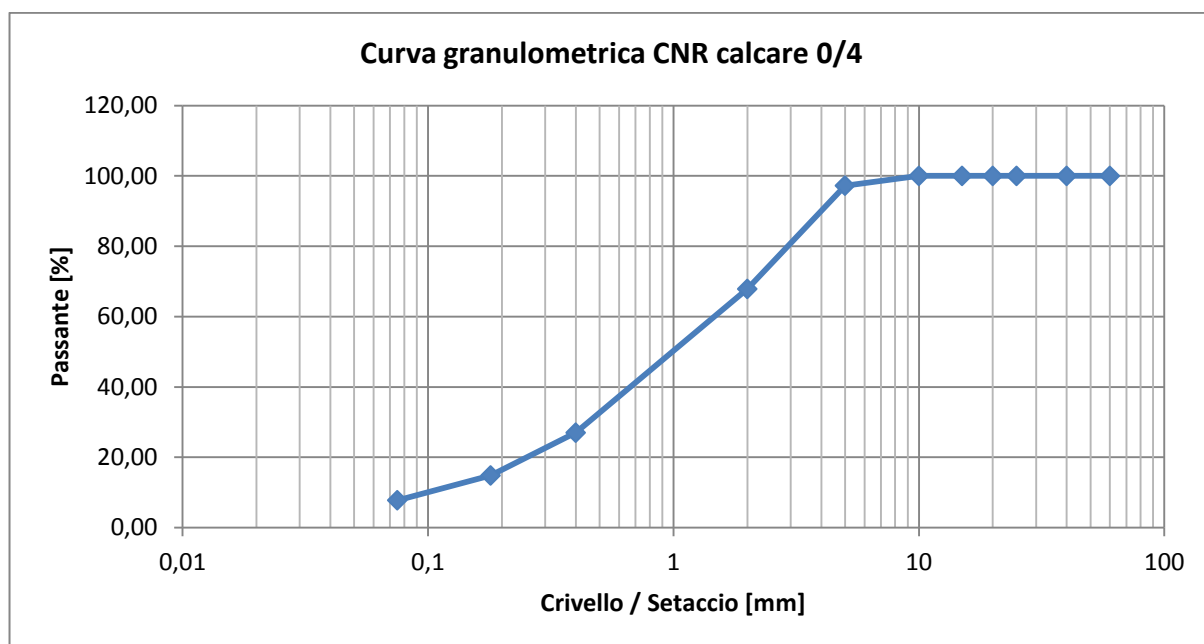


Figura 22 Curva granulometrica calcare 0/4

➤ calcare 4/8

Tipo	Apertura magli,mm	Trattenuto [g]	Trattenuto [%]	Passante [g]	Passante [%]
Crivello [mm]	60		0,00	952	100,00
	40		0,00	952	100,00
	25		0,00	952	100,00
	20		0,00	952	100,00
	15	0	0,00	952	100,00
	10	14	1,47	938	98,53
Setaccio [mm]	5	757	79,52	181	19,01
	2	175	18,38	6	0,63
	0,4	6	0,63	0	0,00
	0,18	0	0,00	0	0,00
	0,075	0	0,00	0	0,00
	fondo	0	0,00	0	0,00
Totale		952	100		

Tabella 3 Setacciatura calcare 4/8

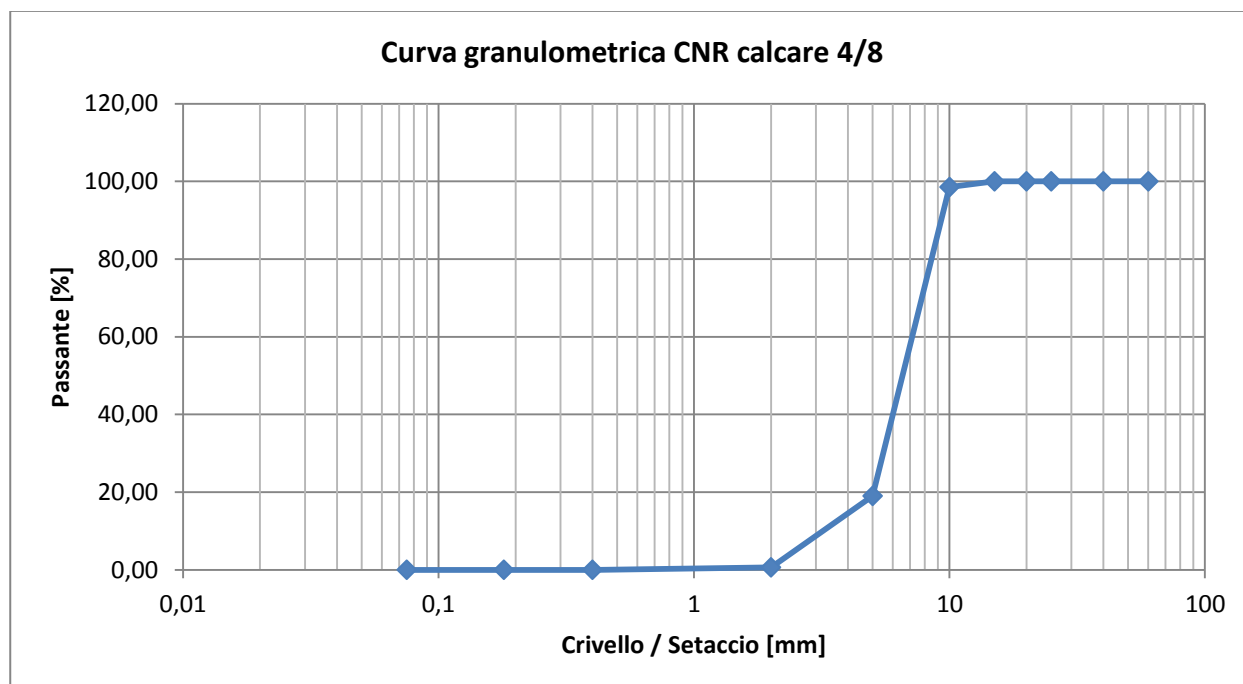


Figura 23 Curva granulometrica calcare 4/8

➤ calcare 8/12

Tipo	Apertura magli,mm	Trattenuto [g]	Trattenuto [%]	Passante [g]	Passante [%]
Crivello [mm]	60		0,00	2036	100,00
	40		0,00	2036	100,00
	25		0,00	2036	100,00
	20	0	0,00	2036	100,00
	15	48	2,36	1988	97,64
	10	1325	65,08	663	32,56
	5	660	32,42	3	0,15
Setaccio [mm]	2	0	0,00	3	0,15
	0,4	0	0,00	3	0,15
	0,18	0	0,00	3	0,15
	0,075	0	0,00	3	0,15
	fondo	3	0,15	0	0,00
Totale		2036	100		

Tabella 4 Setacciatura calcare 8/12

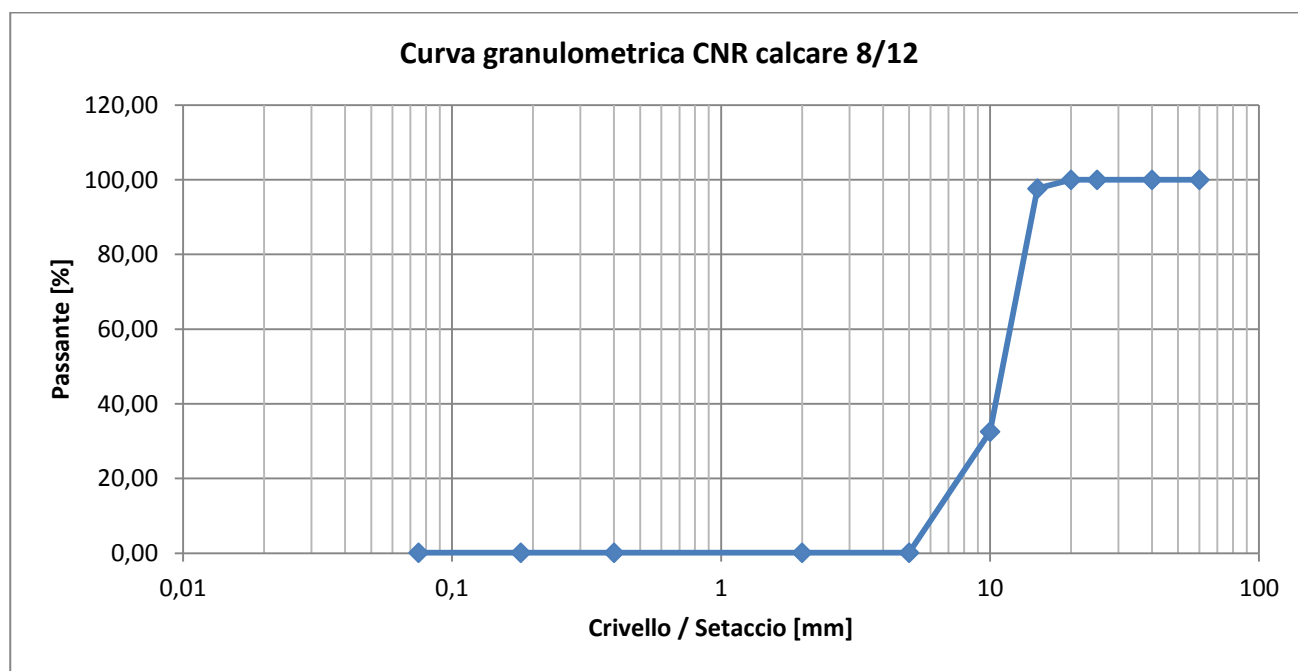


Figura 24 Curva granulometrica calcare 8/12

6.1.2 IL fresato

Per la sperimentazione è stato utilizzato del fresato: questo è un materiale proveniente dalla scarifica dello strato superficiale di pavimentazioni in conglomerato bituminoso.

Il materiale fresato, come il materiale calcareo nuovo, necessita dello studio della curva granulometrica degli inerti: essendo infatti costituito per il 93-97% in peso da aggregati litici e per il resto da bitume invecchiato si deve considerare a tutti gli effetti come un materiale inerte.

La distribuzione granulometrica degli aggregati è stata valutata vagliando gli stessi in appositi setacci, seguendo la procedura descritta dalla normativa UNI EN 933-1.

Tipo	Apertura magli,mm	Trattenuto [g]	Trattenuto [%]	Passante [g]	Passante [%]
Crivello [mm]	60		0,00	1021	100,00
	40		0,00	1021	100,00
	25		0,00	1021	100,00
	20		0,00	1021	100,00
	15		0,00	1021	100,00
	10	3	0,29	1018	99,71
	5	165	16,16	853	83,55
Setaccio [mm]	2	283	27,72	570	55,83
	0,4	441	43,19	129	12,63
	0,18	99	9,70	30	2,94
	0,075	24	2,35	6	0,59
	fondo	6	0,59	0	0,00
	Totale	1021	100		

Tabella 5 Setacciatura fresato "tal quale"

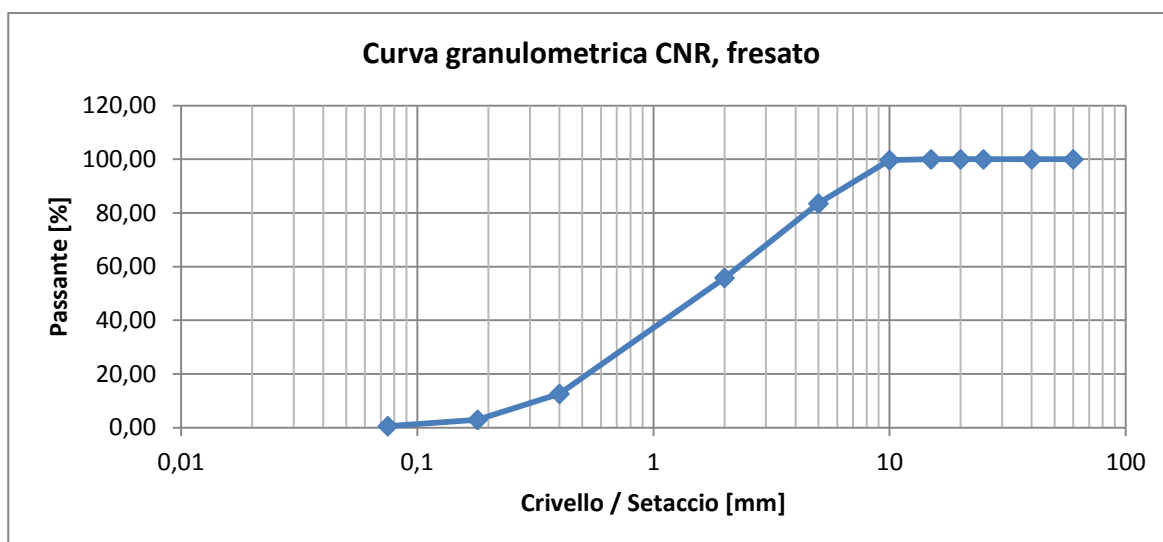


Figura 25 Curva granulometrica fresato

Il fresato è stato sottoposto inoltre a prove di estrazione del bitume invecchiato residuo. Il contenuto di bitume è risultato pari al 5% in massa, cioè la stessa percentuale di bitume che si è deciso di utilizzare per la miscela tradizionale.

6.1.3 Il filler

L'aggiunta del filler nel bitume influisce sulle caratteristiche reologiche. Le esperienze eseguite hanno messo in evidenza che l'assorbimento del bitume da parte del filler varia molto con la penetrazione del bitume e con la natura dell'additivo. Il punto di rammollimento aumenta con il crescere del tenore del filler mentre la penetrazione decresce con l'aumentare di esso. Siccome si stanno analizzando conglomerati bituminosi per regioni con clima freddo, non è accettabile ridurre la penetrazione. L'adesione sugli aggregati asciutti aumenta con la percentuale di additivo: tale aumento comincia a notarsi al di sopra di un certo valore di detta percentuale.

Nelle miscele confezionate si limita la quantità di filler al 9% in peso.

La curva granulometrica di filler è seguente:

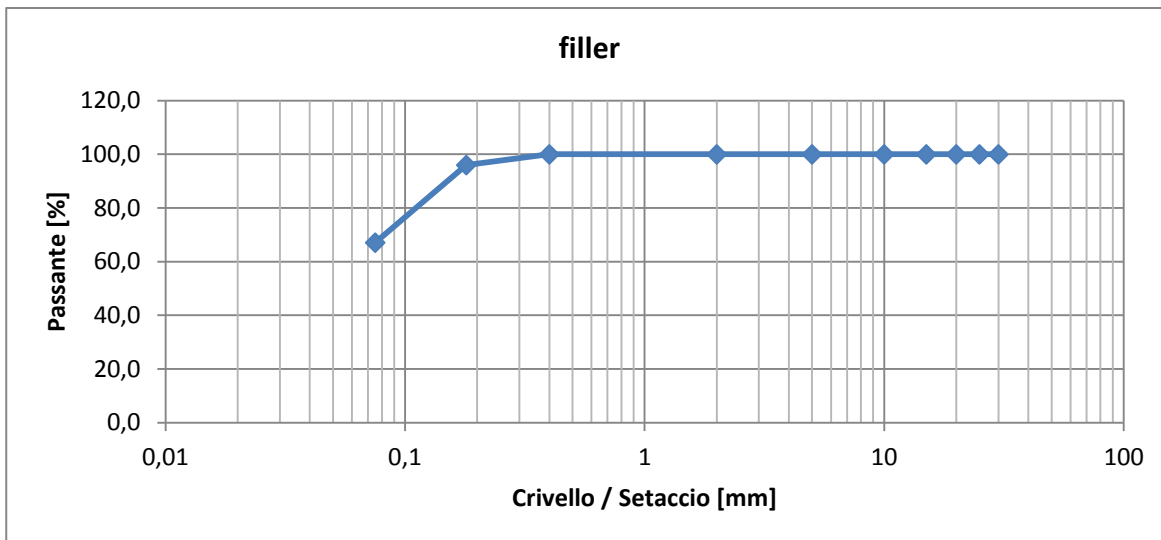


Figura 26 Curva granulometrica filler

6.1.4 Il bitume

Nelle regioni con clima freddi vengono utilizzati bitumi teneri. Visto che a basse temperature si verifica il fenomeno del thermal cracking, ovvero il bitume indurisce diventando più rigido e fragile, durante la sperimentazione è stato utilizzato un bitume con classe di penetrazione 70/100 0,1/mm.

6.1.5 Gli additivi

L'introduzione di fresato comporta indirettamente difficoltà dovute all'incremento di viscosità del conglomerato, in quanto la viscosità del bitume da rigenerare è molto alta. L'aggiunta di rigeneranti porta ad una riduzione della viscosità con conseguente aumento di lavorabilità, adesione agli inerti e compattazione del conglomerato, ed una possibilità di diminuire le temperature di lavorazione e di stesa rispetto un conglomerato senza rigenerante, con un risparmio sul consumo di carburanti ed una ridotta emissione di gas inquinanti in atmosfera.

Il bitume rigenerato generalmente è bilanciato con l'aggiunta di legante fresco più morbido di quello tradizionale utilizzato per produrre miscele calde. Tuttavia, il

bilanciamento non produce un bitume identico a quella originale. Fondamentalmente, la rigenerazione del legante invecchiato serve per riequilibrare la struttura molecolare del bitume. Questo processo implica l'uso di composti organici speciali come rigeneranti.

Il primo additivo utilizzato è di produzione italiana (di seguito denominato “Italiano” - I). Esso è un additivo liquido polifunzionale ad elevato potere rigenerante di nuova generazione, esente dalla presenza di oli aromatici, molto pericolosi per la salute dell'uomo.

Inoltre, il prodotto presenta un basso impatto odorigeno. Costituito da diversi componenti chimici. L'additivo italiano inoltre è antiossidante, plastificante, rigenerante, bagnante, diluente e disperdente. Nei confronti del bitume è un attivante di adesione.

Il prodotto consente di “rigenerare” efficientemente il bitume proveniente dal fresato utilizzato nel confezionamento dei conglomerati bituminosi e si aggiunge direttamente al legante nelle cisterne di stoccaggio o in linea durante il ciclo produttivo, mediante l'uso di appositi dosatori.

La percentuale di prodotto deve essere pari allo $0,20 \div 0,40\%$ sul peso del fresato utilizzato. Nella sperimentazione è stato adottato il valore maggiore e cioè $0,40\%$.

Il dosaggio dell'additivo italiano varia in funzione della percentuale di fresato integrata nel conglomerato bituminoso e delle condizioni operative di lavoro (temperatura, distanza dal cantiere, umidità del fresato ecc.).

Il secondo additivo è prodotto da un'azienda americana (di seguito denominato “Americano” - A). Esso è potente, completamente naturale, rigenerante e ottenuto da olio di piante a seguito di speciale processo produttivo. Non è basato e non contiene i grassi da animali o industriali. Questo additivo è inoltre compatibile con tutti i tipi di bitume. Ringiovanisce le caratteristiche di base del bitume e riduce la necessità di bitume nuovo. Questo rigenerante è consigliato come additivo per migliorare le caratteristiche dei conglomerati con elevato contenuto di RAP utilizzati nelle regioni con basse temperature.

Il prodotto può essere aggiunto al conglomerato bituminoso sia a temperatura ambiente che alla temperatura di produzione.

La percentuale di prodotto varia da 0.5% a 0.75% sul peso del fresato.

Nella sperimentazione è stato adottato il valore maggiore e cioè 0,75%.

6.1.6 Confronto delle caratteristiche del pietrisco e del fresato

L'indagine in laboratorio ha permesso di mettere in evidenza le caratteristiche meccaniche degli aggregati presi in considerazione. Di seguito vengono riportati i risultati delle singole prove con riferimento alla relativa norma d'esecuzione. Le norme a cui si è fatto riferimento sono:

- CNR 62 per la massa volumica apparente non addensata;
- CNR 63 per la massa volumica apparente;
- CNR 64 per la massa volumica reale;
- CNR 95 per l'indice di forma e l'indice di appiattimento;
- UNI EN 1097-2 per la resistenza alla frammentazione (Los Angeles);
- CNR UNI 10014 per i limiti di Atterberg.

RISULTATI MASSA VOLUMICA APPARENTE DI AGGREGATI NON ADDENSATI (CNR 62)

CALCARE 0/4		
<i>massa volumica apparente non addensata</i>	MVA [g/cm³]	1,69
massa materiale nel contenitore	1 [g]	3497,0
massa materiale nel contenitore	2 [g]	3474,0
massa materiale nel contenitore	2 [g]	3471,0
	Media [g]	3480,7
Volume recipiente	V [litri] [dm ³]	2,1
Volume recipiente	V [cm ³]	2055,41

Tabella 6 Massa volumica apparente non addensata, calcare 0/4

CALCARE 4-8		
<i>massa volumica apparente non addensata</i>	MVA [g/cm³]	1,39
massa materiale nel contenitore	1 [g]	2866,0
massa materiale nel contenitore	2 [g]	2827,0
massa materiale nel contenitore	2 [g]	2874,0
	Media [g]	2855,7
Volume recipiente	V [litri] [dm ³]	2,055
Volume recipiente	V [cm ³]	2055,41

Tabella 7 Massa volumica apparente non addensata, calcare 4/8

CALCARE 8/12		
<i>massa volumica apparente non addensata</i>	MVA [g/cm³]	1,40
massa materiale nel contenitore	1 [g]	15080,0
massa materiale nel contenitore	2 [g]	14993,0
massa materiale nel contenitore	2 [g]	15118,0
	Media [g]	15063,7
Volume recipiente	V [litri] [dm ³]	10,782
Volume recipiente	V [cm ³]	10782

Tabella 8 Massa volumica apparente non addensata, calcare 8/12

FRESATO		
<i>massa volumica apparente non addensata</i>	MVA [g/cm³]	1,33
massa materiale nel contenitore	1 [g]	2767
massa materiale nel contenitore	2 [g]	2768
massa materiale nel contenitore	2 [g]	2677
	Media [g]	2737,33
Volume recipiente	V [litri] [dm ³]	2,055
Volume recipiente	V [cm ³]	2055,41

Tabella 9 Massa volumica apparente non addensata, fresato

Come si evince dai risultati, il fresato è caratterizzato da una massa volumica apparente non addensata inferiore a quella del calcare. Questo permette di dedurre come, a parità di volume, il fresato pesa meno. Facendo una media tra i risultati ottenuti dalle varie pezzature degli aggregati, si deduce che: la media della massa volumica apparente non

addensata del calcare è di 1,49 g/cm³, la massa volumica apparente non addensata del fresato è di 1,33 g/cm³.

