

Università Politecnica delle Marche



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in INGEGNERIA CIVILE

Dipartimento Ingegneria Civile, Edile e dell'Architettura

**VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI
MECCANICHE DEL CONGLOMERATO
BITUMINOSO A CALDO REALIZZATO
INSERENDO UN'ELEVATA QUANTITÀ DI
FRESATO**

EVALUATION OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF HOT
MIX ASPHALT WITH HIGH AMOUNT OF RAP

TESIDILAUREADI

RELATORE

Miccoli Giulia

Prof. Ing. Bocci Maurizio

Anno Accademico 2018-2019

Sommario

Introduzione.....	5
1. Considerazioni generali sul riciclaggio	7
1.1 La pavimentazione : funzionalità e composizione.....	9
1.2 Storia del riciclaggio in Italia.....	12
1.3 Norme di riferimento	13
1.4 Il fresato stradale : definizione e proprietà	14
1.5 Invecchiamento del bitume.....	17
1.6 Additivi rigeneranti.....	18
1.7 Tecniche di riciclaggio.....	19
1.7.1 Riciclaggio a caldo	20
1.7.2 Riciclaggio a freddo	29
2. Programma sperimentale	32
2.1 Obiettivi del programma sperimentale	32
2.2 Materiali.....	33
2.2.1 Aggregati vergini.....	33
2.2.2 Fresato	44
2.2.3. Bitume	47
2.2.4. Additivi.....	51
2.3 Procedure di laboratorio.....	53
2.3.1. Definizione della curva granulometriche di progetto.....	53
2.3.2. Realizzazione dei provini	55
2.3.3. Pressa a taglio giratoria (UNI EN 12697-31).....	60
2.3.4. Determinazione delle proprietà volumetriche	62
2.3.5. Prova di modulo a trazione indiretta (UNI EN 12697-26).....	64
2.3.6. Prova di Trazione Indiretta (UNI EN 12697-23)	76
2.3.7 Prova Accumulo di deformazione permanente (UNI EN 12697-25).....	80

2.4 Specifiche di capitolato.....	92
3. Risultati sperimentali.....	93
3.1 Mix 1.....	93
3.1.1. Caratteristiche volumetriche	93
3.1.2. Modulo a trazione indiretta.....	94
3.1.3 Resistenza a trazione indiretta.....	95
3.2 Mix 2.....	97
3.2.1. Caratteristiche volumetriche	97
3.2.2. Modulo a trazione indiretta.....	98
3.2.3 Resistenza a trazione indiretta.....	98
3.3 Mix 3.....	100
3.3.1. Caratteristiche volumetriche	101
3.3.2. Modulo a trazione indiretta.....	101
3.3.3 Resistenza a trazione indiretta.....	102
3.4 Mix4.....	104
3.4.1. Caratteristiche volumetriche	104
3.4.2. Modulo a trazione indiretta	105
3.4.3 Resistenza a trazione indiretta.....	105
3.5. Mix 5.....	107
3.5.1. Caratteristiche volumetriche	108
3.5.2. Modulo a trazione indiretta	108
3.5.3 Resistenza a trazione indiretta.....	109
3.6. Confronto tra le varie miscele.....	111
3.7 Mix A.....	114
3.7.1. Caratteristiche volumetriche	114
3.7.2. Deformazioni permanenti.....	115
3.8 Mix B.....	118
3.8.1. Caratteristiche volumetriche	118

3.8.2. Deformazioni permanenti.....	119
3.9 Mix C	122
3.9.1. Caratteristiche volumetriche	122
3.9.2. Deformazioni permanenti.....	123
3.10 Confronto tra i Mix A,B e C	126
Conclusioni.....	129
Bibliografia.....	131
Sitografia	132

Introduzione

Nel corso degli ultimi decenni le infrastrutture hanno avuto uno sviluppo notevole, infatti è aumentato il trasporto su strada, in particolare il volume relativo ai veicoli pesanti ed il carico per asse è di gran lunga maggiore rispetto al passato. Tutti questi fattori non fanno altro che accentuare il degrado delle pavimentazioni e di conseguenza rendono inevitabili gli interventi di manutenzione, che devono essere effettuati sempre più frequentemente. Nel caso in cui non si intervenga tempestivamente, i fenomeni di degrado potrebbero interessare l'intero pacchetto stradale e quindi comportare l'asportazione e il rifacimento della rete. Tutte queste operazioni portano alla formazione di una grande quantità di conglomerato bituminoso di recupero, detto anche fresato (RAP: *Reclaimed Asphalt Pavement*), che può essere riutilizzato per la costruzione di nuove pavimentazioni stradali.

Anche se il riciclaggio del fresato comporta numerosi vantaggi sia economici che ambientali, il suo riutilizzo fino ad ora è limitato a causa dell'elevato stato di ossidazione del bitume in esso contenuto, dovuto all'invecchiamento a breve e a lungo termine. Infatti, il legante invecchiato presenta una minor duttilità e capacità di ricoprire gli aggregati rispetto al bitume vergine, nonché una maggiore rigidità della miscela e quindi una predisposizione a fenomeni di fessurazione. È in questo ambito che si inserisce l'utilizzo di additivi rigeneranti, in grado di riattivare le proprietà reologiche e chimiche del bitume invecchiato con conseguente miglioramento della lavorabilità del conglomerato.

La presente tesi è articolata in due fasi distinte: nella prima, sono stati testati diversi additivi rigeneranti in miscele a caldo contenenti alta percentuale di fresato al fine di valutare l'effetto che questi additivi provocano nella miscela finale; nella seconda parte sono state analizzate le resistenze alla deformazione permanente di due miscele contenenti additivi rigeneranti ed elevato contenuto di fresato, andandola a confrontare con quella di un conglomerato di controllo realizzato senza l'inserimento di alcun tipo di additivo. In particolare vengono utilizzate due tipologie di RAP e diverse percentuali di additivo, andando a valutare le caratteristiche volumetriche, tramite metodo volumetrico, e meccaniche, mediante prove di modulo (NAT), di rigidità a trazione indiretta e di accumulo delle deformazioni permanenti.

Per una più dettagliata descrizione delle miscele realizzate e delle prove effettuate si rimanda al Capitolo 2.

La tesi è strutturata come segue:

- Capitolo 1: definizione di fresato stradale con relative proprietà, descrizione delle varie tecniche di riciclaggio con conseguenti problematiche dovute all'invecchiamento del bitume e lo scopo dell'utilizzo di additivi rigeneranti;
- Capitolo 2: esposizione dell'obiettivo del programma sperimentale, descrizione dei materiali utilizzati nelle miscele, con curve granulometriche degli aggregati vergini e del fresato, caratteristiche del legante e degli additivi. Infine illustrazione delle apparecchiature e metodologie di prova effettuate;
- Capitolo 3: esposizione ed analisi dei risultati derivanti da prove meccaniche di laboratorio.

1. Considerazioni generali sul riciclaggio

Nel settore delle pavimentazioni stradali col termine “riciclare”, si intende qualsiasi possibilità di recuperare e riutilizzare il materiale fresato, per la produzione di un nuovo conglomerato bituminoso. Tale materiale viene prodotto tramite scarificazione della superficie stradale e quindi risulta costituito da bitume ed inerte di quantità ottimale per l’impiego in ambito stradale.

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.

In termini di prestazioni, sia le normative Comunitarie sia quelle dei singoli Paesi europei prescrivono che i conglomerati bituminosi confezionati con materiale fresato rispettino le stesse specifiche previste per le miscele contenenti soltanto aggregati vergini. In Italia tuttavia, al contrario di come avviene in altri paesi industrializzati, la percentuale di reimpiego del fresato risulta assai ridotta, nonostante la sua elevata disponibilità. Facendo riferimento a dati pubblicati da EAPA (Associazione europea asfaltatori) relativi all’anno 2010, si nota infatti che l’Italia è agli ultimi posti per quantità di conglomerato riciclato.

Risulta che la quantità di conglomerato bituminoso fresato è pari a circa 12 milioni di tonnellate, su un totale di quasi 40 milioni di tonnellate di conglomerato bituminoso prodotto annualmente, con una percentuale di reimpiego stimata intorno al 15% (circa 1.8 milioni di tonnellate). Tale dato risulta molto inferiore rispetto a quello dei maggiori paesi sviluppati, dove si recupera oltre l’80% dello stesso materiale fresato.

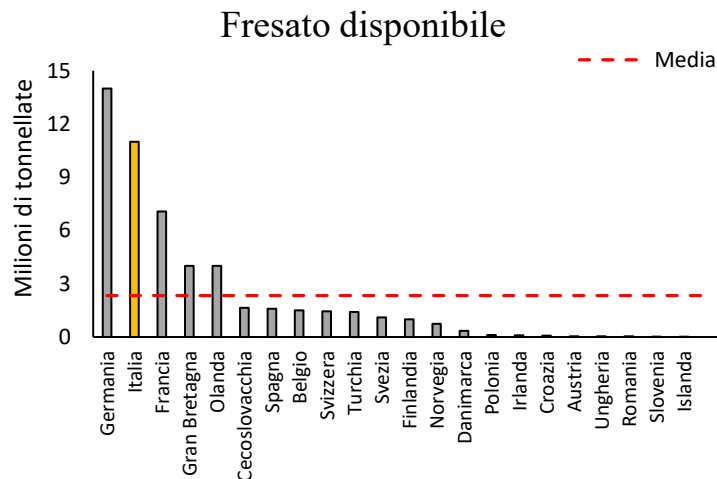


Fig. 1.1 Tonnellate di fresato disponibile secondo EAPA, 2010

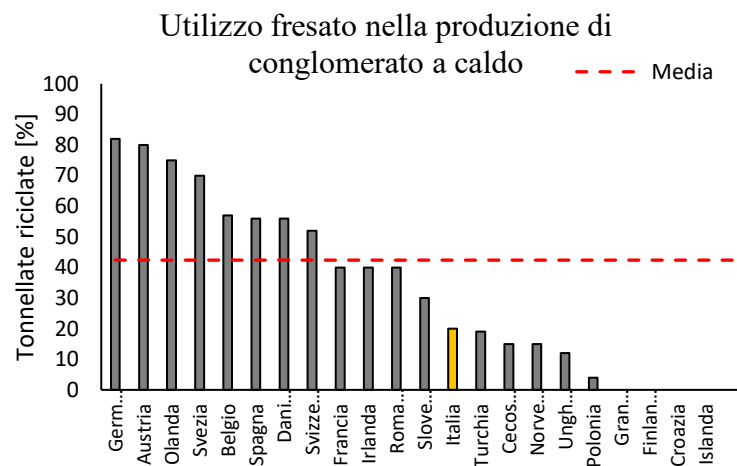


Fig. 1.2 Percentuali di riciclo del fresato secondo EAPA, 2010

Risulta che la quantità di conglomerato bituminoso fresato è pari a circa 12 milioni di tonnellate, su un totale di quasi 40 milioni di tonnellate di conglomerato bituminoso prodotto annualmente, con una percentuale di reimpiego stimata intorno al 15% (circa 1.8 milioni di tonnellate). Tale dato risulta molto inferiore rispetto a quello dei maggiori paesi sviluppati, dove si recupera oltre l'80% dello stesso materiale fresato.

Paese	Produzione annuale di conglomerati t·10 ⁶	Produzione annuale di fresato t·10 ⁶	Percentuale di impiego del fresato %
Francia	38,0	7,0	25
Germania	63,5	16,0	80
Svizzera	4,7	1,8	30
Paesi Bassi	7,5	3,0	100
Regno Unito	27,5	8,0	90
Usa	515,0	50,0	80
Giappone	70,1	22,0	80
Italia	36,3	12,0	15

Tab.1.1: Produzione annuale di conglomerato bituminoso in alcuni paesi e percentuali del materiale recuperato

1.1 La pavimentazione : funzionalità e composizione

Prima di parlare di riciclaggio vero e proprio, è opportuno fornire indicazioni sul significato della pavimentazione stradale. Essa è per definizione quella struttura sovrastante un rilevato o il terreno in sito nelle trincee, atta a garantire la transitabilità del traffico veicolare, con lo scopo di assolvere a diverse funzioni:

- conferire caratteristiche superficiali di planarità ed aderenza, assicurando una circolazione confortevole e sicura;
- dissipare in profondità gli sforzi e le pressioni trasmesse dalle ruote veicolari (in relazione alla pressione di gonfiaggio dei pneumatici), affinché l'intero pacchetto stradale possa resistere ad un elevato numero di passaggi, il più a lungo possibile;
- proteggere la pavimentazione stessa ed il terreno sottostante da agenti atmosferici pericolosi per la stabilità del piano viabile (dal gelo in particolare).

La pavimentazione stradale è costituita da vari strati, ciascuno con caratteristiche proprie, composizionali e funzionali, che spesso possono raggiungere anche la profondità di un metro; i tre elementi principali che la compongono sono: il *manto*, la *struttura* ed il *sottofondo*.

Il *manto* è la parte più superficiale della pavimentazione, e in quanto tale rappresenta il primo contatto con il carico; deve perciò essere dotato di resistenza notevole e caratteristiche geometriche perfette: i materiali utilizzati dovranno pertanto avere delle

formulazioni compositive specifiche, che non solo assolvano alle funzioni richieste, ma le mantengano elevate nel tempo, affinché la vita utile della pavimentazione stessa sia la più lunga possibile. Il manto effettuerà una protezione di tutta la struttura della pavimentazione, in particolare nei confronti di due elementi: l'elemento traffico e l'elemento ambiente. La protezione dal traffico è relativa sia ai carichi trasmessi dalle ruote, come abbiamo già avuto modo di accennare, ma anche all'azione di sfregamento esercitata dai pneumatici stessi, con conseguente abrasione della superficie, perdita di attrito (resistenza allo slittamento) e inevitabile aumento della pericolosità. La protezione dall'ambiente invece, deriva da due principali forme di attacco: gli effetti termici, che conferiscono alla pavimentazione continue contrazioni e dilatazioni, ed il deterioramento provocato dal sole, da cui assorbono quotidianamente raggi ultravioletti, che ne accelerano l'invecchiamento; per ovviare a questi tipi di attacco, il manto risultante, dovrà pertanto essere elastico e durevole. Il bitume è certamente uno dei leganti più utilizzati per questo tipo di strato, con uno spettro di utilizzo che va da strade a traffico intenso, a strade a traffico ridotto.

La *struttura* permette il trasferimento del carico dal manto al sottofondo. Anch'essa è composta da vari strati ed ogni strato riceve un carico dallo strato sovrastante e lo diffonde su un'area più ampia della parte sottostante; chiaramente le sollecitazioni maggiori saranno nella parte superiore della pavimentazione, e pertanto ad essa verranno richieste caratteristiche di resistenza più elevate. La struttura è composta a sua volta da materiali granulari e da materiali legati: i primi, comprendenti pietrisco e ghiaia, trasferiscono i carichi applicati attraverso i singoli granuli; i materiali legati invece, che includono i materiali stabilizzati e l'asfalto, hanno il compito di ricevere i carichi verticali, che generano sollecitazioni di flessione, ossia trazione nella metà inferiore e compressione nella metà superiore, a causa del continuo passaggio di veicoli, con conseguente rottura a fatica: si creano infatti delle fessure nella parte inferiore dello strato, che si propagano verticalmente e che risalgono lungo la struttura, man mano che le ripetizioni di carico proseguono.

Il *sottofondo* è costituito da terreno naturale, alla base del corpo stradale; le caratteristiche intrinseche dei materiali utilizzati, determinano una maggiore o minore resistenza del sottofondo stesso, influenzando la scelta del tipo di struttura sovrastante

da adottare, che dovrà garantire una distribuzione del carico tale da non causare deformazioni permanenti. Analizzando più in dettaglio gli strati che costituiscono una pavimentazione, possiamo distinguere, partendo dall'alto:

- uno strato di usura, in conglomerato bituminoso;
- uno strato di collegamento, in conglomerato bituminoso, denominato “binder”;
- uno strato di base, sempre in conglomerato bituminoso;
- uno strato di sottobase in misto cementato, utilizzato solamente per strade e autostrade con un volume notevole di traffico pesante;
- uno strato di fondazione, in misto granulare, stabilizzato meccanicamente (per mezzo di rulli compattatori particolari);
- uno strato di sottofondazione, utilizzato per strade a ridotto o nullo volume di traffico pesante, in sostituzione della fondazione, o nei casi in cui il terreno sia di tipo limoso o argilloso.

Anche gli spessori dei vari strati possono cambiare, in funzione della tipologia di pavimentazione, che potrà essere flessibile, semi-rigida o rigida: in quest'ultimo caso lo strato superficiale è però costituito da conglomerato cementizio e non bituminoso; Si osservi come variano gli spessori nella seguente figura, in rapporto alla tipologia di pavimentazione:

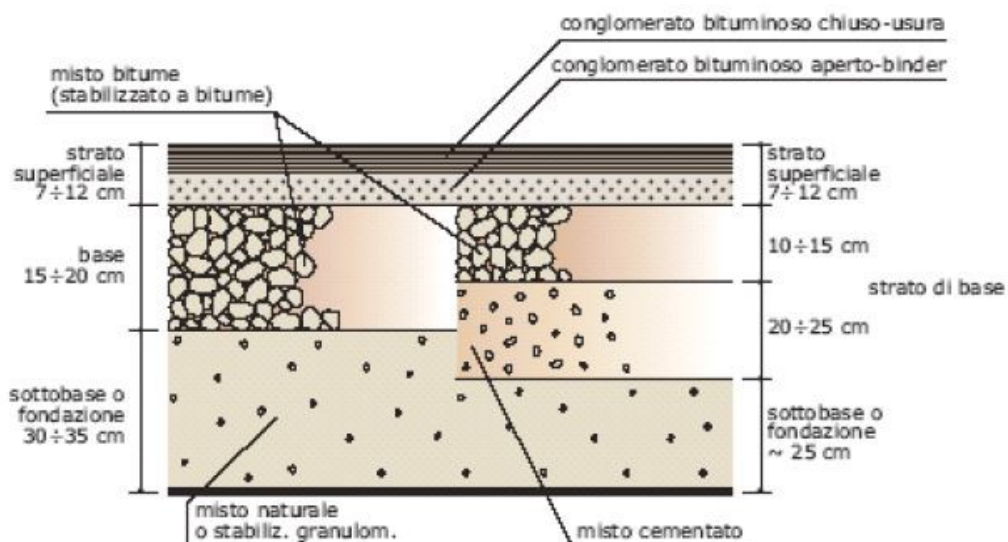


Fig. 1.3: Sovrastruttura stradale flessibile e semirigida

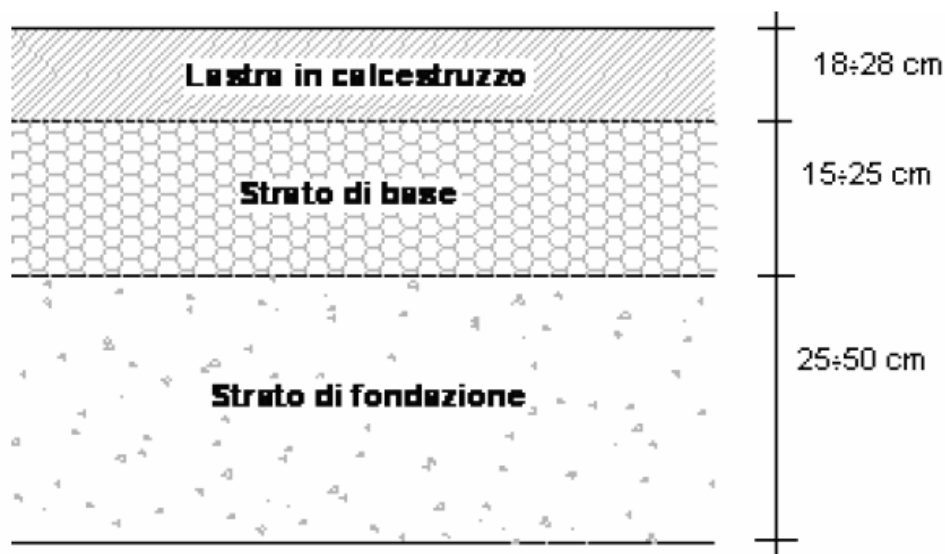


Fig. 1.4: Sovrastruttura stradale rigida

1.2 Storia del riciclaggio in Italia

Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali ebbe inizio negli anni '70, in concomitanza con la crisi petrolifera del tempo.

La prima tecnica utilizzata fu quella della *fresatura a caldo*; tale tecnica prevedeva il riscaldamento della superficie per mezzo di riscaldatori alimentati a gas e una successiva demolizione di uno strato di 5 o 6 cm di pavimentazione tramite l'utilizzo di speciali pettini. Questo tipo di fresatura riscontrò un immediato successo in quanto consentiva di non innalzare la quota della superficie stradale e quindi non comprometteva la funzionalità delle barriere di sicurezza laterali che già in quegli anni erano per la maggior parte installate. La pericolosità delle operazioni, derivante dalla presenza di contenitori di gas e dalla limitata profondità di demolizione, spinsero i ricercatori verso tecniche meno pericolose e più efficaci.

Negli anni '80 vi fu la comparsa delle prime frese meccaniche a freddo che al contrario della tecnica precedente consentivano di raggiungere una profondità di 10 cm senza pericolosità legate alla presenza di contenitori potenzialmente esplosivi in cantiere.

Dagli anni '80 in poi, vi sono state numerose ricerche volte a massimizzare la percentuale di riciclaggio della pavimentazione demolita e volte a ridurre i tempi di

lavorazione per consentire una più rapida riapertura dell'infrastruttura che durante le operazioni di manutenzione resta inevitabilmente chiusa al traffico.

Nonostante le ricerche in materia abbiano dato frutti importanti, la pratica del riciclaggio delle pavimentazioni resta ancora poco adottata per svariati motivi che secondo AIPCR (Associazione Mondiale della Strada) sono:

- Carenza di normativa tecnica di riferimento
- Legislatura inadeguata
- Scarsa conoscenza della stazione appaltante, dei vantaggi che possono ottenersi dall'impiego del fresato.
- Comune convincimento che il riciclaggio comporta costi maggiori rispetto alle tecniche tradizionali.

Oggi, quindi, sono molte le ricerche che cercano di indirizzare la pratica comune verso l'utilizzo di maggiori percentuali di fresato per la realizzazione di nuove pavimentazioni, con la speranza che la maggiore conoscenza in materia e il miglior utilizzo di tale materiale portino ad un minor spreco di risorse naturali ed economiche.

1.3 Norme di riferimento

Per quanto riguarda la normativa italiana, in passato ci si rifaceva a quanto di pertinenza DL 05/02/1997 n° 22 (Decreto Ronchi) e DM 05/02/1998 n° 72. Successivamente con la circolare del 15 luglio 2005, n. 5205 il Ministero dell'Ambiente ha reso note le disposizioni per attuare nel settore edile, stradale e ambientale il D.M. 203/2003, cioè il Decreto che impone alle Pubbliche Amministrazioni di soddisfare il proprio fabbisogno annuale di manufatti e beni con una quota non inferiore al 30% di prodotti ottenuti da materiale riciclato.

Dal 1 Marzo 2008 è obbligatoria la marcatura CE dei conglomerati bituminosi secondo la direttiva 89/106/CEE concernente i prodotti da costruzione. Tale marchio viene concesso in base alle specifiche richieste al prodotto e alle regole riportate nella serie di Norme Europee UNI EN13108:2006 6, parti 1-8, che ha di recente regolamentato le specifiche dei materiali per la costruzione delle pavimentazioni stradali flessibili, dettando le specifiche per i conglomerati bituminosi in termini di proprietà fondamentali basate sulle prestazioni in opera.

1.4 Il fresato stradale : definizione e proprietà

La norma tecnica UNI EN 13108-8 definisce il fresato d'asfalto come “conglomerato bituminoso recuperato mediante fresatura che può essere utilizzato come materiale costituente per miscele bituminose prodotte in impianto a caldo”.

Il fresato, materiale dismesso da vecchi pacchetti stradali la cui pavimentazione risulta essere danneggiata per fessurazione o degrado (fig. 1.5), è una miscela di aggregati con una curva granulometrica propria caratterizzata da un'elevata percentuale di fini e contenente bitume invecchiato, cioè bitume che con il tempo ha modificato le sue proprietà chimico-fisiche.



Fig. 1.5 Fresato stradale

La rimozione della pavimentazione o di un solo strato, avviene per mezzo di opportuni macchinari (fresatrice, escavatore, ripper, scraper, ecc.) che producono blocchi a lastre irregolari di conglomerato bituminoso da frantumarsi, se necessario, in seguito. La scelta dell'attrezzatura più idonea per l'operazione di rimozione è funzione dello spessore dello strato da demolire. Al termine della demolizione, il fresato ottenuto può essere sottoposto a due processi di confezionamento del conglomerato bituminoso:

- trasportato in centrale dove verrà trattato con processi di schiacciatura, vagliatura, raccolta e stoccaggio, il cui processo è definito con il termine riciclaggio a caldo;
- polverizzato in sito e successiva incorporazione negli strati granulari, fondazione o strati di base ad opera di mezzi semoventi, in questo caso si parla di riciclaggio a freddo.

Preliminarmente alla definizione del *Mix Design* di progetto, in cui si determinano i requisiti qualitativi e quantitativi di ogni componente al fine di ottenere una miscela equilibrata, è opportuno analizzare le caratteristiche del conglomerato di recupero

attraverso il prelievo di campioni e successiva analisi in laboratorio per definire i seguenti aspetti:

- percentuale di legante;
- invecchiamento del legante;
- tipo e qualità dell'aggregato utilizzato;
- curva granulometrica.

Le caratteristiche prestazionali e quindi anche meccaniche del RAP sono fortemente influenzate dai materiali che lo compongono e dalla funzione che espletava il conglomerato d'origine (strato di base, usura, binder, etc.). Il compito del singolo strato di conglomerato costituente la pavimentazione, induce sostanziali differenze nella natura, qualità e pezzatura degli aggregati. Il conglomerato bituminoso proveniente dalle vecchie pavimentazioni esauste viene trattato frantumandolo o fresandolo; la prima tecnica comporta una minore percentuale di materiale fino nella miscela di risulta rispetto alla seconda. La macinatura e la frantumazione del RAP provocano il naturale affinamento della pezzatura degli aggregati in esso contenuti rispetto alla miscela d'origine. Questa diminuzione di pezzatura è imputabile, principalmente, alla macinatura. In ogni caso, la distribuzione dimensionale delle particelle del RAP macinato può variare molto in funzione dei sistemi usati nella sua produzione e trattamento ed, inoltre, dipende dalla natura degli aggregati in esso contenuti. Con il trattamento in centrale o in sito il RAP prodotto può essere frantumato, o macinato, in particelle di dimensioni minori di 38 mm sempre che, la massima dimensione degli aggregati, non superi i 63 mm. L'intervallo di distribuzione delle particelle che risultano normalmente dai processi di frantumazione o macinatura del RAP viene riportato nella Tabella 1.2.

Dimensione Setacci	% di Passante dopo Fresatura
38.1 mm (1.5 in)	100
25.0 mm (1.0 in)	95-100
19.0 mm (3/4 in)	84-100
12.5 mm (1/2 in)	70-100
9.5 mm (3/8 in)	58-95
4.75 mm (N°4)	38-75
2.36 mm (N°8)	25-60
1.18 mm (N°16)	17-40
0.60 mm (N°30)	10-35 ^a
0.30 mm (N°50)	5-25 ^b
0.15 mm (N°100)	3-20 ^c
0.075 mm (N°200)	2-15 ^d

a. generalmente meno del 30 % c. generalmente meno del 15%
b. generalmente meno del 20 % d. generalmente meno del 10%

Tab. 1.2 Composizione granulare del RAP

Nonostante la carenza in letteratura di dati a disposizione riguardanti il RAP si può affermare che, con una buona approssimazione, la densità di volume del materiale frantumato, alla fine di tutti i trattamenti, è lievemente inferiore a quella degli aggregati vergini e si colloca tra 1940 e 2300 kg/m³. Generalmente l'umidità naturale del materiale si aggira intorno al 5 % ed un'eventuale esposizione alla pioggia può provocare un incremento fino a valori compresi tra il 7 e l'8 %. Nell'ottica del risparmio energetico la permanenza di RAP nelle riserve dovrà essere minima. Il conglomerato bituminoso proveniente dalla demolizione di pavimentazioni esistenti presenta, usualmente, un contenuto di legante tra il 4.5% ed il 6 %, ed è piuttosto rigido a causa dell'ossidazione subita durante la stesa e in esercizio. Estrahendo ed analizzando il bitume dal RAP, questo esibisce una bassa penetrazione ed un alto valore di viscosità che variano con la durata in servizio della pavimentazione originaria. I valori di penetrazione a 25° C si collocano, spesso, nell'intervallo compreso tra i 10 e 80 dmm mentre la viscosità, a 60° C, ha valori che oscillano da un minimo di 2000 ad un massimo di 50000 P e, quanto più è esteso il periodo di servizio, tanto più la viscosità cresce.

La Tabella 1.3 presenta in modo sommario, i valori tipici che possono caratterizzare le proprietà fisiche e meccaniche del RAP oltre alla gradazione degli aggregati già mostrata.

Tipo di Proprietà	Proprietà	Tipico Intervallo di Valori
Proprietà Fisiche	Peso Specifico	1940-2300 kg/m ³
	Contenuto di Umidità	Normale: > 5% Massimo: 7-8%
	Contenuto di Bitume	Normale: 4.5-6% Massimo: 3-7%
	Penetrazione del Bitume	10-80 a 25°C (77°F)
	Viscosità Assoluta	4000-25000 poise a 60°C (140°F)
Proprietà Meccaniche	Peso Specifico del Compattato (asciutto)	1600-2000 kg/m ³
	California Bearing Ratio (CBR) (dopo una settimana)	100% RAP: 20-25% 40% RAP, 60% vergine: ≥ 150%

Tab.1.3 Proprietà fisiche e meccaniche del RAP

1.5 Invecchiamento del bitume

Con il termine invecchiamento o ageing si identifica il processo di deterioramento del bitume causato dall'ossidazione del bitume stesso, dall'evaporazione delle componenti volatili e dalle reazioni di polimerizzazione nel caso di bitumi modificati con polimeri. Tale alterazione avviene nel tempo e induce un cambiamento delle proprietà chimiche, fisiche, colloidali e reologiche del bitume stesso incidendo sulla vita utile della pavimentazione stradale, poiché tale fenomeno tende a rendere il legante più fragile e quindi il conglomerato più soggetto alla fessurazione. I problemi di durabilità e di deterioramento sono quindi dipendenti dalla suscettibilità del bitume all'invecchiamento sia reversibile che irreversibile, il primo è di natura fisica, il secondo di natura chimica.

In particolare, l'*invecchiamento fisico* del bitume dipende dal cambiamento di struttura durante il raffreddamento, dalla perdita di sostanze volatili, dall'assorbimento selettivo da parte degli aggregati lapidei e dall'azione dell'acqua. La variazione della struttura del bitume causa una modifica delle caratteristiche meccaniche e comporta una perdita di adesività e un incremento di rigidità assumendo un comportamento sempre più fragile.

L'*invecchiamento chimico* è, invece, la causa immediata di deterioramento del bitume, provocato da alterazioni di natura chimica della composizione del bitume stesso. I cambiamenti chimici sono provocati dalla reazione di ossidazione accelerata da alta temperatura e radiazione solare, che fungono da catalizzatori.

Inoltre si distingue l'invecchiamento a breve termine da quello a lungo termine.

Il bitume subisce un primo invecchiamento detto a *breve termine* durante la fase di produzione del conglomerato, quando il bitume riveste gli aggregati caldi con un film sottile, e durante la messa in opera che sono fasi durante le quali il bitume è esposto all'azione combinata di elevata temperatura e disponibilità di ossigeno atmosferico. Mentre l'invecchiamento a *lungo termine* del bitume inizia dal momento dell'apertura al traffico ed evolve durante l'esercizio della pavimentazione, prevalentemente a causa del processo di ossidazione chimica ed esposizione alle intemperie. Il grado di invecchiamento a lungo termine dipende dall'acqua, dall'esposizione alla radiazione solare, dalle condizioni climatiche, dallo spessore del film di bitume che riveste gli aggregati e, soprattutto, dal tenore di vuoti e dalla posizione dello strato all'interno della pavimentazione stradale perché influenzano l'interazione tra ossigeno e bitume.

Il processo di invecchiamento consiste principalmente nei processi di:

- *Ossidazione*: consiste nella reazione tra l'ossigeno e le macromolecole idrocarburiche, favorita dalle alte temperature;
- *volatilizzazione*: evaporazione delle componenti volatili più leggere caratterizzate da bassi punti di ebollizione;
- *reazioni di polimerizzazione* (nel caso di bitumi modificati con polimeri): riorganizzazione della struttura interna verso elementi di maggiore dimensione e quindi aumento della rigidità.

1.6 Additivi rigeneranti

Nel corso degli ultimi anni ricerca e sperimentazione collaborano nello studio e sviluppo di additivi rigeneranti nell'intento di riattivare il legante contenuto all'interno del fresato e in ultimo garantire il target richiesto al conglomerato bituminoso di recupero in termini di Performance Grade (PG).

Se fino a pochi anni fa non si percepiva l'urgenza di impiegare tali additivi date le basse percentuali di RAP aggiunte al nuovo conglomerato, ad oggi essi rappresentano una componente imprescindibile del mix design. Generalmente vengono eseguite prove di laboratorio impiegando non uno, ma più additivi per valutare la miglior compatibilità tra l'additivo e quel bitume specifico che deve essere trattato; inoltre

sarebbe buona norma, se possibile, testare ogni additivo in diverse percentuali al fine di individuare il dosaggio ottimale.

Nell'ambito del riciclaggio a caldo del fresato vengono utilizzati degli additivi detti rigeneranti (e anti-ossidanti) che hanno il compito di integrare il bitume invecchiato del fresato con le sostanze che si sono perse o modificate durante il processo di invecchiamento e migliorarne le proprietà di adesione, consistenza e viscosità, migliorando perciò le prestazioni del conglomerato bituminoso finale. Allo stesso tempo, essi devono essere stabili in un ampio intervallo di temperature, da quella di stoccaggio a quella di applicazione, e non devono evaporare né essudare durante le fasi di realizzazione e di servizio, altrimenti il loro contributo sarebbe solo sulla lavorabilità del materiale e non sulle prestazioni a medio e lungo termine.

1.7 Tecniche di riciclaggio

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

- riciclaggio in impianto fisso;
- riciclaggio in situ.

Ciascuna di esse presenta vantaggi e svantaggi, che vedremo in seguito.

Un'altra caratterizzazione 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 però una terza, relativa a miscele bituminose tiepide.

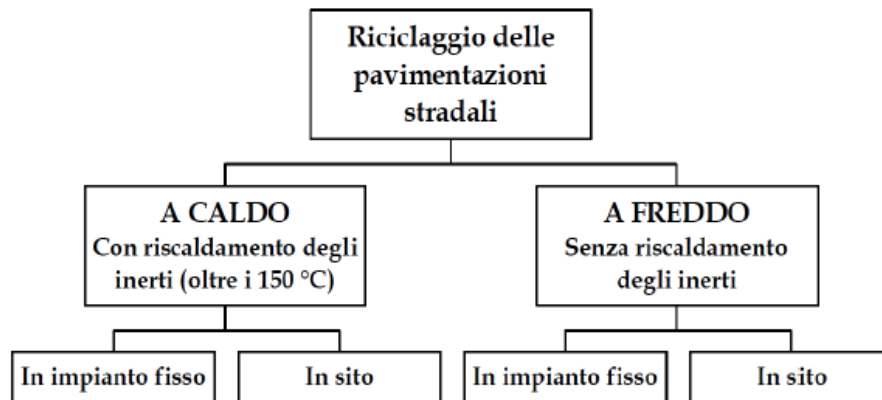


Fig.1.6 - Schematizzazione delle tecniche di riciclaggio

Il riciclaggio consente un risparmio di risorse non rinnovabili, come aggregati lapidei e bitume, ma anche di tutti i consumi relativi alla loro produzione, come impianti di frantumazione primaria o secondaria. La demolizione delle pavimentazioni non comporta più un consumo di risorse per lo smaltimento del fresato stesso e per la gestione dell'area di discarica: il materiale viene riutilizzato, sia a caldo che a freddo.