RISULTATI MASSA VOLUMICA APPARENTE DEI GRANULI DI UN AGGREGATO (CNR 63)

CALCARE 0/4		
<i>massa volumica apparente dei granuli</i>	MVA_p [g/cm³]	2,76
<i>massa materiale essiccato nel picnometro</i>	p [g]	500,0
<i>massa materiale e acqua nel picnometro</i>	p ₁ [g]	1887,0
<i>massa acqua nel picnometro</i>	p ₂ [g]	1565,0
<i>massa volumica dell'acqua</i>	γ _w [g/cm ³] (a 23,5 °C)	0,981

Tabella 10 Massa volumica apparente dei granuli, calcare 0/4

CALCARE 4/8		
<i>massa volumica apparente dei granuli</i>	MVA_p [g/cm³]	2,75
<i>massa materiale essiccato nel picnometro</i>	p [g]	500,0
<i>massa materiale e acqua nel picnometro</i>	p ₁ [g]	1886,6
<i>massa acqua nel picnometro</i>	p ₂ [g]	1565,0
<i>massa volumica dell'acqua</i>	γ _w [g/cm ³] (a 23,5 °C)	0,981

Tabella 11 Massa volumica apparente dei granuli, calcare 4/8

CALCARE 8/12		
<i>massa volumica apparente dei granuli</i>	MVA_p [g/cm³]	2,77
<i>massa materiale essiccato nel picnometro</i>	p [g]	500,0
<i>massa materiale e acqua nel picnometro</i>	p ₁ [g]	1887,9
<i>massa acqua nel picnometro</i>	p ₂ [g]	1565,0
<i>massa volumica dell'acqua</i>	γ _w [g/cm ³] (a 23,5 °C)	0,981

Tabella 12 Massa volumica apparente dei granuli, calcare 8/12

FRESATO		
<i>massa volumica apparente dei granuli</i>	MVA_p [g/cm³]	2,35
<i>massa materiale essiccato nel picnometro</i>	p [g]	500,0
<i>massa materiale e acqua nel picnometro</i>	p ₁ [g]	1854,0
<i>massa acqua nel picnometro</i>	p ₂ [g]	1563,0
<i>massa volumica dell'acqua</i>	γ _w [g/cm ³] (a 23,5 °C)	0,981

Tabella 13 Massa volumica apparente dei granuli,i fresato

La prova è stata eseguita per le varie pezzature e per entrambi i tipi di aggregati. Viene confermato quanto dedotto dalla prova precedente, ovvero che a parità di volume il fresato è meno pesante del calcare. Infatti mediamente si ottiene la seguente massa volumica apparente: per il calcare pari a 2,76 g/cm³; per il fresato pari a 2,35 g/cm³.

RISULTATI DELLA MASSA VOLUMICA REALE DEI GRANULI DI UN AGGREGATO (CNR 64)

CALCARE 0/4		
<i>massa volumica reale dei granuli</i>	MVR [g/cm³]	2,80
<i>massa materiale essiccato nel picnometro</i>	p [g]	40
<i>massa materiale e acqua nel picnometro</i>	p ₁ [g]	1591
<i>massa acqua nel picnometro</i>	p ₂ [g]	1565
<i>massa volumica dell'acqua</i>	γ _w [g/cm ³] (a 23,5 °C)	0,981

Tabella 14 Massa volumica reale dei granuli, calcare 0/4

CALCARE 4/8		
<i>massa volumica reale dei granuli</i>	MVR [g/cm³]	2,80
<i>massa materiale essiccato nel picnometro</i>	p [g]	40
<i>massa materiale e acqua nel picnometro</i>	p ₁ [g]	1591
<i>massa acqua nel picnometro</i>	p ₂ [g]	1565
<i>massa volumica dell'acqua</i>	γ _w [g/cm ³] (a 23,5 °C)	0,981

Tabella 15 Massa volumica reale dei granuli, calcare 4/8

CALCARE 8/12		
<i>massa volumica reale dei granuli</i>	MVR [g/cm³]	2,80
<i>massa materiale essiccato nel picnometro</i>	p [g]	40
<i>massa materiale e acqua nel picnometro</i>	p ₁ [g]	1591
<i>massa acqua nel picnometro</i>	p ₂ [g]	1565
<i>massa volumica dell'acqua</i>	γ _w [g/cm ³] (a 23,5 °C)	0,981

Tabella 16 Massa volumica reale dei granuli, calcare 8/12

FRESATO		
<i>massa volumica reale dei granuli</i>	MVR [g/cm³]	2,64
<i>massa materiale essiccato nel picnometro</i>	p [g]	45
<i>massa materiale e acqua nel picnometro</i>	p ₁ [g]	1600,5
<i>massa acqua nel picnometro</i>	p ₂ [g]	1572,2
<i>massa volumica dell'acqua</i>	γ _w [g/cm ³] (a 23,5 °C)	0,981

Tabella 17 Massa volumica reale dei granuli, fresato

Determinate le masse volumiche reali (pari a 2,80 g/cm³ per il calcare e 2,64 g/cm³ per il fresato) , si conferma nuovamente quanto commentato sopra.

RISULTATI DI FORMA DI AGGREGATI LAPIDEI (CNR95)

CALCARE 4/8	I_f [%]	12,8
Massa totale dei 100 o più elementi sottoposti a misura	M ₀ [g]	39,0
Massa elementi passanti al calibro secondario	M ₁ [g]	5,0

Tabella 18 l'indice di forma, calcare 4/8

CALCARE 8/12	I_f [%]	7,5
Massa totale dei 100 o più elementi sottoposti a misura	M ₀ [g]	147,0
Massa elementi passanti al calibro secondario	M ₁ [g]	11,0

Tabella 19 l'indice di forma, calcare 4/8

FRESATO	I_f [%]	1
Massa totale dei 100 o più elementi sottoposti a misura	M ₀ [g]	3994
Massa elementi passanti al calibro secondario	M ₁ [g]	29

Tabella 20 l'indice di forma, fresato

Per un'adeguata resistenza meccanica del conglomerato è necessario scegliere aggregati che siano meno piatti possibile, ovvero che una dimensione non prevalga sull'altra. Il calcare analizzato presenta un indice di forma abbastanza basso, quindi il pietrisco risulta di forma poliedrica e quindi idoneo all'impiego. Confrontando le geometrie del calcare con il fresato, queste ultime risultano ancora migliori, con valori dell'indice di forma nettamente inferiori.

RISULTATI DELL'INDICE DI APPIATTIMENTO DI AGGREGATI LAPIDEI

CALCARE 4/8				
Massa del provino	M_0 [g]	1542		
Indice di appiattimento globale del provino	I_a [-]	10,5		
d/D [mm]	M_f [g]	Ag [mm]	M_g [g]	I_{afg} [-]
50 - 63	0	31,7	0	-
40 - 50	0	25,3	0	-
31,5 - 40	0	20	0	-
25 - 31,5	0	16	0	-
20 - 25	0	12,5	0	-
16 - 20	0	10	0	-
12,5 - 16	0	8	0	-
10 - 12,5	4	6,3	0	0,00
8 - 10	107	5	7	6,54
6,3 - 8	665	4	83	12,48
5 - 6,3	492	3,15	51	10,37
4 - 5	274	2,5	21	7,66
Totale M_f [g]	1542		162	
Verifica: $\sum M_f - M_0 < 2\%$	0,00	30,84		

Tabella 21 l'indice di appiattimento,calcare 4/8

CALCARE 8/12				
Massa del provino	M_0 [g]	2430		
Indice di appiattimento globale del provino	I_a [-]	11,8		
d/D [mm]	M_f [g]	Ag [mm]	M_g [g]	I_{afg} [-]
50 - 63	0	31,7	0	-
40 - 50	0	25,3	0	-
31,5 - 40	0	20	0	-
25 - 31,5	0	16	0	-
20 - 25	0	12,5	0	-
16 - 20	0	10	0	-
12,5 - 16	42	8	18	42,86
10 - 12,5	832	6,3	125	15,02
8 - 10	1034	5	113	10,93
6,3 - 8	420	4	25	5,95
5 - 6,3	77	3,15	4	5,19
4 - 5	13	2,5	0	0,00
Totale M_f [g]	2418		285	
Verifica: $\sum M_f - M_0 < 2\%$	12,00	48,6		

Tabella 22 l'indice di appiattimento,calcare 8/12

FRESATO				
Massa del provino	M_0 [g]	1542		
Indice di appiattimento globale del provino	I_a [-]	4,5		
d/D [mm]	M_f [g]	A_g [mm]	M_g [g]	I_{afg} [-]
50 - 63	0	31,7	0	-
40 - 50	0	25,3	0	-
31,5 - 40	0	20	0	-
25 - 31,5	0	16	0	-
20 - 25	0	12,5	0	-
16 - 20	0	10	0	-
12,5 - 16	0	8	0	-
10 - 12,5	0	6,3	0	-
8 - 10	0	5	0	-
6,3 - 8	41	4	0	0,00
5 - 6,3	72	3,15	5	6,94
4 - 5	89	2,5	4	4,49
Totale M_f [g]	202		9	
Verifica: $\sum M_f - M_0 < 2\%$	-202,00	0		

Tabella 23 24 l'indice di appiattimento, fresato

Si può notare che l'indice di appiattimento si mantiene abbastanza basso, il che significa che gli aggregati scelti hanno una pezzatura idonea.

Tuttavia nuovamente si osserva come granulometricamente il fresato dia risultati più soddisfacenti.

6.2 MIX DESIGN

Dopo aver eseguito l'analisi granulometrica e ricavato le curve granulometriche di ogni tipo di aggregato, variando la percentuale, si costruisce un'unica curva, che deve essere confrontata con un fuso di riferimento (delimitato da due curve): la curva in questione deve essere contenuta nel fuso, delimitato da due curve, una superiore e una inferiore.

I Capitolati prescrivono diversi fusi. Nel caso in esame è stato utilizzato il fuso della Società "Autostrade per l'Italia", fuso B, per strati di usura di spessore 3-4 cm. Lo stesso

capitolato mette in evidenza le percentuali minime e massime di bitume sul peso degli aggregati da aggiungere alla miscela: MIN = 5% MAX = 6,0%.

Per miscele con 0% di fresato sono state definite le seguenti percentuali degli aggregati, e il relativo fuso:

FRESATO 0%										
Conglomerato bituminoso		Percentuale di passante al singolo setaccio in base alla curva								
		SETACCI UNI (apertura in mm)								%
		15	10	5	2	0,4	0,18	0,075		
Sabbia I 0/4	0/4	100,0%	100,0%	97,2%	67,9%	27,0%	14,9%	7,8%		40
		40	40	38,892	27,15	10,804	5,94	3,12		
Pietrisco 4/8	4/8	100,0%	98,5%	19,0%	0,6%	0,0%	0,0%	0,0%		27
		27	26,6031	5,1327	0,17	0	0	0		
Pietrisco 8/12	8/12	97,6%	32,6%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%		24
		23,4312	7,8144	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036		
Fresato	0/10	100,0%	99,7%	83,6%	55,8%	12,6%	2,9%	0,6%		0
		0	0	0	0	0	0	0		
Filler		100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	96,0%	67,1%		9
		9	9	9	9	9	8,64	6,039		
TOTALE										100
		99,43	83,42	53,06	36,35	19,84	14,62	9,20		

Tabella 25 Mix design fresato 0%

Curva Granulometrica, fresato 0%

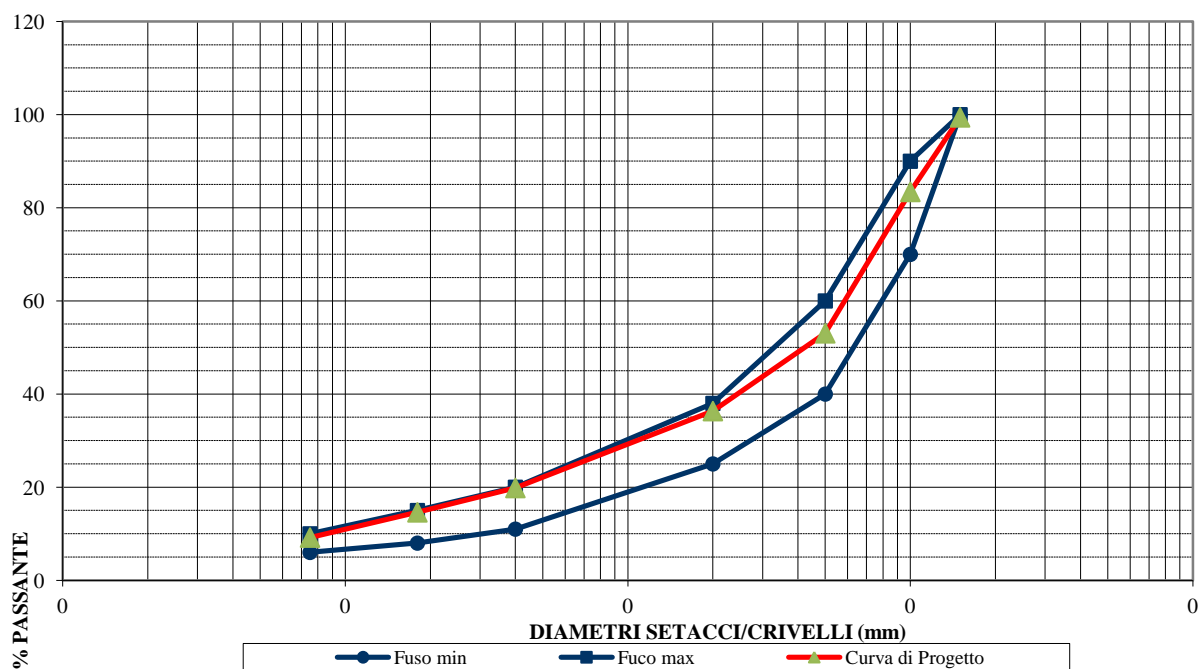


Grafico 1 Curva granulometrica, fresato 0%

La stessa procedura è stata eseguita per le altre miscele, che contengono il 20% e il 50% di RAP.

In seguito si vedono le percentuali degli aggregati e i corrispondenti fusi per:

- Miscela con il 20% di fresato:

FRESATO 20%												
Conglomerato bituminoso		Percentuale di passante al singolo setaccio in base alla curva										
		SETACCI UNI (apertura in mm)										%
		15	10	5	2	0,4	0,18	0,075				
Frazione												
Sabbia I 0/4	0/4	100,0% 25	100,0% 25	97,2% 24,308	67,9% 16,97	27,0% 6,7525	14,9% 3,713	7,8% 1,95				25
Pietrisco 4/8	4/8	100,0% 30	98,5% 29,559	19,0% 5,703	0,6% 0,189	0,0% 0	0,0% 0	0,0% 0				30
Pietrisco 8/12	8/12	97,6% 15,6208	32,6% 5,2096	0,2% 0,024	0,2% 0,024	0,2% 0,024	0,2% 0,024	0,2% 0,024				16
Fresato	0/10	100,0% 20	99,7% 19,942	83,6% 16,71	55,8% 11,17	12,6% 2,526	2,9% 0,588	0,6% 0,118				20
Filler		100,0% 9	100,0% 9	100,0% 9	100,0% 9	100,0% 9	96,0% 8,64	67,1% 6,039				9
TOTALE												100
		99,62	88,71	55,74	37,35	18,30	12,96	8,13				

Tabella 26 Mix design fresato 20%

Curva Granulometrica, fresato 20%

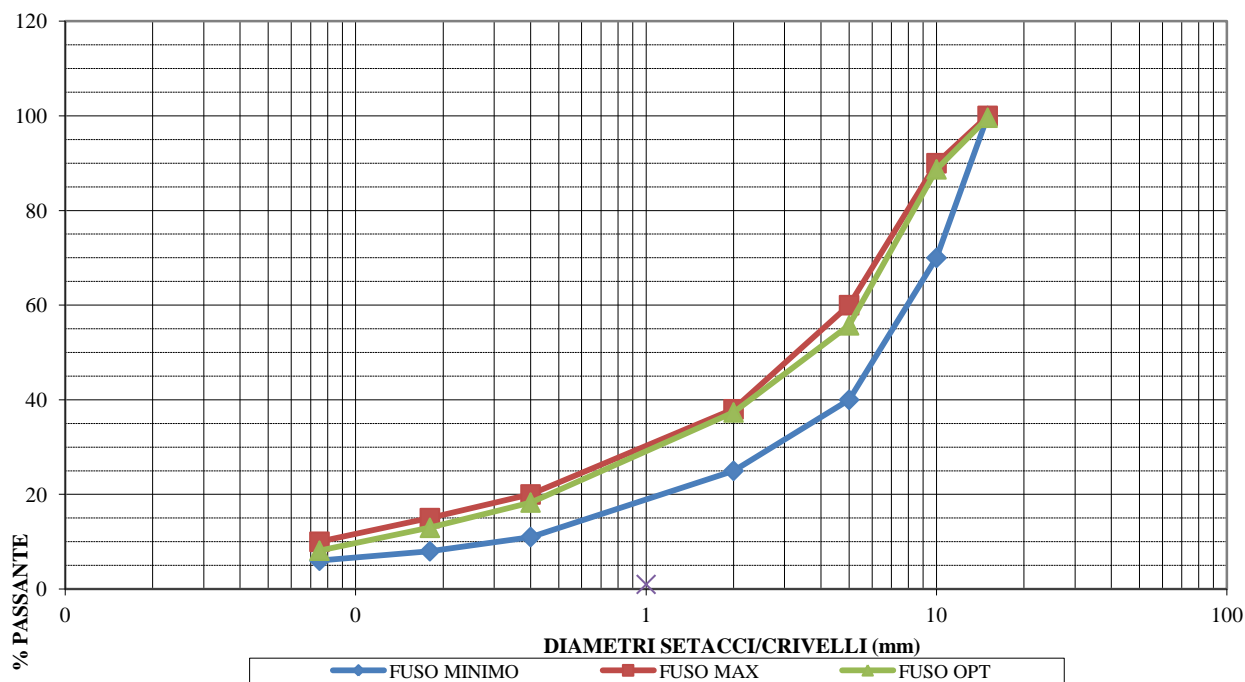


Grafico 2 Curva granulometrica, fresato 20%

➤ Miscela con il 50% di fresato:

FRESATO 50%										
Conglomerato bituminoso		Percentuale di passante al singolo setaccio in base alla curva								
		SETACCI UNI (apertura in mm)								%
		15	10	5	2	0,4	0,18	0,075		
Sabbia 0/4	0/4	100,0% 1	100,0% 1	97,2% 0,9723	67,9% 0,679	27,0% 0,2701	14,9% 0,149	7,8% 0,078		1
Pietrisco 4/8	4/8	100,0% 19	98,5% 18,7207	19,0% 3,6119	0,6% 0,12	0,0% 0	0,0% 0	0,0% 0		19
Pietrisco 8/12	8/12	97,6% 20,5023	32,6% 6,8376	0,2% 0,0315	0,2% 0,032	0,2% 0,0315	0,2% 0,032	0,2% 0,0315		21
Fresato	0/10	100,0% 50	99,7% 49,855	83,6% 41,775	55,8% 27,92	12,6% 6,315	2,9% 1,47	0,6% 0,295		50
Filler		100,0% 9	100,0% 9	100,0% 9	100,0% 9	100,0% 9	96,0% 8,64	67,1% 6,039		9
TOTALE										100
		99,50	85,41	55,39	37,74	15,62	10,29	6,44		

Tabella 27 Mix design fresato 50%

Curva Granulometrica, fresato 50%

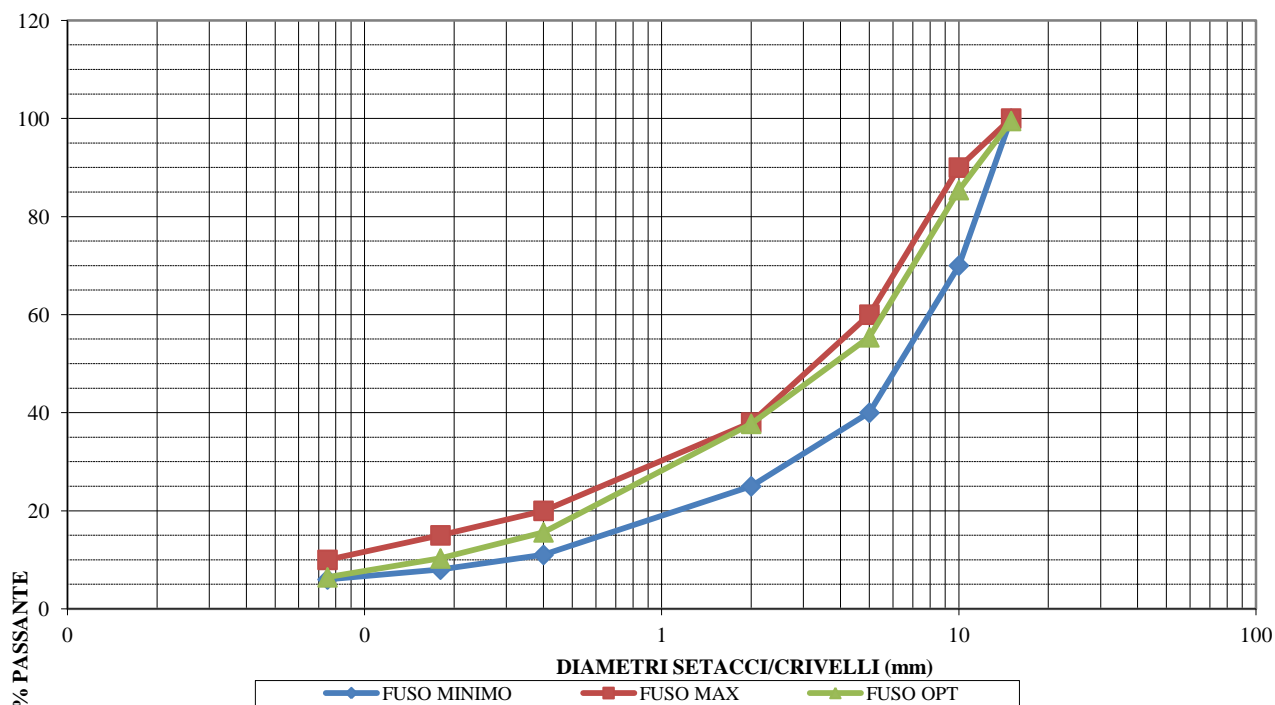


Grafico 3 Curva granulometrica, fresato 50%

Come si vede nei grafici, le curve di progetto sono interamente interne al fuso.