Le tecniche in situ, inoltre, annullano il trasporto del fresato dal cantiere all'impianto, e conseguentemente del conglomerato dall'impianto al cantiere, permettendo un riutilizzo del materiale fino al 100% nel caso di riciclaggio a freddo.

La stessa distinzione fra riciclaggio a caldo o a freddo, caratterizza un maggior o minor consumo energetico, che si ripercuote direttamente sia sull'aspetto economico, ma anche su quello ambientale.

1.7.1 Riciclaggio a caldo

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'ideale temperatura, ossia oltre i 150°C. Nel riciclaggio a caldo si ottengono miscele, composte da:

- aggregati lapidei vergini;
- fresato in proporzioni variabili (come se fosse una selezione di aggregati);
- bitume tradizionale o modificato;

- eventuali ACF (Additivi Chimici Funzionali), 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 suoi componenti; la tecnica è senza dubbio quella che conferisce prestazioni più elevate al conglomerato riciclato, e che lo rendono idoneo per ogni tipo di impiego, dallo strato di base a quello di usura.

- **Riciclaggio a caldo “in situ”**

Nella tecnica di riciclaggio a caldo “in situ” del conglomerato bituminoso tutte le operazioni si sviluppano in cantiere. Ciò comporta il vantaggio di evitare il trasporto e lo stoccaggio del materiale recuperato, ma anche lo svantaggio di richiedere macchine da cantiere più complesse e costose. Un ulteriore limite è quello di poter utilizzare tale tecnica solo in caso di ammaloramenti della parte superficiale della sovrastruttura (sgranamenti, perdita di aderenza, ormaiamento, buche, ondulazioni...) potendo agire su una profondità di 5 o 6 cm.

Le fasi operative sono realizzate per mezzo di impianti mobili e sono le seguenti:

- *Rimozione*: prevede un preriscaldamento della pavimentazione a temperature superiori a 110°C con l'utilizzo di piastre radianti o a infrarossi; oppure si realizza una rimozione “a freddo” dello strato superficiale della pavimentazione seguita da un riscaldamento degli aggregati di apporto e del fresato in separata unità.
- *Studio della miscela*: si valutano le percentuali di aggregato e di bitume vergine che devono essere miscelate con il fresato recuperato dalla vecchia pavimentazione.

A differenza della tecnica in impianto, il riciclaggio in sito viene progressivamente abbandonato per problematiche ambientali (il preriscaldamento della pavimentazione, e quindi del bitume, produce fumi nocivi di notevole impatto ambientale), logistiche

(ingombro dei macchinari, necessità di sistemi di depurazione per abbattimento delle polveri emesse, difficoltà nell'ottenere una correzione granulometrica esatta) e problematiche economiche (costo delle attrezzature).

- **Riciclaggio a caldo in impianto**

Tutti 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 entrambe 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.

➤ *Impianto Discontinuo*

L'impianto di tipo discontinuo, è la tipologia di impianto utilizzato per la produzione di tutte le miscele analizzate in questo lavoro di ricerca. L'impianto discontinuo rappresenta sicuramente la tipologia più diffusa in Europa, grazie alla miglior qualità del prodotto finito e alla sua grande flessibilità. La presenza di diversi filtri garantisce inoltre un miglior controllo sulle emissioni in atmosfera.

In questa tipologia di impianto gli inerti che si trovano cumulati ai margini dello stesso, vengono al bisogno prelevati e caricati in appositi pre-dosatori. Ogni pre-dosatore contiene una precisa pezzatura.



Fig.1.7 Impianto discontinuo

Durante la produzione, gli inerti passano dai pre-dosatori al nastro trasportatore che li porta nel tamburo essiccatore: un cilindro rotante che consente tramite delle barre metalliche il costante movimento degli inerti al suo interno. Questo dispositivo consente di eliminare l'umidità dagli aggregati e il raggiungimento della giusta temperatura di miscelazione. A causa delle alte temperature nel cilindro si vengono a formare fumi e polveri che prima di essere scaricati nell'ambiente passano attraverso dei filtri dai quali saremo così in grado di recuperare dell'ulteriore materiale di riciclo come il "filler di recupero". Questo materiale è stato anch'esso usato nella trattazione. Una volta usciti dal tamburo essiccatore, gli aggregati hanno una temperatura che si aggira intorno ai 150 – 160 °C e vengono trasportati fino ad un ulteriore vaglio selezionatore per mezzo di un elevatore a tazze.

Nello step successivo il materiale arriva al vaglio vibrante, dove viene nuovamente separato e stoccato in appositi contenitori dove è mantenuta la temperatura. Da tali contenitori ogni pezzatura viene nuovamente pesata e introdotta all'interno del mescolatore, al cui interno vi sono due alberi a palette rotanti in verso opposto, che consentono una miscelazione omogenea di aggregati caldi, filler e bitume. Al termine di quest'ultimo processo la miscela può essere scaricata direttamente nei camion per il trasporto in cantiere.

In questa tipologia di impianto quello che si deve assolutamente evitare è il passaggio del fresato attraverso la fiamma del bruciatore nel cilindro, questo potrebbe bruciare il bitume del fresato provocando delle emissioni estremamente tossiche.

A tal proposito si sono introdotte diverse tecniche per ovviare a questo problema:

- Aggiunta del fresato freddo al piede dell'elevatore: tale tecnica consente un impiego massimo del 15-20% di conglomerato di recupero ed in questo caso il vaglio selezionatore posto dopo l'elevatore viene escluso.

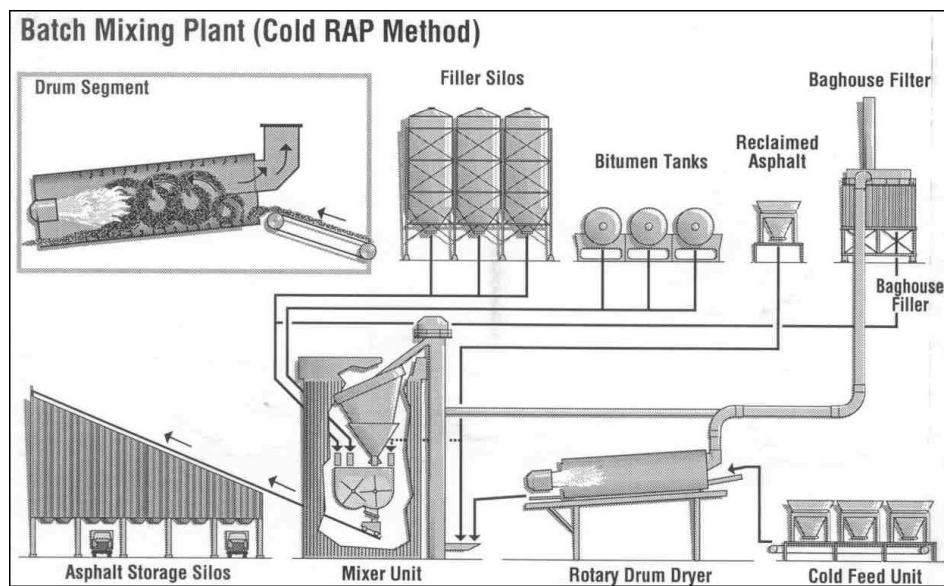


Fig. 1.8 Impianto discontinuo con fresato introdotto al piede dell'elevatore

- Aggiunta del fresato all'interno del cilindro essiccatore: tale operazione viene effettuata grazie alla presenza di un apposito anello contenente solo il fresato, che previene il contatto diretto con la fiamma del bruciatore evitando i problemi precedentemente citati.

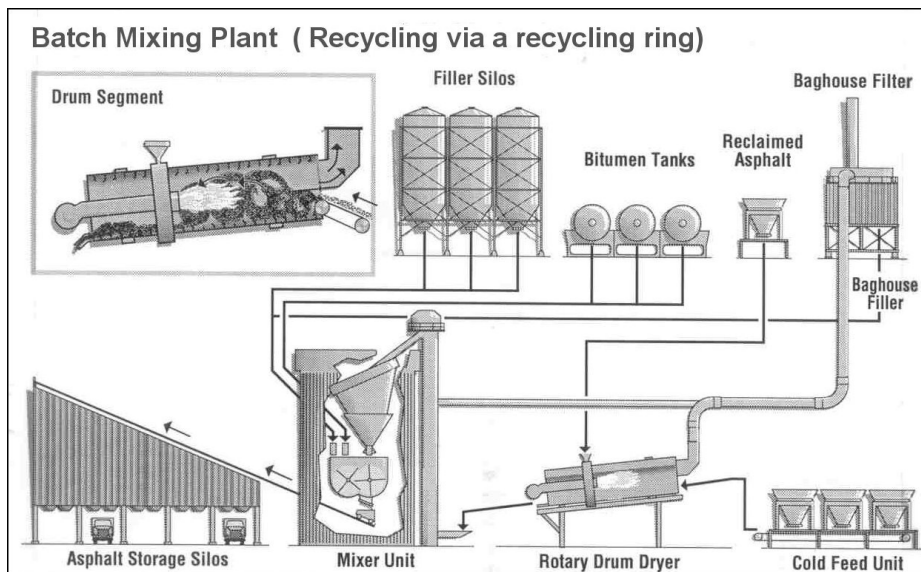


Fig.1.9 Impianto discontinuo con fresato introdotto nell'anello posto intorno al cilindro essiccatore

- Aggiunta del *fresato a freddo nella camera di miscelazione*: in questa tecnica, al fresato si aggiungono gli aggregati riscaldati e successivamente la miscela viene introdotta all'interno del miscelatore. In questo modo si ottiene uno scambio termico tra aggregati e fresato che comporta un abbassamento della temperatura finale del conglomerato.
- Aggiunta del *fresato combinando i precedenti due metodi*: tale metodologia, adottata per la produzione di miscele testate per i due campi prova successivamente descritti consente di riciclare una percentuale maggiore di fresato in quanto non vi è più il limite di capienza imposto dall'anello essiccatore.

➤ *Impianto continuo*

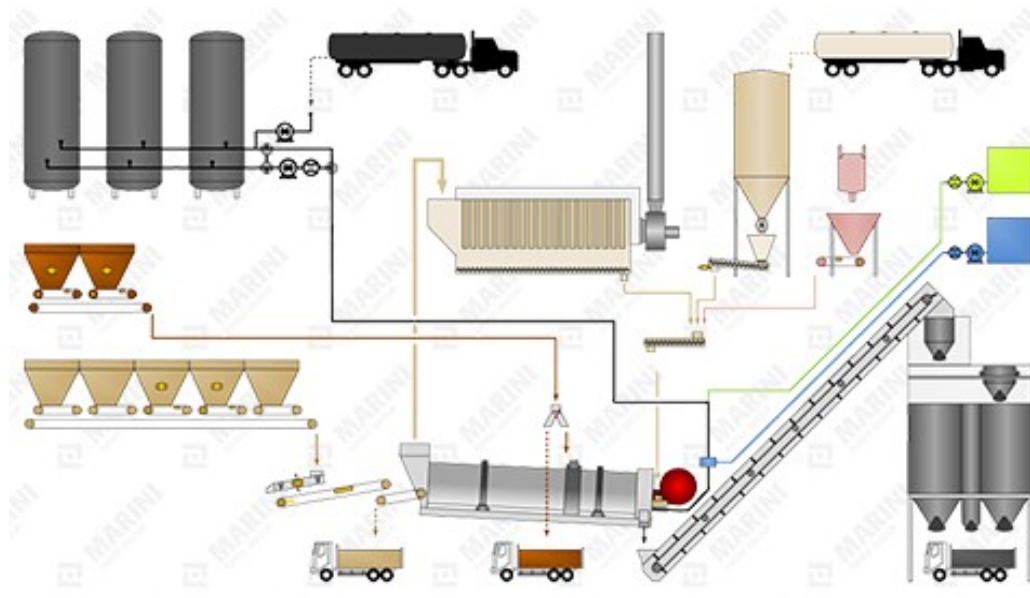


Fig.1.10 Impianto continuo

Tale impianto è anche chiamato Drum-mixer. Come si evince anche dalla figura non c'è, né la torre di miscelazione né il vaglio vibrante per la selezione degli aggregati, né risulta quindi dei costi di gestione molto ridotti e una capacità di produzione maggiore. La sua caratteristica principale è quella di miscelare tutti gli ingredienti all'interno del tamburo essiccatore che fungendo anche da miscelatore ha una lunghezza maggiore che nell'impianto discontinuo. Tale tipologia di impianto presenta due svantaggi importanti:

- il primo riguarda la minor qualità del conglomerato prodotto, in quanto si effettuano minori controlli sulle pezzature delle miscele;
- il secondo riguarda il fatto che il bitume viene mescolato vicino a zone ad elevata temperatura che provoca la formazione di vapori volatili ed oleosi difficilmente filtrabili.

A differenza dell'impianto discontinuo, in quello continuo, non vi è interruzione nel processo produttivo del conglomerato, quindi c'è continuità d'esercizio. La miscelazione del materiale avviene, come già detto, all'interno del tamburo essiccatore che per questo motivo è assai più lungo essendo contemporaneamente essiccatore e

mescolatore. In funzione della capacità del tamburo, dalle tramogge - alimentatori degli inerti ha il via il ciclo produttivo, previo controllo qualità sugli inerti. Tramite nastro trasportatore gli inerti vengono portati al sistema di pesatura che consente di regolare al meglio, in ogni istante, il rapporto inerte/bitume. Il sistema di pesatura degli inerti, ne misura la loro massa totale, per cui anche l'umidità in essi contenuta; questa massa deve perciò essere sottratta dal sistema di pesatura, per evitare possibili discrepanze tra la miscela di progettazione e il conglomerato finale. La percentuale di umidità effettivamente contenuta negli inerti, viene valutata mediante estrazioni periodiche di prova. Altra differenza tra i due impianti riguarda la modalità di rivestimento dell'inerte, possiamo distinguere quattro fasi principali:

- **Fase 1-** 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.
- **Fase 2-** In questa fase 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 il tasso di aumento della temperatura della miscela, si stabilizza.
- **Fase 3-** Quando la temperatura della miscela raggiunge i 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: risulta chiaro, quindi, come il rivestimento del materiale lapideo, non dipenda dalla miscelatura forzata con il bitume.
- **Fase 4-** La maggior parte dell'umidità degli aggregati, è stata eliminata. L'inerte è stato ricoperto, e la temperatura del conglomerato continuerà a salire fino al valore desiderato (di progetto); quando questa sarà raggiunta, il conglomerato verrà

scaricato tramite un nastro trasportatore inclinato, portato in un silo o in un serbatoio di stoccaggio, e mantenuto ad una temperatura costante fino al momento dell'uso.

Così come nell'impianto discontinuo anche in questo caso devono essere adoperate delle opportune modifiche per poter utilizzare nell'impianto del materiale di riciclo. Si deve, infatti, assolutamente scongiurare che il bitume e vergine e gli inerti di recupero possano venire a contatto con la fiamma del bruciatore. A tal proposito si sono introdotti diversi sistemi:

- sistema a doppia alimentazione (dual-feed): il materiale vergine viene immesso all'altezza del bruciatore ed inizia il suo riscaldamento. Il materiale di recupero 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 materiale di recupero, 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 (vergine e di recupero) si mescolano nella rimanente parte del cilindro principale;
- sistema Pyrocone (o a diffusione di fiamma): è un sistema di controllo 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;

- Il fresato viene aggiunto dalla parte opposta a quella degli aggregati e mantenuto da nervature metalliche in tale posizione in modo da non entrare in contatto con la fiamma del bruciatore.

1.7.2 Riciclaggio a freddo

Tale tecnica di riciclaggio consiste nell'utilizzo di RAP e di aggregati lapidei di primo impiego senza una fase preventiva di riscaldamento, ma miscelandoli con il legante a temperatura ambiente. Il riciclaggio a freddo presenta dei vantaggi che ne fanno un'alternativa sempre più utilizzata di riqualificazione e manutenzione della pavimentazione:

- limita lo sfruttamento delle risorse ambientali per la riduzione dell'attività estrattiva degli aggregati;
- riduce i costi, essendo garantita la medesima durabilità di una pavimentazione costruita con materiali vergini;
- risparmia l'energia necessaria al riscaldamento degli aggregati e, in caso di riciclaggio *in situ*, al trasporto del materiale all'impianto;
- riduce l'impatto ambientale limitando i fumi emessi dal combustibile bruciato e dall'ossidazione del bitume contenuto nel fresato;
- permette l'utilizzo di un'elevata quantità di RAP (fino al 100% della massa degli aggregati lapidei).

- Riciclaggio a freddo “in situ ”

Il processo avviene in strada attraverso treni a unità singola o multipla. Vengono utilizzate delle macchine stabilizzatrici capaci di frantumare la vecchia pavimentazione e miscelarla sotto un'apposita campana con acqua, aggregato d'integrazione, cemento e leganti bituminosi (emulsione bituminosa e bitume schiumato).

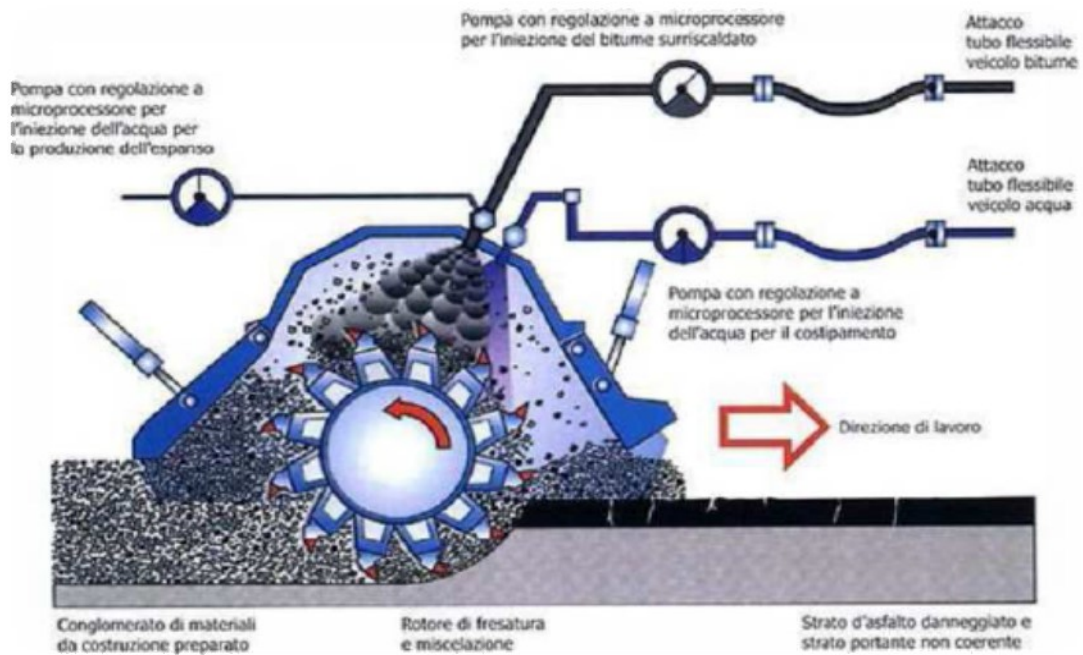


Fig.1.11 Rotore del riciclaggio in sito

Il riciclaggio condotto in sito permette quindi di evitare la movimentazione e lo stoccaggio di materiale recuperato dalla pavimentazione ammalorata, comportando determinati vantaggi:

- minor costo di costruzione;
- minor durata dell'intervento (per l'eliminazione di alcune fasi intermedie);
- minor rischio di incidenti (per l'assenza della fase di trasporto e per il minor numero di mezzi coinvolti);
- minor disagio per gli utenti grazie alla collocazione delle apparecchiature lungo una sola corsia stradale.

Questo tipo di trattamento presenta però anche degli svantaggi importanti:

- eccessivo inquinamento causato dall'impossibilità pratica di portare su strada 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.

- Riciclaggio a freddo in impianto (continuo e discontinuo)

Viene usato principalmente in caso di nuove costruzioni utilizzando il conglomerato bituminoso di recupero accumulato in precedenza, mediante operazioni di fresatura a freddo, o in caso di strade urbane che non permettono l'utilizzo delle apposite macchine stabilizzatrici.

Tale procedura consente un più corretto dosaggio delle componenti della miscela, la cui percentuale deve essere studiata preventivamente. Essa è costituita da:

- RAP: frantumato e suddiviso in varie frazioni granulometriche, si ottiene in seguito ad un'analisi granulometrica condotta per via umida (i grumi vengono considerati come singoli granuli);
- Legante bituminoso (emulsione bituminosa o bitume schiumato): tali tipi di leganti possono essere utilizzati con elementi freddi e umidi. L'emulsione è composta da due liquidi immiscibili, uno disperdente (l'acqua) e l'altro disperso (il bitume) sottoforma di goccioline. 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). Nel bitume schiumato invece si unisce acqua con bitume caldo (a 180°C) e si genera una reazione di espansione per la formazione di bolle di vapore rivestite da bitume. 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.

2. Programma sperimentale

Nel seguente capitolo vengono riportate tutte le operazioni eseguite in laboratorio, illustrando gli obiettivi del programma d'indagine, i materiali utilizzati, le apparecchiature adoperate e le metodologie di prova eseguite.

2.1 Obiettivi del programma sperimentale

L'analisi sperimentale condotta ha due obiettivi:

1. Analizzare la variazione delle caratteristiche meccaniche dei conglomerati mantenendo costanti la quantità di RAP , la temperatura di miscelazione e compattazione e facendo variare il bitume e l'additivo inserito nella miscela. Al fine di raggiungere questo scopo sono stati realizzati cinque mix (Tab. 2.1) .

Mix n°	% RAP	Tipo di bitume	% bitume totale	Additivo	Tempo in forno del bitume (ore)	T°C
1	50	50/70 tradizionale	5.2%	-	1h	140°
2	50	Rigenerval non modificato	5.2%	-	2h	140°
3	50	Rigenerval non modificato	5.2%	-	2h	140°
4	50	Rigenerval Hard	5.2%	-	2h	140°
5	50	50/70 tradizionale	5.2%	ACF1000	2h	140°

Tab.2.1 Tabella riassuntiva delle miscele realizzate e testate

2. Valutare l'accumulo delle deformazioni permanenti di tre miscele (Mix A , B e C) , una composta da bitume vergine Nynas 50/70 con soli aggregati vergini (senza RAP) per poi confrontarla con una contenente 50_RAP e bitume Rigenerval (già utilizzato nelle miscele sopra descritte) e una con additivo Iterlow-T e bitume Nybit 190.

Mix n°	% RAP	Tipo di bitume	% bitume totale	Additivo	T°C
1	50	Rigenerval non modificato	5.2%	-	140°
2	-	Nynas 50/70	5%	-	150°
3	40	Nybit 190	5%	Iterlow	130°

Tab.2.2 Tabella riassuntiva delle miscele realizzate per valutare l'accumulo delle deformazioni permanenti

Come si può notare dalla tabella 2.2 le temperature risultano differenti dalla sperimentazione precedente (Tab.2.1) e fra loro. Questo perché la temperatura di miscelazione delle miscele realizzate con i bitumi della Nynas, sono state scelte semplicemente seguendo quelle consigliate dalle schede tecniche di tali leganti.

2.2 Materiali

I materiali utilizzati per il confezionamento dei provini di conglomerato bituminoso sono stati: aggregati vergini, bitume (50/70 tradizionale, rigenerval non modificato, rigenerval hard , Nynas 50/70, Nybit 190) fresato (RAP grosso e RAP fino) e additivi rigeneranti (ACF1000 e Iterlow-T).

2.2.1 Aggregati vergini

Nell'ambito della presente indagine sono stati impiegati diversi tipi di aggregati, in termini di pezzatura e mineralogia. La granulometria di ogni aggregato è stata effettuata in accordo alle norme UNI EN 933-1.

Per ottenere la curva si prende un campione di materiale ottenuto per quartatura, ovvero una selezione di un campione rappresentativo dell'intero lotto di materiale lapideo e poi viene posto in forno a 105 °C per eliminare l'acqua interstiziale presente per il tempo necessario a raggiungere un peso costante.

Per quanto riguarda l'analisi granulometrica per via secca, si pesa del materiale prima della prova e poi si dispongono i setacci uno sopra l'altro, con retinatura di diametro via

via minore e si versa sulla sommità il campione di aggregato da analizzare. Il vibrovaglio scuote vigorosamente attraverso un movimento “rotatorio-sussultorio” la pila di setacci per 15 minuti per facilitare il passaggio degli aggregati: i materiali più grossolani si fermano più in alto e via via i più fini finiscono più in basso.

Terminata l’operazione, si pesa il materiale raccolto in ciascun setaccio, a cominciare da quello più fino, misurando così il TRATTENUTO PARZIALE che poi viene espresso in percentuale, utilizzando la seguente formula, essendo N il numero totale dei setacci:

$$T_i = 100 \cdot \frac{P_i}{\sum_{j=1}^N P_j}$$

dove:

- ✓ T_i : trattenuto parziale in percentuale;
- ✓ P_i : passante all’i-esimo setaccio.

Successivamente, vengono calcolati i TRATTENUTI CUMULATIVI nei vari setacci relativi a tutta la quantità di materiale trattenuta nel setaccio i-esimo ed in quelli sovrastanti ($j=1,2,\dots,i$), espressi in percentuale rispetto al peso totale del campione.

$$TC_i = 100 \cdot \frac{\sum_{j=1}^i P_j}{\sum_{j=1}^i P_j}$$

Vengono infine calcolati i PASSANTI CUMULATIVI nei vari setacci calcolati come complemento a 100 dei trattenuti cumulativi, espressi in percentuale rispetto al peso totale del campione:

$$TC_i = 100 - TC_i$$

L’analisi granulometrica per via umida prevede che un quantitativo preciso di materiale, posto in un setaccio con maglie di dimensioni pari a 0,063 mm, venga lavato sotto l’acqua corrente, con l’aiuto di una mano, per il tempo necessario perché avvenga il completo distacco della frazione più fine (filler) e la completa disgregazione dei grumi. Al termine di questa operazione (quando l’acqua che passa attraverso il setaccio ritorna ad essere limpida), il residuo viene posto in forno ad asciugare alla

temperatura di 105 °C per poi effettuare una setacciatura “tradizionale” come è stata descritta qui sopra.

Il risultato dell’analisi granulometrica è reso visibile attraverso la creazione di grafici detti CURVE GRANULOMETRICHE in cui sull’asse delle ascisse viene riportato l’apertura del setaccio che ha trattenuto il materiale in scala logaritmica, mentre sulle ordinate la percentuale del materiale trattenuto dal rispettivo setaccio. La curva granulometrica ottenuta per ogni materiale, è stata in seguito utilizzata per la realizzazione della curva di progetto e quindi per il calcolo delle quantità di ogni singola pezzatura da impiegare nelle miscele.

- **Calcare**

Il calcare è una roccia sedimentaria la cui composizione dipende dalle condizioni di formazione (chimica, organica o clastica). Il componente principale è rappresentato dal minerale calcite nel quale sono presenti impurità argillose o quarzitiche più o meno evidenti.

Le cave per l’estrazione del calcare si trovano prevalentemente lungo i corsi d’acqua o laghi e, di conseguenza, si trovano distribuite più o meno in tutte le regioni italiane. In particolare si sono utilizzate due diverse pezzature (in cui i rapporti 8/16 e 12/16 si riferiscono al d/D , dove d sta per diametro minimo e D per diametro massimo):

- Calcare 4/8 (Tabella 2.3 , Figure 2.1 e 2.2)
- Calcare 8/16 (Tabella 2.4, Figura 2.3 e 2.4);
- Calcare 12/16 (Tabella 2.5, Figura 2.5 e 2.6).

APERTURA d (mm)	TRATTENUTO PARZIALE g	PASSANTE CUMULATIVO %P
20	0	100
16	0	100
12,5	0	100
9,5	0	100
8	5,9	99,41
6,3	116,4	87,77
4	653,9	22,38
2	191,9	3,19
1	13,8	1,81
0,5	2,2	1,59
0,25	0,2	1,57
0,063	9,2	0,65
fondo	6,5	0
TOTALE	1000	

Tab.2.3 Calcare 4/8



Fig.2.1 Calcare 4/8

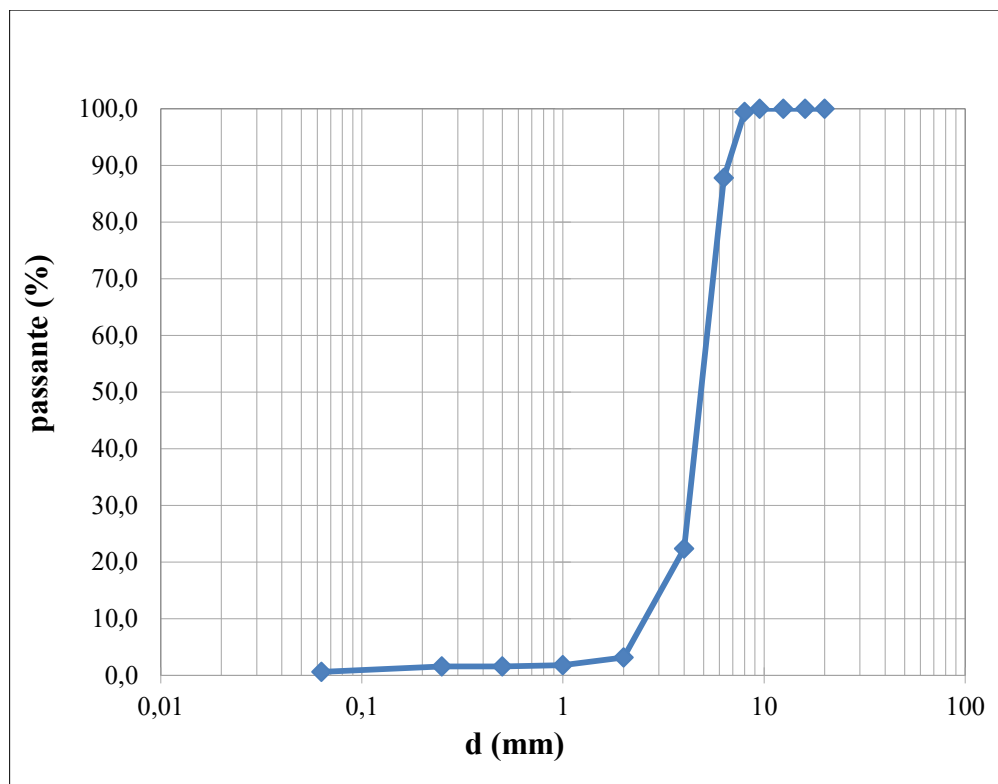


Fig.2.2 Curva granulometrica Calcare 4/8

APERTURA d (mm)	TRATTENUTO PARZIALE g	PASSANTE CUMULATIVO %P
20	0	100
16	0	100
12,5	0	100
9,5	0	100
8	5,9	99,41
6,3	116,4	87,77
4	653,9	22,38
2	191,9	3,19
1	13,8	1,81
0,5	2,2	1,59
0,25	0,2	1,57
0,063	9,2	0,65
fondo	6,5	0
TOTALE	1000	

Tab.2.4 Calcare 8/16

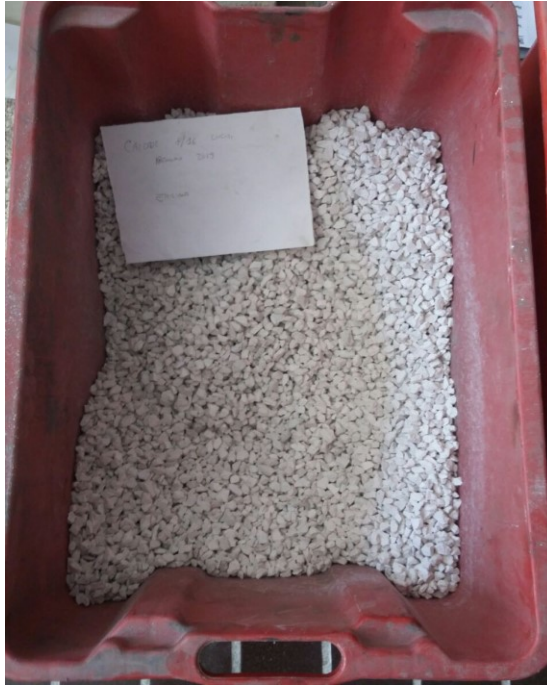


Fig.2.3 Calcarea 8/16

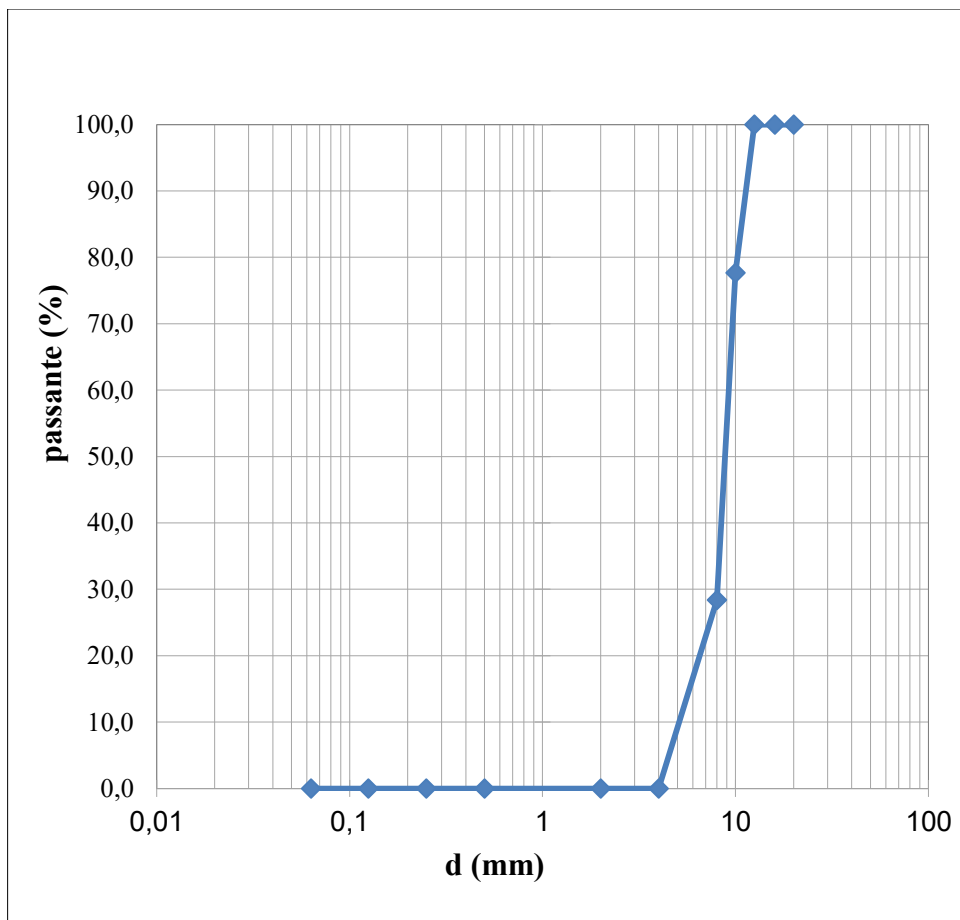


Fig.2.4 Curva granulometrica Calcarea 8/16

APERTURA d (mm)	TRATTENUTO PARZIALE g	PASSANTE CUMULATIVO %P
31	0	100
20	0	100,0
16	563,2	53,5
12,5	519,2	10,6
10	128	0,0
8	0	0,0
4	0	0,0
2	0	0,0
0,5	0	0,0
0,25	0	0,0
0,125	0	0,0
0,063	0	0,0
fondo	0,00	0
TOTALE	1210,4	

Tabella 2.5: Calcare 12/16



Fig.2.5: Calcare 12/16

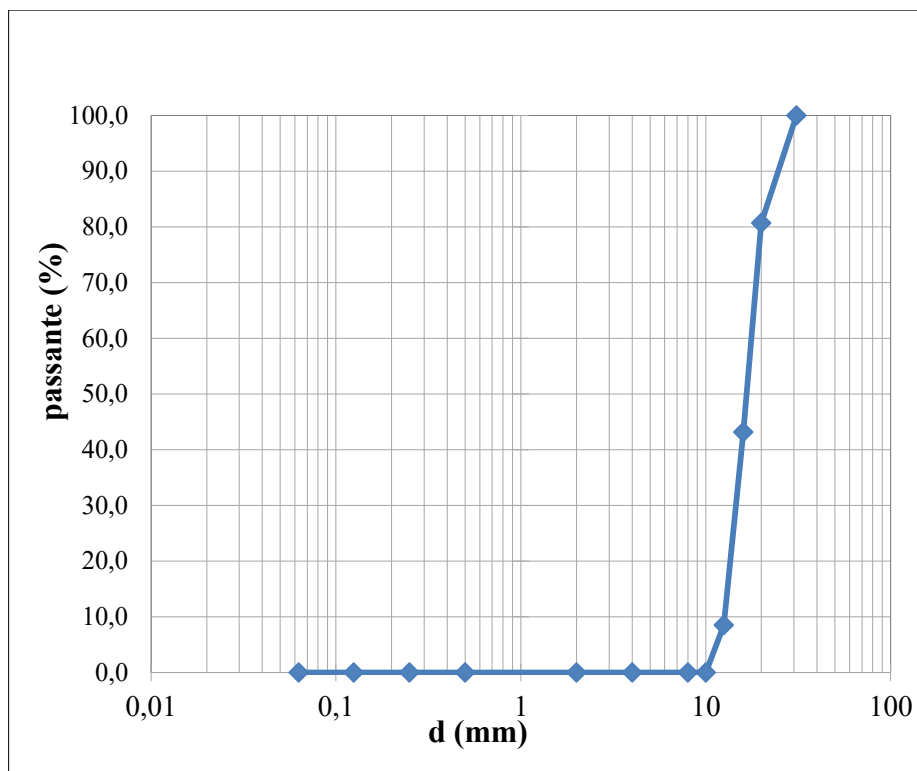


Fig. 2.6: Curva granulometrica Calcare 12/16

- Sabbia calcarea

La sabbia utilizzata per la realizzazione di questa indagine sperimentale è di natura calcarea con pezzatura 0/6 (Tabella 2.6 , Figure 2.7 e 2.8):

APERTURA d (mm)	TRATTENUTO PARZIALE g	PASSANTE CUMULATIVO %P
20	0	100
16	0	100
12,5	0	100
9,5	0	100
8	0	100
4	74,7	92,5
2	321,1	60,4
0,5	378,8	22,5
0,25	65,5	16,0
0,125	41,7	11,8
0,063	25,9	9,2
fondo	92,3	0,0
TOTALE	1000	

Tab. 2.6 : Sabbia calcarea 0/6



Fig. 2.7: Sabbia calcarea 0/6

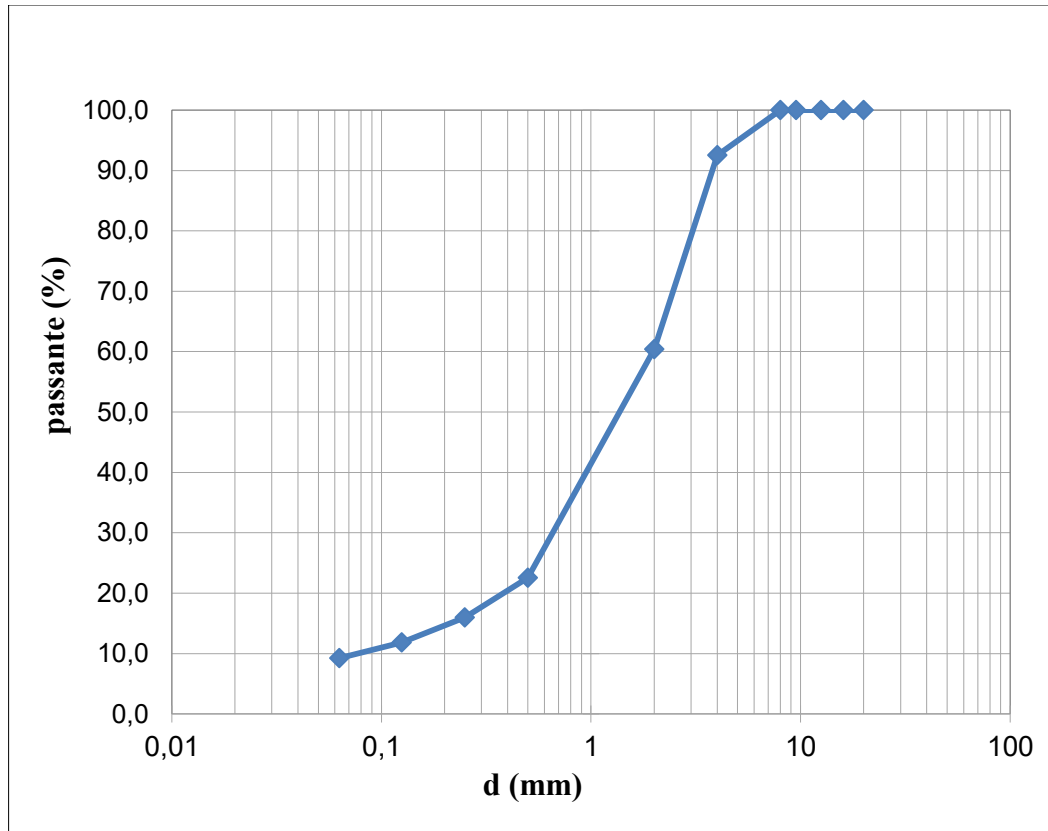


Fig. 2.8: Curva granulometrica Sabbia calcarea 0/6

- **Filler industriale di recupero**

Il filler è la frazione di aggregato avente dimensioni minori di 0,075 mm secondo la norma CNR 139 (la normativa UNI EN 933-1 invece richiede l'utilizzo del setaccio da 0,063 mm). In realtà sono consentite tolleranze (100% passante al setaccio da 0,18 mm e l'80% passante al setaccio da 0,075 mm). Il filler viene utilizzato nella produzione di conglomerati bituminosi per conferirgli una certa plasticità una volta unito al legante.

APERTURA d (mm)	TRATTENUTO PARZIALE g	PASSANTE CUMULATIVO %P
20	0	100
16	0	100
12,5	0	100
9,5	0	100
8	0	100
6,3	0	100
4	0	100
2	2	99
1	6	96
0,5	9,2	91,4
0,25	10,6	86,1
0,063	33,2	69,5
fondo	139	0
TOTALE	200	

Tab.2.7: Filler



Fig. 2.9 : Filler di recupero

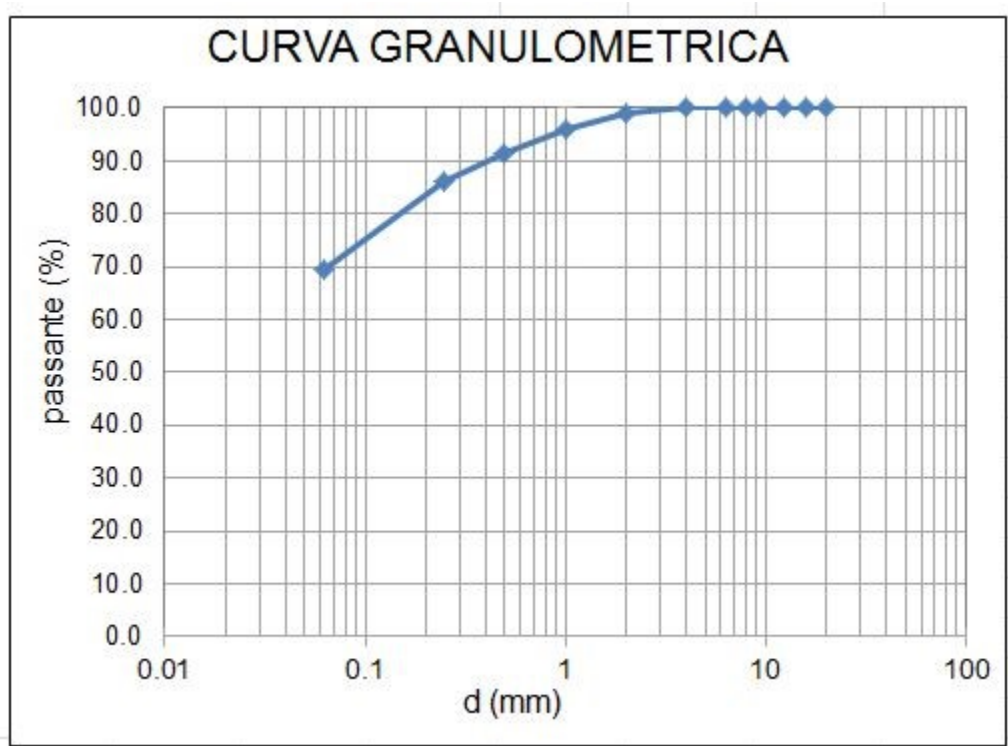


Fig. 2.10 : Curva granulometrica del Filler

2.2.2 Fresato

Il fresato stradale è un materiale proveniente dalla fresatura degli strati legati di pavimentazioni in conglomerato bituminoso. Esso è costituito per il 93-97% in peso da aggregati litici e per il resto da bitume invecchiato. Il fresato è stato sottoposto ad una prova di estrazione del bitume invecchiato e successivamente la distribuzione granulometrica dell'aggregato contenuto nel fresato è stata determinata con gli stessi setacci usati con gli aggregati vergini, seguendo la procedura descritta dalla normativa UNI EN 933-1. Si sono ottenute così due pezzature: RAP grosso e RAP fino.

Nella fase di dosaggio delle componenti per la miscelazione, si sono eliminati con un setaccio gli elementi di dimensioni superiori ai 31,5 mm.

Nella presente sperimentazione sono stati utilizzati RAP grosso e RAP fino provenienti dalla fresatura di più strade. Si riportano di seguito le caratteristiche granulometriche di entrambi.

APERTURA d (mm)	TRATTENUTO PARZIALE g	PASSANTE CUMULATIVO %P
31	0	100,0
20	45,2	95,3
16	52,5	89,8
12,5	84,7	80,9
9,5	65,2	74,1
8	218,5	51,3
4	150,3	35,6
2	104,5	24,7
1	60,5	18,3
0,5	40,3	14,1
0,25	34,4	10,5
0,063	48,7	5,4
fondo	52,00	0
TOTALE	956,8	

Tab.2.8: RAP Grosso



Fig.2.11: RAP Grosso

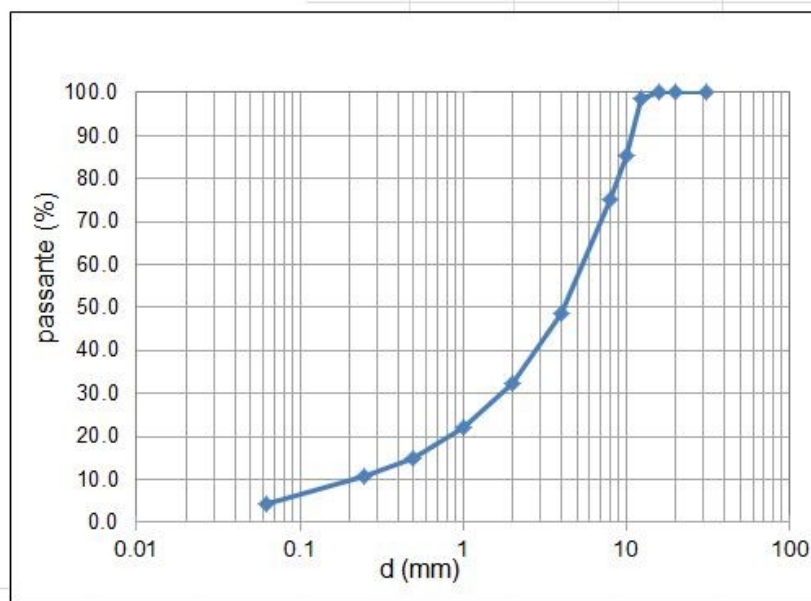


Fig. 2.12: Curva granulometrica del RAP 1 Grosso

APERTURA d (mm)	TRATTENUTO PARZIALE g	PASSANTE CUMULATIVO %P
31	0	100
20	0	100,0
16	0	100,0
12,5	0	100,0
9,5	37	96,1
8	62,7	89,5
4	325,7	55,3
2	195,9	34,7
1	107,4	23,4
0,5	60,8	17,0
0,25	34,7	13,4
0,063	64,2	6,6
fondo	62,80	0
TOTALE	951,2	

Tab.2.9: RAP Fino



Fig. 2.13: RAP Fino

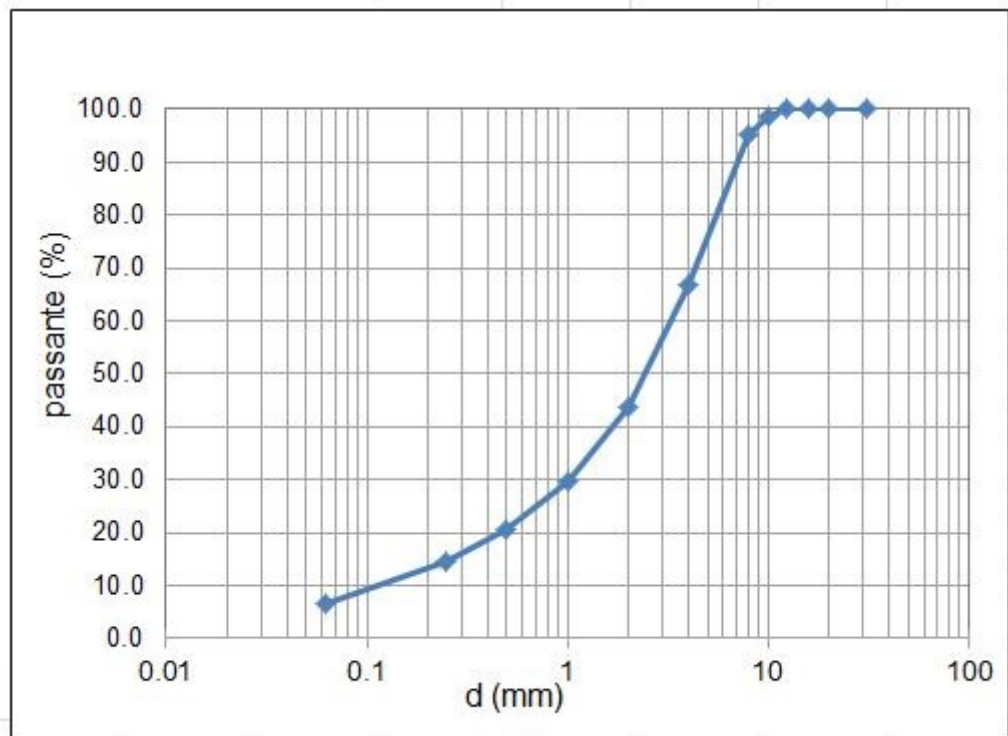


Fig. 2.14: Curva granulometrica RAP Fino

2.2.3. Bitume

Per la realizzazione del conglomerato sono stati utilizzati diversi bitumi:

- Un bitume con classe di penetrazione 50/70. I valori numerici riportati si riferiscono alla profondità di penetrazione, dopo 5 secondi, di un ago standardizzato sotto un carico fissato (100 g) in un campione di bitume condizionato a 25°C (Fig.2.15).



Fig. 2.15 Bitume 50/70

- Rigenerval è un bitume in cui la base di partenza è B70/100 ed è Specifico per Warm mix Asphalt e CB ad alto contenuto fresato. (Tab.2.10)

INFORMAZIONI	
Codice di notifica O.N.	N. 1982
Numero certificato FPC	N. 1982 – CPR – 1104
Anno di affissione marcatura	2017
Produttore	VALLI ZABBAN S.p.A. Via Danubio, 10 – 50019 Sesto Fiorentino FI
Sito produttivo	Stabilimento di Bologna - Via del Traghetto, 42 – 40100 Bologna
Gradazione	B70/100
Descrizione del prodotto	Specifico per Warm mix Asphalt e CB ad alto contenuto di fresato

Tab.2.10 Informazioni bitume Rigenerval

NORMA DI RIFERIMENTO: UNI EN 12591					
Requisiti essenziali	Caratteristiche	Metodo	U.d.M.	Prestazione	
				min	max
Consistenza alle temperature intermedie di servizio	Penetrazione a 25°C	UNI EN 1426	dmm	70	100
Consistenza alle temperature elevate di servizio	Punto di Rammollimento P.A.	UNI EN 1427	°C	43	51
Durabilità Resistenza all'invecchiamento RTFOT EN12607-1	Variatione di massa	-	%		0.8
	Penetrazione a 25°C residua	UNI EN 1426	%	50	
	Incremento del punto di rammollimento P.A.	UNI EN 1427	°C		9
Infiammabilità	Flash point	EN ISO 2592	°C	230	
Condizioni operative				Valori indicativi	
Temperatura di stoccaggio			°C	150 ÷ 160	
Temperatura di stoccaggio prolungato oltre 5 giorni			°C	130	
Temperatura di impasto con inerti			°C	120 ÷ 160	
Temperatura minima di compattazione			°C	> 90	
Temperatura minima di pompaggio			°C	120	

Tab.2.11 Requisiti prestazionali bitume Rigenerval



Fig. 2.16 Rigenerval

- Rigenerval Hard è un bitume come quello precedente , ma la base da cui parte non è un bitume tradizionale , ma è modificato con l’aggiunta principalmente di polimero SBS.



Fig. 2.17 Rigenerval Hard

- Nynas 50/70

	Test description	Method	Unit	Min	Max
Consistency at intermediate service temperature	Penetration at 25°C	EN 1426	mm/10	50	70
Consistency at elevated service temperature	Softening Point	EN 1427	°C	46	54
Resistance to hardening at 163°C	Change in mass	EN 12607-1	%	-	0.50
	Retained penetration	EN 1426	%	50	-
	Softening point after hardening	EN 1427	°C	48	-

Tab. 2.12 Caratteristiche bitume Nynas 50/70

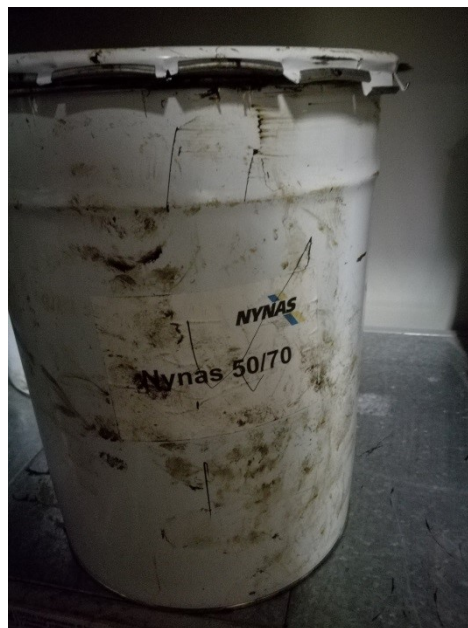


Fig.2.18 Nynas 50/70

- Nybit E 190

	Test description	Method	Unit	Min	Max
Consistency at intermediate service temperature	Penetration at 25°C	EN 1426	mm/10	160	220
Consistency at elevated service temperature	Softening Point	EN 1427	°C	35	43
Resistance to hardening at 163°C	Change in mass	EN 12607-1	%	-	1.00
	Retained penetration	EN 1426	%	37	-
	Softening point after hardening	EN 1427	°C	37	-

Tab.2.13 Caratteristiche bitume Nybit E190

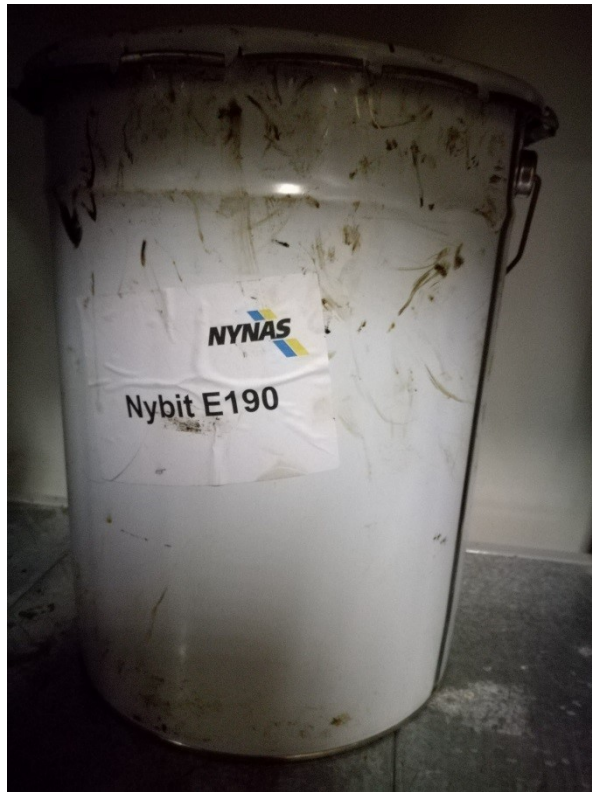


Fig.2.19 Nybit E190

2.2.4.Additivi

Gli additivi utilizzati durante la sperimentazione sono di due tipi rigenerante e fluidificante, le cui principali qualità sono quelle di rigenerare il bitume invecchiato e rendere più fluida e quindi compattabile la miscela anche a temperature inferiori. Sono stati testati due diversi tipi di additivi con caratteristiche leggermente differenti fra loro, nominati ACF1000 e Iterlow-T .

- ACF1000

Esso è un additivo chimico funzionale con lo scopo di rigenerare e ringiovanire il bitume contenuto nel fresato.



Fig.2.20 ACF1000

- Iterlow-T

Le tecnologie denominate Iterlow-T rispetto alle tecniche tradizionali a caldo per la produzione di conglomerati bituminosi, permettono di ridurre fino a 40°C le temperature operative, sfruttando le caratteristiche chimico-fisiche del bitume, per ottenere una miscela molto lavorabile, dalla produzione alla compattazione e acquisire rapidamente le caratteristiche meccaniche necessarie a sopportare le sollecitazioni indotte dal traffico veicolare.

L'Iterlow-T è un composto liquido fluidificante che viene additivato al bitume, direttamente nei serbatoi di stoccaggio o durante la fase produttiva; la percentuale utilizzata è dello 0,5% in peso sul bitume stesso.



Fig.2.21 Iterlow-T

2.3 Procedure di laboratorio

Nel presente paragrafo vengono illustrate nel dettaglio tutte le apparecchiature e le procedure di laboratorio per la preparazione e la valutazione delle miscele di conglomerato bituminoso prodotte con il fresato e l'aggiunta degli additivi, riportando, per completezza, anche il metodo di confezionamento dei provini.

2.3.1. Definizione della curva granulometriche di progetto

Per determinare la ricetta granulometrica di progetto si è fatto riferimento alle specifiche dettate dal Capitolato Anas. Esso impone che la curva granulometrica ottenuta variando le percentuali delle varie pezzature di aggregati sia contenuta all'interno di un fuso granulometrico delimitato da una curva superiore e una inferiore. Esso è utilizzato in modo da combinare le varie classi di inerti per ottenere una curva che consenta l'addensamento ottimale del conglomerato bituminoso.

Per lo strato di binder il Capitolato Anas prescrive il seguente fuso:

Capitolato ANAS Binder		
Apertura [mm]	Pmin	Pmax
20	100	100
16	90	100
12,5	66	86
8	52	72
4	34	54
2	25	40
0,5	10	22
0,25	6	16
0,063	4	8
% bit (sul mix)	4,1	5,5

Tab.2.14: Fuso granulometrico ANAS adottato

Conoscendo le curve granulometriche dei singoli inerti utilizzati e considerato i limiti del fuso granulometrico, si è potuta determinare la curva di progetto mediante il calcolo su un foglio Excel e ricavare le percentuali in peso di aggregato da inserire. Da

qui si sono calcolate le quantità in grammi. La miscela è stata realizzata con il 50% di RAP e di seguito si riporta la tabella delle percentuali in peso e la curva granulometrica di progetto.

Apertura setaccio [mm]	Filler	Sabbia	Calcare 4/8	Calcare 8/16	Calcare 12/16	Calcare 16/20	RAP Grosso	RAP Fino	50RAP
31,5	100	100	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
20	100	100	100,0	100,0	100,0	100,0	95,3	100,0	99,1
16	100	100	100,0	100,0	100,0	0,6	89,8	100,0	98,0
12,5	100	100	100,0	100,0	0,6	0,6	80,9	100,0	76,3
10	100	100	100,0	72,4	0,6	0,6	74,1	96,1	71,6
8	100	100	99,4	33,7	0,3	0,3	51,3	89,5	61,9
4	100	97	22,4	1,0	0,3	0,3	35,6	55,3	45,2
2	99	63	3,2	0,8	0,3	0,3	24,7	34,7	30,0
1	96	43	1,8	0,8	0,3	0,3	18,3	23,4	21,3
0,5	91,4	27,5	1,6	0,8	0,3	0,3	14,1	17,0	15,4
0,25	86,1	19,2	1,6	0,8	0,3	0,3	10,5	13,4	11,8
0,063	69,5	12,9	0,6	0,7	0,1	0,1	5,4	6,6	7,1
Massa volumica	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68	2,50	2,48	2,59
% volume	1,9	19,3	0,0	7,7	19,3	0,0	19,3	28,9	96,3
% peso	2,0	20,0	0,0	8,0	20,0	0,0	20,0	30,0	100,0

Tabella 2.15: Determinazione della miscela di progetto per 50_RAP

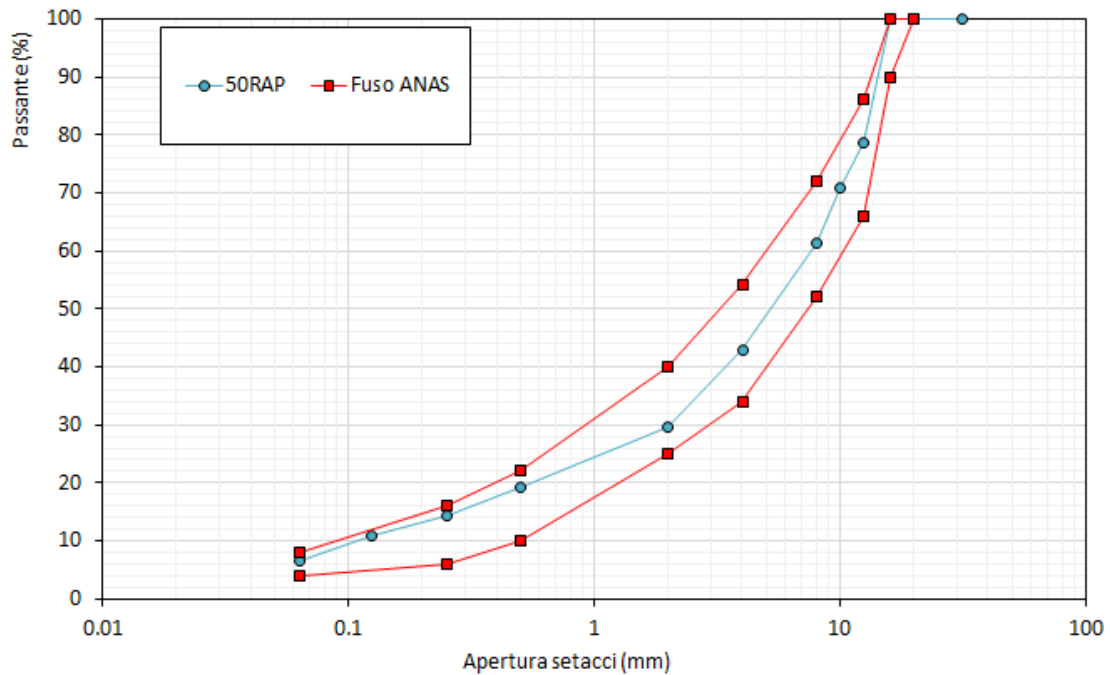


Fig. 2.22 Curva granulometrica di progetto

2.3.2. Realizzazione dei provini

Dopo aver pesato le quantità delle varie pezzature di aggregati con l'utilizzo di un'apposita bilancia di precisione (Figura 2.23), si dispone il materiale in apposite teglie (dividendo aggregati vergini, filler e fresato) e lo si riscalda in forno (Figura 2.24) alla temperatura vista nelle Tabelle 3 e 4 (generalmente 140° C) per 3 ore, in modo da eliminare l'umidità e raggiungere la temperatura di miscelazione.

Anche il bitume scelto viene inserito nel forno alla stessa temperatura, per un tempo necessario affinché diventi liquido (circa 120 min). Viene scaldata una quantità maggiore rispetto a quella necessaria per via della possibilità che il bitume rimanga attaccato ai bordi del barattolo e che non possa bastare.



Fig.2.23 Bilancia di precisione



Fig.2.24 Forno

Nei Mix in cui è prevista l'aggiunta di additivo , dopo un'ora e mezza circa si aggiunge l'additivo all'interno della lattina contenente il bitume vergine. L'additivo

viene disperso nel legante già riscaldato mediante un miscelatore (Figura 2.25) che viene fatto agire per 5-6 minuti.

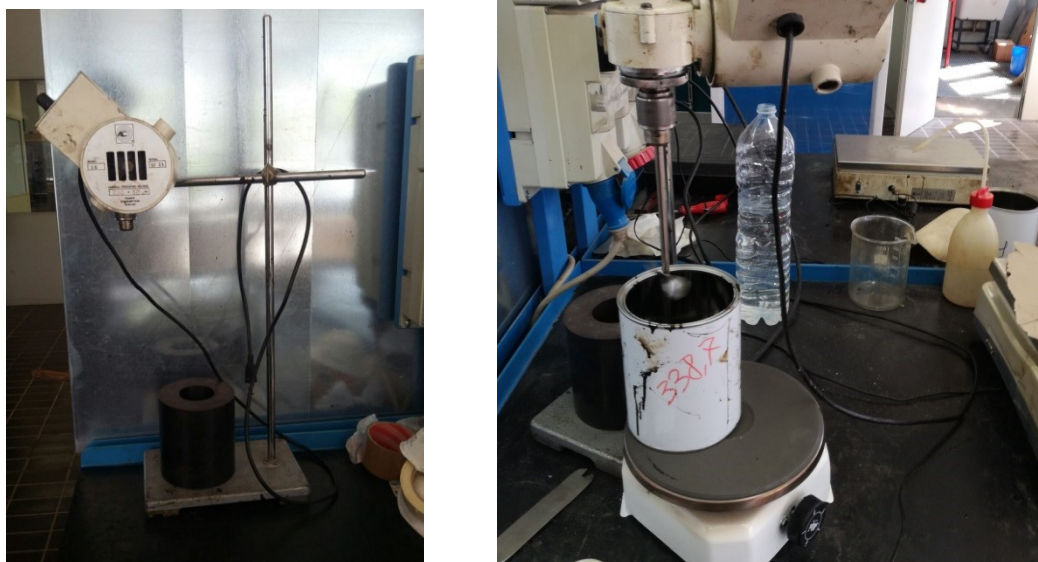


Fig.2.25: Miscelatore bitume-additivo

Il dosaggio utilizzato viene valutato in percentuale sulla quantità di bitume prevista dal mix design: l'additivo ACF1000 corrisponde al 6% sul bitume del RAP mentre l'Iterlow-T corrisponde allo 0,5% in peso sul bitume vergine. L'effettiva quantità in grammi inserita viene valutata effettuando un'ulteriore proporzione rispetto ad una quantità leggermente maggiore rispetto a quella necessaria per l'impasto, per il fatto che parte del legante aderisce alle pareti del barattolo e non scola. Dopo la miscelazione bitume-additivo, la lattina è tenuta nuovamente in forno per un'altra mezz'ora, per far sì che al momento della miscelazione il legante sia il più fluido possibile.

Successivamente le varie componenti della miscela vengono inserite nel seguente ordine nel recipiente dell'impastatrice meccanica:

- Inerti calcarei più fresato (Grosso e Fino) miscelando per 30 sec;
- Bitume (con o senza additivo) miscelando per 2 min;
- Filler miscelando per 3 min.



Fig. 2.26 Impastatrice 1 utilizzata per i Mix 1,2,3,4 e 5

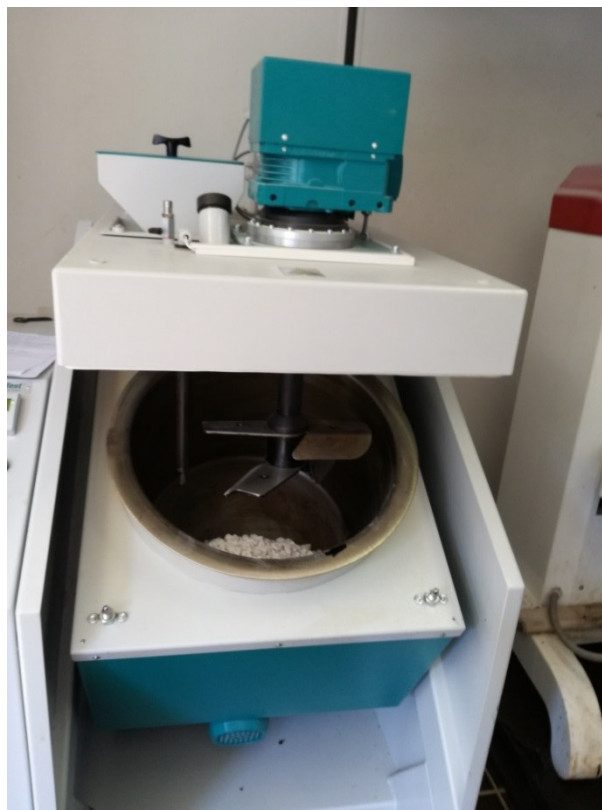


Fig.2.27 Impastatrice 2 utilizzata per i Mix A ,B e C

Sono state utilizzate due diverse impastatrici per i Mix 1,2,3,4 e 5 quella nella figura 2.26 che chiameremo Impastatrice 1 , mentre per i Mix A,B e C una più grande con maggior capienza denominata Impastatrice 2 (Fig.2.27).

Dopo ogni aggiunta vengono attivate le pale meccaniche del macchinario che consentono di ottenere un impasto più omogeneo. Il macchinario , in particolare l'unità in cui avviene la miscelazione, sono stati portati precedentemente alla temperatura desiderata e mantenuti caldi per facilitare l'esecuzione dell'operazione e per non creare uno shock termico con il materiale caldo. Particolare attenzione deve essere fatta per l'inserimento della corretta quantità di bitume. E' necessario infatti procedere volta per volta valutando con una bilancia esterna al macchinario la quantità aggiunta. La fase di miscelazione ha una durata che dipende dal raggiungimento del corretto rivestimento degli aggregati.