Per quel che riguarda la miscela con il 70% di RAP, non è stato possibile individuare la percentuale che permettesse di costruire una curva che soddisfacesse il fuso limite. Per completare l'obiettivo sperimentale si è ugualmente proceduto alla produzione della miscela, facendo attenzione che la curva fosse il più vicino a quella ideale.

Di seguito sono riportati le percentuali e il corrispondente fuso per la miscela con il 70% di RAP:

FRESATO 70%											
Conglomerato bituminoso		Percentuale di passante al singolo setaccio in base alla curva									
		SETACCI UNI (apertura in mm)									%
		Frazione	15	10	5	2	0,4	0,18	0,075		
Sabbia 0/4	0/4	100,0% 0	100,0% 0	97,2% 0	67,9% 0	27,0% 0	14,9% 0	7,8% 0			0
Pietrisco 4/8	4/8	100,0% 13	98,5% 12,8089	19,0% 2,4713	0,6% 0,082	0,0% 0	0,0% 0	0,0% 0			13
Pietrisco 8/12	8/12	97,6% 11,7156	32,6% 3,9072	0,2% 0,018	0,2% 0,018	0,2% 0,018	0,2% 0,018	0,2% 0,018			12
Fresato	0/10	100,0% 70	99,7% 69,797	83,6% 58,485	55,8% 39,08	12,6% 8,841	2,9% 2,058	0,6% 0,413			70
Filler		100,0% 5	100,0% 5	100,0% 5	100,0% 5	100,0% 5	96,0% 4,8	67,1% 3,355			5
TOTALE											100
		99,72	91,51	65,97	44,18	13,86	6,88	3,79			

Tabella 28 Mix design, fresato70%

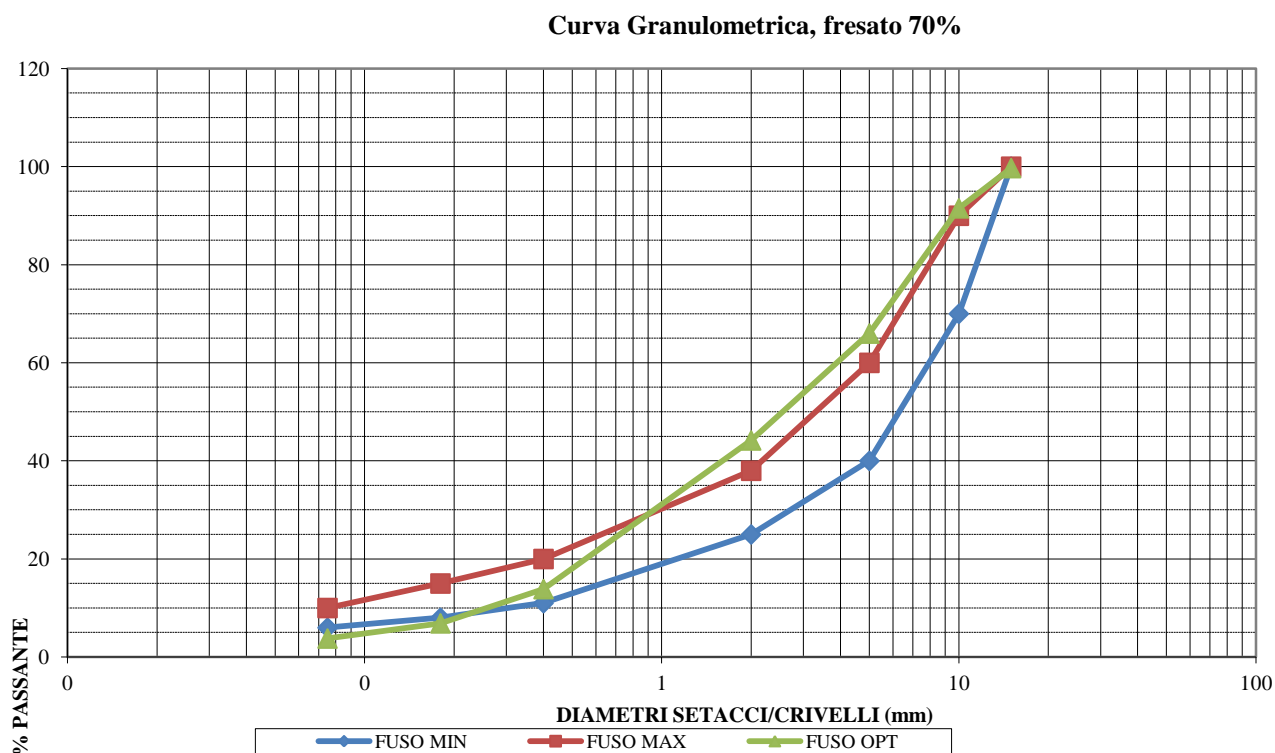


Grafico 4 Curva granulometrica, fresato 70%

6.3 PREPARAZIONE DEI PROVINI

Le prove descritte in seguito richiedevano la realizzazione di 2 tipi di campioni diversi:

- Un campione cilindrico realizzato mediante Pressa a Taglio Giratoria;
- Una lastra realizzata mediante il compattatore a rullo.

Tutti i tipi di campioni sono stati realizzati tenendo in conto le considerazioni fatte precedentemente.

Seguendo la normativa di riferimento e conoscendo le percentuali si sono determinate le quantità in peso di fresato, aggregato vergine, filler, bitume da aggiungere ed additivo, dove previsto. La miscelazione di tutti gli elementi, operazione fondamentale per l'ottenimento di un impasto il più possibile omogeneo, è avvenuta in un'apposita macchina miscelatrice (UNI EN 12697-35).

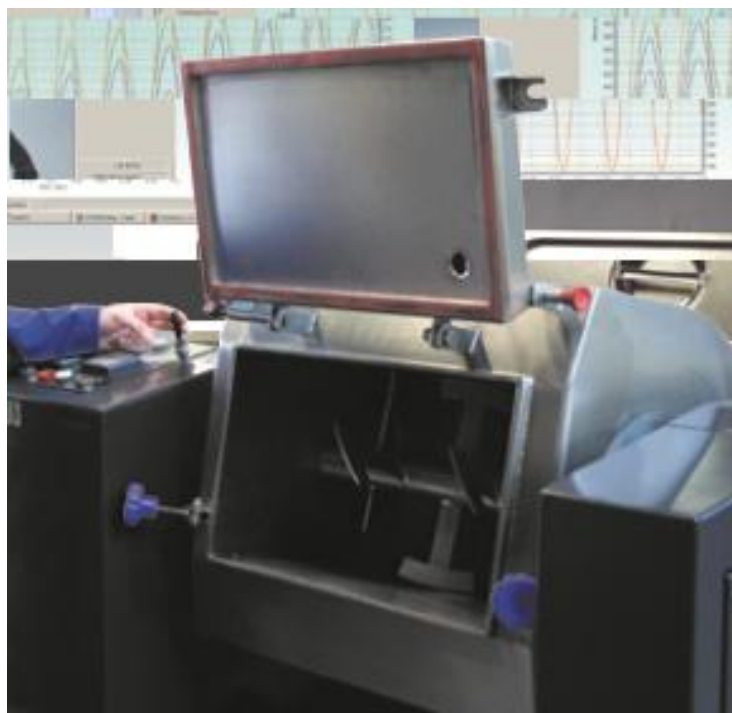


Figura 27 Miscelatrice automatica

I passi da seguire durante la preparazione della miscela sono i seguenti:

1. dosaggio e collocazione delle varie pezzature di aggregato e di fresato, nel rispetto della curva granulometrica di progetto, in diversi contenitori;
2. inserimento del bitume prescelto nel forno, dove viene riscaldato fino a temperatura di 160° , per un tempo, necessario affinché il bitume diventi liquido;
3. collocazione degli aggregati, del fresato, del filler, del bitume e dell'additivo (nei casi indicati precedentemente) nella miscelatrice;
4. miscelazione di tutti i componenti, per ottenere una matrice omogenea;
5. disposizione del materiale in apposite fustelle e compattato.

Durante il processo di miscelazione sono state fatte alcune osservazioni:

- con l'aumento della percentuale di RAP la miscela diventa poco lavorabile e richiede più tempo affinché venga raggiunta l'omogeneità della miscela;
- l'aggiunta degli additivi, sia Italiano che Americano, rende la miscela più lavorabile e richiede meno tempo per la sua produzione.

6.3.1 Confezionamento dei provini con Pressa a taglio Giratoria

(UNI EN 12697-31)

I compattatori giratori sono apparecchiature in grado di produrre campioni cilindrici di conglomerato bituminoso aventi caratteristiche di addensamento e di distribuzione interna dei granuli di aggregato molto simili a quelle ottenute in sito mediante compattazione con rulli di cantiere.

Il conglomerato bituminoso collocato all'interno della fustella è sottoposto ad una pressione di addensamento verticale uniforme, la cui risultante avrà una direzione di applicazione inclinata rispetto all'asse della fustella, essendo quest'ultima inclinata di un angolo prefissato rispetto alla verticale. Simultaneamente, durante il processo di compattazione, il meccanismo di rivoluzione caratteristico della macchina distribuisce tale inclinazione della fustella uniformemente attorno al proprio asse, ad una velocità costante prefissata.

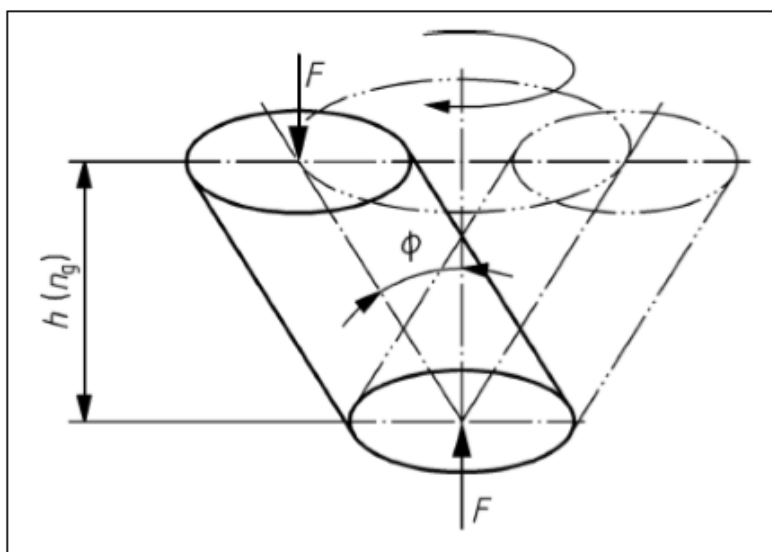


Figura 28 Simulazione movimento pressa giratoria

La compattazione giratoria determina, invece, un mutuo incastro tra i grani dell'aggregato, formando così strutture aventi una distribuzione dei vuoti la cui forma ed entità è simile a quella che si registra in sito.

Sono stati realizzati provini cilindrici di diametro 150 mm e altezza 130 mm. Successivamente i provini sono stati tagliati a metà. I provini ottenuti dalla pressa giratoria sono stati utilizzati per la determinazione dei vuoti, coefficiente CEI, ITS, ITSM.

6.3.2 Confezionamento dei provini con compattatore a rullo

(UNI EN 12697-33)

Il compattatore a rullo provvede a compattare in laboratorio lastre di conglomerato bituminoso in condizioni tali da simulare la compattazione in sito. È possibile selezionare il carico verticale fino a un valore massimo di circa 30 kN. La larghezza del compattatore è di 300 mm, per cui è possibile riprodurre l'effetto dei compattatori statici stradali più grandi. È possibile selezionare il carico verticale fino a un valore massimo di circa 30 kN. È possibile prestabilire un preciso spessore consentendo all'operatore di compattare una determinata massa di materiale fino a un determinato volume per un "mix design" di progetto. La macchina è composta essenzialmente da:

- Telaio d'acciaio con rullo a segmento, tavola di supporto con moto alternativo, attuatore pneumatico per l'azionamento della tavola e l'applicazione della forza di compattazione;
- Controllo automatico di inizio compattazione, arresto d'emergenza, selezione automatica dei livelli di forza di compattazione e numero di passaggi del rullo.



Figura 28 Rullo compattatore

La lastra compattata viene utilizzata come lastra da cui ricavare provini prismatici da sottoporre a prove di fatica e per il calcolo del modulo elastico di rigidezza.

La normativa prescrive le modalità di confezionamento, taglio e conservazione dei provini nei periodi in cui non vengono testati. Essi devono essere ricavati da lastre stese in laboratorio o prelevate da strati stradali, dallo spessore maggiore di 60 mm. Da ognuna delle lastre si devono estrarre cinque provini, di cui almeno quattro vanno testati, e uno tenuto di riserva. Le travi devono essere tagliati dal centro e la distanza minima dal bordo della lastra deve essere di 20 mm. I campioni devono essere conservati su una superficie piana, per evitare di sottoporre a prova materiale già inflesso, e protetti dal sole, ad una temperatura inferiore ai 30 °C.

Per ogni miscela è stata realizzata una lastra di dimensioni 300×400 mm con altezza di 50 mm. Successivamente ogni lastra è stata sottoposta a taglio per ricavare i provini prismatici.

6.4 PROCEDURA PER IL CALCOLO DELL'INDICE CEI

Dal punto di vista dei risultati si è fatto riferimento al software che gestisce la pressa giratoria. Il software restituisce i dati che possono essere utilizzati nel calcolo di indice CEI (vd. di seguito).

04.05.2015				SAMPLE WEIGHT		5268 g	
12:37				PRESSURE IN SAMPLE		600 kPa	
TEST-ID 2				GYRATORY ANGLE		21.80 mrad	
SAMPLE CODE RAP0_1				GYRATORY SPEED		28.6 rpm	
CYCL	HEIGHT	DENSITY	SHEAR	CYCL	HEIGHT	DENSITY	SHEAR
	mm	kg/m3	kN/m2		mm	kg/m3	kN/m2
4	114.5	2605	301	100	95.4	3126	384
5	113.0	2639	315				
6	111.7	2670	326				
8	109.7	2717	345				
10	108.2	2756	357				
12	106.9	2789	365				
16	105.0	2839	380				
20	103.6	2877	382				
25	102.3	2915	384				
32	100.8	2957	385				
40	99.6	2993	380				
50	98.5	3026	378				
64	97.3	3064	375				
80	96.3	3096	378				

Figura 29 Schermata al termine della compattazione

Dalla schermata è possibile osservare come il programma calcoli a ogni determinato numero di cicli di carico la densità relativa del provino. Quest'ultima la si può definire come una densità geometrica essendo riferita alla dimensioni della fustella già precaricate dal software. Tale densità però è stata ritenuta non reale ai fini dei calcoli, perché è stato riscontrato durante le varie compattazioni di entrambe le miscele un'elevata compattazione del provino una volta estratto dalla fustella. Quindi, si è ricalcolata la densità di ogni campione per via idrostatica ovvero si è tenuto conto della "bulk density" (normativa UNIEN 12697-6). Quel che si è fatto è stato convertire la densità geometrica nella corretta densità per via idrostatica.

6.4.1 Indice CEI

Come già accennato, è possibile calcolare l'indice CEI, riferito alla lavorabilità delle miscele, tramite dei parametri ricavati a partire dai dati forniti dalla pressa a taglio giratorio. Quindi, in base alla curva di compattazione si può in un primo tempo riconoscere se la miscela sia lavorabile o meno. Un indice fondamentale per l'analisi della lavorabilità della miscela è l'indice CEI. Il CEI, ovvero Compaction Energy Index (Indice dell'energia di compattazione), è stato introdotto nel 1998 e permette di dedurre l'energia di compattazione in seguito ai risultati della pressa giratoria. Esso viene calcolato come il valore dell'area sottesa dal grafico compresa tra l'ottavo giro compiuto dalla pressa fino al raggiungimento del 92% della densità massima. Il CEI simula quindi il lavoro compiuto dal compattatore per raggiungere la densità della miscela massima in fase di costruzione. Per ricavarlo bisogna fare riferimento alle curve di compattazione ricavate dalla pressa giratoria: modificandole opportunamente, è possibile ottenere sull'asse delle ordinate il rapporto della densità stimata ai vari giri della macchina sulla densità massima, mantenendo sull'asse delle ascisse il numero di cicli compiuti dalla pressa. Si è fissato il numero di otto giri per simulare lo sforzo applicato da una tipica finitrice durante il processo di stesa della miscela, mentre si è scelto il 92% della densità massima poiché è il valore minimo che deve essere raggiunto al compimento della sovrastruttura e alla sua apertura al traffico. Le miscele con valore basso dell'indice sono maggiormente lavorabili e per questo sono auspicabili: infatti, dal momento che tale indice dà un'idea della facilità con cui la miscela viene stesa, più è basso tale valore, più facilmente avviene la sua compattazione. Tuttavia non è bene che sia troppo ridotto: potrebbe essere il segnale di un conglomerato tenero e pertanto deve essere evitato.

6.5 CONTENUTO DEI VUOTI

Per la determinazione dell'indice dei vuoti si fa riferimento alla normativa UNIEN 12697-8 in cui, alla formulazione 1.

La UNI EN 12697-8 propone la determinazione del contenuto dei vuoti nella miscela utilizzando la seguente relazione:

$$V_m = \frac{\rho_{max} - \rho_{buk}}{\rho_{max}} \times 100\%, \quad (1)$$

dove

ρ_{max} - densità massima della miscela, kg/m^3 ;

ρ_{buk} - bulk density della miscela, kg/m^3 .

Per la determinazione di ρ_{max} (massima densità) normativa UNI EN 12697-5 propone diverse procedure: volumetrica, idrostatica, matematica.

E stata adottata procedura matematica espressa da seguente relazione:

$$\rho_{max} = \frac{100}{(p_{a1}/\rho_{a1}) + (p_{a2}/\rho_{a2}) + \dots + (p_b/\rho_b)}, \quad (2)$$

dove

p_{a1} - è proporzione di aggregato 1 nella miscela, %;

ρ_{a1} - è densità apparente di aggregato 1, Mg/m^3 ;

p_{a2} - è proporzione di aggregato 2 nella miscela, %;

ρ_{a2} - è densità apparente di aggregato 2, Mg/m^3 ;

p_b - è proporzione di bitume nella miscela, %;

ρ_b - è densità di bitume, Mg/m^3 ;

$$p_{a1} + p_{a2} + \dots + p_b = 100\% \quad (3)$$

Bulk densità si calcola in accordo a UNI EN 12697-6, come segue:

$$\rho_{bulk} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w, \quad (4)$$

dove

m_1 – è massa di campione asciutto, g;

m_2 – è massa di campione immerso nell'acqua, g;

m_3 – è massa di campione saturato e successivamente asciugato, g;

ρ_w – è densità dell'acqua, Mg/m^3 .