Fig. 2.28 : Impastatrici con all'interno il conglomerato a fine miscelazione

Una volta terminata questa fase il contenuto dell'impastatrice 1 viene diviso in 4 pesate da 1100g ciascuna , mentre quello dell'impastatrice 2 è diviso in 3 pesate da 1500g e ciascuna pesata viene disposta in una teglia (Fig.2.29). Queste teglie vengono poi inserite nuovamente nel forno alla temperatura precedente per ottenere una temperatura omogenea della miscela e per simulare la fase di trasporto che

avviene dall'impianto fino al sito di stesa. L'impasto viene tenuto nel forno per circa 30 min.



Fig.2.29 Conglomerato pronto per la compattazione

2.3.3. Pressa a taglio giratoria (UNI EN 12697-31)

Il confezionamento dei provini è stato realizzato mediante la pressa a taglio giratoria, macchinario introdotto alla fine degli anni '50. Essa è composta da un telaio di carico al cui interno sono inseriti un supporto inclinabile, dove verrà inserita la fustella, un pistone di carico che permette l'applicazione del carico verticale, e una base rotante. È dotata inoltre di un sistema di acquisizione e controllo dei dati dal quale è possibile impostare, tra le altre cose, il tipo di prova, cioè se a numero di giri imposto o ad altezza imposta, la pressione (600 kPa) e il diametro della fustella. Tutto l'apparato è collegato ad un pannello di controllo che registra l'andamento dell'altezza del provino ad ogni giro.

La prova si svolge innanzitutto mettendo il materiale all'interno di una fustella del diametro di 100 mm per i Mix 1,2,3, 4 e 5 e 150 mm per i Mix A, B e C. Questa fustella viene poi inserita all'interno del telaio di carico. La fase di preparazione di ogni singola fustella, riscaldata precedentemente in forno insieme agli aggregati, prevede che si inserisca in essa una piastra di base ed un dischetto di carta-filtro per evitare l'adesione del provino alla piastra stessa. Riempita la fustella con la quantità di impasto necessaria a raggiungere il peso prestabilito, si ripone un dischetto di carta-

filtro con su scritto il nome del provino (ad es. 50_RAP 140⁰, 1) e, a seguire, la piastra superiore. La fustella è pronta e si può procedere alla compattazione tramite pressa giratoria.

A questo punto la fustella viene inserita all'interno della camera di prova, ruotandola leggermente fino ad incontrare l'apposito contrasto posto alla sua base e, tramite il pannello di controllo, si setta il macchinario con precise impostazioni. In questa sperimentazione è stato utilizzato il metodo di compattazione a numero di giri imposti:

- Pressione: 600 KPa;
- Diametro della piastra: 100 mm (per i Mix 1,2,3,4 e 5) /150mm (per i Mix A,B e C)
- Numero di giri: 100.

Eseguito il “setting”, è possibile dare inizio alla prova premendo il tasto START.

Fatto ciò, il pistone inizia a scendere fino ad imprimere la pressione desiderata (600 kPa). Dopo questa fase, i sostegni laterali si alzano facendo inclinare la fustella, per poi iniziare a ruotare.

Raggiunto il numero di giri pre-impostato, il macchinario va in modalità “self-parking”: il pistone risale dando, perciò, la possibilità di estrarre la fustella con all'interno il provino compattato. Si conclude con l'estrazione del provino mediante martinetto idraulico che lo solleva dal basso verso l'alto, provocandone la fuoriuscita (Fig.2.30)



Fig.2.30 Pressa a taglio giratoria

2.3.4. Determinazione delle proprietà volumetriche

La composizione volumetrica delle miscele è una delle proprietà che maggiormente caratterizza il comportamento del conglomerato bituminoso in fase di esercizio. Le miscele sono costituite principalmente da tre componenti, come illustrato in figura 2.31:

- Inerti;
- Legante;
- Vuoti.

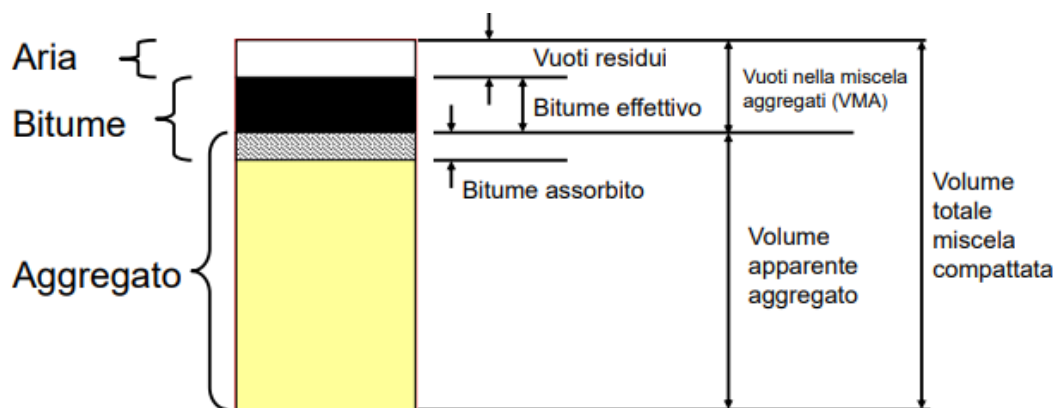


Fig. 2.31 schema che evidenzia i rapporti quantitativi dei principali costituenti del conglomerato

In questo paragrafo si elencano i metodi per il calcolo volumetrico del provino utilizzati nella presente sperimentazione, che ha rispettato la procedura seguente:

a) Determinazione della massa volumica massima (UNI EN 12697-5)

Si definisce massa volumica massima la massa per unità di volume, senza vuoti d'aria, di una miscela bituminosa ad una temperatura di prova nota. Nel presente elaborato la massa volumica massima ρ_m del conglomerato prodotto con la pressa a taglio giratoria è stata valutata utilizzando un procedimento matematico conformemente alla normativa UNI EN 12697-5, secondo cui:

$$\rho_m = \frac{100}{(p_a/\rho_a) + (p_b/\rho_b)}$$

dove:

- ρ_m : massa volumica massima della miscela in kg/m³;

- p_a : percentuale di aggregati nella miscela in m/m;
- ρ_a : massa volumica apparente degli aggregati in kg/m³;
- p_b : percentuale di legante nella miscela in m/m;
- ρ_b : massa volumica del legante a 25 °C in kg/m³.

b) Determinazione della massa volumetrica apparente (UNI EN 12697-6)

Si definisce massa volumica apparente la massa per unità di volume, inclusi i vuoti d'aria, di provino ad una temperatura di prova nota. Nel presente elaborato la massa volumica apparente ρ_b del conglomerato prodotto con la pressa a taglio giratoria è stata valutata utilizzando la procedura D (procedura geometrica) in accordo con la normativa UNI EN 12697-6.

La procedura D prevede di misurare le dimensioni del provino in millimetri e di determinare la massa del campione secco (m_1). La massa volumica geometrica (ρ_{bgeom}) per provini cilindrici si calcola come segue:

$$\rho_{bgeom} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} \cdot h \cdot d^2} \cdot 10^6$$

dove:

- ρ_b : massa volumica apparente del provino in kg/m³;
- m_1 : massa del provino asciutto in g;
- h: altezza del provino in mm;
- d: diametro del provino in mm.

c) Determinazione del volume dei vuoti (UNI EN 12697-8)

Le proprietà volumetriche delle miscele studiate nella presente indagine sono state determinate, in termini di contenuto di vuoti residui dei provini compattati, in accordo a quanto prescritto dalla normativa UNI EN 12697-8. Il volume dei vuoti si ricava utilizzando la massa volumica massima e la massa volumica apparente mediante la seguente formula:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \cdot 100$$

2.3.5. Prova di modulo a trazione indiretta (UNI EN 12697-26)

In questa sperimentazione per la misurazione del modulo di rigidità a trazione indiretta è stata utilizzata l'apparecchiatura NAT (Nottingham Asphalt Tester). In linea generale essa consente di applicare un carico di compressione in una direzione e di misurare la deformazione tramite trasduttori nella direzione ruotata di 90° rispetto a quella di applicazione del carico.

La determinazione del modulo di rigidità con il NAT avviene mediante una prova di trazione indiretta ripetuta. Nel corso della sperimentazione, le prove di modulo sono state eseguite secondo quanto stabilito dalla rispettiva normativa UNI EN 12697-26 con modalità a deformazione controllata. Le prove devono essere eseguite su almeno due diametri del provino (con un angolo tra i due diametri di $90^\circ \pm 2^\circ$).

Attraverso il software dell'apparecchiatura è possibile controllare in maniera automatica tutte le variabili in gioco: il tempo di picco (rise time), il carico fissato, la deformazione di target fissata (in questo caso $2 \mu\text{m}$) o il carico imposto, il coefficiente di Poisson, la temperatura di prova.

Il controllo di tali grandezze avviene tramite un sistema di gestione che opera in maniera da effettuare una taratura durante gli impulsi di condizionamento prima della prova vera e propria. Gli impulsi di condizionamento servono anche ad assestare il carico sulla superficie del campione. Le specifiche condizioni di prova rendono lecita l'applicazione della teoria dell'elasticità lineare, assumendo valide anche le ipotesi di materiale omogeneo ed isotropo.

Nella prova di trazione indiretta ripetuta, il modulo del campione è funzione della sua stessa geometria, della deformazione orizzontale, del rise time, della temperatura di prova e del coefficiente di Poisson.

In Figura 2.32 è riportato lo stato di sollecitazione a cui è sottoposto il provino durante la prova di trazione indiretta.

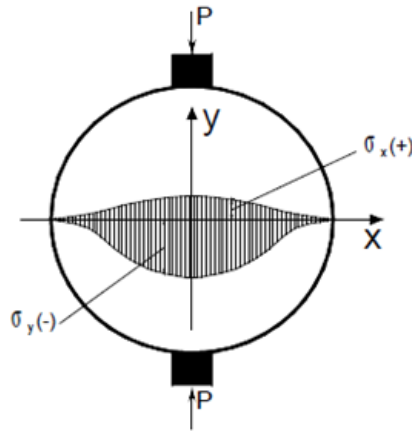


Fig.2.32 Stato di sollecitazione a cui è sottoposto un provino durante una prova a trazione indiretta

In corrispondenza del diametro orizzontale le sollecitazioni medie e massime nelle direzioni x (trazione) ed y (compressione) sono date dalle seguenti espressioni:

$$\begin{aligned} \sigma_{x,\max} &= \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot t} & \sigma_{x,\text{media}} &= \frac{0,273 \cdot P}{d \cdot t} \\ \sigma_{y,\max} &= \frac{-6 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot t} & \sigma_{y,\text{media}} &= \frac{-P}{d \cdot t} \end{aligned}$$

dove:

- P: carico applicato;
- d: diametro del campione;
- t: spessore del campione.

La determinazione del modulo di rigidezza elastica in funzione di tale distribuzione teorica delle sollecitazioni, può essere rappresentata in termini di deformazioni di un elemento soggetto ad uno stato biassiale di tensioni. La deformazione orizzontale ϵ_x dell'elemento è:

$$\epsilon_{x,\text{media}} = \frac{\sigma_{x,\text{media}}}{E} - \nu \frac{\sigma_{y,\text{media}}}{E}$$

dove:

- ν è il coefficiente di Poisson;
- E è il modulo elastico del materiale.

Sostituendo le espressioni ricavate per le tensioni medie nella precedente formula, e tenendo conto che la deformazione orizzontale dei campioni Δ si ottiene moltiplicando la deformazione media per il diametro del campione, si ottiene:

$$\Delta = \frac{0,273 \cdot P}{E \cdot t} + \nu \frac{P}{E \cdot t}$$

Da cui è possibile ricavare il modulo elastico del materiale, come indicato nelle seguente equazione:

$$E = \frac{P}{\Delta \cdot t} \cdot (0,273 + \nu)$$

La versione del software utilizzata fornisce anche un valore di modulo corretto da un fattore AF (Adjustment Factor), che tiene conto della forma dell'onda di carico impostata. Qualora il rapporto tra l'area sottesa dalla curva di carico e quella data dal prodotto del rise-time per il carico di picco non sia pari a $0,60 \pm 0,10$, viene proposta una correzione al modulo ricavato attraverso la seguente equazione:

$$E' = E[1 - 0,322(\log(E) - 1,82)(0,60 - k)]$$

dove:

- E' è il modulo di rigidezza aggiustato ad un rapporto di 0,60 in MPa;
- k è il rapporto tra le aree;
- E è il modulo di rigidezza in MPa.

Affinché la prova possa essere considerata correttamente eseguita, si devono ottenere curve di carico e di deformazione il più regolari possibile, i tempi di picco intorno ad una tolleranza di ± 4 ms ed una deformazione di $5,0 \pm 0,2$ μm . Le variabili che maggiormente influenzano la determinazione del modulo sono:

- *temperatura*: affinché sia valida la formula per il calcolo del modulo E , occorre che quest'ultimo risulti uguale sia a compressione che a trazione. Questa affermazione può essere considerata vera solo per temperature sotto i 25°C . In questo studio le prove di modulo sono state eseguite alla temperatura di 20°C ;
- *rise-time (tempo di picco)*: a causa della natura viscoelastica del legante, la risposta meccanica dei conglomerati dipende fortemente dal tempo di applicazione del carico. In particolare il rise-time, in prove di carico di tipo

impulsivo, indica il tempo necessario al carico pulsante di raggiungere il valore massimo come mostra la Figura 2.33.

Una variazione del tempo di picco su una prova di tipo impulsivo crea, sulla rigidità del conglomerato, gli stessi effetti di una variazione della frequenza di carico su una prova di tipo ciclico (sinusoidale).

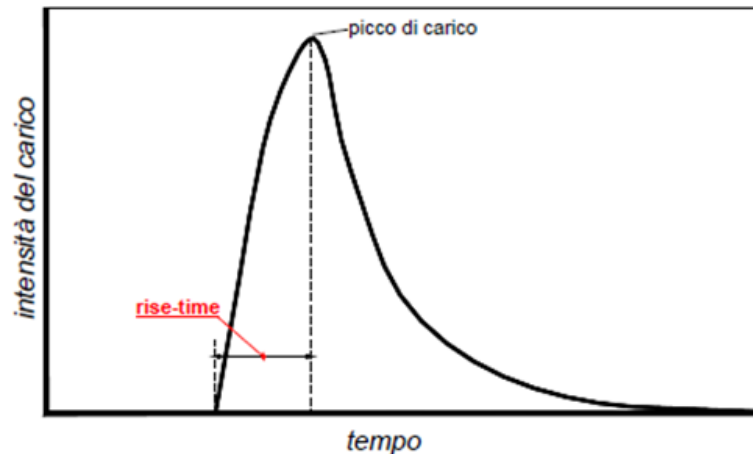


Fig.2.33: Rappresentazione del rise-time di un impulso di carico

La relazione che lega la frequenza di carico (espressa in Hz) con il tempo di picco (in ms) è la seguente:

$$f = \frac{1000}{4 \cdot r_i}$$

In questa campagna sperimentale il rise-time è stato mantenuto costante e pari a 124 ms.

- *deformazione orizzontale imposta*: a causa del comportamento non lineare, le proprietà meccaniche del conglomerato dipendono dal livello di deformazione imposta durante la prova. Nel caso in esame, le prove sono state effettuate imponendo una deformazione pari a 3 μm ;
- *numero di colpi di condizionamento iniziale*: si è già visto come, attraverso un sistema di gestione ed acquisizione dati, sia possibile operare una taratura durante gli impulsi di condizionamento prima della prova vera e propria. Tali

impulsi servono anche ad assestare le strisce di carico sulla superficie del campione. Per ottenere valori di rigidezza affidabili è necessario scegliere accuratamente il numero di colpi per il condizionamento iniziale. Utilizzando un basso numero di colpi si favoriscono tempi di prova più brevi, ma a discapito di misurazioni affidabili. Il BSI (British Standard Institute) suggerisce un numero di colpi di condizionamento pari a 5, ma da indagini sperimentali si è visto come questo numero di colpi non sia da ritenere sufficiente. Pertanto nella presente sperimentazione, tutte le prove sono state eseguite dopo 10 colpi iniziali di condizionamento.

Il NAT è posto all'interno di una camera climatica che permette il raggiungimento e il mantenimento della temperatura di prova. La misurazione della temperatura all'interno della camera avviene tramite un apposito termometro a sonda collegato con un display digitale posto sul pannello superiore della macchina.

In accordo alla norma UNI EN 12697-26, i provini da testare sono stati condizionati termicamente alla temperatura di prova di 20° C, per un tempo sufficiente a raggiungere la tale anche all'interno del provino con una differenza tra centro e superficie esterna non maggiore di 0,4 °C.

Il primo elemento che viene illustrato nel dettaglio è la cella di carico che supporta un carico massimo pari a 20 kN a cui subito sotto è collegato il pistone che permette l'applicazione del carico alla testa di carico posta a contatto con il provino. Tale cella di carico è collegata al computer che la controlla e ne registra i dati.

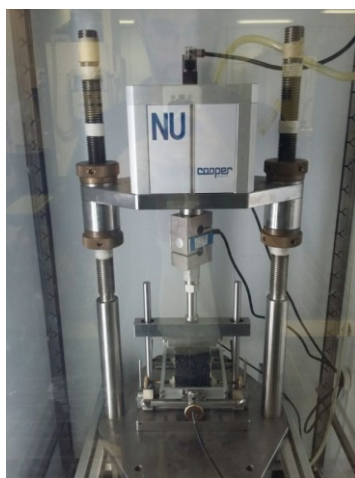


Fig. 2.34 Cella di carico del NAT con al di sotto il castelletto contenente il provino

La misurazione della deformazione nella direzione perpendicolare a quella di applicazione del carico avviene tramite dei trasduttori che, collegati al computer, consentono di rilevare con estrema precisione ogni minimo spostamento.

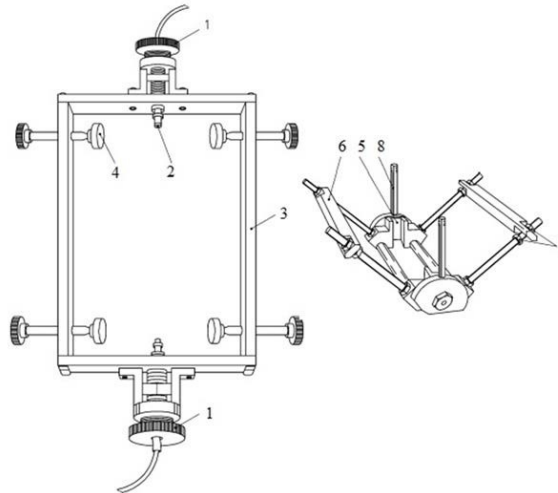


Fig. 2.35 Componenti del castelletto

Per il montaggio dei trasduttori in posizione corretta, si utilizzano due strumenti illustrati in figura 2.35 . In tale illustrazione si possono notare i trasduttori (2) che vengono inseriti nei loro appositi fori, le viti che consentono di mettere in posizione corretta i trasduttori (1), il telaio al cui interno va posto il provino da testare (3), i morsetti di fissaggio che collegano il provino al telaio (4), il canale che permette il centramento del provino (5), le barre che permettono di posizionare i trasduttori a metà del provino (6), le viti che tengono in posizioni tali barre (7) ed infine la leva che permette di abbassare il supporto al telaio che sostiene i trasduttori (8).

Prima di iniziare la procedura atta alla realizzazione del test, le altezze dei provini sono state misurate tramite calibro con una precisione non inferiore a 0,1 mm, in quanto l'altezza finale derivante dal compattatore girevole risulta essere imprecisa. Per tale dato, si è misurata l'altezza su quattro punti, e si è presa come altezza del provino da testare la media dei quattro valori misurati. (Fig. 2.36)



Fig.2.36 Misurazione delle quattro altezze del provino mediante un calibro

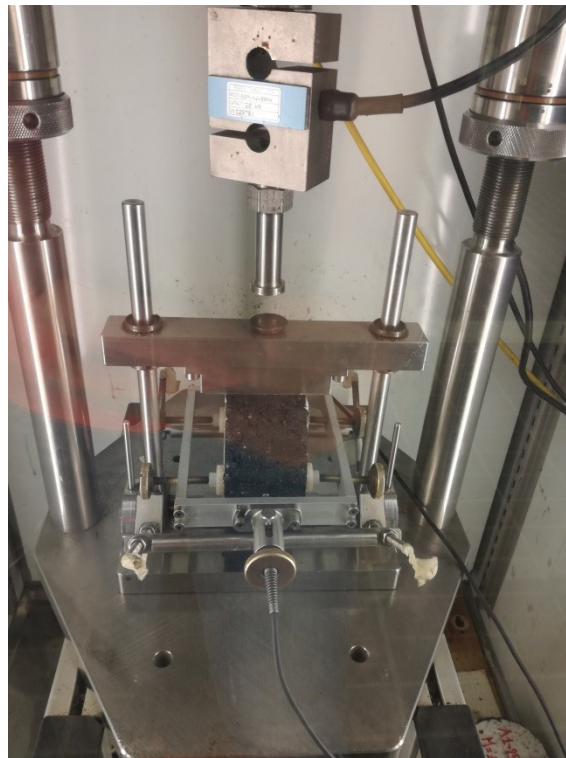
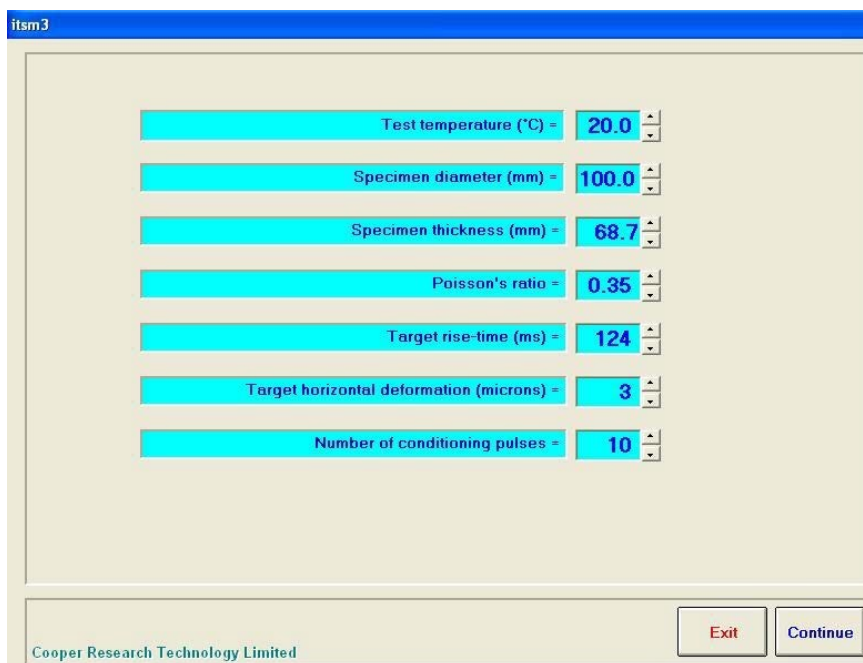


Fig.2.37 Provino pronto per la prova

Si illustra ora in dettaglio come è stata effettuata la misurazione del modulo a trazione indiretta. Innanzitutto, è stato usato un software grazie al quale è possibile il controllo di tutte le fasi della prova. La schermata iniziale del software è quella indicata in figura 2.38.



The screenshot shows the initial screen of the ITSM software. The window title is 'itsm3'. The interface is a light beige color with a blue header bar. It contains seven input fields, each with a cyan background and a blue border. The fields are arranged vertically and contain the following values: Test temperature (°C) = 20.0, Specimen diameter (mm) = 100.0, Specimen thickness (mm) = 68.7, Poisson's ratio = 0.35, Target rise-time (ms) = 124, Target horizontal deformation (microns) = 3, and Number of conditioning pulses = 10. At the bottom right, there are two buttons: 'Exit' and 'Continue'. At the bottom left, the text 'Cooper Research Technology Limited' is visible.

Parameter	Value
Test temperature (°C)	20.0
Specimen diameter (mm)	100.0
Specimen thickness (mm)	68.7
Poisson's ratio	0.35
Target rise-time (ms)	124
Target horizontal deformation (microns)	3
Number of conditioning pulses	10

Fig.2.38 Schermata iniziale del software ITSM con dati input

La prima fase di prova consiste quindi nell'inserimento dei dati relativi al provino da testare all'interno del software. Come si può notare dalla figura precedente vanno inseriti i seguenti parametri:

- Test Temperature [°C]: temperatura alla quale viene effettuata la prova;
- Specimen Diameter [mm]: diametro del provino sottoposto a test;
- Specimen Thickness [mm]: altezza del provino sottoposto a test;
- Poisson's Ratio: modulo di Poisson. Come definito dalla norma, in mancanza di una sua specifica misurazione è assunto pari a 0,35;
- Target Rise-Time [ms]: tempo in ms che la macchina impiega per applicare il carico di picco necessario a raggiungere la deformazione indicata;
- Target horizontal Deformation [μm]: deformazione che la macchina deve far raggiungere al provino;

- Number of Conditioning Pulses : numero di impulsi di pre-carico, ovvero impulsi utili alla macchina ad auto-calibrarsi per far raggiungere al provino una deformazione di 2 μm .

Nella finestra più piccola in alto a destra va invece inserita la denominazione del provino, cioè il nome di riferimento che comparirà nel rapporto finale.

The screenshot shows a software window titled 'itsm3_5' with a header 'Enter the details that need to be stored and printed on the test report'. The main area contains several input fields, most of which are filled with 'N/A'. A modal dialog box titled 'Bulk density' is open, with a text input field containing '2510' and 'OK' and 'Cancel' buttons. At the bottom of the main window, there are 'Exit' and 'Continue' buttons, and the text 'Cooper Research Technology Limited' is visible in the bottom left corner.

Fig.2.39 Seconda schermata

Dopo aver inserito i dati appena elencati con un clic del mouse su Continue si passa alla schermata visualizzata in Figura 2.39, dove vanno inseriti i dati del provino riguardanti la data di effettuazione del test, l'addetto che lo esegue, il metodo di produzione del campione, ecc. Questi dati sono utili solo alla stesura del rapporto di prova.

La schermata successiva a cui si arriva tramite il clic sempre su Continue è quella di figura 2.40. Essa è utile al controllo del pistone pneumatico; infatti una volta che il provino è stato montato sull'apposito "castelletto" con la relativa barra di carico posta al di sopra, si deve portare a contatto con essa il pistone che permette l'applicazione del carico.

Questa operazione è effettuata automaticamente dal software, cliccando sul pulsante *Make Contact* infatti, il pistone si porta a contatto applicando sul provino una forza di pre-carico pari a circa 30 N.

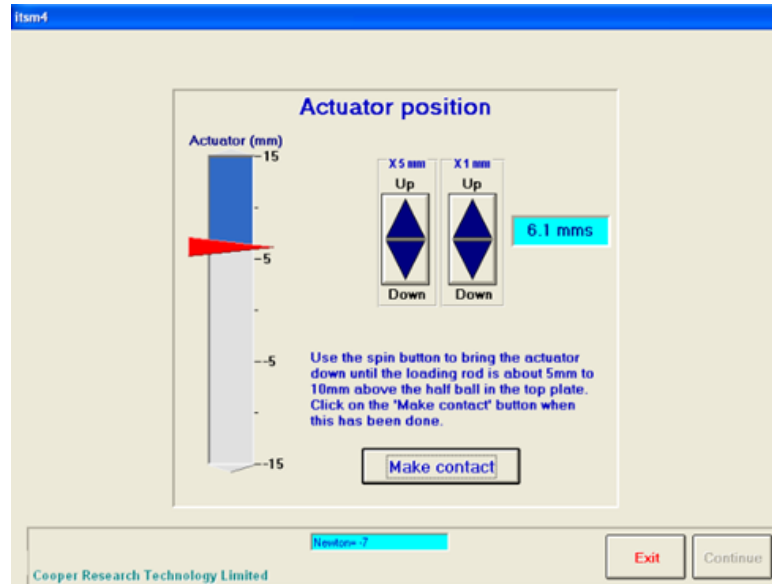


Fig. 2.40 Schermata con il comando "Make contact"

Successivamente viene visualizzata la schermata di Figura 2.41, utile al controllo dei trasduttori. Essi infatti vanno regolati finché le due freccette diventano rosse come in Figura 2.42, a quel punto significa che i trasduttori sono in grado di misurare correttamente la deformazione. Se i trasduttori non fossero così regolati la macchina misurerebbe una deformazione che non è quella reale del provino, questo porta ad una errata applicazione del carico, in quanto si avrebbe un'auto-calibrazione errata e quindi il risultato del test verrebbe falsato.

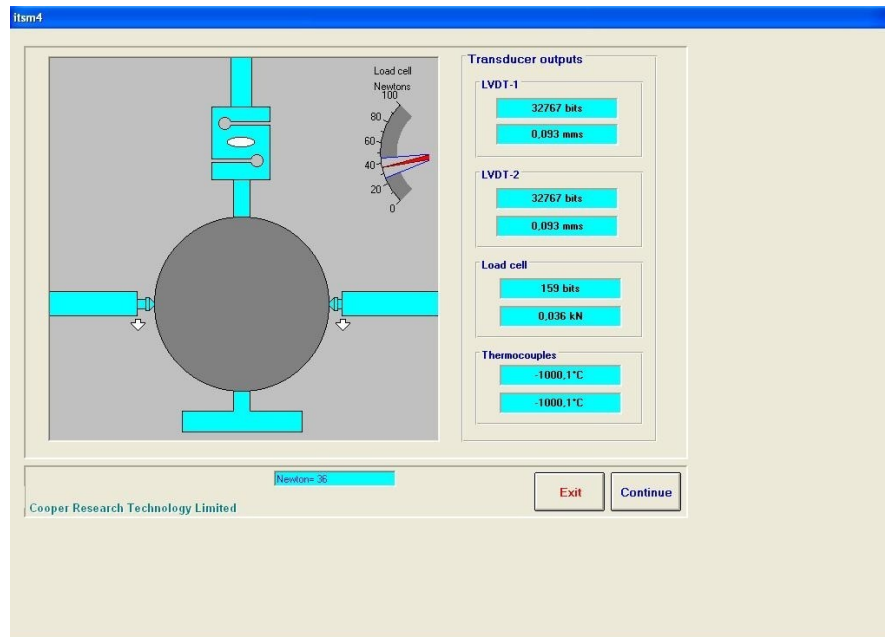


Fig. 2.41 Schermata prima della regolazione dei trasduttori

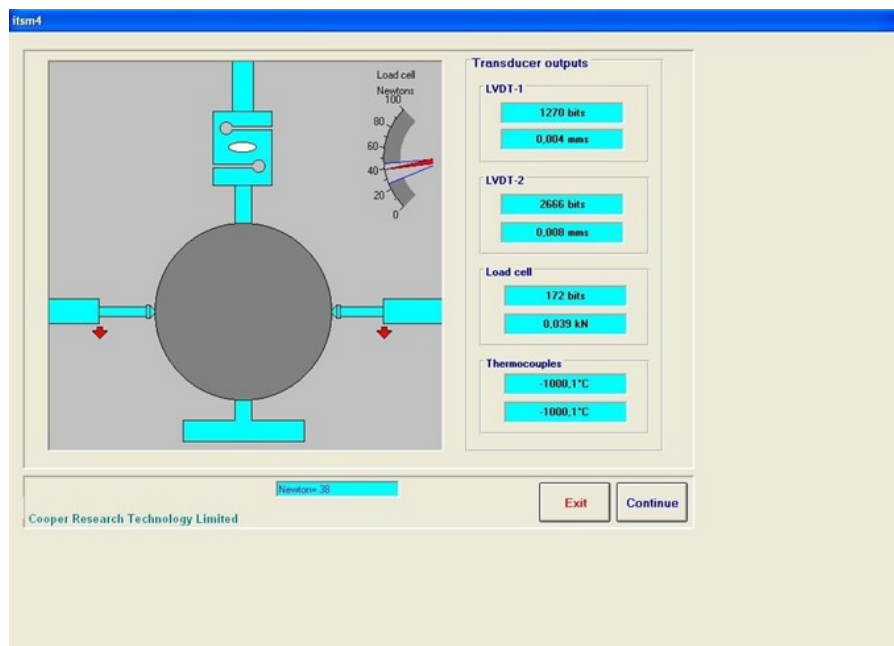


Fig.2.42 Schermata dopo la regolazione dei trasduttori

Una volta che i trasduttori sono in posizione corretta, va controllata la temperatura della camera climatica al cui interno è posizionata tutta l'apparecchiatura con il provino montato su essa. In particolare, tale temperatura non dovrà essere differente da quella di prova di un valore ± 0.5 °C. Una volta sicuri che anche la temperatura è corretta si prosegue il test cliccando sul tasto Continue di 2.42. A questo punto si passa

alla schermata visualizzata in figura 2.43. Qui vengono visualizzati i dati che la macchina misura ed applica durante i 10 impulsi di pre-carico.

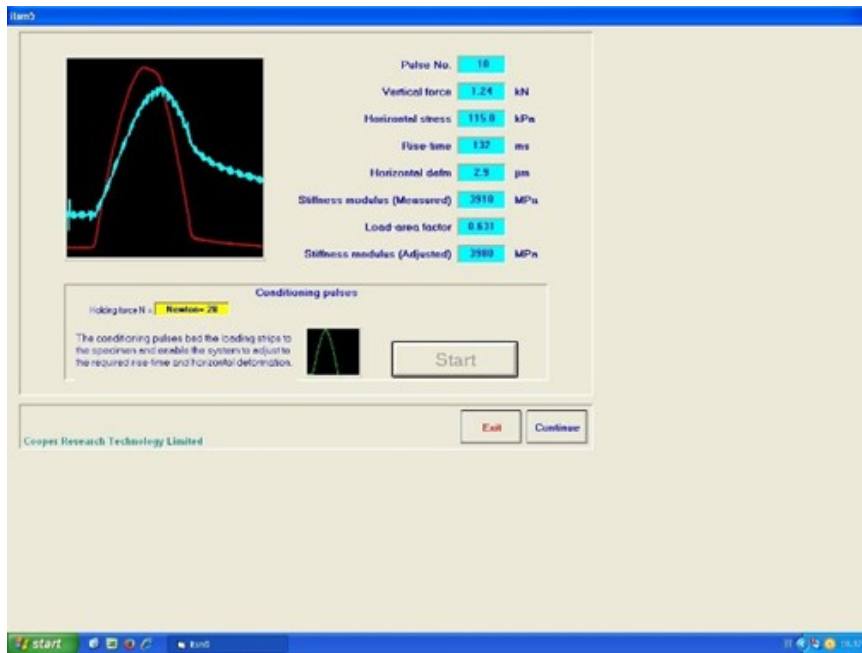


Fig.2.43 Schermata degli impulsi pre-carico



Fig.2.44 Applicazione dei 5 impulsi di prova e visualizzazione dei risultati

Infine, si visualizzano i risultati come in figura 2.44. In questa schermata finale si visualizzano i 5 impulsi di prova e ad ogni impulso si visualizzano tutti i parametri descritti appena sopra, con l'aggiunta dei valori medi di ogni parametro.

Successivamente il software richiede che il provino venga ruotato di un angolo pari a $(90^\circ \pm 10^\circ)$ ed in seguito si procede al test con i passaggi appena descritti. Secondo la norma i moduli calcolati sui due diametri possono differire fino ad un massimo del 20%..

2.3.6. Prova di Trazione Indiretta (UNI EN 12697-23)

La prova di trazione indiretta, nota anche come prova Brasiliana, consiste nel comprimere, fino a rottura, un provino lungo un piano diametrale verticale. La rottura nel materiale avviene per trazione in direzione perpendicolare a quella di applicazione del carico (effetto Poisson).

La prova di resistenza a trazione indiretta può essere eseguita ad una temperatura compresa tra i 5 ed i 25°C. In questa indagine, e di norma, la prova è effettuata alla temperatura di 25°C. Infatti, prima della realizzazione della prova, i provini vengono tenuti per almeno 3 ore nella camera climatica a 25°C rappresentata in Figura 2.45.



Fig.2.45 Camera climatica a 25°C

L'apparecchiatura utilizzata per l'esecuzione di tale prova è costituita da un sistema di carico, formato da due piatti paralleli infinitamente rigidi: la testa di carico inferiore è fissata ad una base munita di due guide verticali lungo le quali scorre, senza apprezzabile attrito mediante due manicotti, la testa di carico superiore. Il carico viene trasferito al provino tramite due listelli, caratterizzati dalle seguenti dimensioni:

- larghezza: 15 ± 2 mm;
- spessore: 4 ± 1 mm;
- lunghezza \geq della lunghezza della linea di contatto del provino.

Il provino viene collocato, ben centrato, tra i piatti della pressa, in maniera tale che il suo asse sia orizzontale, che l'asse del listello di carico superiore sia perfettamente parallelo a quello del listello inferiore e che entrambi siano contenuti nel piano verticale passante per l'asse del provino (Figura 2.46).

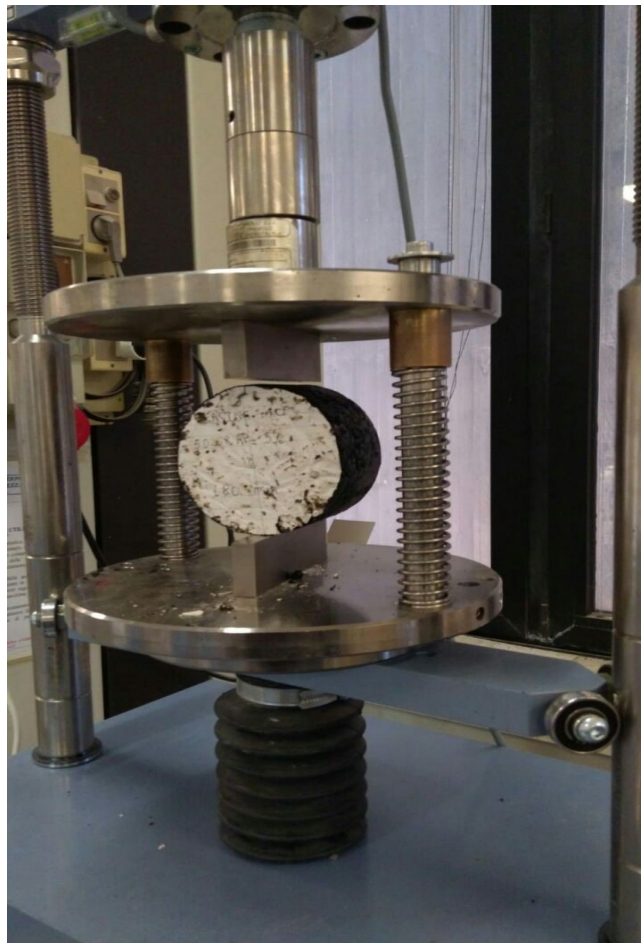


Fig.2.46 Posizionamento del provino tra i piatti della pressa

Durante la prova la testa di carico inferiore viene fatta avanzare ad una velocità costante di 50 ± 2 mm/min. Il sistema di controllo, mediante due comparatori, permette di misurare sia la deformazione (verticale ed orizzontale) subita dal provino durante l'applicazione del carico, che il carico stesso. La prova, in accordo con la norma UNI EN 12697-23, viene svolta in controllo di deformazione.

In Figura 58 troviamo invece un provino rotto al termine della prova Brasiliana.



Fig.2.47 Provino rotto dopo la prova

La macchina di prova può essere guidata mediante un pannello di controllo oppure in remoto con un computer tramite il software UTMII. Nel controllo in remoto, si impostano parametri di prova (i principali sono diametro e altezza del provino, velocità di avanzamento e carico di fine prova) e si ottengono in output oltre alla curva carico-corsa (carico-deformazione verticale) visualizzabile già durante l'esecuzione del test, tutti i punti che formano tale curva, il carico di rottura a compressione e la deformazione a compressione. Si può chiedere al software di fornire già calcolati anche la resistenza a trazione indiretta ITS e il coefficiente di trazione indiretta ITC. Nelle figure seguenti si possono vedere i passaggi principali eseguiti con UTM II.

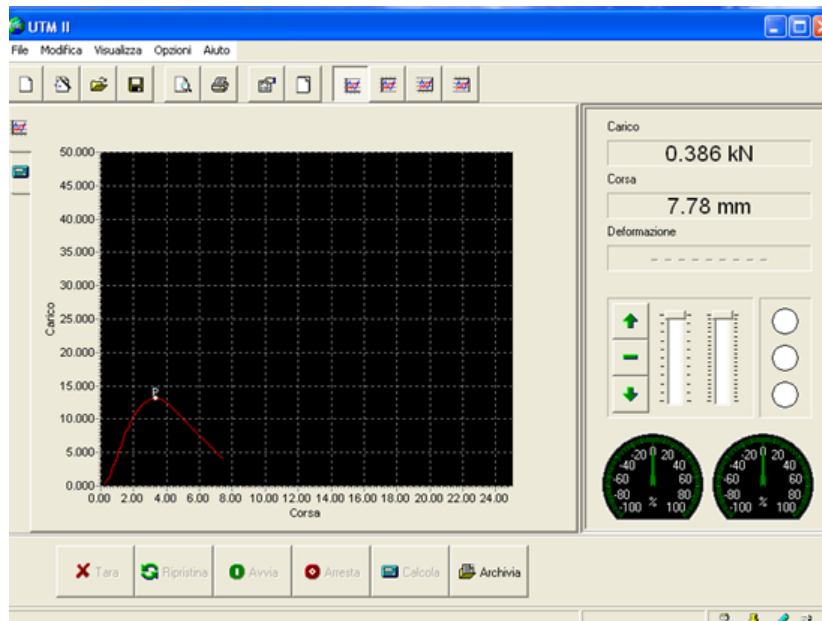


Fig.2.48 Curva sforzo-defomazione risultante dall'applicazione del carico assiale

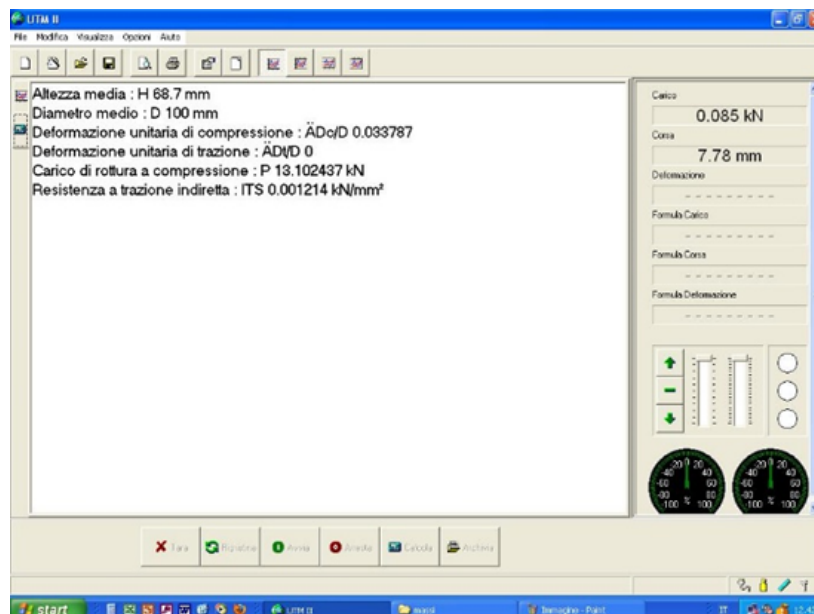


Fig.2.49 Schermata con rielaborazione dei risultati

Viene calcolata la Resistenza a Trazione Indiretta ITS (Indirect Tensile Strength), cioè la massima tensione di trazione applicata al provino, a partire dal carico di picco e dalle dimensioni del provino, mediante la seguente espressione:

$$ITS = \frac{2 \cdot P_{\max}}{\pi \cdot t \cdot D}$$

dove:

- P_{\max} è il carico massimo espresso in N;
- t è l'altezza del provino espressa in mm;
- D è il diametro del provino in mm.



Fig.2.50 Provino rotto a seguito della prova a trazione indiretta

2.3.7 Prova Accumulo di deformazione permanente (UNI EN 12697-25)

La natura viscoelastica del conglomerato bituminoso deve essere indagata nella sua completezza analizzando sia la risposta in termini di rigidità, risposta elastica, mediante la caratterizzazione con prove di modulo, che la sua componente viscosa e plastica, sollecitando il materiale ad un carico che generi un accumulo di deformazione permanente proporzionale alla natura viscosa della miscela.

In questo capitolo si descrivono le caratteristiche fisiche principali riguardanti il fenomeno del creep e, altresì, la modalità d'esecuzione della prova relativa a tale studio, nei suoi aspetti funzionali ed analitici.

- Il creep

Il conglomerato bituminoso, come si è già trattato, ha un carattere fortemente tempo dipendente che lo porta ad assumere due stati limite, alle alte ed alle basse temperature, che si possono identificare in solido elastico e fluido viscoso. Il solido elastico ha una forma ben definita che può essere modificata all'atto dell'applicazione di un carico esterno, ma che ritorna allo stato iniziale al momento della rimozione di quest'ultimo. Al contrario, il liquido di natura viscosa non ha una forma ben definita ed accumula deformazioni permanenti che sono recuperate solamente in minima parte all'atto dello scarico.

Nella pratica comune di analisi delle caratteristiche meccaniche, lo sforzo e la deformazione vengono sostituiti da altre due grandezze differenti che sono:

- Lo *stress*: pressione esercitata sul materiale (Pa);
- Lo *strain*: deformazione percentuale (adimensionale).

Il fenomeno di creep, scorrimento viscoso permanente sotto un'azione esterna, viene studiato mettendolo in relazione al fenomeno inverso, il rilassamento, cioè un progressivo decremento dello stato tensionale del sistema sottoposto ad una deformazione permanente.

Si conduce il materiale al fenomeno di creep applicando uno stress costante (carico costante) e misurando l'andamento dello strain nel tempo indotto dal rilassamento.

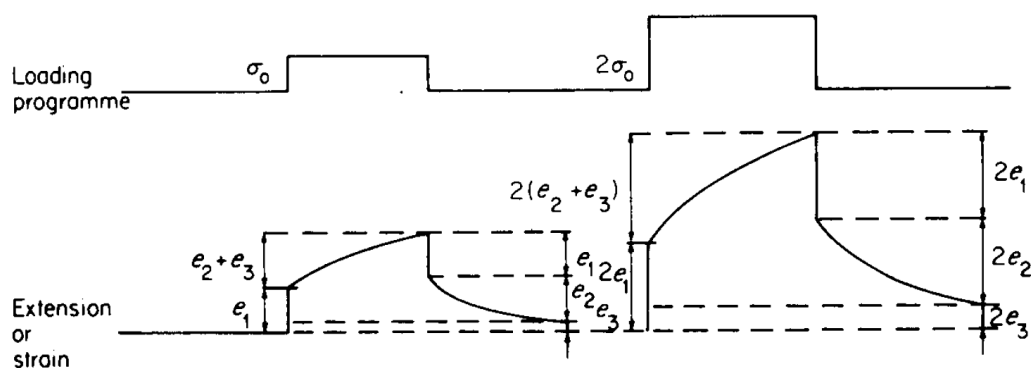


Fig.2.51 Deformazione di un materiale viscoelastico lineare

lo strain totale è costituito dalla somma di tre contributi separati (elastico istantaneo, elastico ritardato, viscoso). Essendo questi proporzionali alla grandezza dello stress applicato si introduce una grandezza, dipendente solo dal tempo, denominata creep compliance $J(t)$:

$$J(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} = J_1 + J_2 + J_3$$

dove:

$\varepsilon(t)$ è la deformazione all'istante t ;

σ_0 è la sollecitazione statica applicata.

Si può affermare, quindi, che la funzione di creep, o funzione di deformazione, rappresenta la deformazione nel tempo per unità di sforzo applicato, che varia con la temperatura in base alla suscettibilità termica del legante.

La risposta immediata ad una prova sperimentale di creep viene chiamata “unrelaxed” per distinguerla dalla “relaxed” che è vali per tempi sufficientemente lunghi in cui si sono sviluppati tutti i fenomeni di rilassamento.

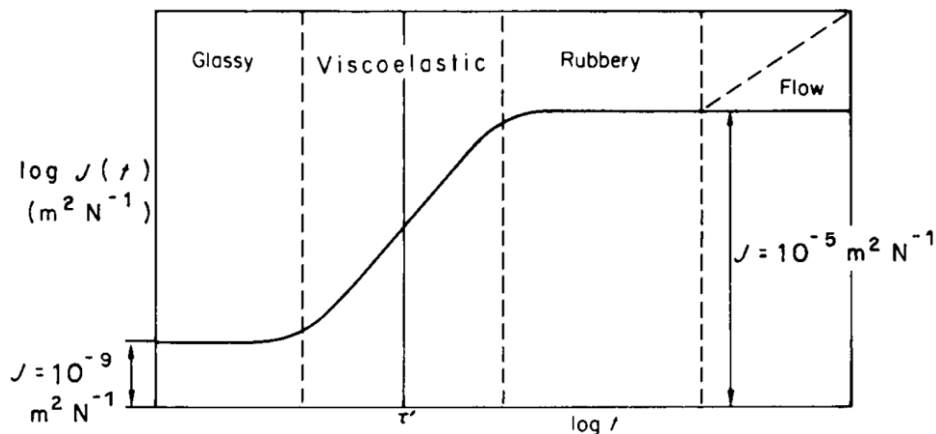


Fig. 2.52 Creep compliance $J(t)$

Nel diagramma (Fig.2.52) è ben visibile il comportamento del materiale, ed in particolare della sua creep compliance: a tempi brevi la risposta è quella di un solido vetroso, a tempi lunghi di un solido gommoso, a quelli intermedi è tipicamente viscoelastico.

Gli andamenti caratteristici di $J(t)$ in funzione del tempo e di varie temperature, riferendosi specificamente ai conglomerati bituminosi, sono rappresentati nella figura sottostante (fig.2.53): si può notare che sotto l'azione del carico $J(t)$ aumenta all'aumentare del tempo e della temperatura.

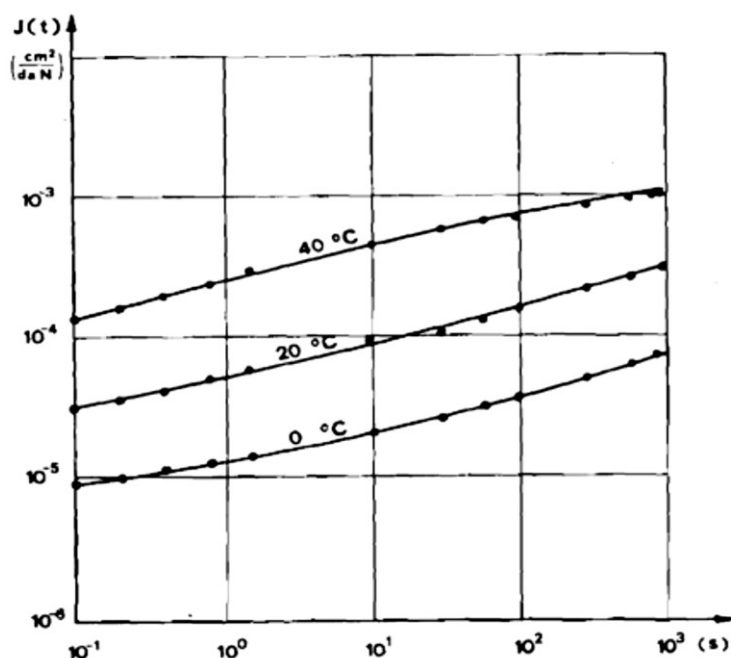


Fig.2.53 Creep compliance $J(t)$ per conglomerati bituminosi

- Procedura di prova

La procedura di prova seguita per l'esecuzione di questo test, prova di compressione ciclica (TCCT) per la determinazione della resistenza alla deformazione permanente delle miscele di conglomerato bituminoso, fa riferimento alla normativa cogente, in particolare alla UNI EN 12697-25. In essa sono riportate due differenti metodologie per determinare la resistenza del materiale preso in esame con una configurazione di tipo monoassiale ed un'altra di tipo triassiale, confinata nella quale possono essere adottati diversi tipi di confinamento. Si può utilizzare la prova sia per classificare, che per controllare l'accettabilità di una determinata miscela sottoposta ad uno stress ciclico sotto condizioni simulate che riproducono la realtà (pavimentazioni reali in situ) mediante l'effetto del confinamento stesso indotto sul provino.

In questa sperimentazione si è deciso di adottare il metodo di test B proposto dalla normativa, con cui si vuole studiare il fenomeno di creep sotto un'azione di confinamento e di compressione assiale ciclica.

In accordo con tale metodo, il provino di forma cilindrica viene posizionata tra due piastre di carico parallele, soggetto ad una pressione di confinamento σ_c , alla quale viene sovrapposta la pressione ciclica assiale $\sigma_a(t)$. La pressione σ_c può essere sia dinamica che statica.

La pressione ciclica assiale può essere:

1. Una pressione sinusoidale $\sigma_a(t)$ con ampiezza σ_v , come rappresentata in figura

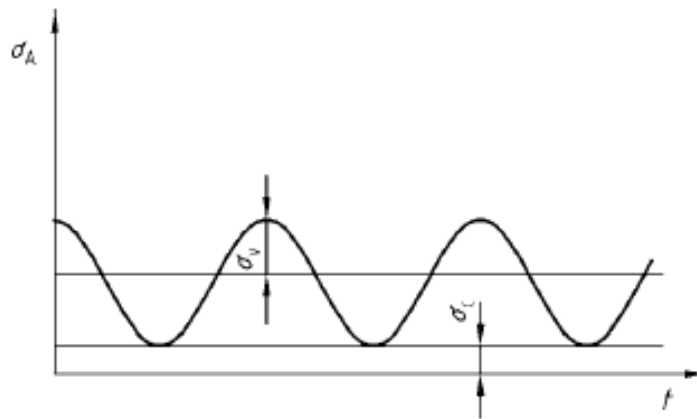


Fig.2.54 Pressione sinusoidale

Il risultato della pressione assiale totale, $\sigma_a(t)$ è:

$$\sigma_c + \sigma_a(t) = \sigma_c + \sigma_v \cdot (1 + \sin(2\pi \cdot f \cdot t)).$$

Dove:

- σ_c è la tensione di confinamento intorno ad il provino, in kiloPascal [kPa];
- $\sigma_a(t)$ è la pressione ciclica assiale in funzione del tempo, in kiloPascal [kPa];
in caso di pressione sinusoidale, $\sigma_a(t)$ è definita come $\sigma_a(t) = \sigma_v \cdot (1 + \sin(2\pi \cdot f \cdot t))$;
- σ_v è l'ampiezza della pressione sinusoidale, in kiloPascal [kPa];
- f è la frequenza in hertz [Hz];
- t il tempo

2. Una pressione di tipo “block-pulse” $\sigma_a(t)$ di altezza σ_b , come rappresentata in figura:

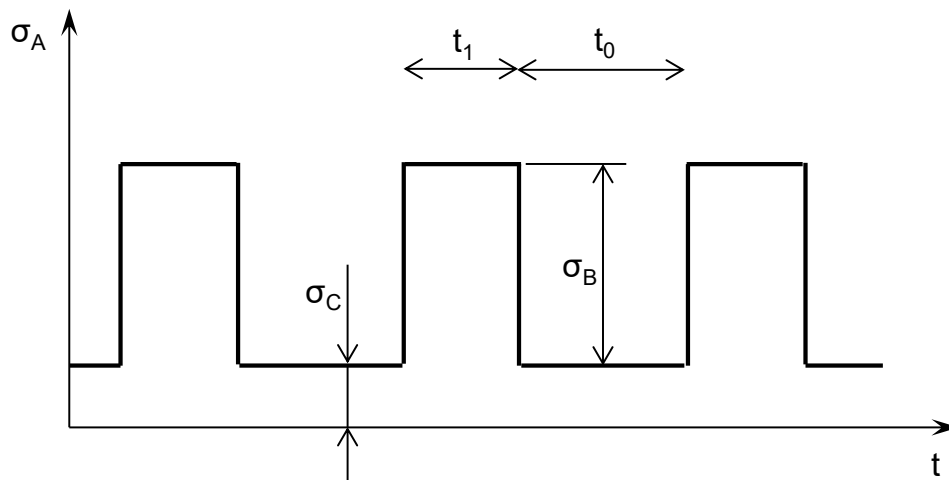


Fig.2.55 Pressione sinusoidale

Dove:

- σ_c è la tensione di confinamento intorno al provino, in kilopascal [kPa];
- $\sigma_a(t) = \sigma_b$ durante l'applicazione del carico di periodo T_1
 $\sigma_a(t) = 0$ durante il periodo di riposo T_0
- σ_b è l'altezza della tensione tipo “block-pulse”

In entrambi i casi, una piccola parte di carico morto del massimo di $0,02 \sigma_v$ (nel caso di pressione sinusoidale) e di $0,02 \sigma_b$ (nel caso di pressione “block-pulse”) è permessa.

Durante il test di prova, la variazione di altezza del provino è misurata ad ogni refissato numero di cicli di applicazione del carico.

La deformazione assiale cumulativa, ε_n , (deformazione permanente) del provino è determinata come funzione del numero di applicazione di cicli. I risultati sono rappresentati nella curva di creep come nella figura seguente:

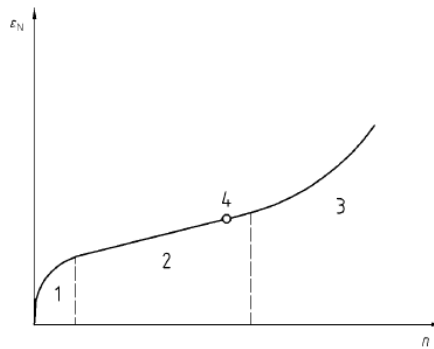


Fig.2.56 *Andamento della curva di creep*

Grazie a tale curva, le caratteristiche di creep del provino vengono calcolate.

Tale prova è stata eseguita solo sui provini ottenuti dai Mix A, B e C (ad esempio quelli nella figura 2.57).



Fig.2.57 *Provini Mix C prima del carotaggio*

Una volta ottenuti questi provini con diametro 150 mm, sono stati carotati in modo da averne dei nuovi con un diametro di circa 100mm e altezza 80 mm (Fig. 2.58).



Fig.2.58 Provini dopo l'operazione di carotaggio

Dopo questa operazione di carotaggio i provini prima di essere sottoposti alla prova sono stati tenuti a temperatura ambiente per permettere loro di asciugarsi e rendere possibile la misura delle reali altezze e diametri mediante un calibro (Fig. 2.59).



Fig.2.59 Misura di altezze e diametri mediante un calibro

Dopo questa operazione di misura sono stati tenuti in forno a 40°C per circa un giorno. Per eseguire tale prova ci si è avvalsi della strumentazione NAT (*Nottingham Asphalt Test*) allestita con uno specifico apparato di carico e misura, e controllato da un software applicativo denominato “RLA TEST”.

La strumentazione utilizzata è composta da:

- Una camera climatica;
- Una pressa pneumatica;
- Una cella di carico;
- Due trasduttori elettronici LVDT;
- Una campana di vetro isolante con una testa di carico;
- Una base di carico;
- Una membrana in lattice;
- Due O-rings;
- Un compressore ed manometro;
- Un'unità di condizionamento del segnale;
- Un computer con software "RLA TEST".

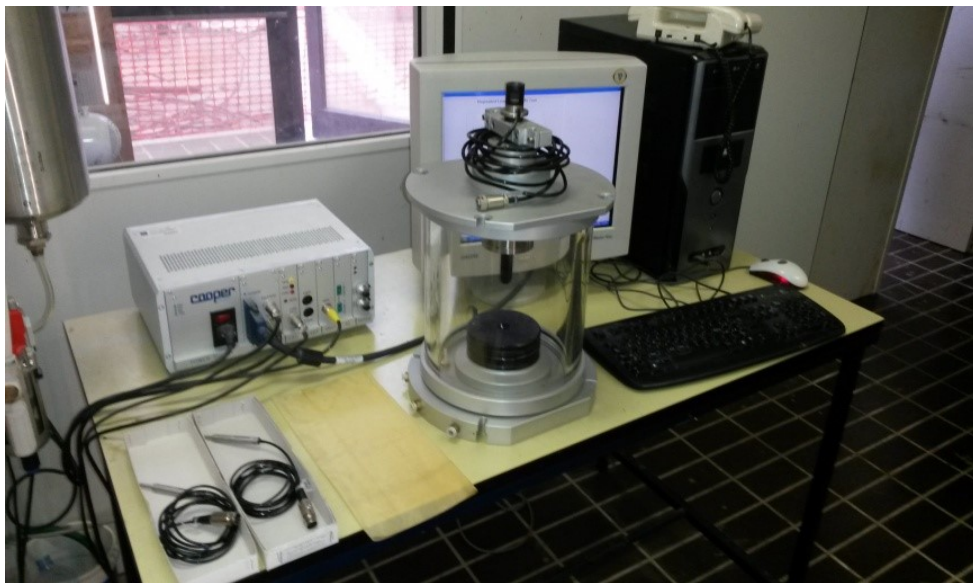


Fig.2.60 Strumentazione per la prova

Come per la prova di modulo, la fase più delicata di tutta la prova è l'allestimento del provino: per ottenere un confinamento adeguato è necessario proteggere il provino con una membrana in lattice che favorisce una diffusione dello stress radiale omogenea su tutta la superficie, e, successivamente, inserire il provino stesso all'interno di una campana di vetro, costituita da un basamento metallico e da una testa di carico, che

deve essere opportunamente serrata e collegata al sistema di compressione regolato da una vite manometrica.

La campana viene strumentata mediante due trasduttori elettrici di tipo LVDT posti sulla sommità della testa di carico, che misurano un range di spostamento pari ad 1 cm e che trasmettono il segnale al computer restituendo il valore medio delle due misurazioni.



Fig.2.61 Allestimento del provino



Fig.2.62 Provino allestito per la prova

A questo punto si può inserire la strumentazione all'interno della camera di prova (Fig.2.62) che si trova alla temperatura stabilita (nel nostro caso 40° C) e si può procedere con la taratura dei parametri di prova e sull'imposizione della pressione di cella. Ultimata questa fase si può iniziare il test di prova secondo il protocollo scelto. Il carico triassiale imposto sui provini cilindrici precedentemente condizionati alla temperatura desiderata per almeno 8 ore, di dimensioni d=94mm ed h=80mm, è stato di 300KPa, mentre per la pressione monoassiale esercitata dalla cella di carico, pari al valore di 150 Kpa, si è scelta la configurazione "b" proposta dalla normativa. Si è utilizzata una pressione il cui andamento è descritto dal diagramma di impulso a blocchi:

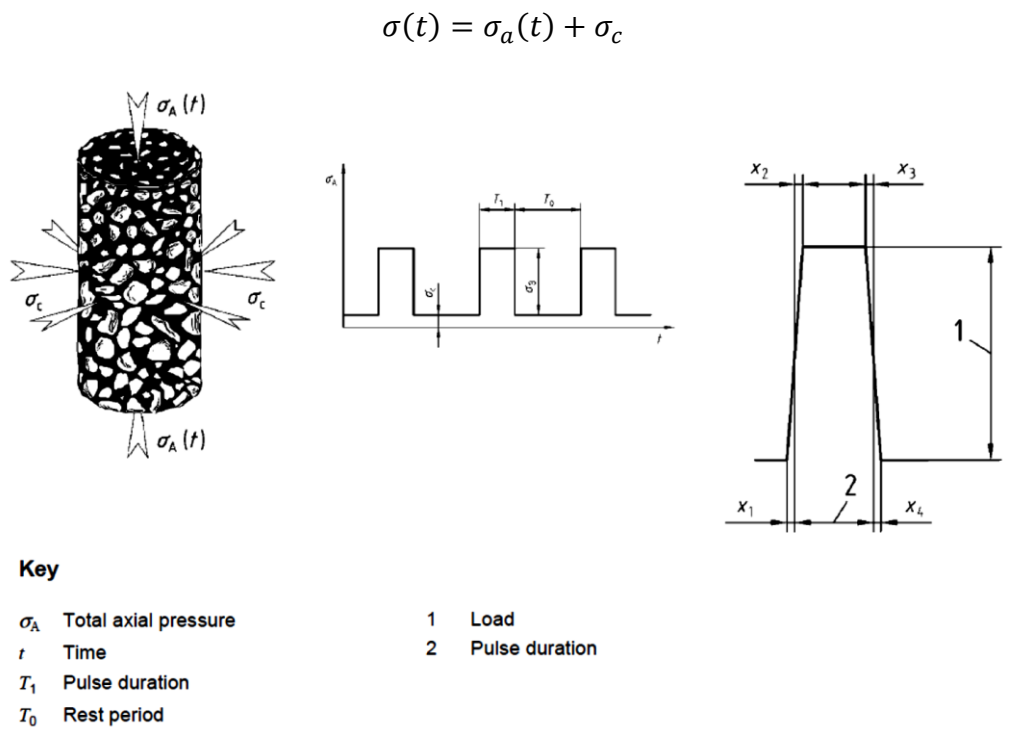


Fig.2.63 Diagramma pressione imposta

Il carico imposto dal pistone è di 300 KPa e la frequenza con cui viene esercitato è di 1 Hz: si impone un secondo di carico ed uno di scarico per un numero di cicli pari a 10.000 ed una durata complessiva della prova di circa 5 ore e 30 minuti.

Durante l'esecuzione della prova si può monitorare l'andamento del test, dei parametri di carico e della misura dei trasduttori, mediante un'interfaccia grafica relativa al software utilizzato che restituisce i valori registrati, secondo una cadenza protocollata.

L'accumulo di deformazione permanente viene rappresentato e diagrammato mediante la ricostruzione della creep curve. In questa curva viene evidenziato l'accumulo di deformazione assiale permanente ε_n % (strain) subita dal provino in funzione del numero di cicli osservati (fig.2.64). Lo strain è ricavato dalla seguente formula:

$$\varepsilon_n = \frac{h_0 - h_n}{h_n} \times 100$$

dove: ε_n è la deformazione assiale cumulativa dopo n cicli (%);

h_0 è l'altezza del provino dopo il precarico (mm);

h_n è l'altezza del provino dopo n cicli di carico (mm).

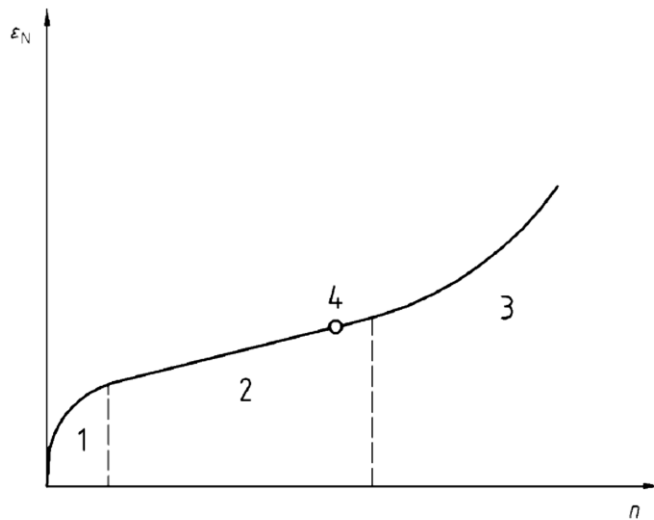


Fig. 2.64 Creep curve

Nella curva di creep rappresentata si distinguono 3 zone fondamentali: nel primo tratto la pendenza della curva decresce all'aumentare del numero di cicli di carico; nel secondo stadio si ha un andamento lineare della curva, cioè c'è un tasso di deformazione viscosa costante; nell'ultimo tratto la pendenza della curva aumenta all'aumentare del numero di cicli di carico.

Da tale curva è possibile ricavare alcuni dati fondamentali per la caratterizzazione della miscela:

- La deformazione permanente massima finale $\varepsilon_{n\text{MAX}}$;
- Il creep rate f_c .

La prima viene calcolata con la stessa formula vista precedentemente, facendo riferimento all'ultimo ciclo (in questo caso al numero 10.000).

Il creep rate rappresenta la resistenza mobilitata dal conglomerato bituminoso all'accumulo di deformazione permanente ed è espresso come:

$$f_c = B_1 * 10^4$$

dove B_1 rappresenta la pendenza del tratto lineare della curva di creep.

Nelle prove eseguite in questa sperimentazione è stato possibile analizzare solamente i primi due stadi della creep curve in quanto le miscele di conglomerato bituminoso utilizzato hanno opposto una buona resistenza all'accumulo di deformazione possibile.

2.4 Specifiche di capitolato

Per la caratterizzazione e l'accettazione dei conglomerati bituminosi tradizionali, bisogna attenersi alle norme tecniche contenute nei Capitolati d'Appalto forniti dai vari enti che gestiscono la rete stradale. Tali norme prevedono il rispetto di determinati requisiti prestazionali sia per quanto riguarda i materiali impiegati nelle miscele (aggregati lapidei, filler, bitume) che per i conglomerati stessi. Infatti, la non rispondenza ad uno di questi requisiti può comprometterne l'impiego o comunque portare ad una riduzione del prezzo del materiale da utilizzare. Da quanto appena detto, bisogna effettuare un'analisi accurata dei materiali che verranno impiegati nella miscela al fine di scegliere i componenti più adatti per la realizzazione di essa.

Nella presente sperimentazione ci si è attenuti alle prescrizioni fornite dal Capitolato Speciale d'Appalto ANAS, in particolare per quanto riguarda i requisiti volumetrici, in termini di contenuto di vuoti residui ottenuti mediante pressa a taglio giratoria, e per la caratterizzazione meccanica dei conglomerati, andando a valutare la resistenza a trazione indiretta e il coefficiente di trazione indiretta (CTI). Nella seguente tabella vengono riportate le specifiche di capitolato alle quali si è fatto riferimento:

Proprietà	Valori richiesti
Vuoti a 100 rotazioni [%]	3% - 6%
ITS [MPa]	0.72 - 1.40
CTI [MPa]	$\geq 65 \text{ MPa}$

Tab.2.16 Requisiti forniti dal Capitolato ANAS

3. Risultati sperimentali

Nel seguente capitolo verranno illustrati i risultati sperimentali ottenuti, sia per quanto riguarda le caratteristiche volumetriche che il comportamento meccanico dei provini testati. Tali risultati saranno espliciti nei paragrafi successivi tramite apposite tabelle e grafici in modo da renderne più semplice la comprensione.

3.1 Mix 1

Il primo impasto è stato realizzato utilizzando le quantità riportate in Tabella 3.1:

Nome	% bitume totale	% bitume vergine	Tipo di bitume	% RAP	Tipo di RAP	% Additivo
Mix 1	5.2%	3,0%	50/70 API	50	RAP grosso e fino	0

Tab.3.1 Mix design del Mix1

Di seguito verranno riportati i risultati ricavati dalla miscela appena descritta relativi al volume dei vuoti, al modulo di rigidezza e alla resistenza a trazione indiretta.