Mentre nella determinazione della densità massima non si hanno problemi per il calcolo, essendo i dati ottenuti in precedenza da inserire nella formulazione 2 della normativa UNIEN 12697-5, per il calcolo della bulk density bisogna seguire la procedura descritta sotto:

- Facendo riferimento alla normativa UNIEN 12697-6, si pesa il provino campione sulla bilancia rilevando il peso a secco “m1”;
- Si procede poi con l’immergere del provino all’interno di una bacinella d’acqua; la bacinella è sorretta da 2 assi di legno con relativi montanti in modo tale che l’intera struttura non influisca sul peso rilevato dalla bilancia dato che poggiano direttamente sul tavolo e non su quest’ultima; il provino invece, immerso in acqua, sarà sorretto da un castello di ferro poggiante sulla bilancia. Il peso del castello viene detratto dal peso totale;
- Si lascia immerso il provino per almeno mezzora in modo tale che l’acqua riesca coprire tutti i vuoti interstiziali del conglomerato; ogni tanto si deve scuotere il provino in modo tale da eliminare eventuali bolle d’aria posizionate sui bordi e superfici del provino;
- Si rileva quindi il peso “m2” mentre il provino rimane immerso;
- Successivamente si estrae il campione, si smonta l’incastellatura e si asciuga il provino in modo rapido giusto per non avere gocce sulla superficie e sui bordi; a questo punto si ripesa il provino e si rileva il peso “m3”; avendo tutti i dati, si procede con il calcolo della bulk density tramite formulazione 3.

6.6 TRAZIONE INDIRETTA: INDIRECT TENSILE STRAIGHT (ITS) TEST

6.6.1 Descrizione delle modalità e delle procedure operate

Si definisce resistenza a trazione indiretta ITS, la massima tensione di trazione (calcolata) applicata a un provino cilindrico caricato diametralmente fino a rottura alla temperatura di prova e alla velocità di avanzamento della macchina.

Le modalità di prova sono riportate nella norma UNI EN 12697-23.

La prova di resistenza a trazione indiretta può essere eseguita ad una temperatura compresa tra i 5 ed i 25°C; essa consente di stabilire dei criteri di qualità ed accettabilità delle miscele, sia in fase di studio degli impasti, che di comportamento in opera. In questa indagine, e di norma, la prova è condotta alla temperatura di 25°C.

I singoli campioni, dopo uno stoccaggio per 5 h in cella climatica a 25 °C, vengono sistemati opportunamente centrati tra i coltelli della pressa. Il posizionamento è eseguito

in modo tale che l'asse dei provini risulti orizzontale, l'asse del coltello di carico superiore sia perfettamente parallelo a quello del coltello inferiore ed entrambi siano contenuti nel piano verticale passante per l'asse del provino.



Figura 30 Dispositivo per la misura della resistenza a trazione indiretta

Nel rispetto della normativa viene applicato un carico impostando una velocità di avanzamento della pressa costante fino al raggiungimento della rottura del provino.

Noto il carico di rottura o carico di compressione massimo misurato durante la prova, il valore della tensione di rottura a trazione indiretta si determina con la seguente relazione:

$$\sigma_t = \frac{2 \times P}{\pi \times d \times h}, \quad (5)$$

dove

σ_t - è la resistenza o tensione di rottura a trazione indiretta, MPa;

P è il massimo carico assiale di compressione registrato, kN;

d è il diametro del campione, cm

h è l'altezza del campione o spessore, cm

6.7 MODULO: INDIRECT TENSILE STIFFNESS MODULUS (ITSM) TEST

6.7.1 I test di laboratorio per la determinazione dei moduli dinamici

I test di laboratorio hanno il compito di riprodurre gli stati tenso-deformativi ai quali il conglomerato bituminoso è sottoposto a seguito dell'azione ciclica dei carichi del traffico veicolare, per poter dedurre le leggi di comportamento necessarie al calcolo di una pavimentazione.

Come già detto, è estremamente difficile realizzare un unico test che induca nel provino la molteplicità di stati tensionali che si verificano nella realtà. Infatti, oltre alla variabilità dei carichi e delle loro velocità di applicazione, bisogna tenere conto anche delle diverse condizioni ambientali.

Ciononostante, grazie alle ricerche effettuate negli ultimi anni e alla progettazione di apparecchiature innovative, è ora possibile analizzare gli stati tenso-deformativi del materiale in condizioni di prova che riproducano sempre più fedelmente le condizioni reali che si verificano all'interno delle pavimentazioni a causa del traffico veicolare.

La legge costitutiva di un materiale, che pone in correlazione tensione e deformazione, è caratterizzata da un indice, detto Modulo.

Nei materiali elastici si tratta del Modulo elastico, o Modulo di Young, mentre nei materiali viscoelastici, come il conglomerato bituminoso, la relazione tra stato tensionale e deformativo è regolata da un Modulo definito come complesso.

I materiali viscoelastici non hanno una legge costitutiva univoca, essa infatti dipende dalle condizioni a cui si trova il materiale, in particolare dalla temperatura, dalla velocità di carico e dalla modalità di applicazione del carico .

Le prove per la determinazione del Modulo complesso sottopongono i provini prismatici, trapezoidali o cilindrici a carichi ciclici di compressione, trazione o flessione, variabili nel tempo, in genere con legge sinusoidale.

Per la natura viscoelastica del materiale, la deformazione conseguente all'applicazione dei carichi avviene con un certo ritardo nel tempo, dipendente dalla temperatura e dalla frequenza di carico. L'andamento della deformata segue la stessa legge di variazione del carico.

I moduli determinabili con prove cicliche e per questo detti dinamici sono: il Modulo complesso, il Modulo di rigidità e il Modulo resiliente.

Il Modulo complesso è un parametro meccanico che descrive la relazione tra tensione e deformazione di un materiale viscoelastico, come il conglomerato bituminoso.

Esso è un numero complesso costituito da una parte reale, che riproduce la risposta elastica del materiale e fornisce quindi una misura del lavoro reversibile compiuto sotto l'azione di un carico, e da una parte immaginaria, che esprime la componente viscosa, responsabile della frazione di lavoro irreversibile che viene dissipata durante la sollecitazione.

La caratterizzazione delle miscele ha bisogno di un parametro per la rappresentazione della risposta meccanica del materiale. I conglomerati hanno un comportamento viscoelastico/viscoplastico e tutto dipende dal tempo di applicazione del carico e dalla temperatura di esercizio. Spesso nelle prove però viene considerato un comportamento viscoelastico lineare. Si ha quindi a disposizione un provino cilindrico derivante dalla pressa giratoria e lo si va a sollecitare in modo monoassiale, ma non con un carico statico, bensì con uno pulsante con legge sinusoidale. Viene quindi applicata una forza di compressione in modo tale da simulare il passaggio dei veicoli.

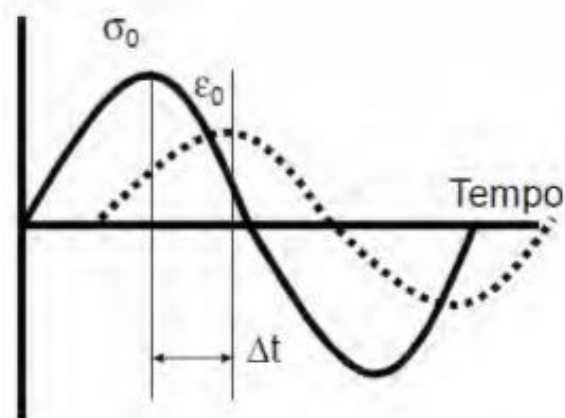


Figura 31 Andamento delle tensioni/deformazioni

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin \omega t; \quad (6)$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi); \quad (7)$$

La $\sigma(t)$ varia quindi secondo una legge sinusoidale dove ω è la pulsazione e σ_0 è la massima ampiezza della sollecitazione. Come la tensione sarà sinusoidale, anche la deformazione di conseguenza lo sarà. All'interno della formula compare φ definito come “ritardo di fase” ovvero un parametro che tiene conto della risposta ritardata del provino in seguito a una sollecitazione a causa della natura visco-elastica del conglomerato bituminoso.

$$\omega = \frac{2\pi}{T}; \quad (8)$$

$$f = \frac{T}{2\pi}; \quad (9)$$

$$\Delta t = \frac{\varphi}{\omega}; \quad (10)$$

T è il periodo di tempo che intercorre da quando si applica il carico fino a quando lo si scarica. Δt è il ritardo di fase ed è un valore finito.

Definito quindi il modulo:

$$E^* = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)} = \frac{\sigma_0 \sin t}{\varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi)}; \quad (11)$$

tale relazione diventerebbe poco gestibile e quindi si opta per considerare il rapporto tra la massima tensione e la massima deformazione e ci si accontenta di avere un valore assoluto ovvero la norma del modulo:

$$|E^*(t)| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (12)$$

Però questo rapporto non è sufficiente per descrivere il comportamento del materiale. Nella formulazione scompare il termine φ e quindi si commette l'errore di non considerare l'effetto visco-elastico. Si stanno allora considerando 2 equazioni inefficienti.

Il modulo complesso E si rappresenta in un piano complesso da cui si può osservare come il modulo venga rappresentato dalla combinazione di una componente elastica E_1 e una viscosa E_2 ed è individuato rispetto all'orizzontale dall'angolo φ .

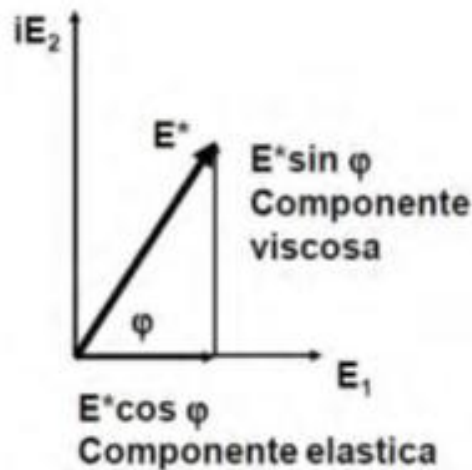


Figura 32 Rappresentazione di modulo in piano complesso

$E_1 = E \cos \varphi$: Modulo di restituzione ovvero la parte elastica del modulo complesso che governa la risposta elastica cioè la componente recuperabile della deformazione.

$E_2 = E \sin \varphi$: Modulo di dissipazione: è la parte che descrive il comportamento viscoso del materiale quindi non recuperabile. Dissipazione perché la parte viscosa è responsabile della dissipazione di energie durante i cicli di carico e quindi delle deformazioni permanenti.

$$\varphi = \arctan \frac{E_2}{E_1} \quad (13)$$

con un angolo φ piuttosto piccolo, il vettore E^* tenderà all'orizzontale. Questo perché tanto più piccolo è l'angolo tanto più piccola sarà la quota di deformazione non recuperabile. Quindi bisognerebbe progettare il materiale in modo tale che φ sia piccolo e che il modulo complesso sia ragionevolmente alto.

Il Modulo di rigidezza, è definito come il valore assoluto del Modulo complesso, ed è il parametro che viene comunemente utilizzato per fornire indicazioni sulle caratteristiche meccaniche del conglomerato bituminoso.

La sua espressione analitica è la seguente:

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (14)$$

Il Modulo di rigidezza si calcola tramite le stesse prove utilizzate per la determinazione del Modulo complesso.

6.7.2 Descrizione delle modalità e delle procedure operative

Il modulo di rigidezza, definito come valore assoluto del modulo complesso, è un parametro meccanico razionale sintetico, ovvero descrive in modo compatto le proprietà tenso-deformative del materiale. Tale modulo viene utilizzato per identificare le miscele in campo stradale: maggiore sarà il modulo della miscela, maggiori saranno le proprietà meccaniche. Quindi esprime in modo sintetico tali proprietà. Un materiale con rigidezza maggiore ha la capacità di ridistribuire tensioni più piccole in un'area più ampia.

Per determinare il modulo di rigidezza si può operare in 2 maniere:

- controllo di carichi;
- controllo di deformazione.

In laboratorio si hanno diversi protocolli di prova a disposizione descritti dalla norma UNI EN 12697-26.

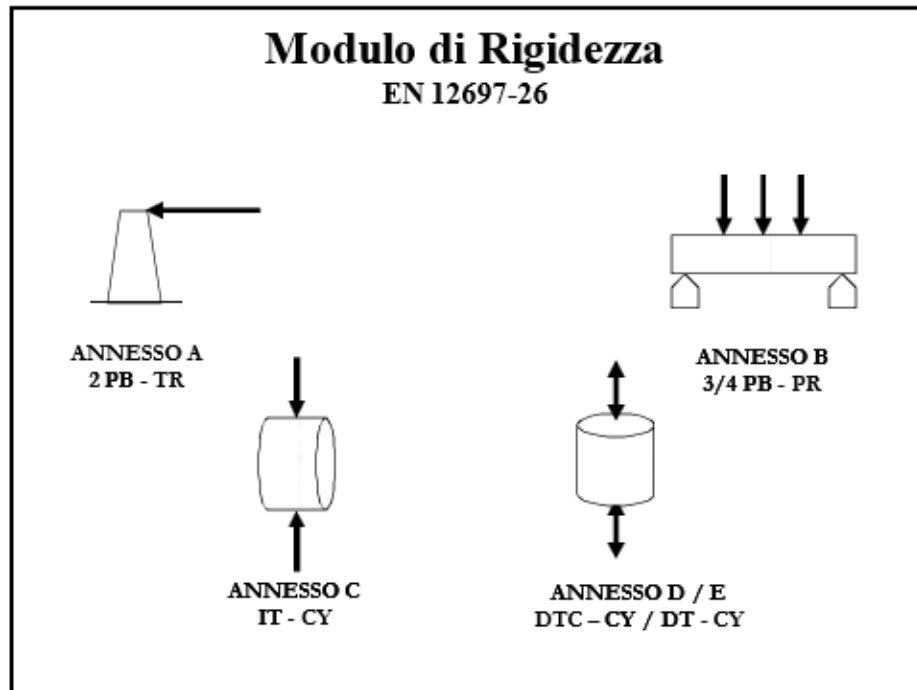


Figura 33 Diversi ANNESSI per determinazione di modulo

In laboratorio di Strade di Università di Padova la determinazione del modulo di rigidezza è stata effettuata ricorrendo a due protocolli diversi: Annesso C e Annesso B.

6.7.3 UNI EN 12697-26 - ANNESSO C

In questo particolare protocollo si fa una leggera modifica rispetto al modulo complesso * E. Nel modulo complesso il passaggio veicolare era espresso tramite una sinusoide, quindi con carico ciclico. Tra un'applicazione e l'altra intercorre un certo tempo. Con l'annesso C, si è pensato di applicare il carico con una pseudo-sinusoide (un quarto di sinusoide) e poi uno scarico lineare sempre per un quarto di sinusoide.

Questa onda simula il passaggio del singolo veicolo. Dopo lo scarico, avviene il tempo di ripetizione, ovvero il tempo che intercorre dal passaggio di un veicolo e il passaggio del successivo.

Con questo metodo si va a studiare cosa succede sul piano diametrale orizzontale dopo aver esercitato un impulso di compressione con un pistone che comprime diametralmente (come nella trazione indiretta). Quindi c'è un castello che permette di

sostenere il provino cilindrico durante la prova e 2 trasduttori laterali che monitorano cosa succede orizzontalmente. Il protocollo EN 12697 opera in controllo di deformazione, ovvero si deve indurre una deformazione diametrale di 5 micron. Quindi si applica il carico, il provino si deforma, e dopo si controlla l'ampiezza della deformazione. Siccome la prova avviene con una deformazione al di sotto di 25 micron, si ritiene che il provino operi in campo elastico, non si hanno deformazioni permanenti e quindi la prova non è distruttiva.

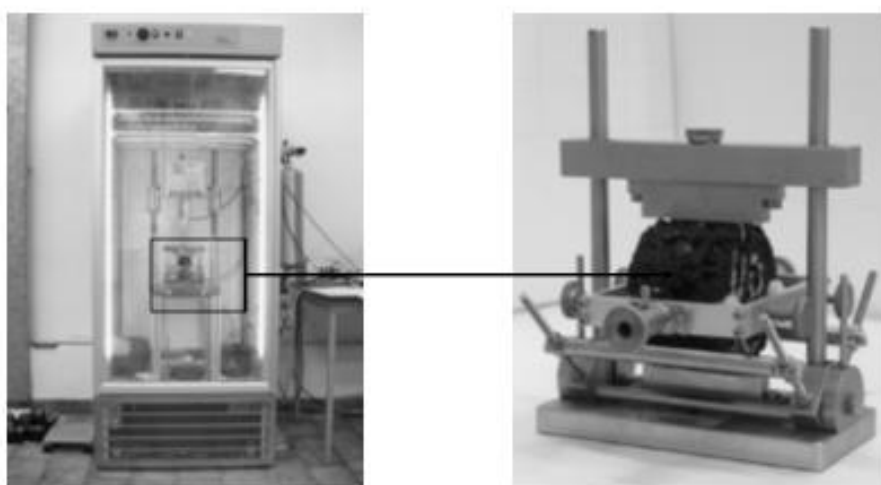


Figura 34 Dispositivo per determinazione di modulo ricorrendo a ANNESSO C

Il tempo di carico è pari al tempo di picco, quindi al tempo che intercorre da quando si inizia la prova e si raggiunge il massimo valore di carico. Il tempo di picco è il tempo di crescita del carico, corrispondente a un quarto di senoide ed è definito anche “rise time”. Non ha senso parlare di frequenza in queste prove perché non si ha un'onda continua.

Il carico P , responsabile delle tensioni interne e della deformazione, avrà, come già detto, la forma di un impulso (Figura 35) e sarà definito, per il corretto svolgimento della prova, da tre parametri fondamentali

- 1) peak load (il carico massimo applicato ad ogni ciclo);
- 2) pulse repetition period (tempo che intercorre tra l'inizio di due impulsi consecutivi);
- 3) rise time (tempo trascorso tra l'inizio dell'impulso e il peak load);

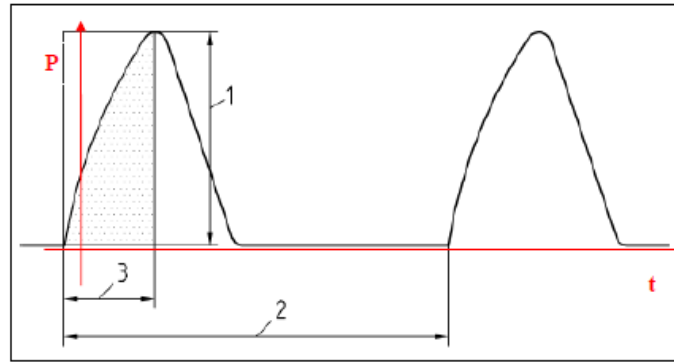


Figura 35 Curva pseudo sinusoidale

Su questo protocollo non si parla di frequenza, ma si parla solo di tempo di applicazione di carico ovvero 125ms. Si ammette allora una pseudo frequenza, quindi una frequenza fittizia: $4 \times 125 = 500$ ms da cui $= 1/500 = 2$ Hz (come indicato sulla norma).

Per provini di diametro 150 mm, il *rise time* raccomandato è di 124 ± 4 ms, il *peak load* sarà scelto in funzione della deformazione orizzontale che dovrà rientrare nell'intervallo 7 ± 2 μ m ed il *pulse repetition period* sarà $3,0 \pm 0,1$ s.

La norma descrive un metodo per la misura del modulo di rigidezza elastico indiretto di miscele bituminose. Esso si può applicare a provini cilindrici aventi uno spessore compreso tra i 30 e gli 80 mm

Modulo di rigidezza elastico indiretto (S_m) in MPa:

$$S_m = \frac{F \times (\nu + 0.27)}{(z \times h)} ; \quad (15)$$

dove:

F – è il valore di picco di carico verticale applicato, N;

z - il picco della deformazione orizzontale diametrale conseguente al carico applicato, mm;

h – spessore medio di provino, mm;

ν - è il valore del modulo di Poisson per le miscele bituminose alla temperatura di prova.

6.7.4 UNI EN 12697-26 - ANNESSO B

La prova di flessione su quattro punti, è una prova di laboratorio dinamica che sottopone provini prismatici a sollecitazione flessionale, allo scopo di determinare il Modulo di rigidezza di un conglomerato bituminoso, cercando di riprodurre gli stati tensionali che si verificano realmente all'interno di una pavimentazione stradale.

La prova consiste nell'applicazione di un carico ciclico variabile con andamento sinusoidale, come già mostrato in Figura, a travetti prismatici, ad una fissata temperatura e frequenza di carico.

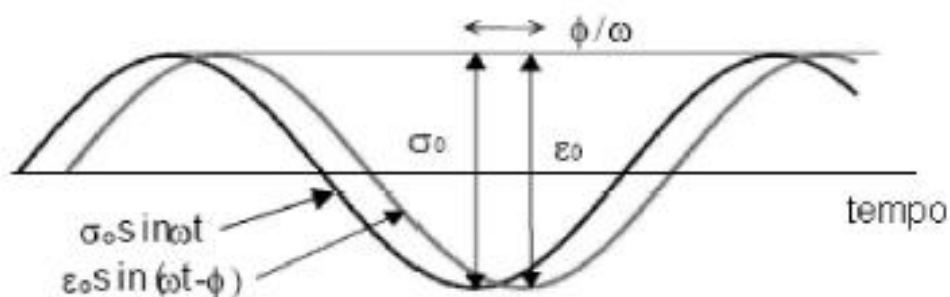


Figura 36 Andamento delle curve di tensione e deformazione per un carico sinusoidale

I provini sono collocati all'interno di un'apparecchiatura, la quale ne provoca la ciclica flessione. Essa si realizza tramite il movimento verticale della parte centrale del provino, mentre i punti estremi rimangono nella stessa posizione.