3.1.1. Caratteristiche volumetriche

No. Provino	No. Giri	m [g]	hm [mm]	$\rho_{b,geom}$ [g/cm ³]	$\rho_{b,sea}$ [g/cm ³]	Pb [%]	Pa [%]	ρ_B [g/cm ³]	ρ_A [g/cm ³]	ρ_m [g/cm ³]	$V_{m,geom}$ [%]
1	100	1108.1	60.10	2.348	0.902	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	5.0
2	100	1100	60	2.334	0.897	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	5.5
3	100	1102.3	59.925	2.342	0.900	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	5.2
4	100	1096.9	60.175	2.321	0.892	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	6.1

Tab. 3.2 Calcolo del volume dei vuoti del Mix1

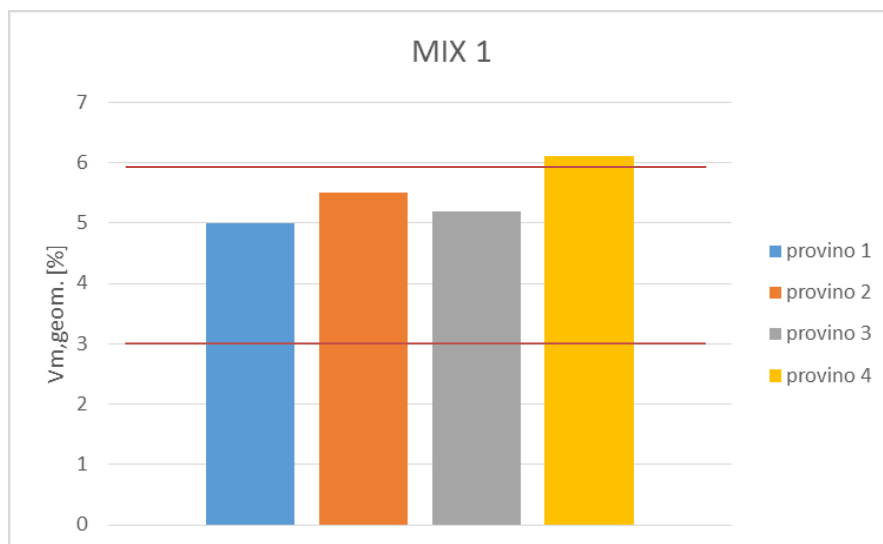


Fig.3.1 Istogramma del Mix1

Dal grafico si nota come i primi tre provini sono all'interno del range fornito dal Capitolato ANAS e il quarto risulta leggermente fuori, ma comunque in linea.

3.1.2. Modulo a trazione indiretta

No. Provino	No. Giri	ITSM'	ITSM''	ITSM_medio
1	100	9508	9297	9402,5
2	100	10981	10329	10655
3	100	11442	10799	11120,5
4	100	11887	11590	11738,5

Tab.3.3: Risultati della prova di modulo a trazione indiretta del Mix1

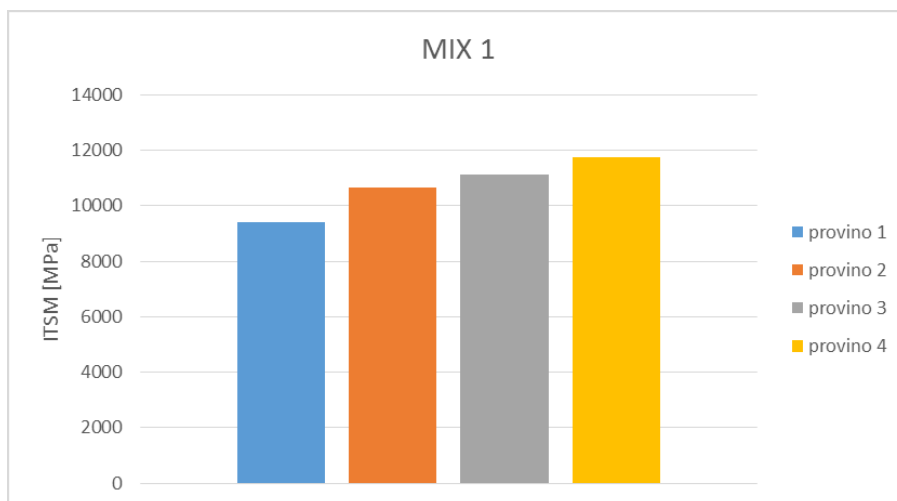


Fig. 3.2 Istogramma del modulo a trazione indiretta del Mix 1

3.1.3 Resistenza a trazione indiretta

No. Provino	No. Giri	P [kN]	ITS [Mpa]	ϵ	CTI [Mpa]	E' [J]	E'' [J]	Etot [J]
1	100	18,09	1,92	0.030701	98,24	18,42	22,54	40,96
2	100	16,41	1,74	0.025347	107,83	15,99	19,76	35,75
3	100	16,67	1,77	0.033187	83,78	23,11	19,55	42,66
4	100	15,58	1,65	0.026865	97,25	15,21	15,39	30,6

Tab.3.4 Risultati della prova a trazione indiretta del Mix1

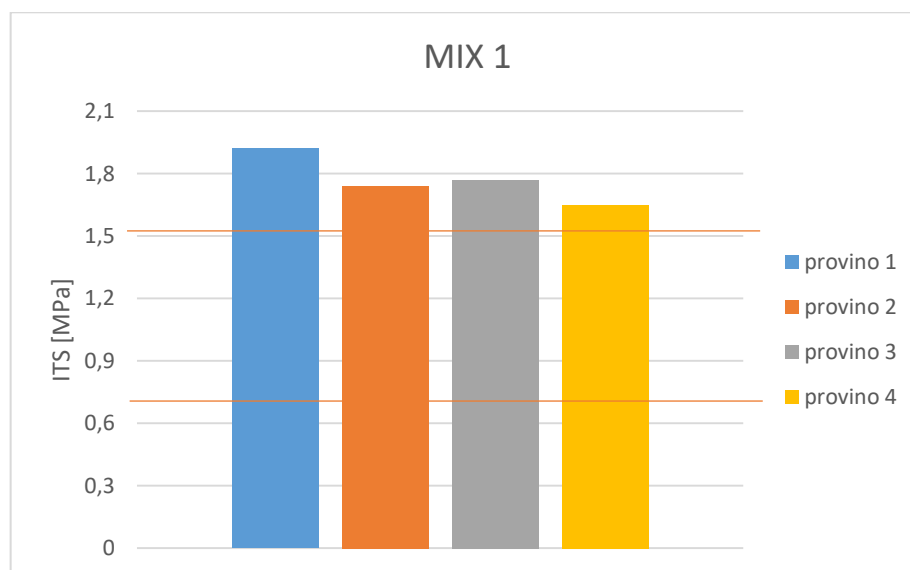


Fig.3.3 Istogramma dell'ITS del Mix1

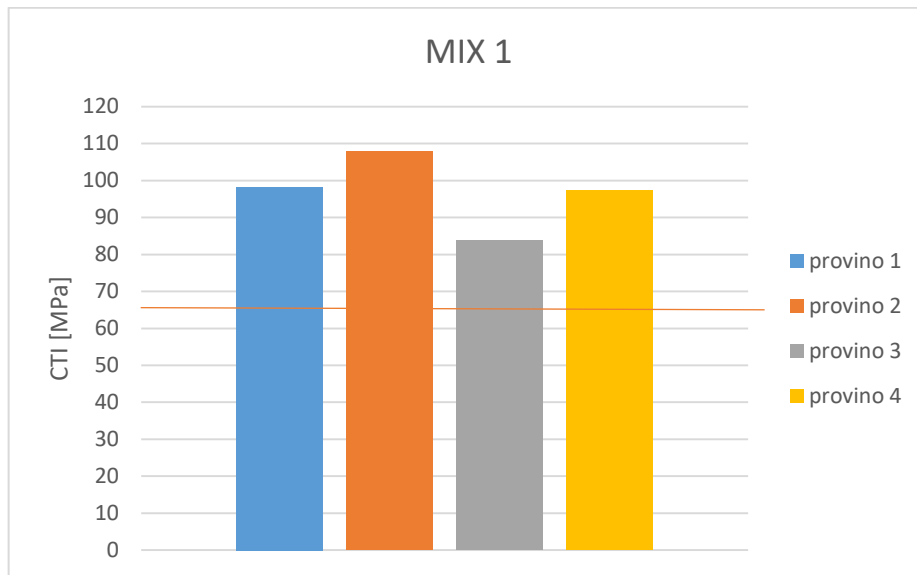


Fig.3.4 Istogramma del CTI del Mix1

Dai grafici dell'ITS si evince che i risultati ottenuti escono dal range richiesto dal capitolato, mentre i valori di CTI rispettano i limiti.

Di seguito si riporta la curva sforzo-deformazione della prova a trazione indiretta:

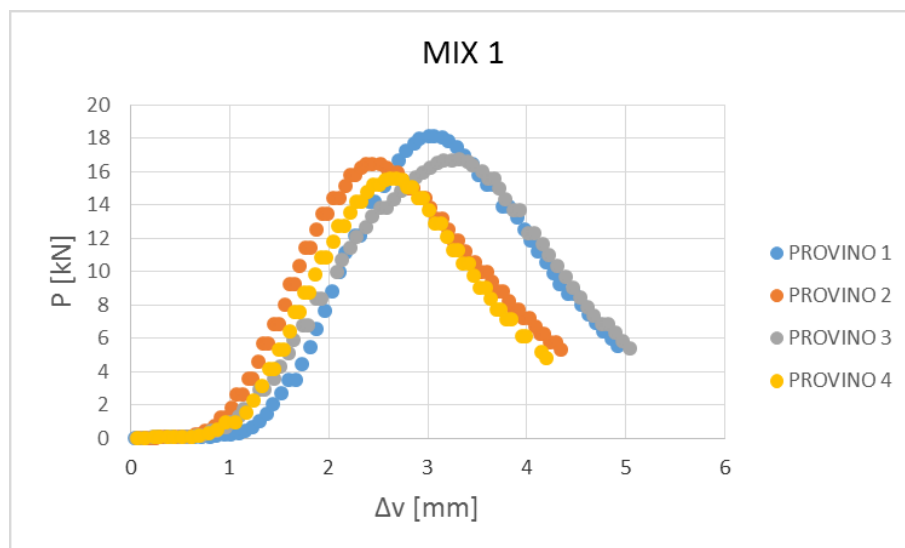


Fig.3.5 Curva sforzo-deformazione di tutti i provini del Mix 1

3.2 Mix 2

Il secondo impasto è stato realizzato utilizzando le quantità riportate in Tabella 3.5 :

Nome	% bitume totale	% bitume vergine	Tipo di bitume	% RAP	Tipo di RAP	% Additivo
Mix 2	5.2%	3,0%	Rigenerval non modificato	50	RAP grosso e fino	0

Tab.3.5 Mix design del Mix 2

Di seguito verranno riportati i risultati ricavati dalla miscela appena descritta relativi al volume dei vuoti, al modulo di rigidezza e alla resistenza a trazione indiretta.

3.2.1. Caratteristiche volumetriche

No. Provino	No. Giri	m [g]	hm [mm]	$\rho_{b,geom}$ [g/cm ³]	$\rho_{b,sea}$ [g/cm ³]	Pb [%]	Pa [%]	ρ_B [g/cm ³]	ρ_A [g/cm ³]	ρ_m [g/cm ³]	$V_{m,geom}$ [%]
1	100	1100.8	61.33	2.285	0.912	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	7.5
2	100	1099.1	61.05	2.292	0.915	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	7.2
3	100	1080.7	61.025	2.255	0.900	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	8.7
4	100	1088.8	60.875	2.277	0.909	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	7.8

Tab.3.6 Calcolo del volume dei vuoti del Mix 2

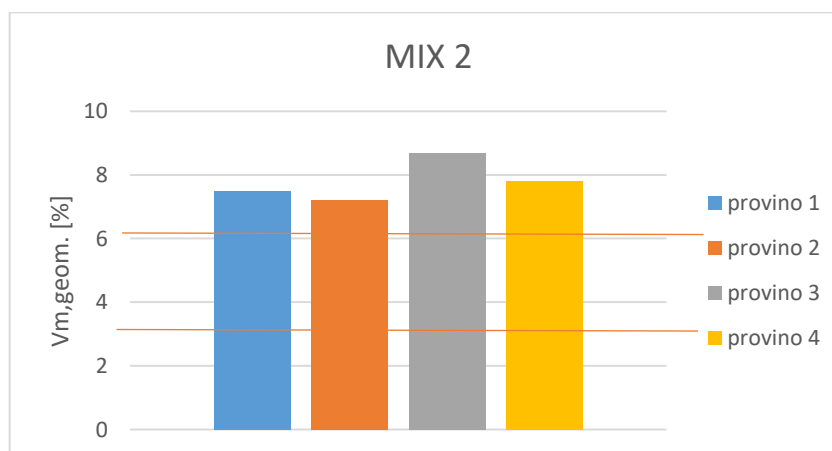


Fig.3.6 Istogramma del Mix 2

Dal grafico si nota come tutti i provini non rientrano nel range fornito dal Capitolato ANAS.

3.2.2. Modulo a trazione indiretta

No. Provino	No. Giri	ITSM'	ITSM''	ITSM_medio
1	100	6004	5925	5964,5
2	100	6762	6449	6605,5
3	100	5714	5607	5661
4	100	7913	7664	7788,5

Tab.3.7: Risultati della prova di modulo a trazione indiretta del Mix1

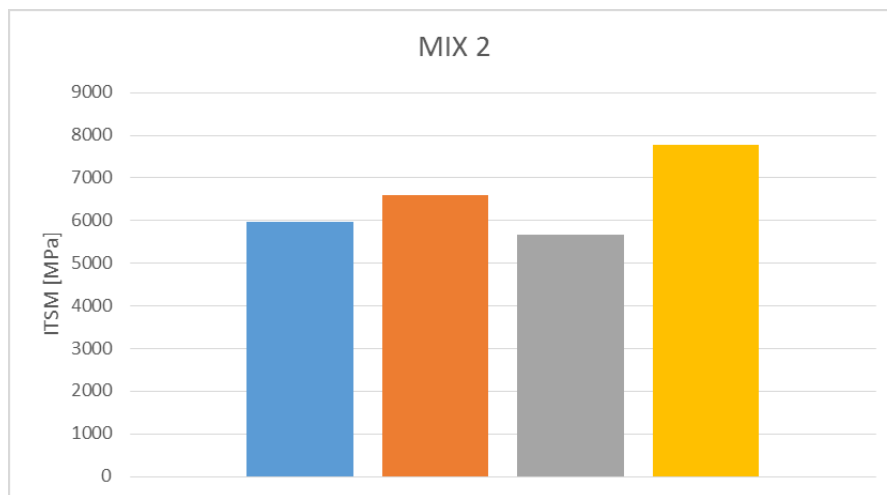


Fig. 3.7 Istogramma del modulo a trazione indiretta del Mix 2

3.2.3 Resistenza a trazione indiretta

No. Provino	No. Giri	P [kN]	ITS [Mpa]	ϵ	CTI [Mpa]	E' [J]	E'' [J]	Etot [J]
1	100	11.11	1.15	0.026732	67.57	13,13	20,55	33,68
2	100	12.17	1.27	0.035251	56.59	15,91	21,89	37,8
3	100	10.73	1.12	0.02734	64.35	14,09	20,74	34,83
4	100	12.39	1.3	0.025656	79.59	13,61	20,09	33,7

Tab. 3.8 Risultati della prova a trazione indiretta del Mix 2

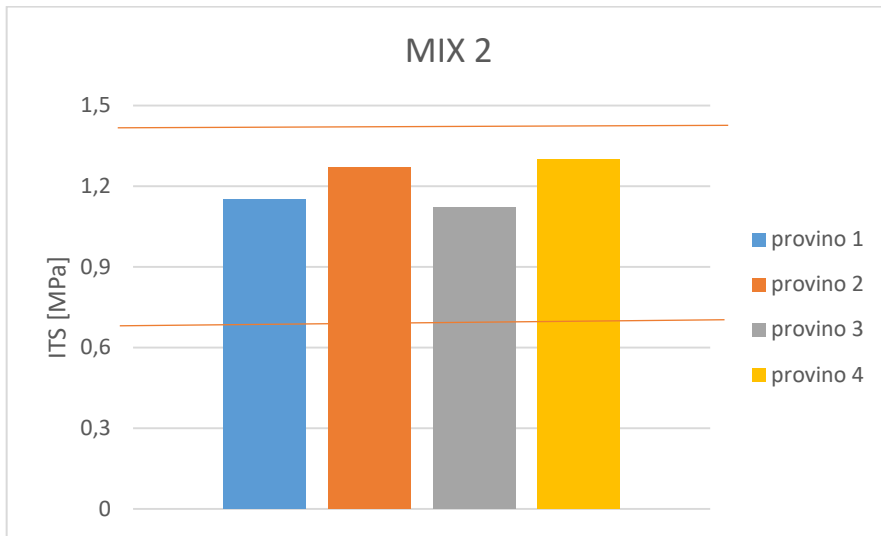


Fig. 3.8 Istogramma dell'ITS del Mix2

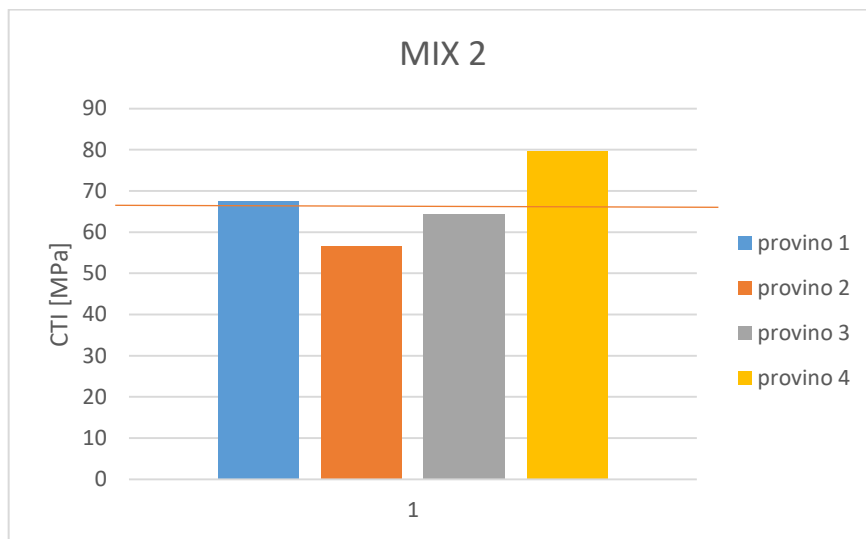


Fig.3.9 Istogramma del CTI del Mix 2

Di seguito si riporta la curva sforzo-deformazione della prova a trazione indiretta:

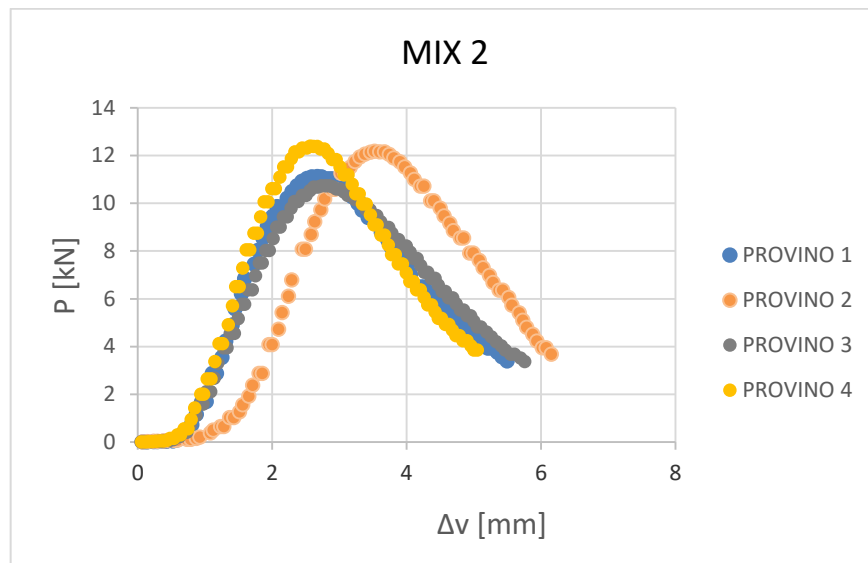


Fig.3.10 Curva di deformazione di tutti i provini del Mix 2

3.3 Mix 3

Il terzo impasto è stato realizzato utilizzando le quantità riportate in Tabella 3.9:

Nome	% bitume totale	% bitume vergine	Tipo di bitume	% RAP	Tipo di RAP	% Additivo
Mix3	5.2%	3,0%	Rigenerval non modificato	50	RAP grosso e fino	0

Tab.3. 9 Mix design del Mix 3

Di seguito verranno riportati i risultati ricavati dalla miscela appena descritta relativi al volume dei vuoti, al modulo di rigidezza e alla resistenza a trazione indiretta.

3.3.1. Caratteristiche volumetriche

No. Provino	No. Giri	m [g]	hm [mm]	$\rho_{b,geom}$ [g/cm ³]	$\rho_{b,sea}$ [g/cm ³]	Pb [%]	Pa [%]	ρ_B [g/cm ³]	ρ_A [g/cm ³]	ρ_m [g/cm ³]	$V_{m,geom}$ [%]
1	100	1111.5	60.90	2.324	0.903	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	6.0
2	100	1099.5	59.6875	2.345	0.911	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	5.1
3	100	1093	60.075	2.317	0.900	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	6.2
4	100	1094.5	60.075	2.320	0.901	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	6.1

Tab.3.10 Calcolo del volume dei vuoti del Mix 3

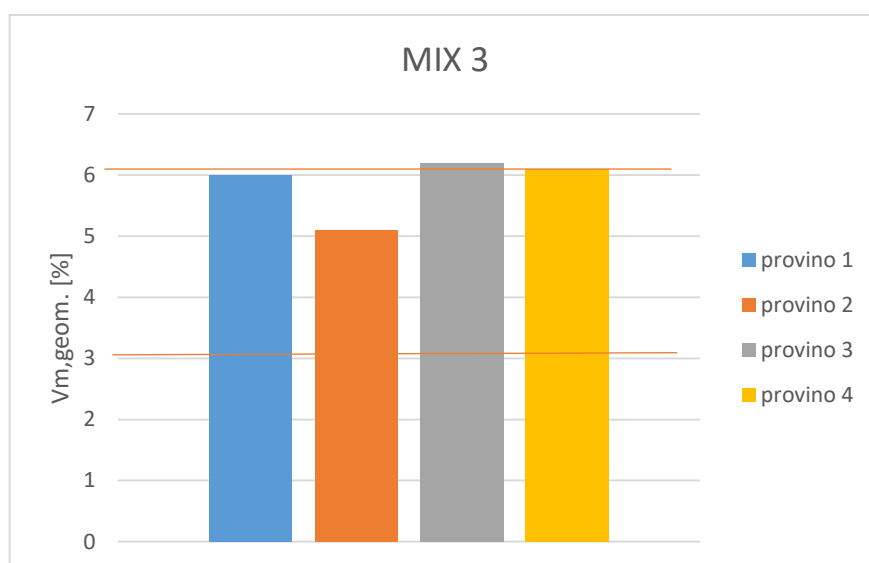


Fig. 3.11 Istogramma del Mix 3

Dal grafico si nota come tutti i provini non rientrano nel range fornito dal Capitolato ANAS.

3.3.2. Modulo a trazione indiretta

No. Provino	No. Giri	ITSM'	ITSM''	ITSM_medio
1	100	4303	3944	4123,5
2	100	5961	5462	5711,5
3	100	5441	5580	5511
4	100	6895	6490	6692,5

Tab.3.11: Risultati della prova di modulo a trazione indiretta del Mix3

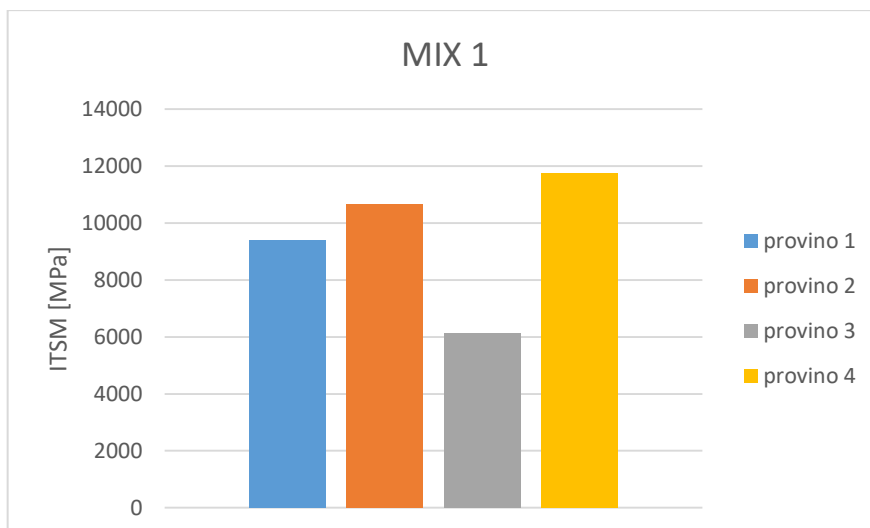


Fig.3.12 Istogramma del modulo a trazione indiretta del Mix 3

3.3.3 Resistenza a trazione indiretta

No. Provino	No. Giri	P [kN]	ITS [Mpa]	ϵ	CTI [Mpa]	E' [J]	E'' [J]	Etot [J]
1	100	9.89	1.03	0.031171	51.9	13,88	23,96	37,84
2	100	10.93	1.17	0.035646	51.56	14,84	27,70	42,54
3	100	10.58	1.12	0.030107	58.43	14,80	20,49	35,29
4	100	11.72	1.24	0.04177	46.63	17,09	22,00	39,09

Tab. 3.12 Risultati della prova a trazione indiretta del Mix 3

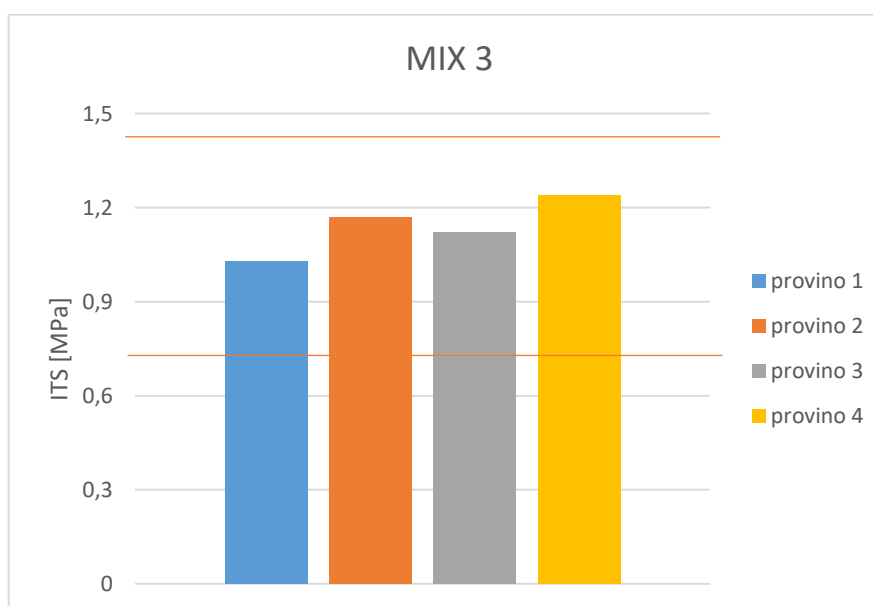


Fig.3.13 Istogramma dell'ITS del Mix 3

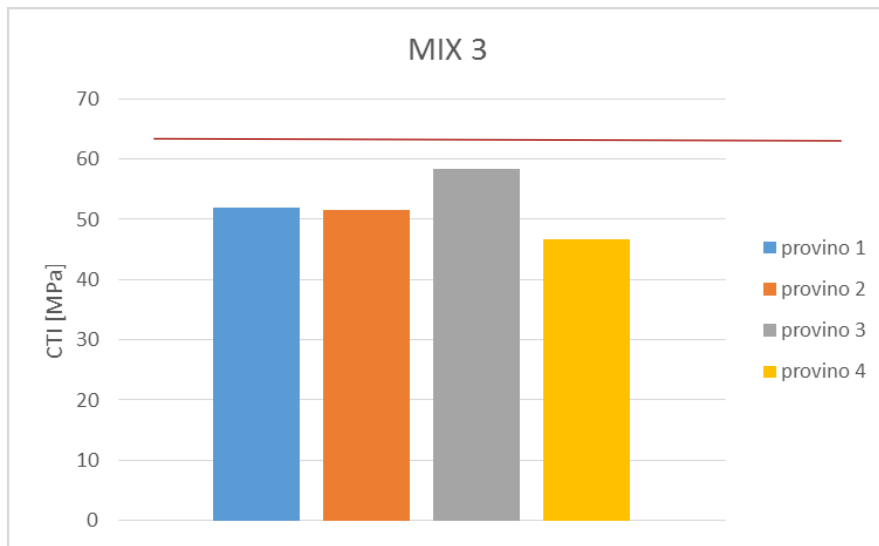


Fig.3.14 Istogramma del CTI del Mix 3

Di seguito si riporta la curva sforzo-deformazione della prova a trazione indiretta:

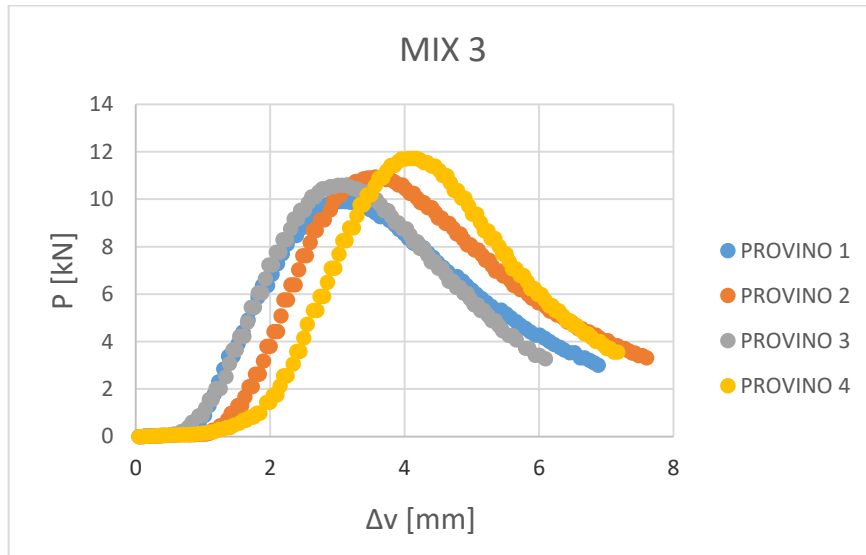


Fig.3.15 Curva sforzo-deformazione di tutti i provini del Mix 3

3.4 Mix4

Il quarto impasto è stato realizzato utilizzando le quantità riportate in Tabella 3.13:

Nome	% bitume totale	% bitume vergine	Tipo di bitume	% RAP	Tipo di RAP	% Additivo
Mix 4	5.2%	3,0%	Rigenerval Hard	50	RAP grosso e fino	0

Tab.3.13 Mix design del Mix 4

Di seguito verranno riportati i risultati ricavati dalla miscela appena descritta relativi al volume dei vuoti, al modulo di rigidezza e alla resistenza a trazione indiretta.

3.4.1. Caratteristiche volumetriche

No. Provino	No. Giri	m [g]	hm [mm]	$\rho_{b,geom}$ [g/cm ³]	$\rho_{b,sea}$ [g/cm ³]	Pb [%]	Pa [%]	ρ_B [g/cm ³]	ρ_A [g/cm ³]	ρ_m [g/cm ³]	$V_{m,geom}$ [%]
1	100	1095.4	59.95	2.326	0.891	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	5.8
2	100	1091.8	59.475	2.337	0.895	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	5.4
3	100	1083.5	58.7	2.350	0.900	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	4.9
4	100	1075	58.65	2.334	0.894	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	5.6

Tab.3.14 Calcolo del volume dei vuoti del Mix 4

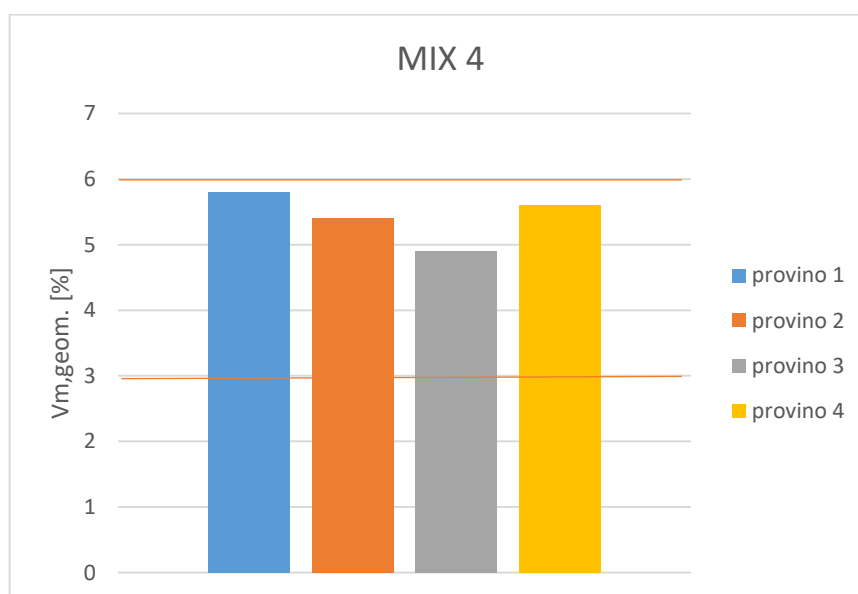


Fig.3.16 Istogramma vuoti del Mix 4

3.4.2. Modulo a trazione indiretta

No. Provino	No. Giri	ITSM'	ITSM''	ITSM_medio
1	100	6461	5737	6099
2	100	6261	5879	6070
3	100	6500	5800	6150
4	100	6266	5693	5979,5

Tab.3.15: Risultati della prova di modulo a trazione indiretta del Mix4

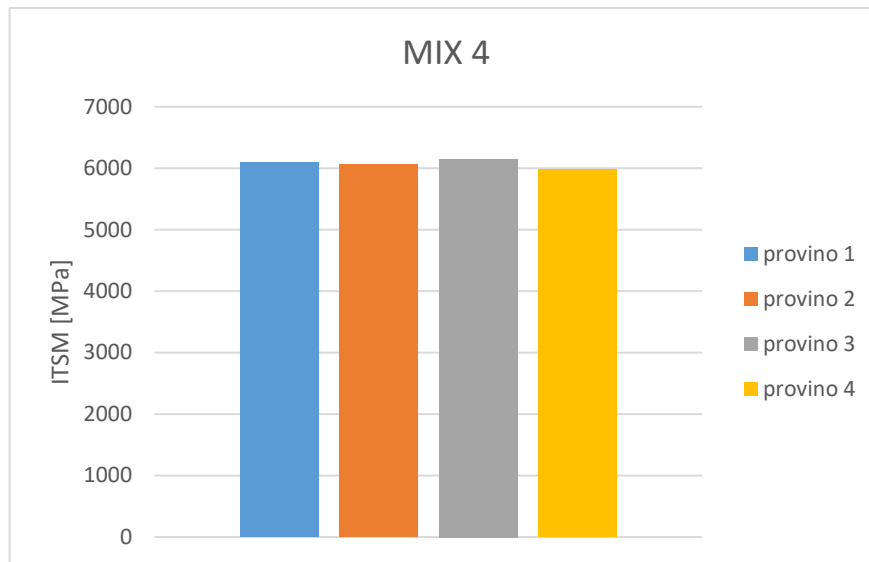


Fig. 3.17 Istogramma del modulo a trazione indiretta del Mix 4

3.4.3 Resistenza a trazione indiretta

No. Provino	No. Giri	P [kN]	ITS [Mpa]	ϵ	CTI [Mpa]	E' [J]	E'' [J]	Etot [J]
1	100	12.93	1.37	0.030041	71.63	16,53	32,18	48,71
2	100	11.87	1.27	0.032202	61.95	16,98	28,78	45,76
3	100	12.42	1.35	0.03024	70.12	16,68	26,56	43,24
4	100	12.25	1.33	0.029681	70.39	16,85	27,10	43,95

Tab. 3.16 Risultati della prova a trazione indiretta del Mix 4

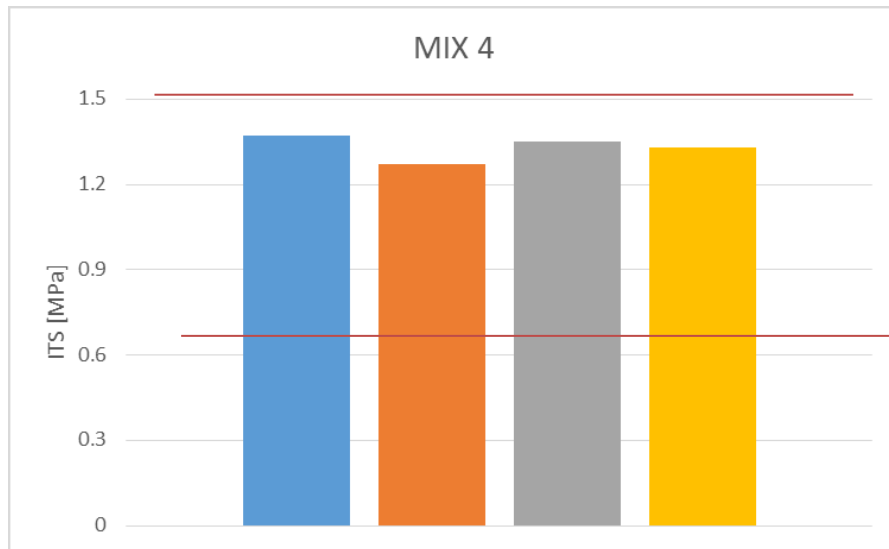


Fig.3.18 Istogramma dell'ITS del Mix 4

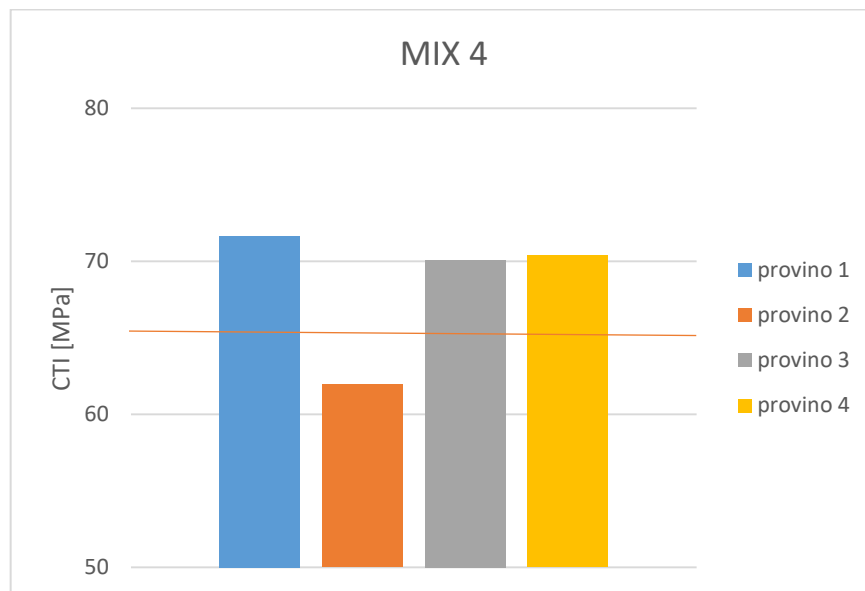


Fig. 3.19 Istogramma del CTI del Mix 4

Di seguito si riporta la curva sforzo-deformazione della prova a trazione indiretta:

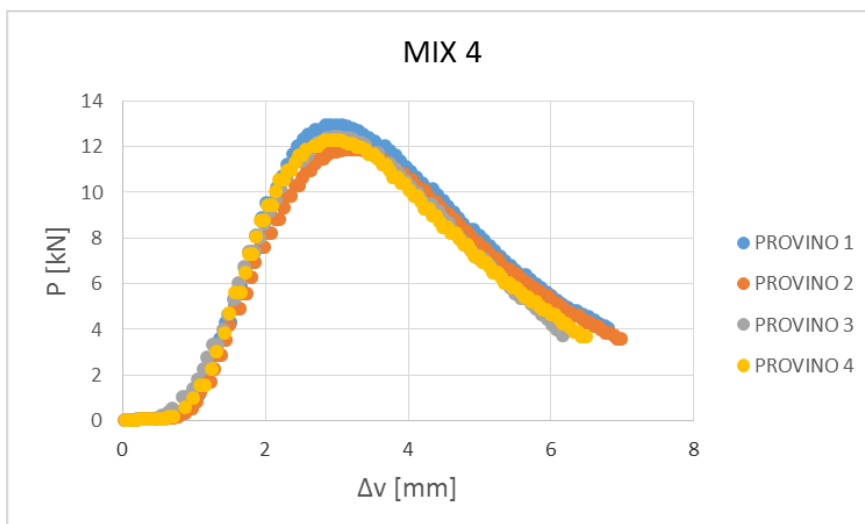


Fig.3.20 Curva sforzo-deformazione di tutti i provini del Mix 4

3.5. Mix 5

Il quinto impasto è stato realizzato utilizzando le quantità riportate in Tabella 3.17:

Nome	% bitume totale	% bitume vergine	Tipo di bitume	% RAP e tipo	Additivo	% Additivo
Mix 5	5.2%	3,0%	50/70 API	RAP grosso e fino , 50%	ACF1000	6 sul bitume del RAP

Tab.3.17 Mix design del Mix 5

Di seguito verranno riportati i risultati ricavati dalla miscela appena descritta relativi al volume dei vuoti, al modulo di rigidezza e alla resistenza a trazione indiretta.

3.5.1. Caratteristiche volumetriche

No. Provino	No. Giri	m [g]	hm [mm]	$\rho_{b,geom}$ [g/cm ³]	$\rho_{b,sea}$ [g/cm ³]	Pb [%]	Pa [%]	ρ_B [g/cm ³]	ρ_A [g/cm ³]	ρ_m [g/cm ³]	$V_{m,geom}$ [%]
1	100	1101.4	58.88	2.382	0.904	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	3.6
2	100	1092.7	58.775	2.367	0.898	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	4.2
3	100	1095.6	58.825	2.371	0.900	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	4.0
4	100	1091.6	60.125	2.312	0.877	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	6.4

Tab.3.18 Calcolo del volume dei vuoti del Mix 5

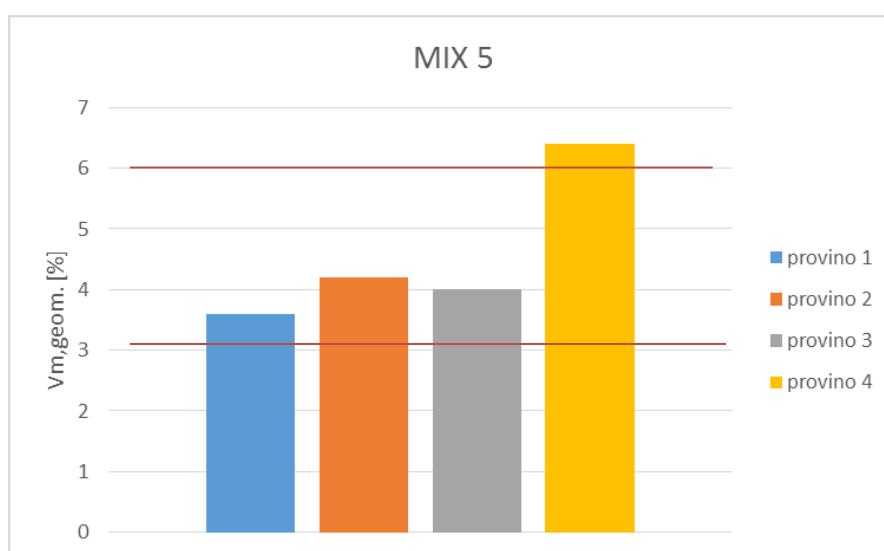


Fig. 3.21 Istogramma del Mix 5

3.5.2. Modulo a trazione indiretta

No. Provino	No. Giri	ITSM'	ITSM''	ITSM_medio
		[Mpa]	[Mpa]	[Mpa]
1	100	7839	7758	7798,5
2	100	8928	8802	8865
3	100	8468	8468	8323
4	100	7785	7785	8663

Tab.3.19 Risultati della prova di modulo a trazione indiretta del Mix5

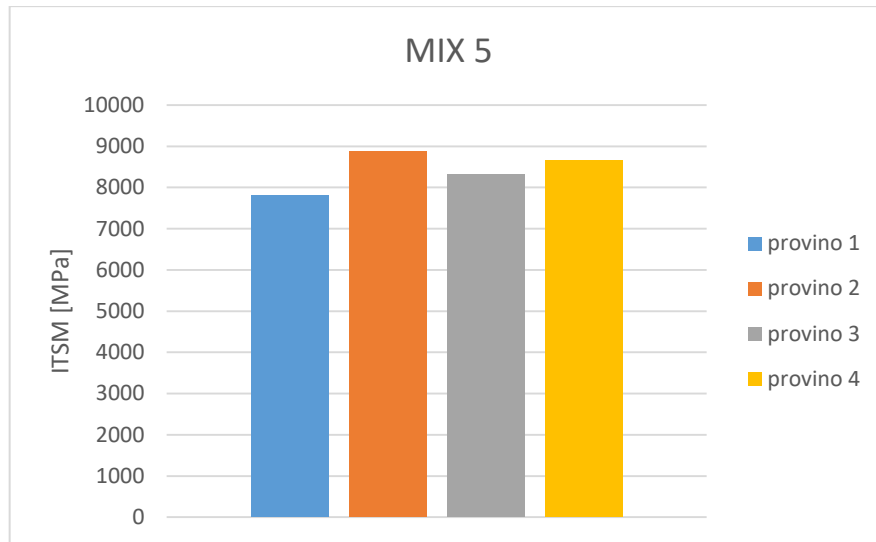


Fig.3.22 Istogramma del modulo a trazione indiretta del Mix 5

3.5.3 Resistenza a trazione indiretta

No. Provino	No. Giri	P [kN]	ITS [Mpa]	ϵ	CTI [Mpa]	E' [J]	E" [J]	Etot [J]
1	100	14.82	1.6	0.028624	87.8	16,66	27,82	44,48
2	100	14.63	1.59	0.025966	96.19	15,04	23,11	38,15
3	100	15.41	1.67	0.028111	93.32	16,59	23,12	39,71
4	100	14.09	1.49	0.032926	71.08	17,76	21,90	39,66

Tab. 3.20 Risultati della prova a trazione indiretta del Mix 5

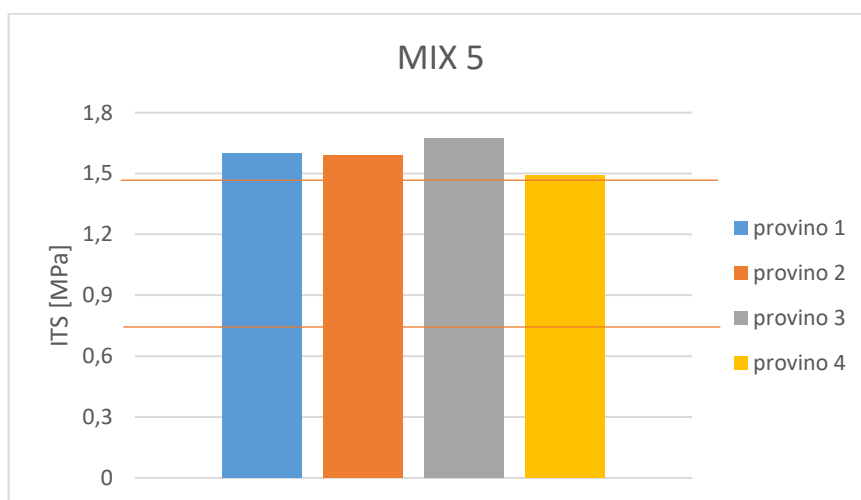


Fig. 3.23 Istogramma dell'ITS del Mix 5

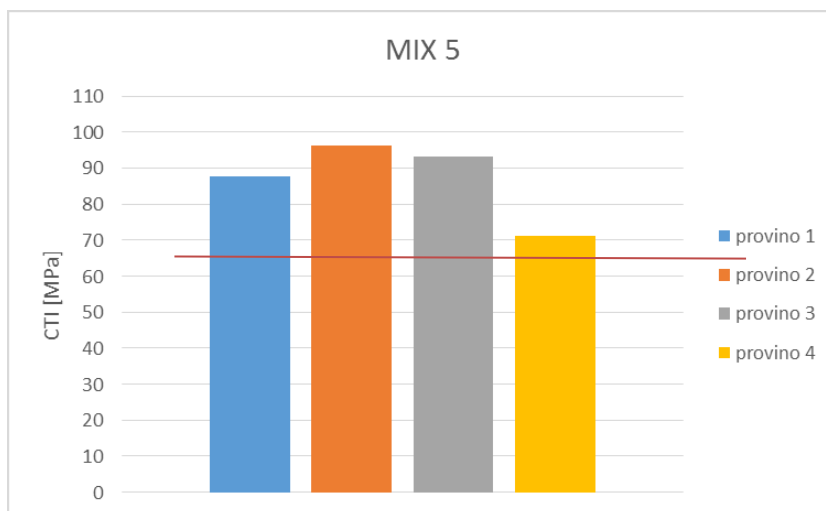


Fig. 3.24 Istogramma del CTI del Mix 5

Di seguito si riporta la curva sforzo-deformazione della prova a trazione indiretta:

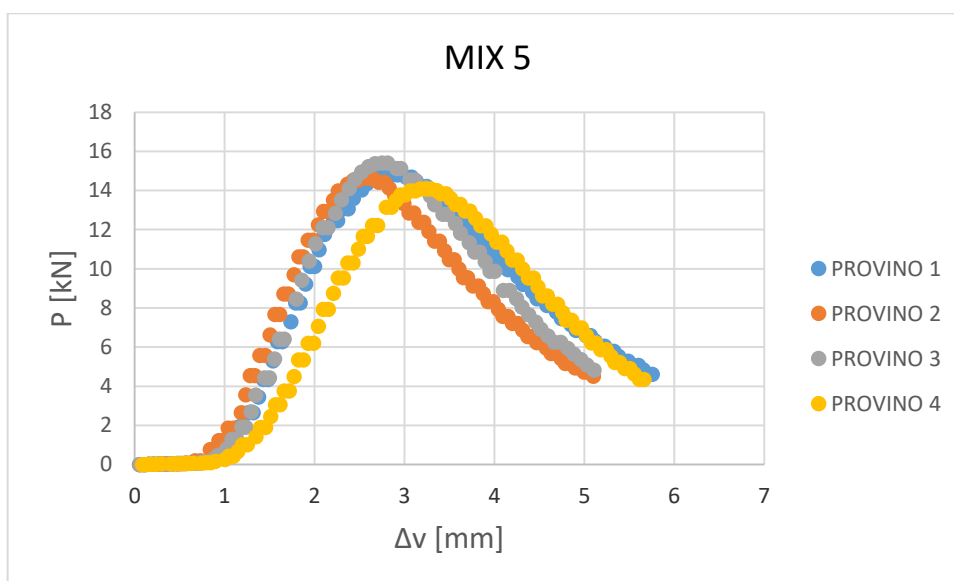


Fig. 3.25 Curva sforzo-deformazione di tutti i provini del Mix 5

3.6. Confronto tra le varie miscele

Si confrontano tra di loro i Mix 1, 3,4 e 5 in termini di caratteristiche volumetriche , modulo a trazione indiretta e resistenza a trazione indiretta.

Nel confronto non si tiene conto del Mix 2 poiché ha la stessa composizione del Mix 3 , ciò che varia è il tempo di permanenza del bitume rigeneroval in forno e si può osservare come il Mix 3 fornisce risultati migliori rispetto al Mix 2. Per questo nel confronto teniamo in considerazione solo il Mix 3.

► Caratteristiche volumetriche

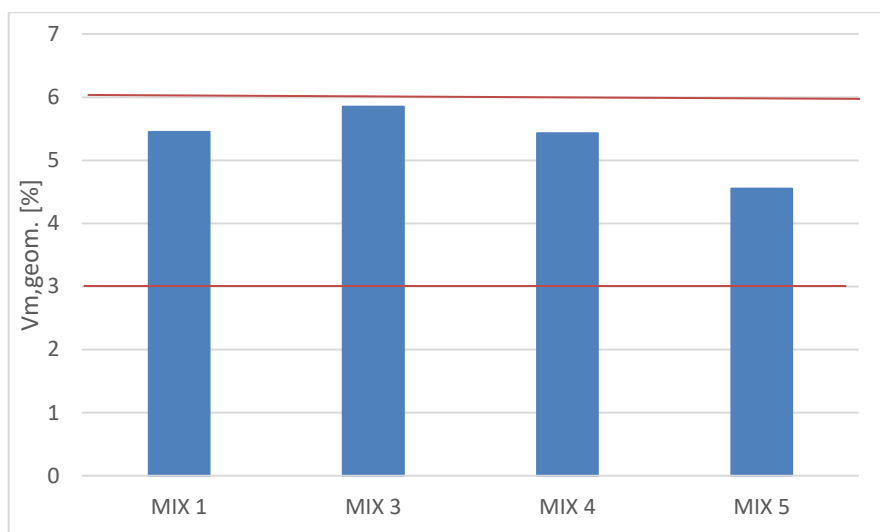


Fig. 3.26 Confronto del volume dei vuoti

Si può notare come tutte le miscele rientrano complessivamente nel range previsto dal Capitolato ANAS.

► Modulo a trazione indiretta

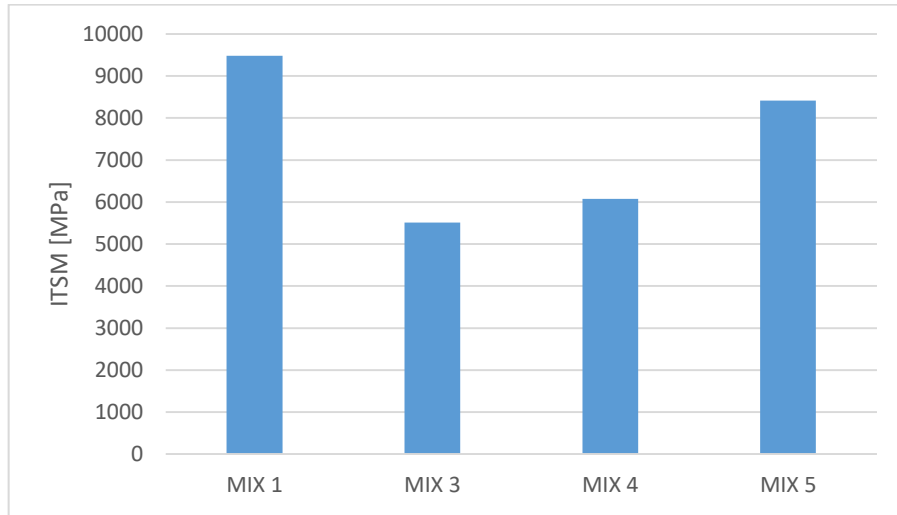


Fig. 3.27 Istogramma di confronto del modulo a trazione indiretta

Come si può vedere dal grafico, l'aggiunta di tutti gli additivi tende a far diminuire il modulo di rigidezza rispetto alla miscela realizzata senza nessun additivo, In particolare, si può notare come entrambi i Rigenerval danno un contributo maggiore rispetto ad ACF1000.

► Resistenza a trazione indiretta

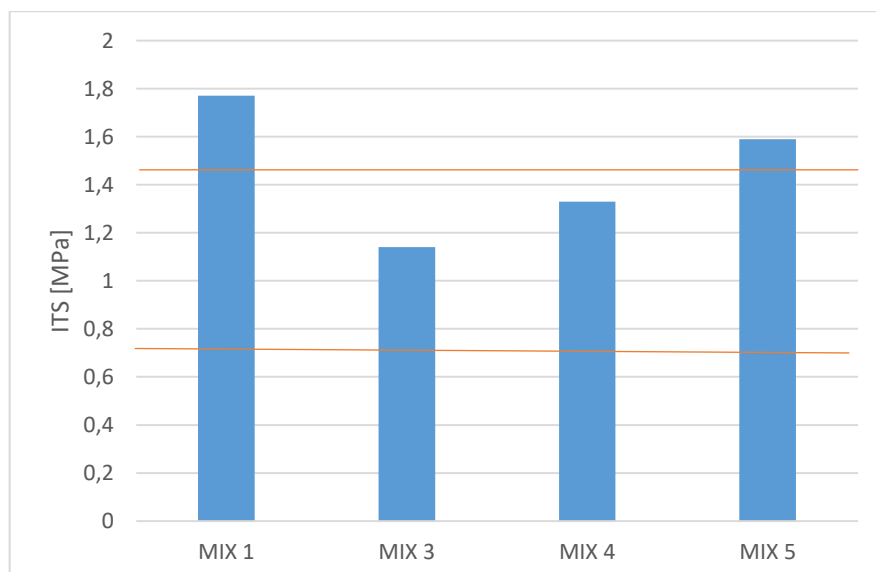


Fig.3.28 Istogramma di confronto dell'ITS

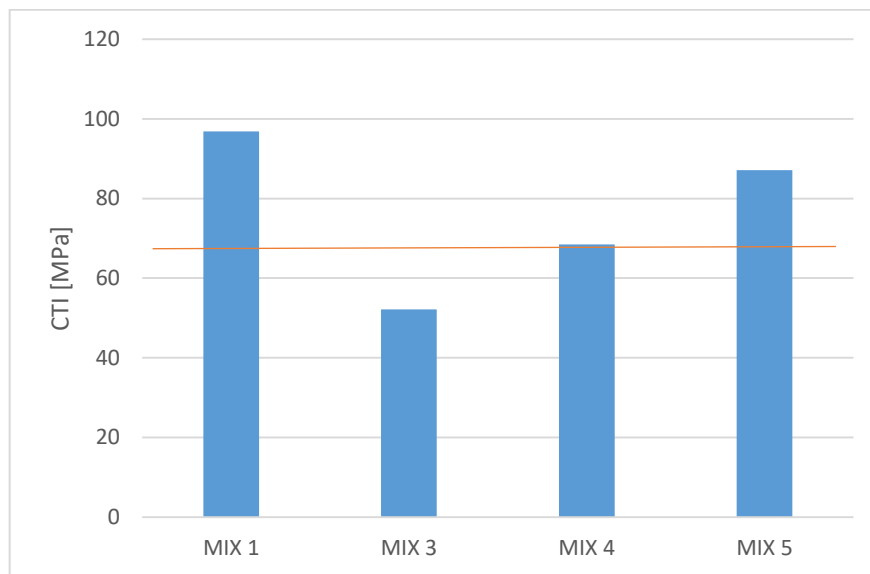


Fig. 3.29 Istogramma di confronto del CTI

Dai grafici risulta evidente come i due bitumi Rigenerval riescono a riportare il valore della resistenza a trazione indiretta all'interno del range di Capitolato. L'additivo ACF diminuisce un po' il valore di ITS ma non lo riporta ancora su valori accettabili.

Per quanto riguarda il coefficiente di trazione indiretta si può notare come tutte le miscele rispettino le prescrizioni tranne il mix realizzato con Rigenerval non modificato.

L'unico impasto che rispetta entrambi i requisiti (ITS, CTI) risulta quindi essere quello realizzato inserendo Rigenerval modificato.

	ITSM [Mpa]	ITS [Mpa]	CTI [Mpa]	V _{m,geom.} [%]
MIX 1	9479.5	1.77	96.8	5.45
MIX 3	5509.5	1.14	52.13	5.85
MIX 4	6074.6	1.33	68.5	5.43
MIX 5	8412.3	1.59	87.1	4.55

Tab.3.21 Valori di confronto riassuntivi

3.7 Mix A

Questo impasto è stato realizzato utilizzando le quantità riportate in Tabella 34:

Nome	% bitume totale	% bitume vergine	Tipo di bitume	% RAP	Tipo di RAP	% Additivo
Mix A	5.2%	3,0%	Rigenerval non modificato	50	RAP grosso e fino	0

Tab.3.22 Mix design del Mix A

Di seguito verranno riportati i risultati ricavati dalla miscela appena descritta relativi al volume dei vuoti e alle deformazioni permanenti.

3.7.1. Caratteristiche volumetriche

No. Provino	No. Giri	m [g]	hm [mm]	$\rho_{b,geom}$ [g/cm ³]	Pb [%]	Pa [%]	ρ_B [g/cm ³]	ρ_A [g/cm ³]	ρ_m [g/cm ³]	$V_{m,geom}$ [%]
1	100	1351.7	80.50	2.376	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	3.8
2	100	1345.1	80.15	2.375	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	3.9
3	100	1341.2	79.975	2.417	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	2.2

Tab. 3.23 Calcolo del volume dei vuoti del Mix A

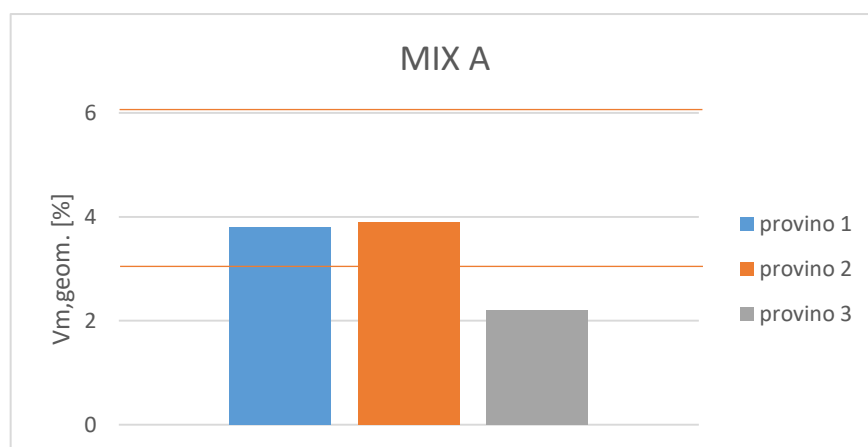


Fig.3.30 Istogramma del Mix A

3.7.2. Deformazioni permanenti

Nei grafici di seguito è riportata l'elaborazione delle prove di deformazione permanente.

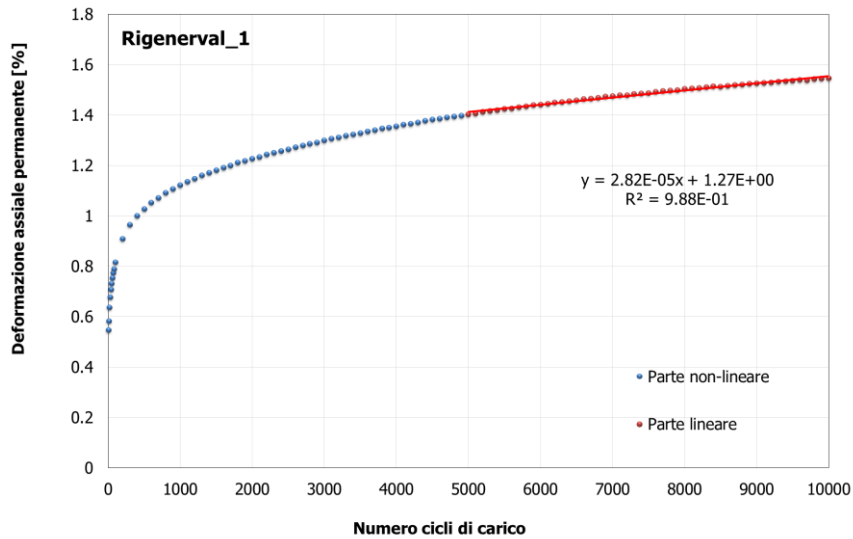


Fig.3.31 Deformazione primo provino Mix A con legge lineare

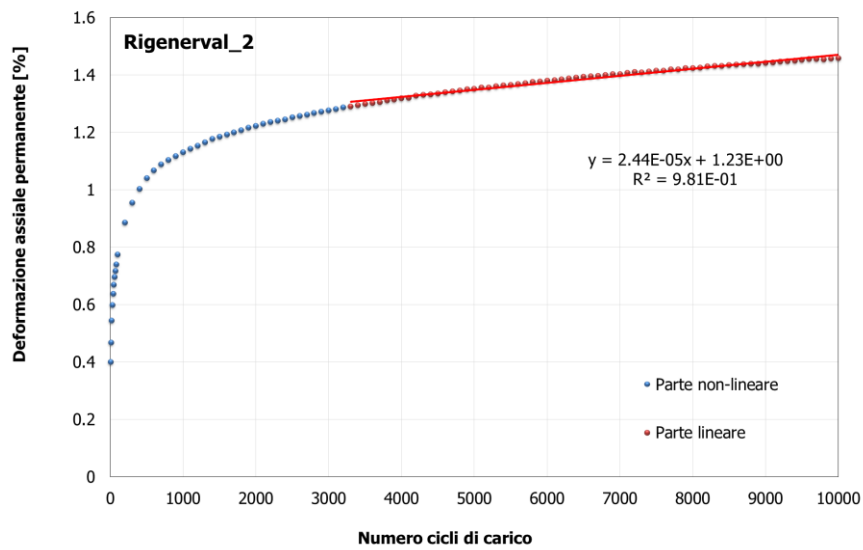


Fig. 3.32 Deformazione secondo provino Mix A con legge lineare

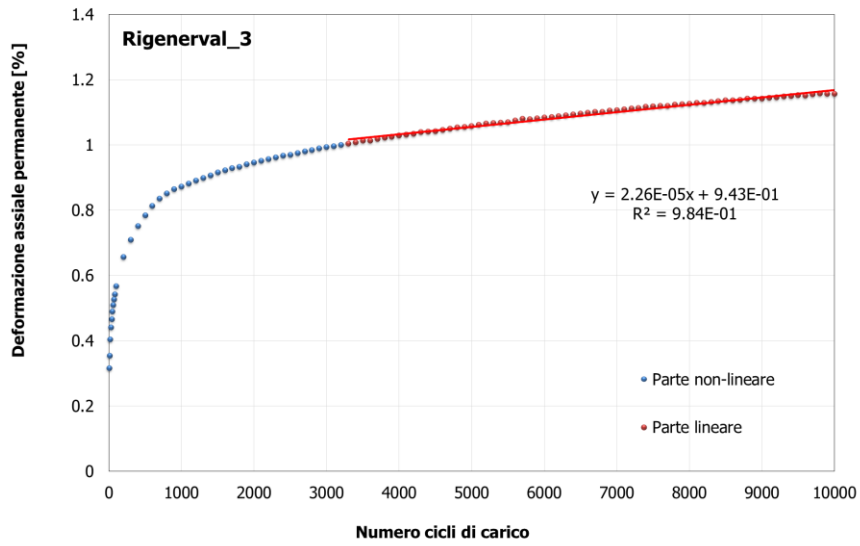


Fig. 3.33 Deformazione terzo provino Mix A con legge lineare

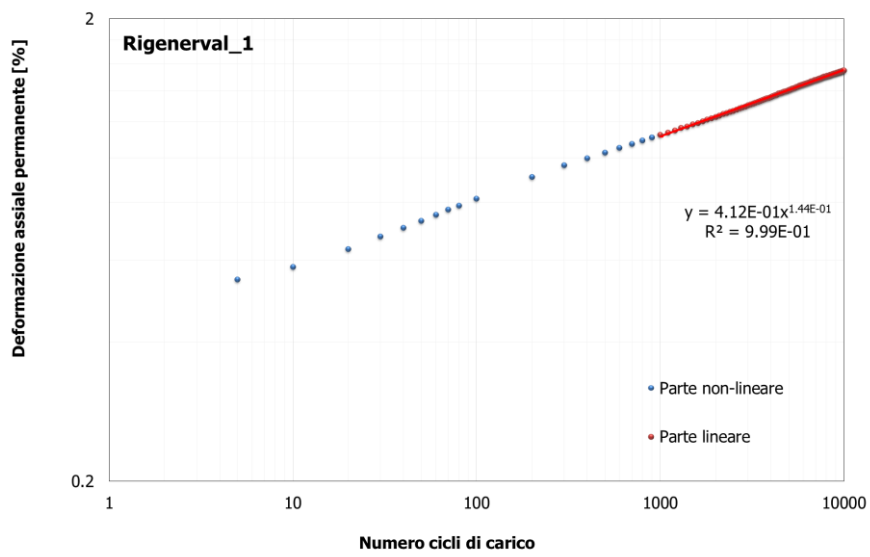


Fig.3.34 Deformazione primo provino Mix A con legge di potenza

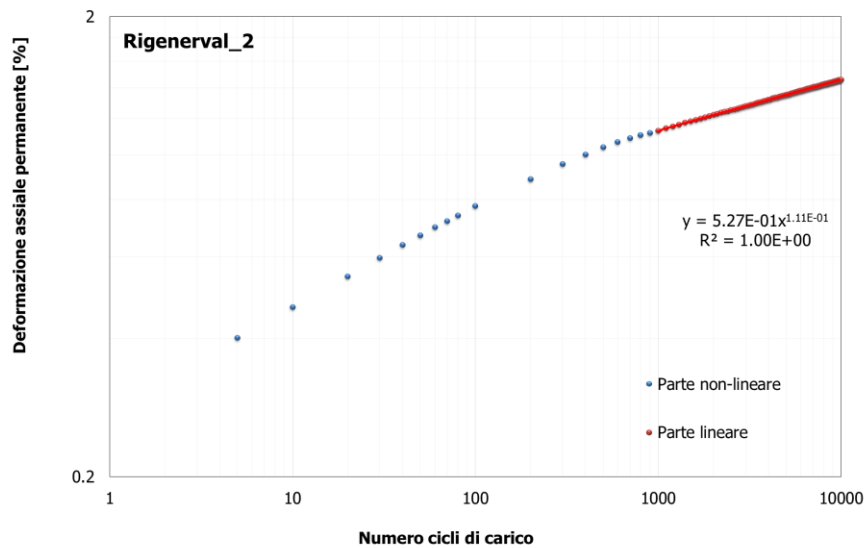


Fig.3.35 Deformazione secondo provino MixA con legge di potenza

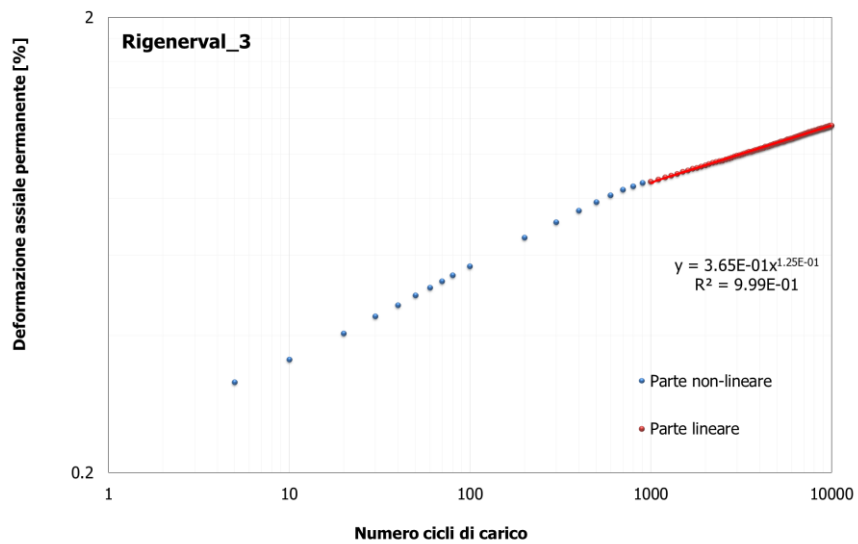


Fig.3.36 Deformazione terzo provino Mix A con legge di potenza

L'interpolazione dei punti sperimentali è stata fatta utilizzando sia una legge lineare che una legge di potenza. Il valore di R^2 è comunque sempre molto alto, segno che la regressione è affidabile.