Figura 37 Dispositivo per determinazione di modulo ricorrendo a [ANNESSO B](#)

Lo spostamento è perpendicolare all'asse longitudinale del campione e il movimento è alternato verso il basso e verso l'alto, simmetrico rispetto alla posizione iniziale, che coincide con l'asse delle ascisse nel riferimento cartesiano in cui è rappresentato il carico sinusoidale.

In Figura è schematizzato il movimento subito dal provino a causa del carico applicato sui due dispositivi di serraggio interni e i movimenti che questi blocchi lasciano liberi di compiere al provino, per rispettare nella maniera più fedele possibile lo schema statico. Il provino è quindi libero di ruotare e di traslare orizzontalmente.

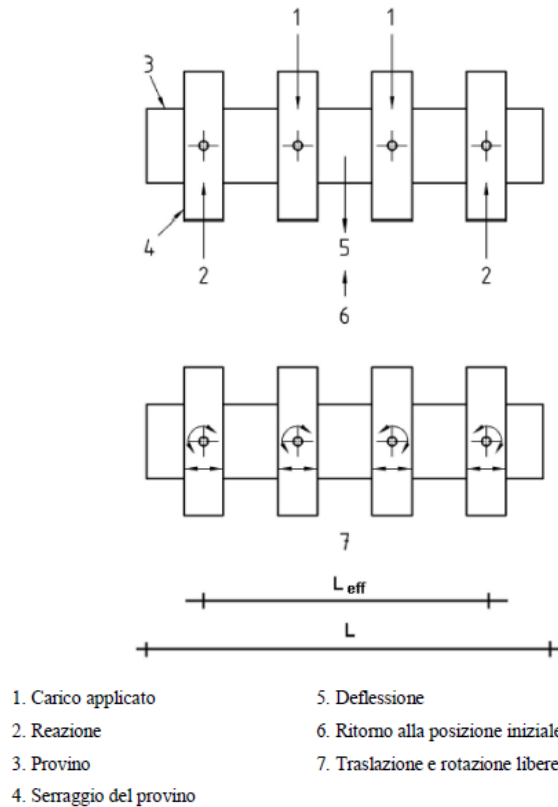


Figura 38 Schematizzazione del movimento del provino e dei suoi gradi di libertà nella prova 4PB-PR

I morsetti sono posizionati ad una distanza, gli uni dagli altri, pari a $L_{eff}/3$, dove L_{eff} è la lunghezza effettiva del provino che viene realmente testato, cioè la distanza tra i due morsetti esterni.

La norma descrive i limiti dimensionali che i provini prismatici devono rispettare; nello specifico:

- la lunghezza totale non deve superare la lunghezza effettiva di oltre il 10%;
- la differenza tra il valore misurato massimo e minimo della larghezza e dell'altezza non deve essere maggiore di 1 mm; la differenza tra il valore misurato massimo e minimo della lunghezza non deve essere maggiore di 2mm;
- l'angolo tra superfici longitudinali adiacenti non deve scostarsi da un angolo retto di oltre 1° ;
- la lunghezza effettiva non dovrebbe essere minore di sei volte quello che è il valore massimo per la larghezza o dell'altezza;
- la larghezza e l'altezza dovrebbero essere pari ad almeno 3 volte la granulometria massima del materiale sottoposto a prova.

Si passa ora all'analisi delle formule indicate nella normativa per il calcolo del Modulo di rigidezza del conglomerato bituminoso.

Le espressioni fornite per le due componenti del Modulo sono le seguenti:

$$E_1 = \gamma \left(\frac{F}{z} \cos \varphi + \frac{\mu}{10^3} \omega^2 \right) \quad (16)$$

$$E_2 = \gamma \left(\frac{F}{z} \sin \varphi \right) \quad (17)$$

con:

γ è il fattore di forma dipendente dalla forma e dalle misure del provino;

μ è il fattore di massa che tiene conto degli effetti inerziali dovute alla massa del provino e delle parti mobili;

F è forza applicata al provino;

z è spostamento;

$\omega = 2\pi f$, pulsazione di carico;

φ è angolo di fase.

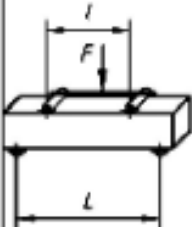
Type of loading		Form factor, γ L^{-1}	Mass factor, μ
4PB-PR		$\frac{L^2 A}{8b^3} \left(\frac{3}{4} - \frac{A^2}{L^2} \right)$	$R(X) \left(\frac{M}{4} + \frac{m}{R(A)} \right)$

Figura 39 Fattore di forma e fattore di massa per la 4PB

Con :

$$R(X) = \frac{12L}{A} \left(\frac{1}{3X/L - 3X^2/L^2 - A^2/L^2} \right) \quad (18)$$

$$A = \frac{L-1}{2} \quad (19)$$

X – è la coordinata alla quale viene misurata la deflessione, m – è massa della parte mobile.

7 RISULTATI E ANALISI DI DATI

7.1 RISULTATI DEI CONTENUTI DI VUOTI

7.1.1 Densità massima

Per il calcolo della densità massima si fa riferimento, come già accennato, alla normativa UNI EN 12697-5. Ricordando le densità apparenti degli aggregati.

MISCELA RAP0				
PESO,KG	MATERIALE	PESO, %	DENSITA, Mg/m3	p/q
2,073	PIETRISCO 0/4	38,10	2,75	13,854
1,399	PIETRISCO 4/8	25,71	2,74	9,383
1,244	PIETRISCO 8/12	22,86	2,73	8,374
0	FRESATO	0,00	2,35	0,000
0,466	FILLER	8,56	2,8	3,057
0,259	BITUME	4,76	1,03	4,621
0	ADDITIVO	0,00	0,92	0,000
5,441	somma, %	99,99		
MASSIMA DENSITA qmax, Mg/m3				2,545

Tabella 29 Densità massima RAP0

MISCELA RAP20				
PESO,KG	MATERIALE	PESO, %	DENSITA, Mg/m3	p/q
1,296	PIETRISCO 0/4	24,04	2,75	8,742
1,555	PIETRISCO 4/8	28,85	2,74	10,528
0,829	PIETRISCO 8/12	15,39	2,73	5,636
0,985	FRESATO AGG	18,27	2,35	7,775
0,466	FILLER	8,65	2,8	3,091
0,259	BITUME VECCHIO+NUOVO	4,80	1,03	4,662
0	ADDITIVO	0,00	0,91	0,000
5,390	somma, %	100,00		
MASSIMA DENSITA qmax, Mg/m3				2,473

Tabella 30 Densità massima, RAP20

MISCELA RAP50				
PESO,KG	MATERIALE	PESO, %	DENSITA, Mg/m3	p/q
0,052	PIETRISCO 0/4	0,98	2,75	0,355
0,985	PIETRISCO 4/8	18,54	2,74	6,765
1,088	PIETRISCO 8/12	20,49	2,73	7,504
2,462	FRESATO AGR	46,34	2,35	19,718
0,466	FILLER	8,78	2,8	3,136
0,260	BITUME VECCHIO+NUOVO	4,89	1,03	4,743
0	ADDITIVO	0,00	0,92	0,000
5,313	somma, %	100		
MASSIMA DENSITA qmax, Mg/m3				2,369

Tabella 31 Densità massima RAP50

MISCELA RAP70				
PESO,KG	MATERIALE	PESO, %	DENSITA, Mg/m3	p/q
0,000	PIETRISCO 0/4	0,00	2,75	0,000
0,674	PIETRISCO 4/8	12,81	2,74	4,674
0,622	PIETRISCO 8/12	11,82	2,73	4,330
3,447	FRESATO AGG	65,51	2,35	27,877
0,259	FILLER	4,93	2,8	1,759
0,259	BITUME VECCHIO+NUOVO	4,93	1,03	4,787
0	ADDITIVO	0,00	0,91	0,000
5,261	somma, %	100,00		
MASSIMA DENSITA qmax, Mg/m3				2,303

Tabella 32 Densità massima RAP70

MISCELA RAP20A				
PESO,KG	MATERIALE	PESO, %	DENSITA, Mg/m3	p/q
1,294	PIETRISCO 0/4	24,00	2,75	8,728
1,553	PIETRISCO 4/8	28,80	2,74	10,512
0,828	PIETRISCO 8/12	15,36	2,73	5,627
0,983	FRESATO AGG	18,24	2,35	7,763
0,466	FILLER	8,64	2,8	3,086
0,259	BITUME VECCHIO+NUOVO	4,80	1,03	4,660
0	ADDITIVO	0,15	0,93	0,160
5,391	somma, %	100		
MASSIMA DENSITA qmax, Mg/m3				2,467

Tabella 33 Densità massima RAP20A

MISCELA RAP20I				
PESO,KG	MATERIALE	PESO, %	DENSITA, Mg/m3	p/q
1,295	PIETRISCO 0/4	24,02	2,75	8,735
1,554	PIETRISCO 4/8	28,83	2,74	10,520
0,829	PIETRISCO 8/12	15,37	2,73	5,631
0,984	FRESATO AGG	18,26	2,35	7,769
0,466	FILLER	8,65	2,8	3,088
0,259	BITUME VECCHIO+NUOVO	4,80	1,03	4,661
0	ADDITIVO	0,07	0,91	0,082
5,390	somma, %	100		
MASSIMA DENSITA qmax, Mg/m3				2,470

Tabella 34 Densità massima RAP20I

MISCELA RAP50A				
PESO,KG	MATERIALE	PESO, %	DENSITA, Mg/m3	p/q
0,052	PIETRISCO 0/4	0,97	2,75	0,353
0,981	PIETRISCO 4/8	18,47	2,74	6,740
1,085	PIETRISCO 8/12	20,41	2,73	7,477
2,453	FRESATO AGG	46,17	2,35	19,646
0,465	FILLER	8,75	2,8	3,124
0,259	BITUME VECCHIO+NUOVO	4,88	1,03	4,734
0	ADDITIVO	0,36	0,93	0,384
5,314	somma, %	100		
MASSIMA DENSITA qmax, Mg/m3				2,355

Tabella 35 Densità massima RAP50A

MISCELA RAP50I				
PESO,KG	MATERIALE	PESO, %	DENSITA, Mg/m3	p/q
0,052	PIETRISCO 0/4	0,97	2,75	0,354
0,983	PIETRISCO 4/8	18,50	2,74	6,752
1,086	PIETRISCO 8/12	20,45	2,73	7,490
2,457	FRESATO AGG	46,25	2,35	19,680
0,466	FILLER	8,76	2,8	3,130
0,259	BITUME VECCHIO+NUOVO	4,88	1,03	4,739
0	ADDITIVO	0,19	0,91	0,207
5,313	somma, %	100		
MASSIMA DENSITA qmax, Mg/m3				2,361

Tabella 36 Densità massima RAP50I

MISCELA RAP70A				
PESO,KG	MATERIALE	PESO, %	DENSITA, Mg/m3	p/q
0,000	PIETRISCO 4/8	0,00	2,75	0
0,670	PIETRISCO 4/8	12,74	2,74	4,650
0,619	PIETRISCO 8/12	11,76	2,73	4,308
3,430	FRESATO AGG	65,17	2,35	27,733
0,258	FILLER	4,90	2,8	1,750
0,259	BITUME VEC+NUOVO	4,91	1,03	4,769
0	ADDITIVO	0,51	0,93	0,552
5,262	somma, %	100		
MASSIMA DENSITA qmax, Mg/m3				2,285

Tabella 37 Densità massima RAP70A

MISCELA RAP70I				
PESO,KG	MATERIALE	PESO, %	DENSITA, Mg/m3	p/q
0,000	PIETRISCO 0/4	0,00	2,75	0
0,672	PIETRISCO 4/8	12,77	2,74	4,662
0,620	PIETRISCO 8/12	11,79	2,73	4,319
3,438	FRESATO AGG	65,34	2,35	27,803
0,258	FILLER	4,91	2,8	1,754
0,259	BITUME VEC+NUOVO	4,92	1,03	4,778
0	ADDITIVO	0,27	0,91	0,292
5,261	somma, %	100,00		
MASSIMA DENSITA qmax, Mg/m3				2,293

Tabella 38 Densità massima RAP70I

7.1.2 Bulk density

Per il calcolo della bulk density si fa riferimento, come già accennato, alla normativa UNI EN 12697- 6, procedura B, ovvero metodo della "saturated surface dry SSD"

campione	massa asciutta	massa bagnata	massa asciugata	bulk densita
descrizione	m1,g	m2,g	m3,g	Qbulk, Mg/m3
RAP0	2376	1424	2381	2,431
RAP20	2477	1477	2487	2,402
RAP50	2454	1483	2469	2,438
RAP70	2542	1530	2564	2,409
RAP20A	2459	1490	2459	2,486
RAP20I	2520	1518	2522	2,457
RAP50A	2554	1548	2555	2,485
RAP50I	2530	1524	2532	2,459
RAP70A	2343	1417	2357	2,442
RAP70I	2519	1520	2529	2,446

Tabella 39 Bulk Dencity, Mg/m3

7.1.3 Contenuto dei vuoti

Avendo ora a disposizione sia la densità massima sia la bulk density per entrambe le miscele, è ora possibile calcolare l'indice dei vuoti facendo quindi riferimento alla normativa UNI EN 12697-8.

Descrizione miscela	Contenuto vuoti,%
RAP0	4,47
RAP20	5,85
RAP50	4,78
RAP70	6,19
RAP20A	5,05
RAP20I	5,24
RAP50A	2,34
RAP50I	3,65
RAP70A	4,02
RAP70I	4,25

Tabella 40 Contenuto vuoti, %

Il grafico sottostante mostra il valore dei contenuti di vuoti per ogni miscela e evidenzia loro comparazione.

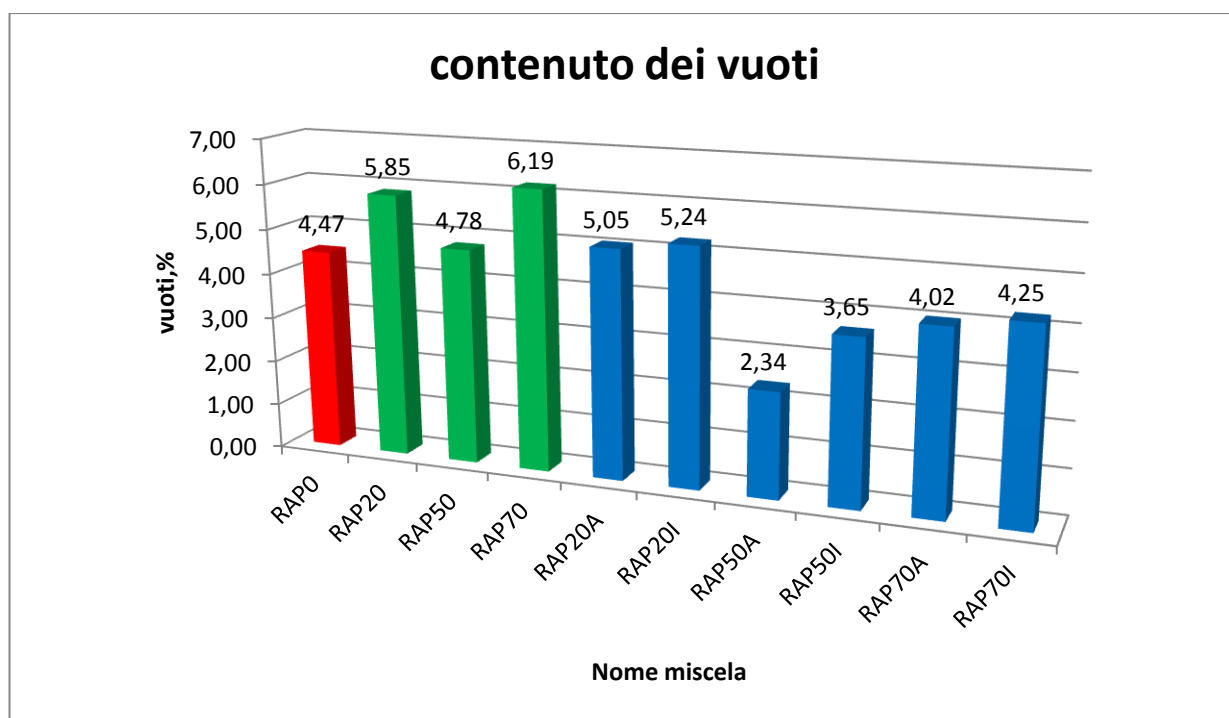


Tabella 41 Contenuto vuoti, comparazione

7.1.4 Osservazioni.

Come si può osservare dal grafico le miscele presentano sostanziali differenze in termini di indici dei vuoti. Per alcune miscele, l'indice di vuoti è molto basso, addirittura più basso del 4%, valore minimo prescritto dal Capitolato. Con il valore di vuoti molto basso otterremo miscele molto chiuse. Durante la preparazione dei provini è stato scelto a priori il dosaggio del bitume pari al 5%, quindi non è stato fatto un mix design ottimizzato. Per ragioni di tempistiche non si è reso più accurato il mix design, anche perché la tesi è rivolta a uno studio comparativo tra miscele e non mira allo studio prestazionale dei singoli composti.

7.2 RISULTATI PRESSA A TAGLIO GIRATORIA

Di seguito vengono riportati i risultati della pressa taglio giratoria e i relativi grafici. Ogni ciclo tiene conto dell'effetto della bulk density ritenuta la densità più idonea rispetto a quella geometrica fornita in primo momento dalla pressa. I grafici, invece, tengono conto del grado di compattazione, ovvero della percentuale della bulk density in funzione della massima densità raggiungibile dal provino.

7.2.1 Grado di compattazione

RAP 0		
Cicli	Bulk density, Mg/m3	% sulla densità massima
4	2026	79,62
5	2053	80,65
6	2077	81,60
8	2113	83,04
10	2144	84,23
12	2169	85,24
16	2208	86,77
20	2238	87,93
25	2267	89,09
32	2300	90,37
40	2328	91,47
50	2354	92,48
64	2383	93,64
80	2408	94,62
100	2431	95,54

Tabella 42 Grado compattazione, RAP0

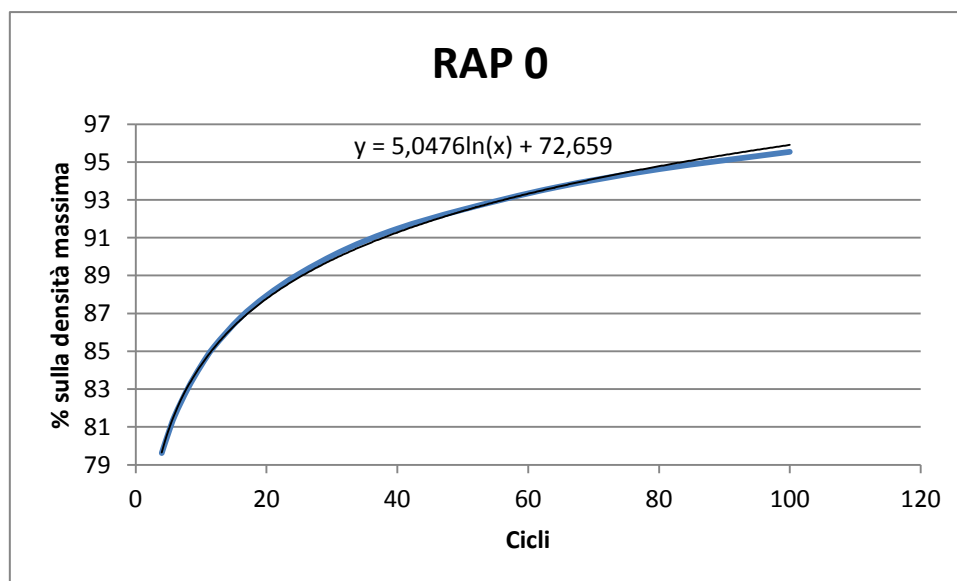


Grafico 5 Curva di compattazione, RAP0

RAP 20		
Cicli	Bulk density, Mg/m3	% sulla densità massima
4	1998	78,28
5	2026	79,38
6	2048	80,24
8	2083	81,64
10	2113	82,80
12	2137	83,75
16	2178	85,33
20	2206	86,46
25	2236	87,61
32	2268	88,86
40	2294	89,90
50	2325	91,09
64	2354	92,25
80	2379	93,20
100	2403	94,15

Tabella 43 Grado compattazione, RAP20

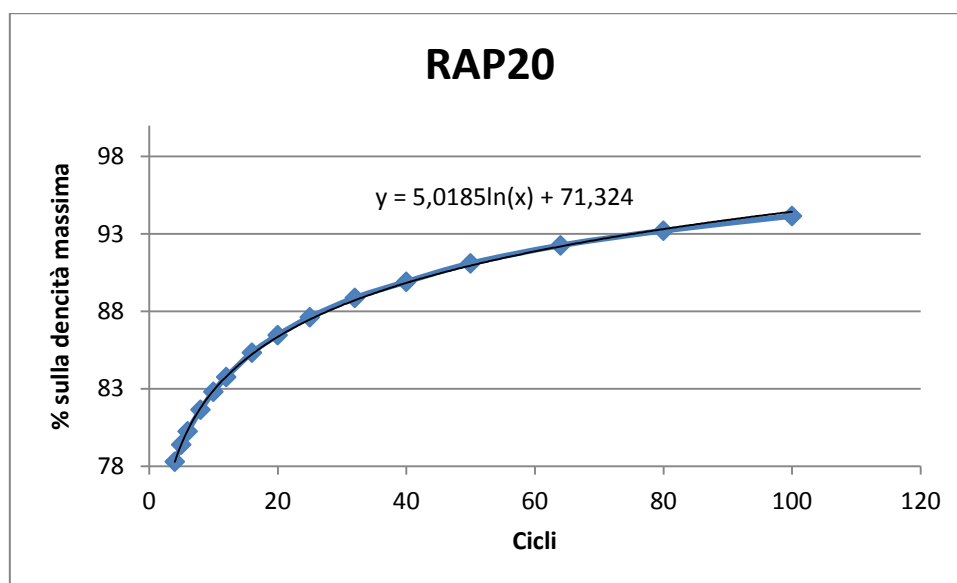


Grafico 6 Curva di compattazione, RAP20

RAP 50		
Cicli	Bulk density, Mg/m3	% sulla densità massima
4	2028	79,20
5	2058	80,37
6	2085	81,42
8	2126	83,00
10	2157	84,23
12	2183	85,25
16	2225	86,89
20	2258	88,15
25	2288	89,35
32	2320	90,60
40	2348	91,68
50	2373	92,67
64	2399	93,66
80	2420	94,50
100	2438	95,21

Tabella 44 Grado compattazione, RAP50

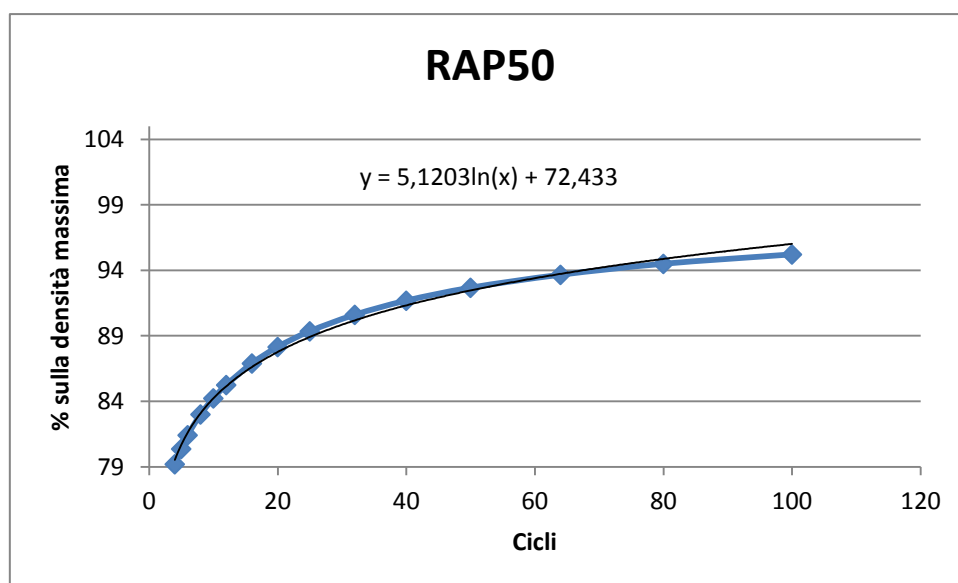


Grafico 7 Curva di compattazione, RAP50

RAP 70		
Cicli	Bulk density, Mg/m3	% sulla densità massima
4	2000	77,89
5	2028	78,98
6	2053	79,95
8	2091	81,42
10	2122	82,63
12	2147	83,60
16	2187	85,16
20	2218	86,37
25	2248	87,55
32	2281	88,81
40	2309	89,93
50	2337	90,99
64	2364	92,04
80	2387	92,95
100	2409	93,79

Tabella 45 Grado compattazione, RAP70

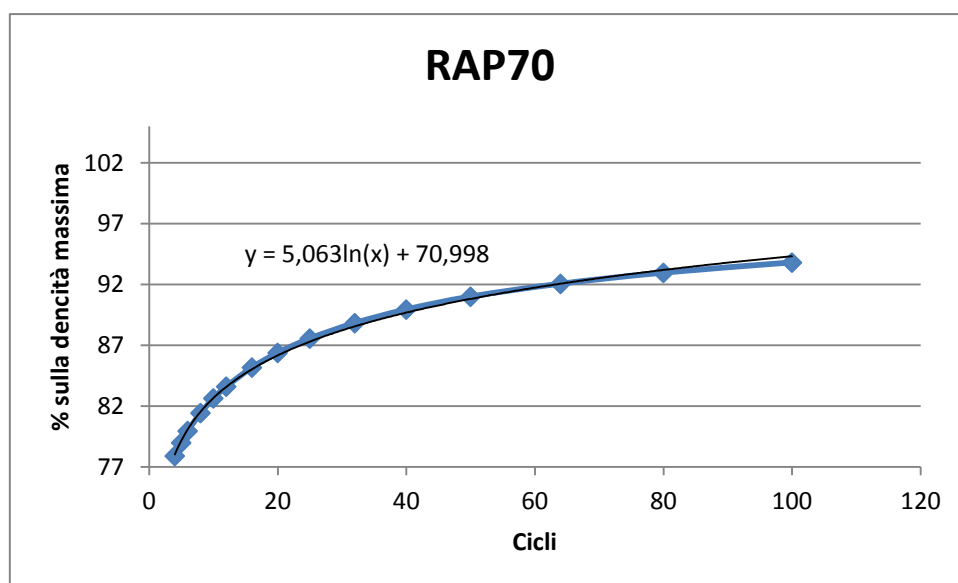


Grafico 8 Curva di compattazione, RAP70

RAP 20A		
Cicli	Bulk density, Mg/m3	% sulla densità massima
4	2076	81,58
5	2107	82,79
6	2132	83,79
8	2174	85,42
10	2207	86,73
12	2235	87,82
16	2277	89,48
20	2310	90,79
25	2343	92,06
32	2376	93,36
40	2403	94,42
50	2429	95,45
64	2452	96,36
80	2472	97,15
100	2486	97,69

Tabella 46 Grado compattazione, RAP20A

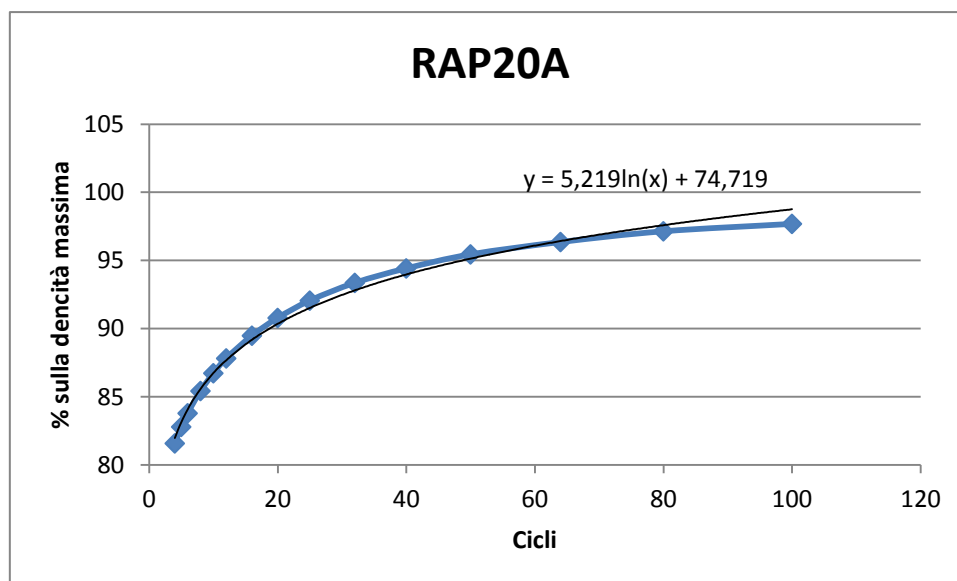


Grafico 9 Curva di compattazione, RAP20A

RAP 20I		
Cicli	Bulk density, Mg/m3	% sulla densità massima
4	2041	80,08
5	2071	81,24
6	2097	82,27
8	2137	83,82
10	2168	85,07
12	2196	86,16
16	2238	87,80
20	2269	89,02
25	2301	90,26
32	2334	91,57
40	2362	92,67
50	2388	93,70
64	2417	94,83
80	2439	95,68
100	2457	96,41

Tabella 47 Grado compattazione, RAP20I

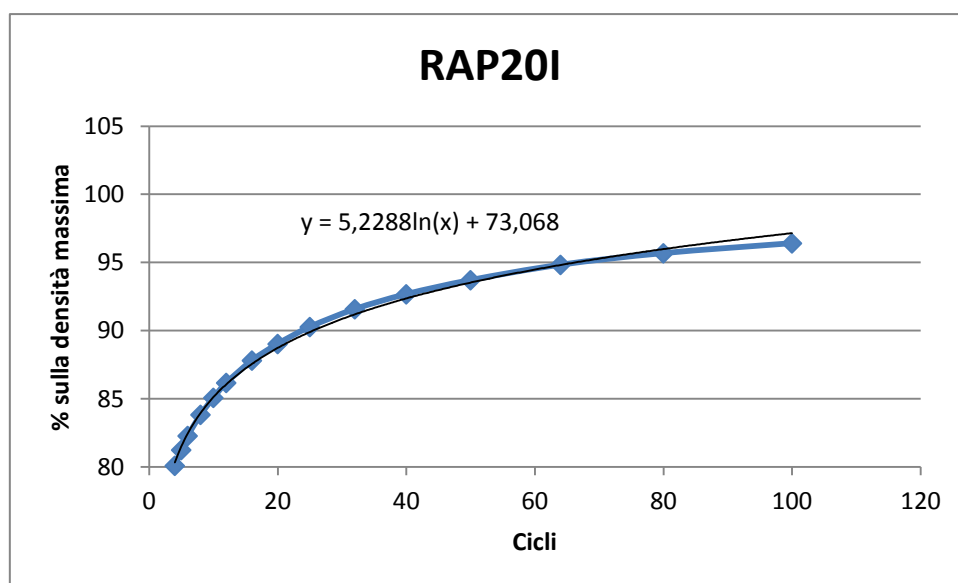


Grafico 10 Curva di compattazione, RAP20I

RAP 50A		
Cicli	Bulk density, Mg/m3	% sulla densità massima
4	2122	83,41
5	2156	84,75
6	2184	85,85
8	2231	87,70
10	2268	89,16
12	2297	90,29
16	2342	92,05
20	2371	93,21
25	2396	94,19
32	2420	95,14
40	2439	95,89
50	2454	96,45
64	2467	96,99
80	2477	97,35
100	2485	97,68

Tabella 48 Grado compattazione, RAP50A

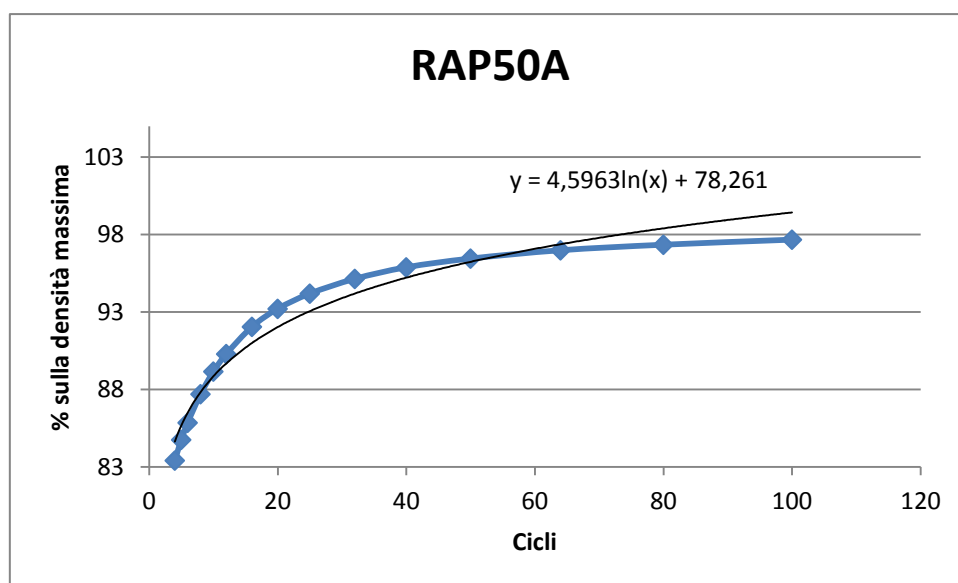


Grafico 11 Curva di compattazione, RAP50A

RAP 50I		
Cicli	Bulk density, Mg/m3	% sulla densità massima
4	2092	81,97
5	2120	83,05
6	2142	83,92
8	2180	85,43
10	2209	86,57
12	2234	87,53
16	2271	89,00
20	2301	90,18
25	2330	91,29
32	2358	92,40
40	2383	93,36
50	2406	94,26
64	2426	95,08
80	2442	95,68
100	2459	96,34

Tabella 49 Grado compattazione, RAP50I

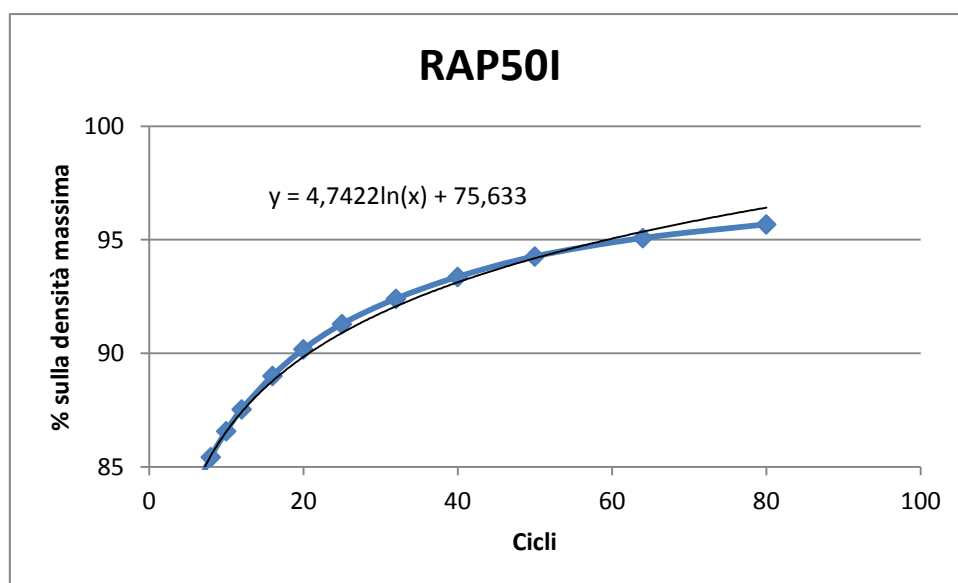


Grafico 12 Curva di compattazione, RAP50I

RAP 70A		
Cicli	Bulk density, Mg/m3	% sulla densità massima
4	2054	80,75
5	2083	81,86
6	2107	82,83
8	2145	84,33
10	2178	85,63
12	2204	86,62
16	2247	88,34
20	2279	89,60
25	2311	90,84
32	2342	92,07
40	2368	93,06
50	2390	93,94
64	2412	94,81
80	2427	95,41
100	2442	95,98

Tabella 50 Grado compattazione, RAP70A

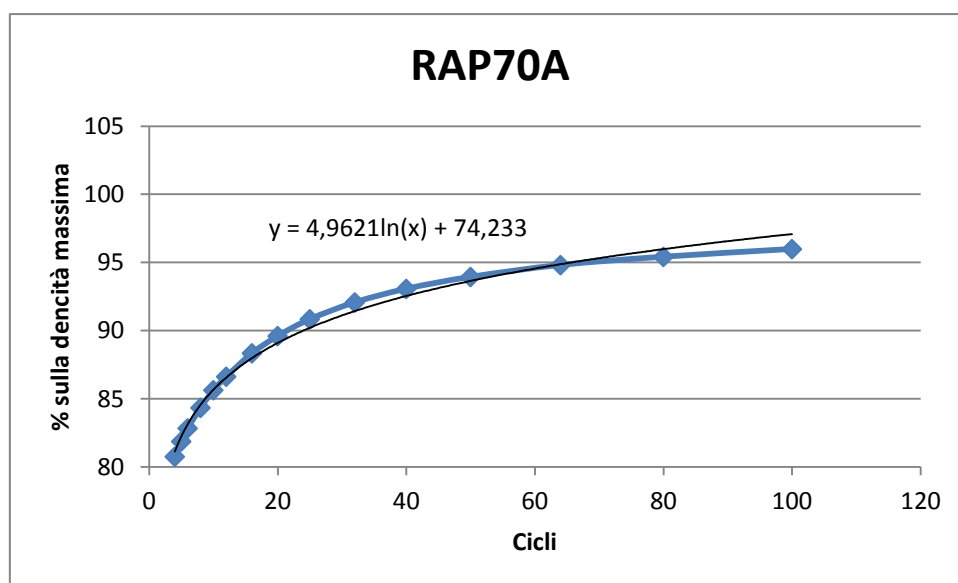


Grafico 13 Curva di compattazione, RAP70A

RAP 70I		
Cicli	Bulk density, Mg/m3	% sulla densità massima
4	2035	79,66
5	2064	80,78
6	2087	81,69
8	2127	83,24
10	2157	84,42
12	2183	85,43
16	2222	86,97
20	2252	88,13
25	2283	89,34
32	2314	90,56
40	2342	91,68
50	2370	92,74
64	2398	93,87
80	2422	94,81
100	2446	95,75

Tabella 51 Grado compattazione, RAP70I

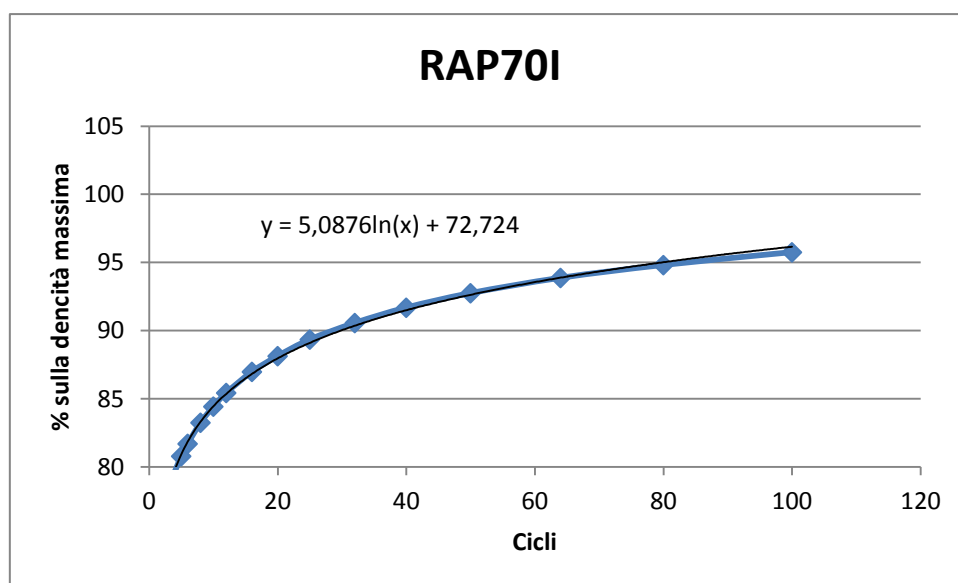


Grafico 14 Curva di compattazione, RAP70I

7.2.2 Calcolo indice CEI

Di seguito vengono elencati i valori dell'indice CEI dei singoli provini. Per la determinazione, oltre aver fatto riferimento dall'ottavo ciclo e al ciclo relativo al raggiungimento del 92% del grado di compattazione, si è calcolata l'area suddividendo le singole aree sottostanti alla curva di compattazione. L'indice CEI è quindi la somma delle aree.

RAP 0			
N cicli	Grado di compattazione, %	Valore Aria	CEI
8	83,04	1,19	224,39
10	84,23	3,39	
12	85,24	11,86	
16	86,77	17,24	
20	87,93	27,35	
25	89,09	46,85	
32	90,37	63,08	
40	91,47	53,42	
46	92,00		

Tabella 52 l'indice CEI, RAP0

RAP 20			
N cicli	Grado di compattazione, %	Valore Aria	CEI
8	81,64	1,16	371,15
10	82,80	3,27	
12	83,75	11,59	
16	85,33	17,00	
20	86,46	26,97	
25	87,61	46,18	
32	88,86	61,94	
40	89,90	88,57	
50	91,09	118,86	
62	92,00		

Tabella 53 l'indice CEI, RAP20

RAP 50			
N cicli	Grado di compattazione, %	Valore Aria	CEI
8	83,00	1,23	227,86
10	84,23	3,47	
12	85,25	12,27	
16	86,89	18,08	
20	88,15	28,73	
25	89,35	48,82	
32	90,60	65,13	
40	91,68	50,13	
46	92,00		

Tabella 54 l'indice CEI, RAP50

RAP 70			
N cicli	Grado di compattazione, %	Valore Aria	CEI
8	81,42	1,21	396,81
10	82,63	3,38	
12	83,60	11,83	
16	85,16	17,38	
20	86,37	27,68	
25	87,55	47,30	
32	88,81	63,59	
40	89,93	90,35	
50	90,99	134,09	
63	92		

Tabella 55 l'indice CEI, RAP70

RAP 20A			
N cicli	Grado di compattazione, %	Valore Aria	CEI
8	85,42	1,30	66,73
10	86,73	3,70	
12	87,82	12,90	
16	89,48	18,84	
20	90,79	29,99	
25	92,00		

Tabella 56 l'indice CEI, RAP20A

RAP 20I			
N cicli	Grado di compattazione, %	Valore Aria	CEI
8	83,82	1,25	157,38
10	85,07	3,59	
12	86,16	12,65	
16	87,80	18,36	
20	89,02	29,11	
25	90,26	49,69	
32	91,57	42,74	
37	92,00		

Tabella 57 l'indice CEI, RAP20I

RAP 50A			
N cicli	Grado di compattazione, %	Valore Aria	CEI
8	87,70	1,459615	19,39
10	89,16	4,051177	
12	90,29	13,88124	
16	92,00		

Tabella 58 l'indice CEI, RAP50A

RAP 50I			
N cicli	Grado di compattazione, %	Valore Aria	CEI
8	85,43	1,14	99,61
10	86,57	3,25	
12	87,53	11,36	
16	89,00	16,65	
20	90,18	26,53	
25	91,29	40,68	
32	92,00		

Tabella 59 l'indice CEI, RAP50I

RAP 70A			
N cicli	Grado di compattazione, %	Valore Aria	CEI
8	84,33	1,29	115,28
10	85,63	3,58	
12	86,62	12,59	
16	88,34	18,55	
20	89,60	29,43	
25	90,84	49,84	
32	92,07		

Tabella 60 l'indice CEI, RAP70A

RAP 70I			
N cicli	Grado di compattazione, %	Valore Aria	CEI
8	83,24	1,18	207,32
10	84,42	3,37	
12	85,43	11,84	
16	86,97	17,25	
20	88,13	27,48	
25	89,34	46,98	
32	90,56	63,04	
40	91,68	36,16	
44	92,00		

Tabella 61 l'indice CEI, RAP70I

Il grafico sottostante mostra il valore dei contenuti di vuoti per ogni miscela e ne evidenzia la comparazione.

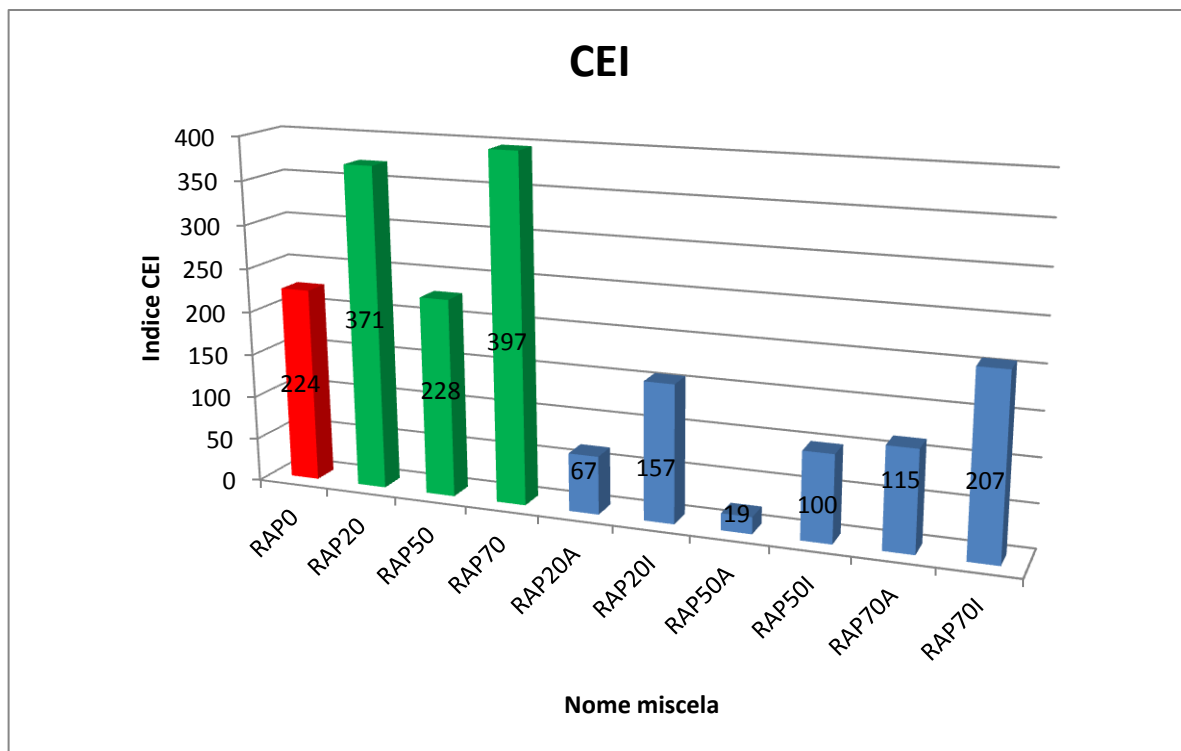


Tabella 62 Indice CEI, comparazione

7.2.3 Osservazioni

Il bitume contenuto nel fresato si presenta come un legante rigido che alla temperature di produzione e di stesa del conglomerato può presentare problemi di lavorabilità.

Le miscele con un valore basso dell'indice sono maggiormente lavorabili. Infatti, tale indice, dà un'idea della facilità con cui la miscela viene stesa: più è basso tale valore, più facilmente avviene la sua compattazione. Tuttavia non è bene che sia troppo ridotto: potrebbe essere il segnale di un conglomerato tenero e pertanto deve essere evitato.

I dati relativi alla miscela con il 50% di RAP sono anomali rispetto al trend generale: ci si aspetterebbe che il dato con il 50% fosse stato compreso fra quello con il 20% e quello con il 70; anche con l'additivo i dati del campione con il 50% sono un po' più bassi di quelli che ci si aspetterebbe vedendo il trend generale.

Come si vede dal grafico sopra riportato, l'aggiunta di fresato aumenta l'indice CEI e quindi la miscela è meno lavorabile, a parte la miscela che ha mostrato un indice più basso, che potrebbe essere legato a qualche errore di prova.

L'aggiunta di additivo riduce notevolmente il valore dell'indice CEI, che si traduce in maggiore lavorabilità, minor energia di compattazione per raggiungere la percentuale dei vuoti della miscela stimata, riduzione del tempo e dei costi.

7.3 RISULTATI DELLA PROVA A TRAZIONE INDIRETTA

E' importante conoscere numericamente i valori delle resistenze a trazione indiretta.

In questo paragrafo vengono riportati, sotto forma di istogramma, i valori di ITS misurati nei diversi campioni analizzati in questa tesi.

Descrizione	Carico massimo,N	Rt,N/mm2
RAP0	12894	0,85
RAP20	21620	1,54
RAP50	28649	2,01
RAP70	36962	2,63
RAP20A	15638	1,06
RAP20I	14375	0,98
RAP50A	15512	1,15
RAP50I	16091	1,17
RAP70A	21551	1,51
RAP70I	14328	1,03

Tabella 63 Carico massimo e resistenza massima

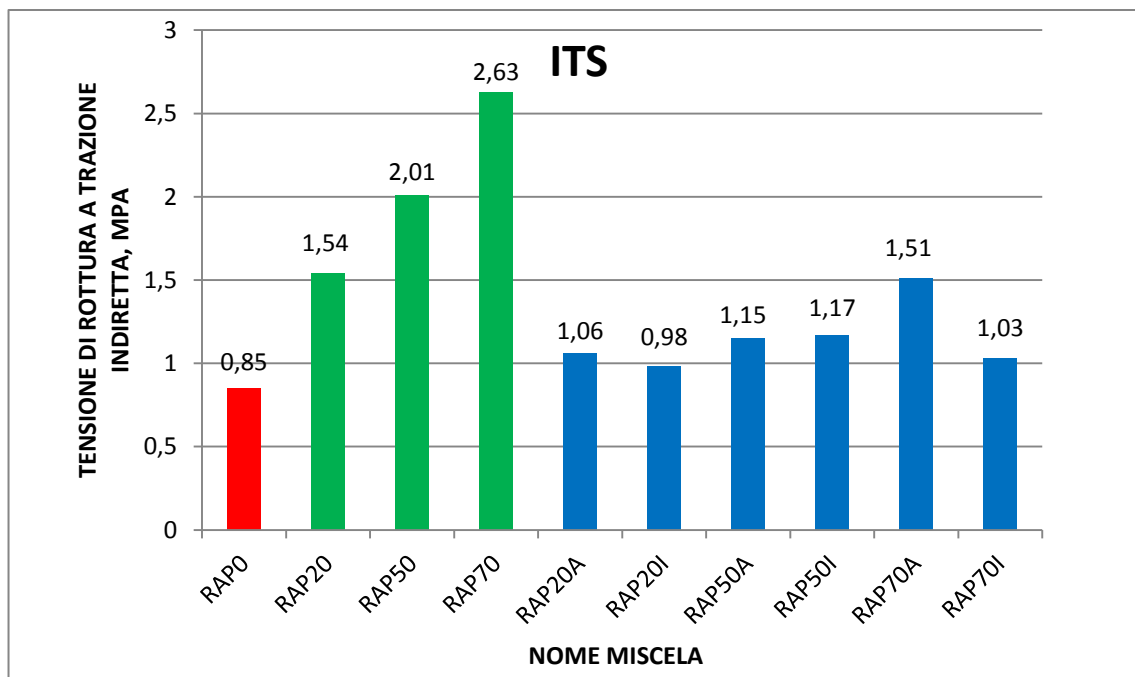


Tabella 64 Tensione di rottura

7.3.1 Osservazioni

È evidente come i valori di tensione a rottura crescono all'aumentare della percentuale di RAP, a causa dell'elevata rigidità del fresato che comporta di riflesso un aumento della rigidità del conglomerato.

Dai test a rottura per trazione indiretta è stato possibile valutare l'effetto che gli additivi hanno sulle diverse miscele.

Come si vede dal grafico, l'aggiunta di additivo, sia americano (A) che italiano (I), permette di mantenere i valori di tensione a rottura pressoché simili al valore della miscela di riferimento (che non contiene fresato - RAP0), ad esclusione della miscela RAP70A, che ha un valore più elevato. In ogni caso questa miscela possiede un valore di resistenza a trazione indiretta più basso di quello osservato per la miscela con il 70% di fresato (RAP70).

Il Capitolato "Autostrade per l'Italia" prescrive che la resistenza a trazione indiretta sia maggiore di 0,6 MPa. Come si può vedere dal grafico, tutte le miscele possiedono il valore di resistenza a trazione molto più alto.

7.4 ANALISI E DESCRIZIONE DEI RISULTATI DEI MODULI USANDO L'ANNESSO C

Di seguito sono riportati i risultati delle prove eseguite in accordo con UNI EN 12697-26 - ANNESSO C. La prova, in condizioni standard, viene eseguita a 20°C. La prova è stata eseguita anche a temperatura di 0°C, in quanto viene studiato il comportamento del materiale a basse temperature in termini di rigidità.

I grafici qui sotto riportano i valori di modulo di rigidità a 25°C e a 0°C.

Modulo di rigidità, MPa 25°C	
Descrizione miscela	Modulo di rigidità, MPa
RAP0	1594
RAP20	4122
RAP50	5393
RAP70	11271
RAP20A	2288
RAP20I	2081
RAP50A	2483
RAP50I	3091
RAP70A	3218
RAP70I	4161

Tabella 65 Modulo di rigidità, 25°C

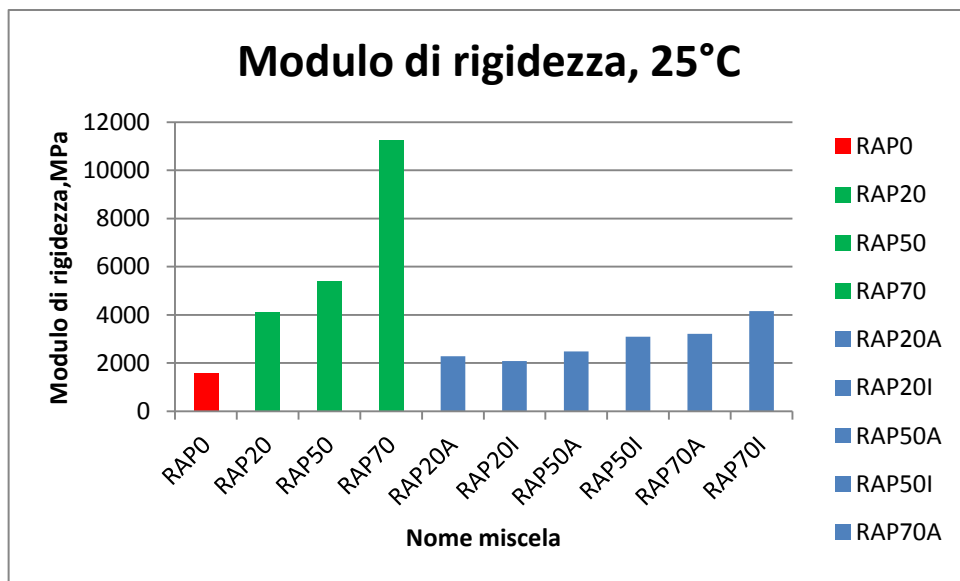


Grafico 15 Modulo di rigidezza, 25°C

Modulo di rigidezza, MPa 0°C	
Descrizione miscela	Modulo di rigidezza, MPa
RAP0	17367
RAP20	25939
RAP50	24260
RAP70	33367
RAP20A	18620
RAP20I	16712
RAP50A	16291
RAP50I	16696
RAP70A	15996
RAP70I	15802

Tabella 66 Modulo di rigidezza, 0°C

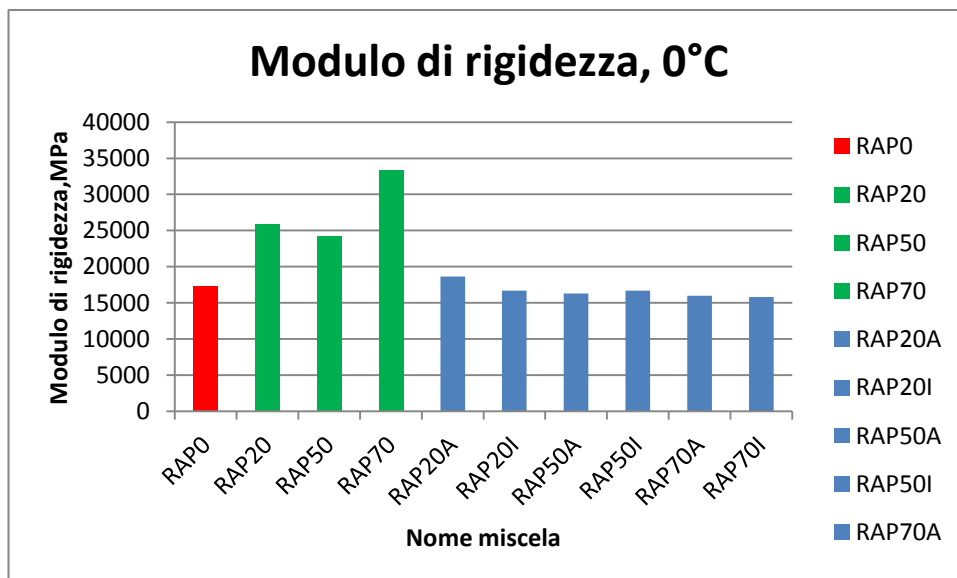


Grafico 16 Modulo di rigidezza, 0°C

7.4.1 Osservazioni

La prima osservazione che è possibile dedurre dai grafici è che il materiale diventa via via più rigido con l'aumento della percentuale di fresato. Questa tendenza si può osservare sia a 25 che a 0°C, con un leggero scostamento sul grafico a 0°C tra la miscela RAP 20 e la miscela RAP 50.

Come si vede dal secondo grafico, il modulo di rigidezza aumenta decisamente alle temperature più basse. La miscela con un elevato contenuto di fresato e con condizionamento a basse temperature possiede un modulo particolarmente alto: questo potrebbe essere un problema, perché una miscela troppo rigida può sua volta portare a precoce “*thermal cracking*”.

Come si può osservare, le miscele additivate mostrano i risultati migliori in termini di modulo sia a 25°C che a 0°C. Gli additivi permettono alla miscela di avere comunque un modulo elevato, come richiesto dai Capitolati, ma non eccessivamente alto, per evitare le conseguenze sopra accennate.

7.5 ANALISI E DESCRIZIONE DEI RISULTATI DEI MODULI USANDO L'ANNESSO B

Di seguito sono riportati i risultati delle prove eseguite in accordo con UNI EN 12697-26 - ANNESSO B. Per vedere il comportamento del materiale in diverse condizioni termiche il modulo di rigidezza è stato valutato a quattro temperature diverse 25, 0, -10, -20°C.

Modulo di rigidezza, MPa 25°C	
Descrizione miscela	Modulo di rigidezza, MPa
RAP0	4107
RAP20	3471
RAP50	9023
RAP70	14215
RAP20A	4196
RAP20I	4259
RAP50A	5890
RAP50I	6325
RAP70A	6026
RAP70I	6500

Tabella 67 Modulo di rigidezza, 25°C

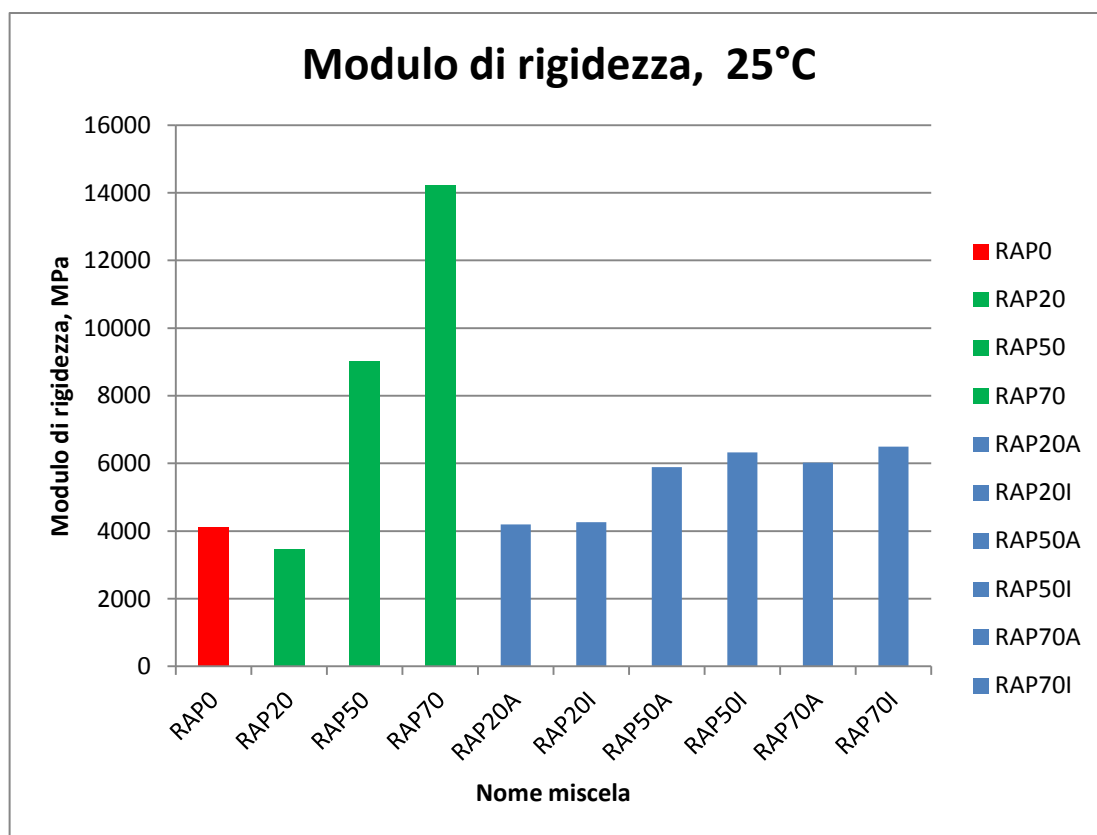


Grafico 17 Modulo di rigidità, 25°C

Modulo di rigidità, MPa 0°C	
Descrizione miscela	Modulo di rigidità, MPa
RAP0	24690
RAP20	20385
RAP50	20078
RAP70	17316
RAP20A	17458
RAP20I	18871
RAP50A	19358
RAP50I	17053
RAP70A	22728
RAP70I	18567

Tabella 68 Modulo di rigidità, 0°C

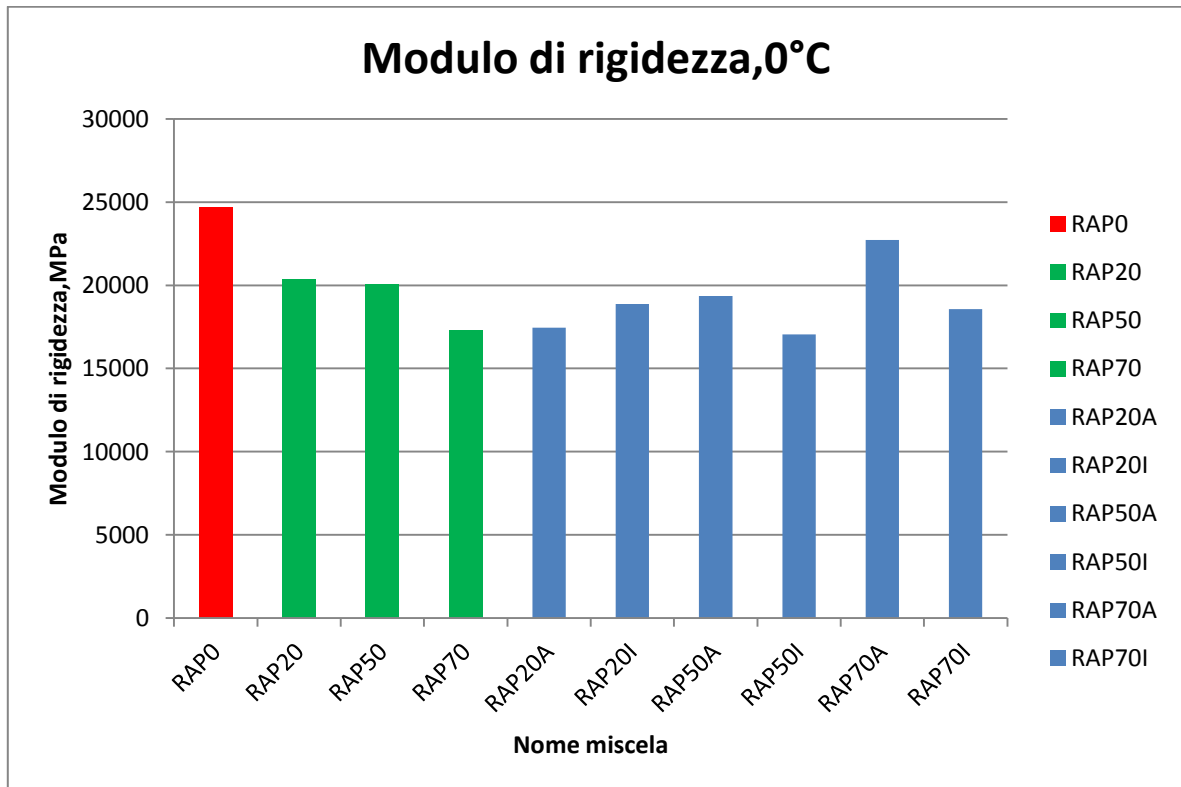


Grafico 18 Modulo di rigidezza, 0°C

Modulo di rigidezza, MPa -10°C	
Descrizione miscela	Modulo di rigidezza, MPa
RAP0	23710
RAP20	24994
RAP50	27952
RAP70	31286
RAP20A	23475
RAP20I	26576
RAP50A	25094
RAP50I	27882
RAP70A	24487
RAP70I	24610

Tabella 69 Modulo di rigidezza, -10°C

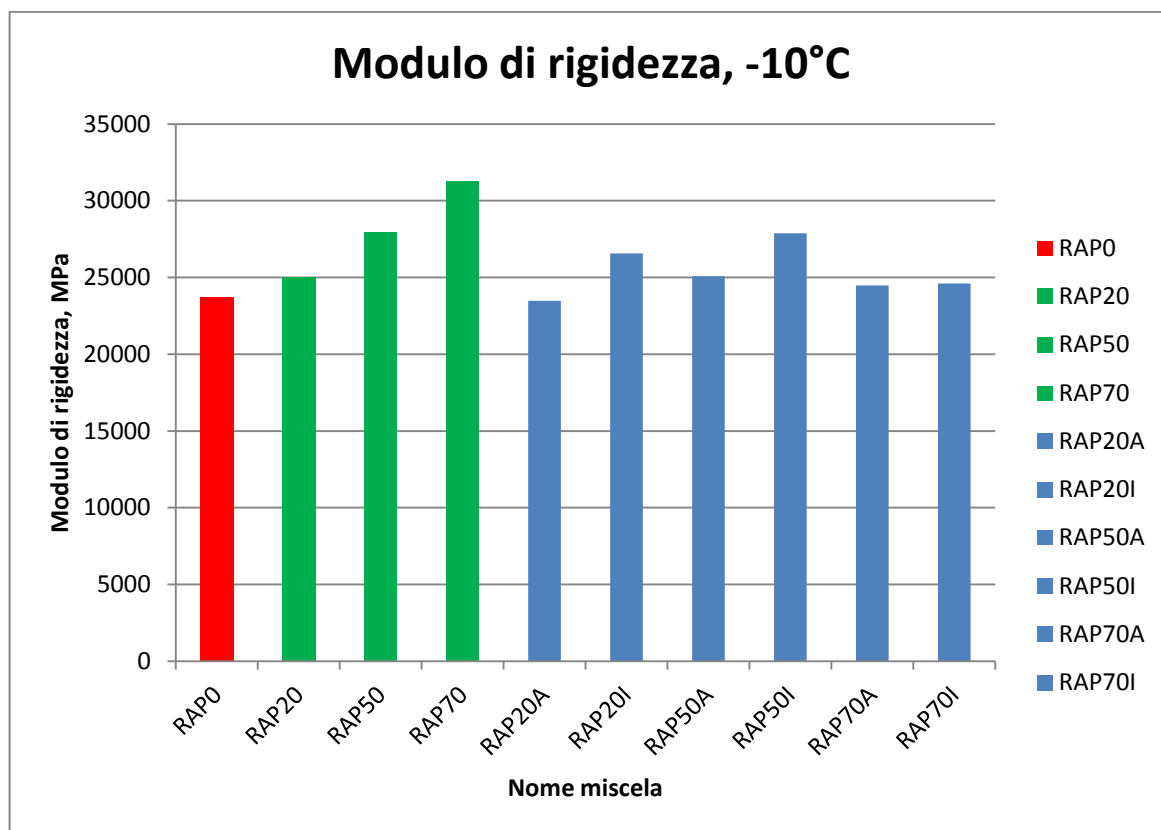


Grafico 19 Modulo di rigidezza, -10°C

Modulo di rigidezza, MPa -20°C	
Descrizione miscela	Modulo di rigidezza, MPa
RAP0	27393
RAP20	28918
RAP50	31052
RAP70	33904
RAP20A	26490
RAP20I	26187
RAP50A	27993
RAP50I	28089
RAP70A	30831
RAP70I	27101

Tabella 70 Modulo di rigidezza, -20°C

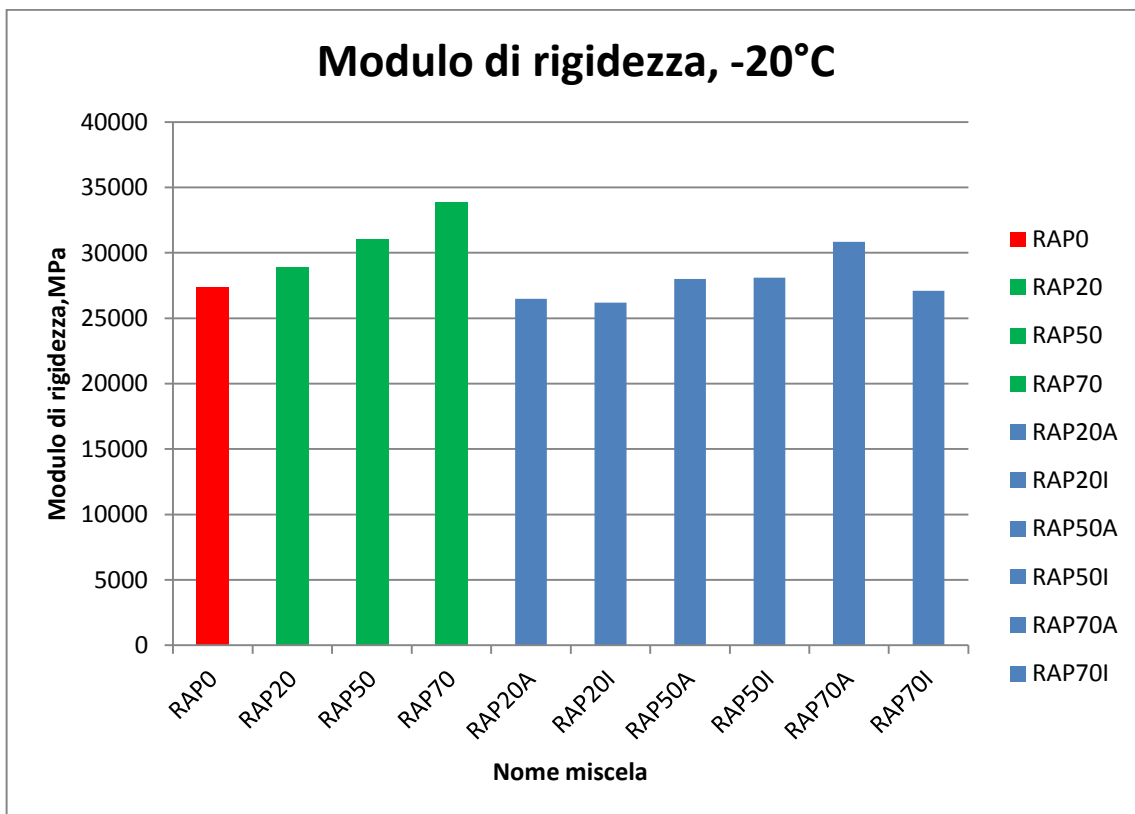


Grafico 20 Modulo di rigidezza, -20°C

Nel grafico successivo si può osservare la comparazione dei moduli di rigidezza a diverse temperature.

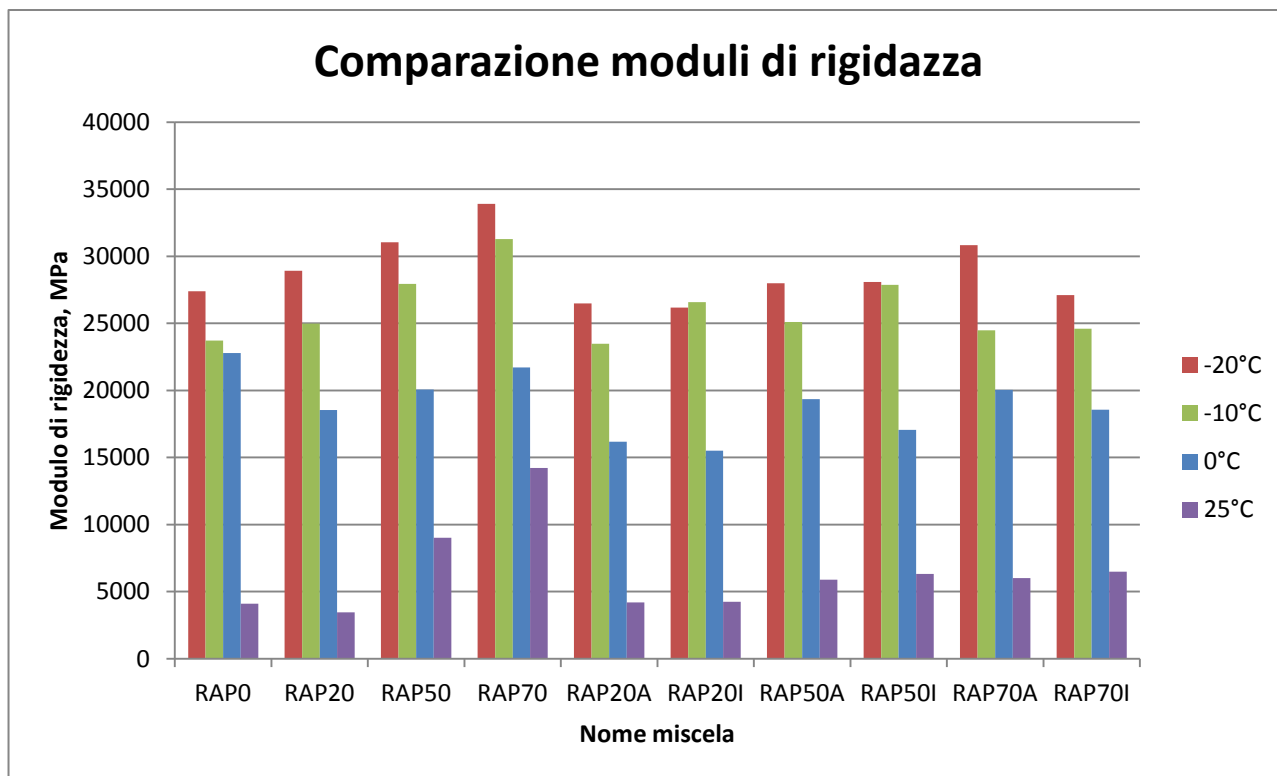


Grafico 21 Comparazione modulo di rigidezza a diverse temperature

7.5.1 Osservazioni

Dopo aver esaminato la prova in condizioni standard (a 25°C) possiamo nuovamente confermare quello che abbiamo visto nella prova fatta in accordo con la normativa UNI EN 12697-26 - ANNESSO C: il modulo di rigidezza aumenta notevolmente con l'aumentare del contenuto di fresato, mentre l'aggiunta di un additivo permette di ridurre il valore del modulo di rigidezza.

Le miscele testate a temperature più basse a loro volta hanno confermato più o meno lo stesso andamento, a parte la prova eseguita a 0°C, che ha mostrato un andamento differente (specialmente per le miscele che non contengono fresato).

Anche a basse temperature (-10°C e - 20°C) possiamo osservare valori di modulo più basso per le miscele con additivo.

8 CONCLUSIONI

Il bitume contenuto nel fresato si presenta come un legante rigido che a basse temperature può presentare problemi di “*Thermal cracking*”, mentre alle temperature di produzione e stesa del conglomerato può presentare problemi di lavorabilità.

Due diversi additivi rigeneranti sono stati aggiunte alle miscele in esame per affrontare i problemi sopra descritti.

L’analisi quindi si è focalizzata sulla comparazione del comportamento meccanico delle miscele con diverso contenuto di fresato (0, 20, 50, 70), senza aggiunta di nessun rigenerante e additivate con due prodotti chimici diversi.

La caratterizzazione prestazionale ha riguardato quindi:

- Compattazione;
- Indice dei vuoti;
- Rigidezza;
- Resistenza a rottura ultima

Una volta analizzato ogni singolo specifico comportamento meccanico delle miscele per tipologia di prova, si possono trarre le conclusioni.

Le miscele con valore basso dell’indice CEI sono maggiormente lavorabili. Infatti, tale indice dà un’idea della facilità con cui la miscela viene stesa: più è basso tale valore, più facilmente avviene la sua compattazione.

Come si è visto, l’aggiunta di fresato ha comportato un aumento dell’indice CEI e quindi la miscela è risultata essere meno lavorabile.

L’aggiunta di additivo riduce notevolmente il valore di Indice CEI, che si traduce in una maggiore lavorabilità, una minor energia di compattazione per raggiungere la percentuale dei vuoti della miscela stimata, una riduzione del tempo e dei costi.

La rigidezza della miscela è un fattore molto importante quando si parla delle miscele con elevato contenuto di fresato e in condizioni ambientali molto rigide.

Sono state eseguite due prove che permettono di stimare il modulo di rigidezza del materiale: una prova a trazione indiretta sui provini cilindrici e una prova a flessione sui

provini prismatici. Le prove sono state eseguite alla temperatura di 25°C (temperatura media del clima italiano) e, per valutare la risposta del materiale in condizioni più severe, a temperature di 0, -10 e -20°C.

Si è osservato che, sia a 25°C sia a temperature più basse, un aumento della percentuale di fresato comporta un aumento del modulo di rigidezza.

Si è visto anche che il modulo di rigidezza aumenta decisamente con l'abbassamento della temperatura e con l'aumento del tenore di fresato contenuto nelle miscele. Il modulo della miscela con il 70% di fresato a bassa temperatura è risultato essere particolarmente alto: il problema conseguente ad avere una miscela troppo rigida potrebbe essere un precoce *thermal cracking*.

Come è stato osservato, le miscele additivate hanno mostrato i risultati migliori in termini di modulo, sia a 25°C che a temperature più basse: una minore rigidezza del materiale riduce il rischio che si manifesti precocemente il fenomeno del *thermal cracking*.

La resistenza a rottura ultima si può ottenere eseguendo delle prove ITS. Anche questa prova ha dimostrato che si verifica un aumento di rigidezza del materiale con l'incremento del contenuto di fresato. Dai test a rottura per trazione indiretta è stato possibile valutare l'effetto che gli additivi hanno sulle diverse miscele: l'aggiunta di additivo, sia americano (A) che italiano (I), ha permesso di mantenere i valori di tensione a rottura pressoché simili al valore della miscela di riferimento RAP0 (che non contiene fresato), evidenziando che l'additivo rigenera il bitume presente all'interno del fresato e diminuisce la rigidezza totale della miscela.

Tutte le miscele soddisfano il requisito indicato nel Capitolato "Autostrade per l'Italia" (utilizzato come riferimento in questo lavoro di tesi) che prescrive una resistenza a trazione indiretta maggiore di 0,6 MPa.

L'aggiunta di uno degli additivi permette di avvicinare le caratteristiche prestazionali delle varie miscele, indifferentemente dalla percentuale di fresato contenuto e dalla temperatura, alla miscela di riferimento (che non contiene fresato, evidenziata con il colore rosso nei grafici del capitolo precedente).

9 BIBLIOGRAFIA

1. Prof. Ing. Pasetto M., Materiale didattico, Padova;
2. D.Lgs 3 Aprile 2006, n. 152, “Norme in materia ambientale”;
3. Bressi G., Pagani L., “La Marcatura CE degli aggregati riciclati. Gli aggregati riciclati - Riciclare per l’ ambiente” , Pisa 2004;
4. Giannattasio F., “Rigeneranti per il fresato” , Le Strade, n. 1345, 1999;
5. Cattini E., “Riciclato...come nuovo” , Quarry and construction, n. 11, 2001.
6. Bonola M., “Il riciclaggio come strumento di gestione della manutenzione” , Le strade, n. 5, 2005.
7. Loprencipe G., Drago D., Quaderno AIPCR “Tecniche e aspetti normativi del riciclaggio nelle pavimentazioni stradali” per il XXV Convegno Nazionale Stradale -Comitato Tecnico C 4.3 “Pavimentazioni stradali” , Napoli 4-7 Ottobre 2006.
8. Santella F., “Tutti i vantaggi del tiepido” , Materiali, Le strade, n. 11, 2007
9. Simone A., appunti del corso di “Tecnica e sicurezza dei cantieri Viari” , 2006-2007.
10. Bonola M., Foschi R., “Riciclaggio in situ di pavimentazioni drenanti: primi risultati” , Le strade, n. 4, 2004
11. Foschi R., Bonola M., “Schema manutentorio integrato delle pavimentazioni stradali” , Le strade, n. 4, 2003
12. Apostolo F., “Il ciclo di vita della strada” , Le strade, 7-8-2007.
13. Castagnetta V., “ Il riciclaggio delle pavimentazioni bituminose stradali invecchiate” , 1985.
14. Ravaioli S., “Emulsioni bituminose” , Siteb, Prima edizione, Settembre 2004
15. Bocci M., Grilli A., Riviera P., Tolentino F., Paglione S., “Il riciclaggio a freddo per l’ ampliamento alla terza corsia dell’ autostrada A 14” , Strade & Autostrade, n. 6, 2008.

16. Gesto, “Produzione economica di conglomerati a freddo con bitume schiumato” ,1999.
17. Fioravanti R., Tattolo S., Begliardi F., Menconi G., “Superfoam 80, il bitume per interventi di riciclaggio a freddo con schiuma di bitume” , Strade & Autostrade, n. 2,2004.
18. Garofalo M., “Riciclaggio a freddo con impianto mobile” , Convention di CGS Group , 26 Marzo 2009
19. EAPA position paper, “The use of Warm Mix Asphalt” , January 2010.
20. Vaitkus A., Čygas D., Laurinavičius A., Perveneckas Z., “The Baltic journal of road and bridge engineering” , Analysys and evaluation of possibilities for the use of warm mix asphalt in Lithuania, Vol. IV, n. 2, 2009.
21. Radoani E., “Il treno di riciclaggio” , n. 7-8, Le strade, 2003.
22. Quaderno AIPCR, “Tecnologie per la produzione di conglomerati bituminosi con processi a bassa temperatura” , per il XXV Convegno Nazionale Stradale – Comitato Tecnico C 4.3, “Pavimentazioni stradali” , Napoli 4-7 Ottobre 2006.
23. Skinner S., “Road sustainability - environmentally friendly machines and processes for road building” , Construction Europe, 2010.
24. Wirtgen group, Manuale riciclaggio a freddo
25. Ing. Baldo N., Materiale didattico, Padova, 2012-2013;
26. Alessandro Pantano “Caratterizzazione meccanica di warm mix asphalt contenenti scorie di acciaieria”, tesi di laurea, Padova 2014-2015
27. Rosa Lucia “il riciclaggio delle pavimentazioni stradali”, tesi di Laurea, Bologna 2009-2010
28. Giacomo Cuciniello, Pietro Leandri, Massimo Losa “ Studio di miscele per strati di usura ecocompatibili ad elevate prestazioni” Dipartimento di Ingegneria Civile Università di Pisa, 2011
29. Stefano Ravaioli ,“Fresato d’asfalto: rifiuto o sottoprodotto?” SITEB,2011
30. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, “Capitolato Speciale d’Appalto Tipo per lavori Stradali”

31. Carlo Costa, Ilaria De Biasi “Il riciclaggio a caldo in opera delle pavimentazioni in asfalto deteriorate”,2008
32. Wirtgen “ Il mondo delle riciclatrici a caldo Wirtgen”
33. Federica Giannattasio “ Contributo degli additivi e delle tecnologie verdi alla sostenibilità dell’asfalto” Iterchimica,Srl