3.8 Mix B

Questo impasto è stato realizzato utilizzando le quantità riportate in Tabella 3.24:

Nome	% bitume vergine	Tipo di bitume	% RAP	% Additivo
Mix B	5,0%	Nynas 50/70	0	0

Tab.3.24 Mix design del Mix B

Di seguito verranno riportati i risultati ricavati dalla miscela appena descritta relativi al volume dei vuoti e alle deformazioni permanenti.

3.8.1. Caratteristiche volumetriche

No. Provino	No. Giri	m [g]	hm [mm]	$\rho_{b,geom}$ [g/cm ³]	Pb [%]	Pa [%]	ρ_B [g/cm ³]	ρ_A [g/cm ³]	ρ_m [g/cm ³]	$V_{m,geom}$ [%]
1	100	1375.8	81.48	2.433	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	1.5
2	100	1352	80.9	2.460	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	0.4
3	100	1362.6	80.725	2.432	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	1.6

Tab.3.25 Calcolo del volume dei vuoti del Mix B

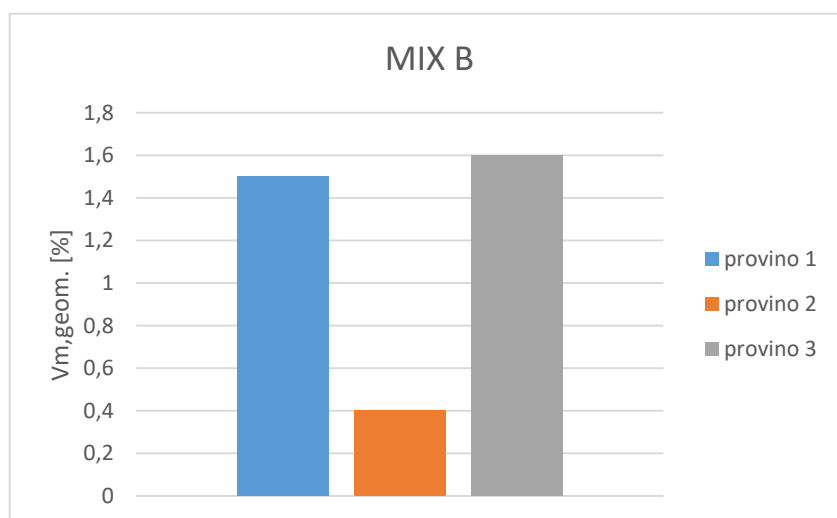


Fig. 3.37 Istogramma del Mix B

3.8.2. Deformazioni permanenti

Nei grafici di seguito è riportata l'elaborazione delle prove di deformazione permanente.

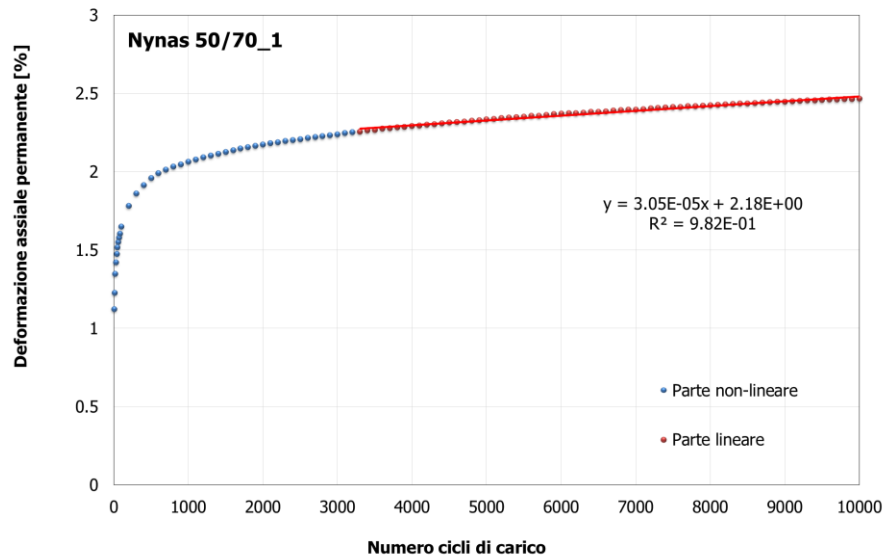


Fig.3.38 Deformazione primo provino Mix B con legge lineare

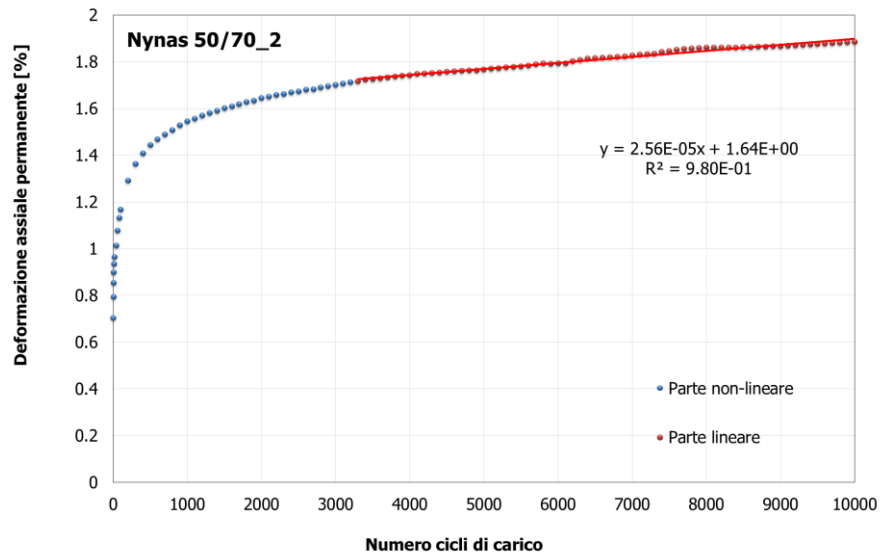


Fig.3.39 Deformazione secondo provino Mix B con legge lineare

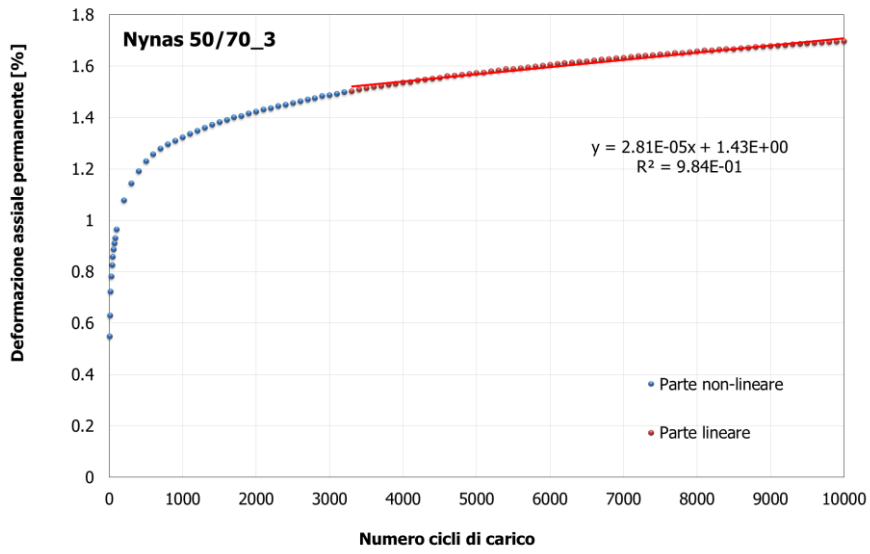


Fig.3.40 Deformazione terzo provino Mix B con legge lineare

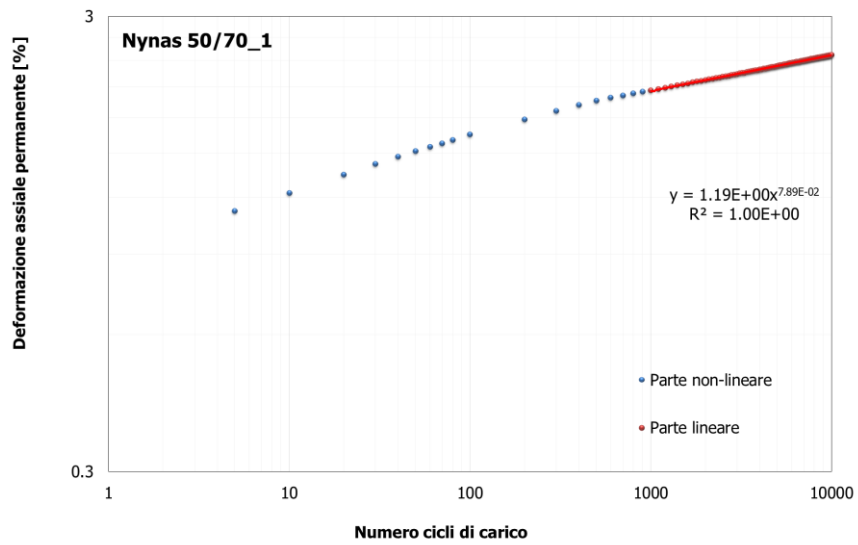


Fig.3.41 Deformazione primo provino Mix B con legge di potenza

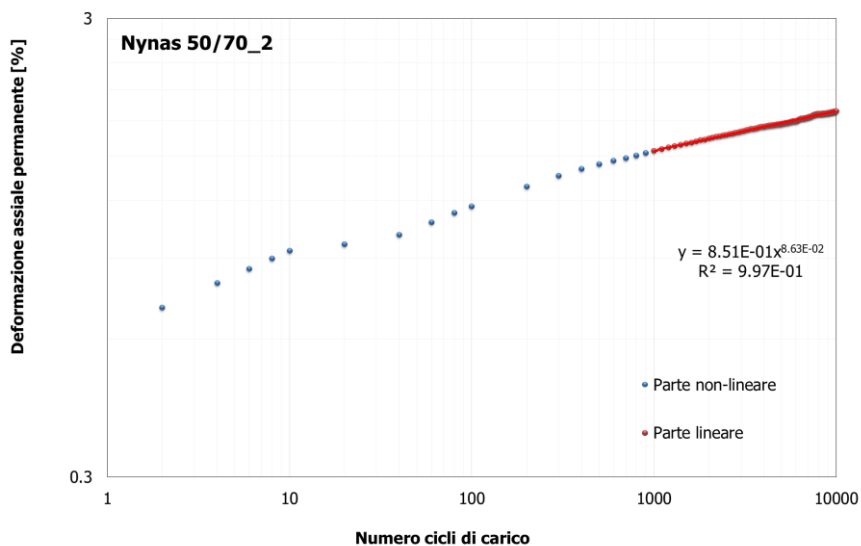


Fig.3.42 Deformazione secondo provino Mix B con legge di potenza

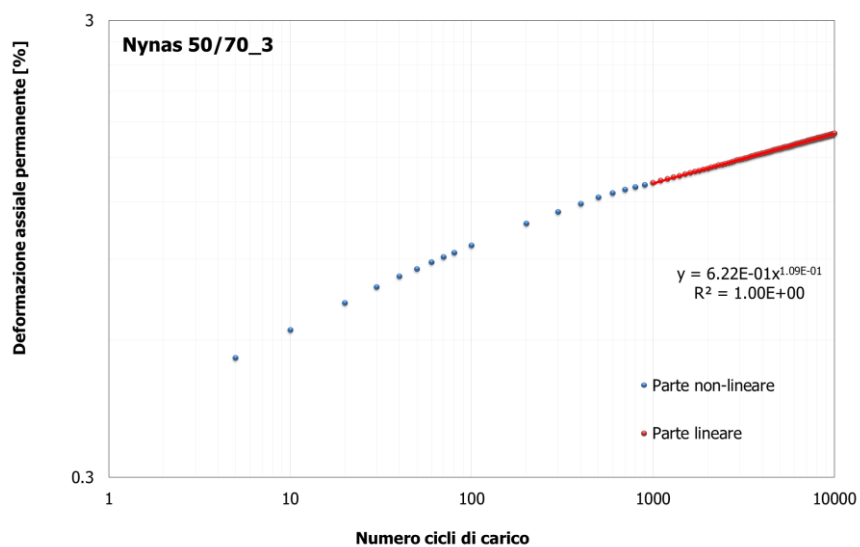


Fig.3.43 Deformazione terzo provino Mix B con legge di potenza

L'interpolazione dei punti sperimentali è stata fatta utilizzando sia una legge lineare che una legge di potenza. Il valore di R^2 è comunque sempre molto alto, segno che la regressione è affidabile.

3.9 Mix C

Questo impasto è stato realizzato utilizzando le quantità riportate in Tabella 3.26:

Nome	% bitume totale	% bitume vergine	Tipo di bitume	% RAP	Additivo	% Additivo
Mix C	5.0%	3,0%	Nybit E 190	40	Iterlow-T	0,5% in peso sul bitume

Tab.3.26 Mix design del Mix C

Di seguito verranno riportati i risultati ricavati dalla miscela appena descritta relativi al volume dei vuoti e alle deformazioni permanenti.

3.9.1. Caratteristiche volumetriche

No. Provino	No. Giri	m [g]	hm [mm]	$\rho_{b,geom}$ [g/cm ³]	Pb [%]	Pa [%]	ρ_B [g/cm ³]	ρ_A [g/cm ³]	ρ_m [g/cm ³]	$V_{m,geom}$ [%]
1	100	1329.5	80.15	2.390	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	3.3
2	100	1340.1	80.15	2.461	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	0.4
3	100	1341.3	80.3	2.459	5.2	94.8	1.02	2.68	2.471	0.5

Tab.3.27 Calcolo del volume dei vuoti del Mix C

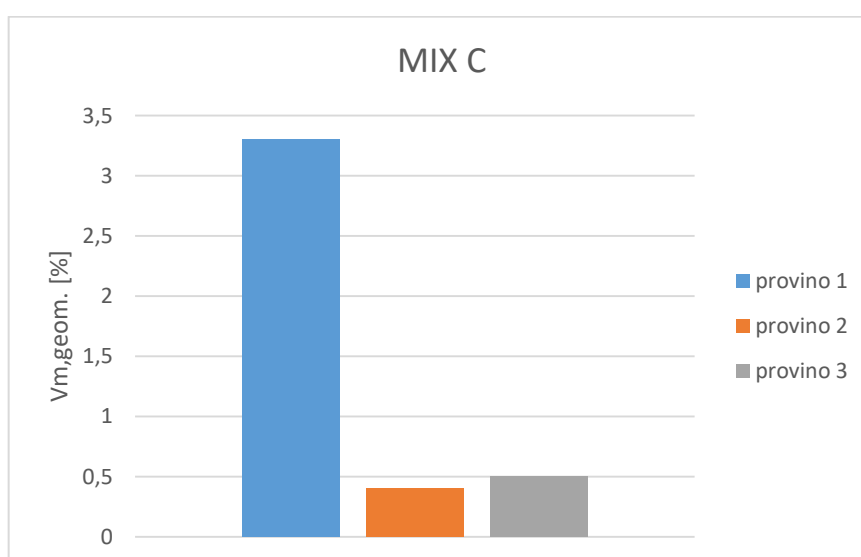


Fig. 3.44 Istogramma del Mix C

3.9.2. Deformazioni permanenti

Nei grafici di seguito è riportata l'elaborazione delle prove di deformazione permanente.

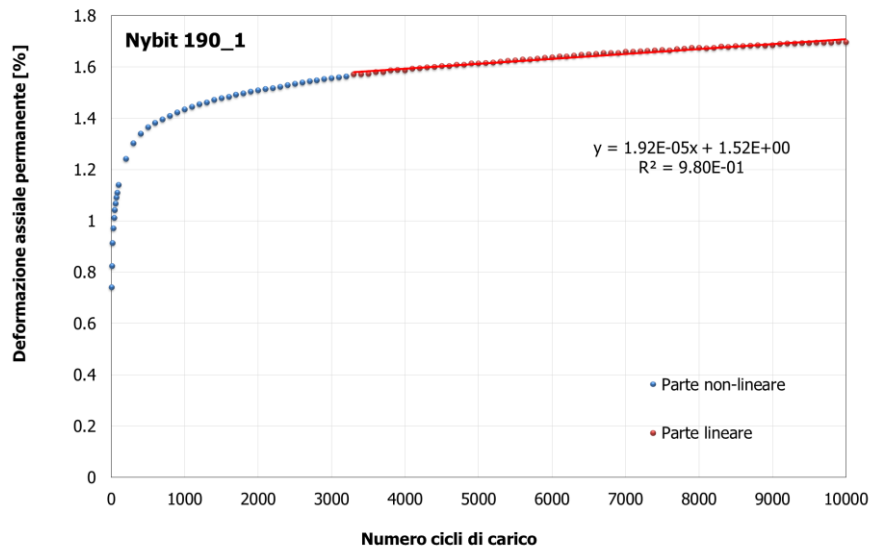


Fig.3.45 Deformazione primo provino Mix C con legge lineare

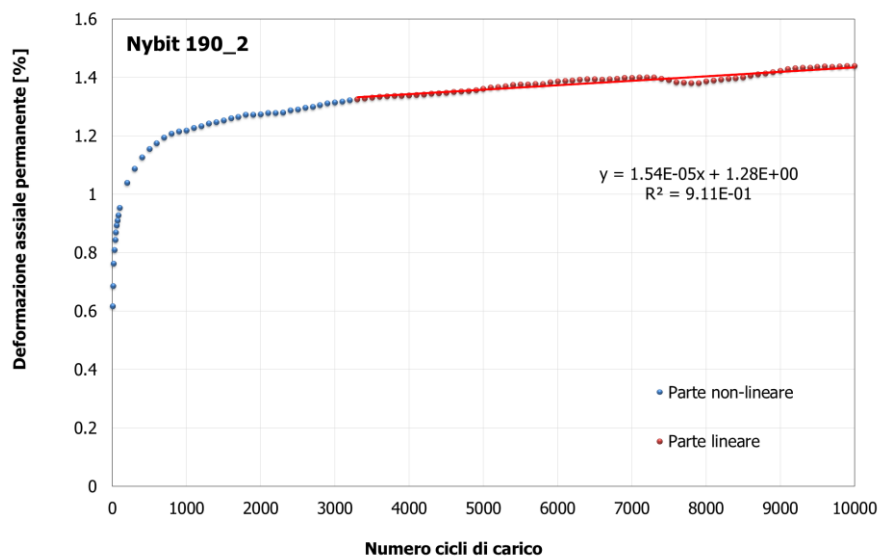


Fig.3.46 Deformazione secondo provino Mix C con legge lineare

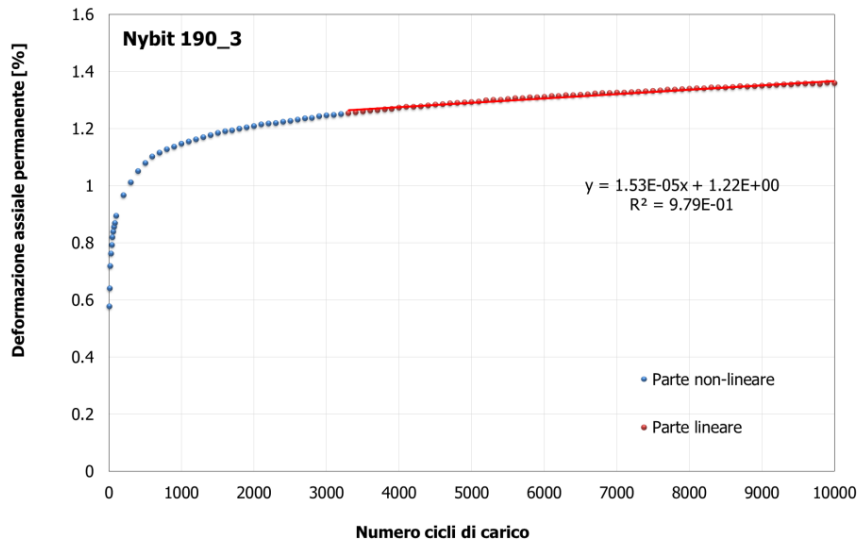


Fig.3.47 Deformazione terzo provino Mix C con legge lineare

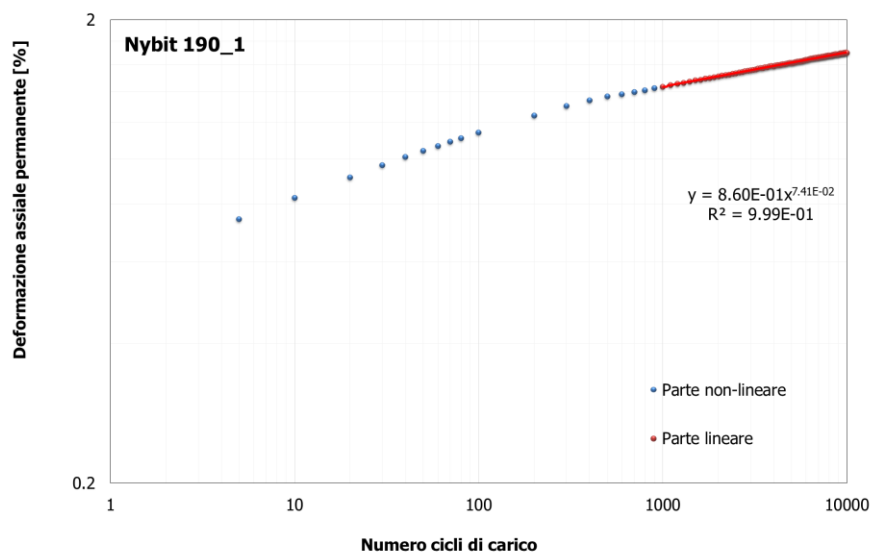


Fig.3.48 Deformazione primo provino Mix C con legge di potenza

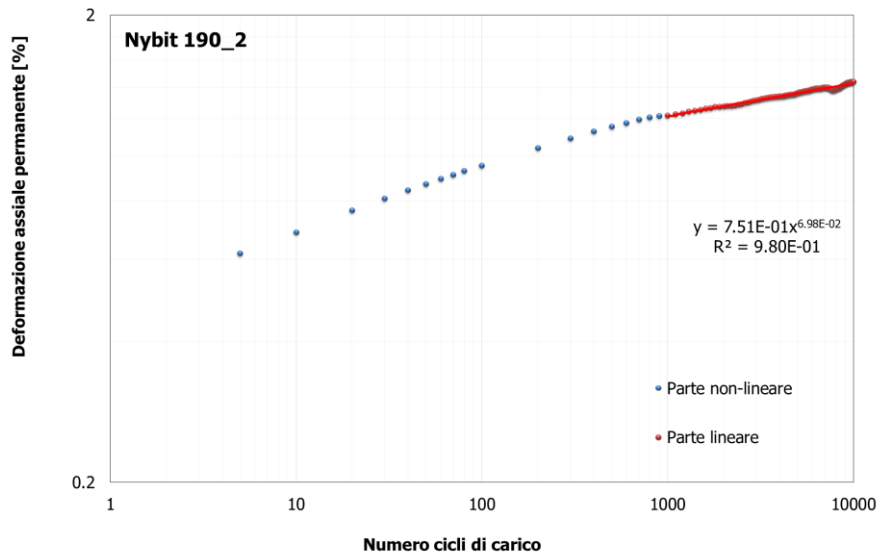


Fig.3.49 Deformazione secondo provino Mix C con legge di potenza

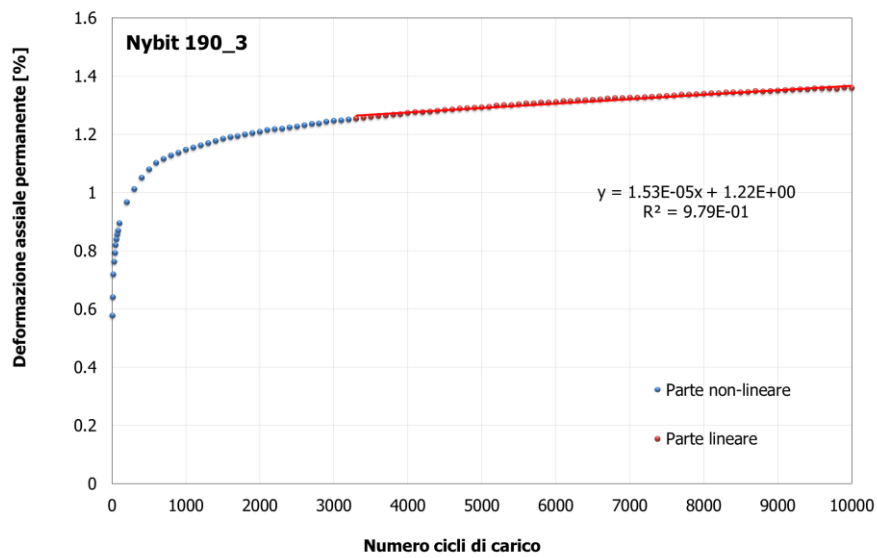


Fig.3.50 Deformazione terzo provino Mix C con legge di potenza

L'interpolazione dei punti sperimentali è stata fatta utilizzando sia una legge lineare che una legge di potenza. Il valore di R^2 comunque sempre molto alto, segno che la regressione è affidabile.

3.10 Confronto tra i Mix A,B e C

	f_c	B	$\epsilon_{1000,calc}$ [%]
Rigeneral_1	0.2823	0.1439	1.1124
Rigeneral_2	0.2445	0.1107	1.1313
Rigeneral_3	0.2263	0.1254	0.8667
Nynas 50/70_1	0.3055	0.0789	2.0570
Nynas 50/70_2	0.2559	0.0863	1.5451
Nynas 50/70_3	0.2805	0.1090	1.3203
Nybit190_1	0.1916	0.0741	1.4340
Nybit190_2	0.1537	0.0698	1.2162
Nybit190_3	0.1530	0.0740	1.1482

Tab.3.28 Confronto dei parametri

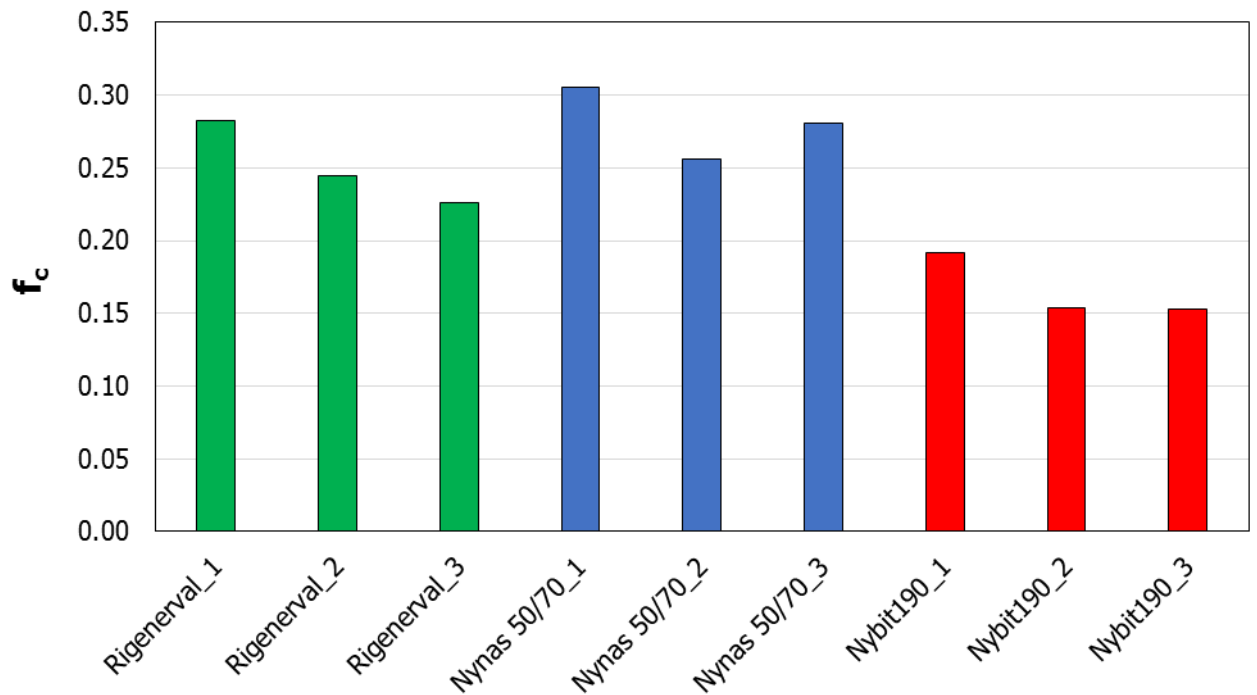


Fig.3.51 Confronto tra le varie miscele del parametro f_c

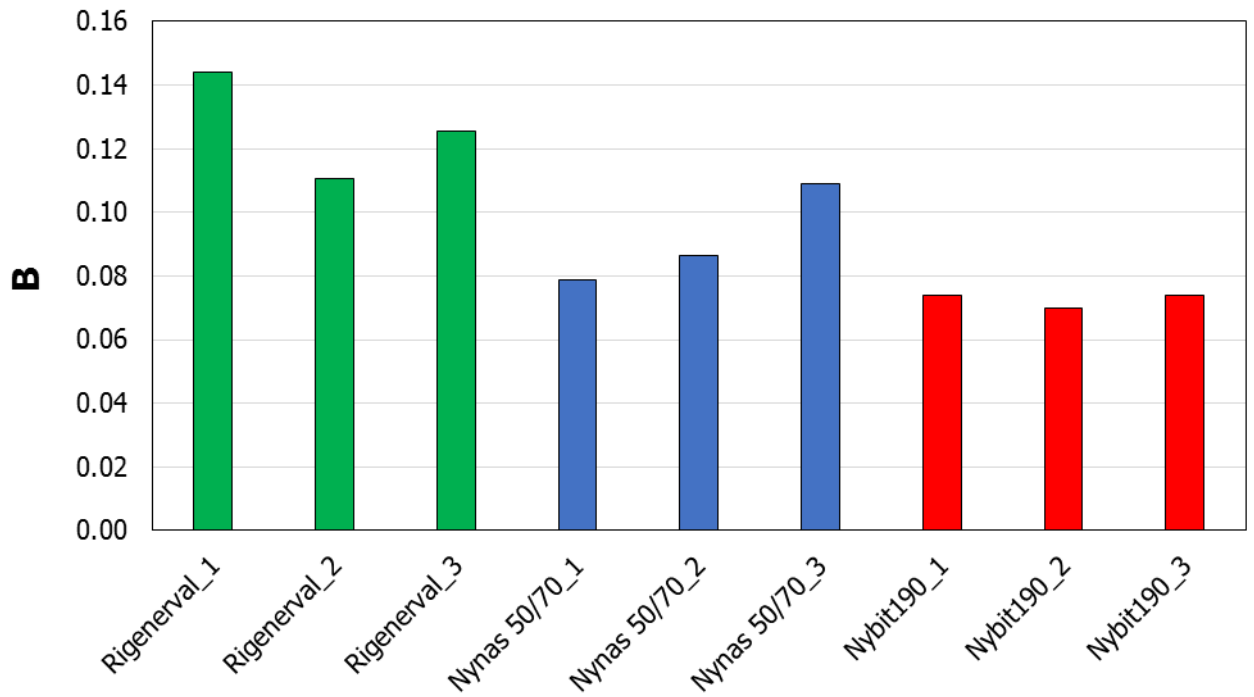


Fig.3.52 Confronto tra le varie miscele del parametro B

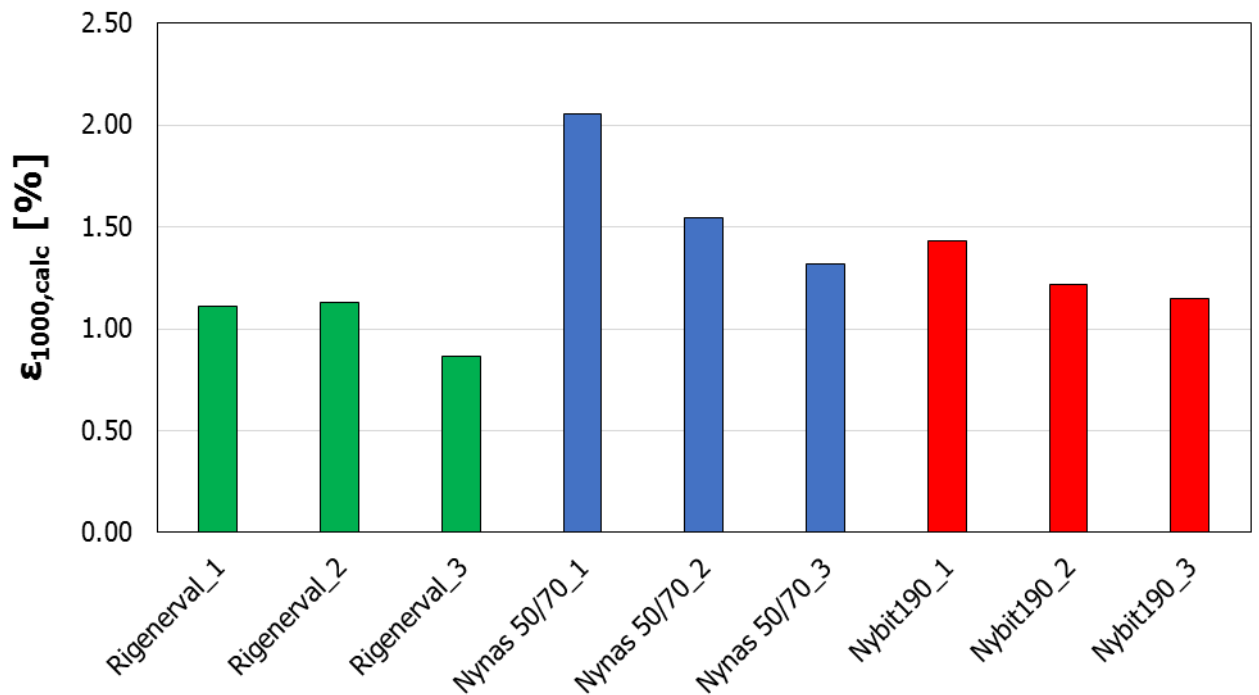


Fig.3.53 Confronto tra le varie miscele del parametro $\epsilon_{1000,calc}$

Dal confronto delle curve e dei parametri si osserva che la miscela Nybit 190 ha una migliore resistenza all'accumulo di deformazione permanente rispetto a quella di

riferimento Nynas 50/70. Infatti ha registrato, come trend, una deformazione minore. Inoltre anche i parametri f_c , B e $e_{1000,calc}$ sono in generale più bassi. Rigenerval tende a deformarsi meno nei primi cicli, infatti le curve sono posizionate in generale molto in basso nel grafico di confronto. Ma dai parametri f_c e B , che dicono con quanta rapidità il materiale accumula deformazione all'aumentare del numero di cicli, il Rigenerval ha i valori più alti, quindi soffre un po' di più. Non a caso è stato proprio un Rigenerval l'unico provino che è collassato (Fig.3.54) ,anche se dalle curve non si vede bene; probabilmente la rottura è stata non repentina ma graduale.

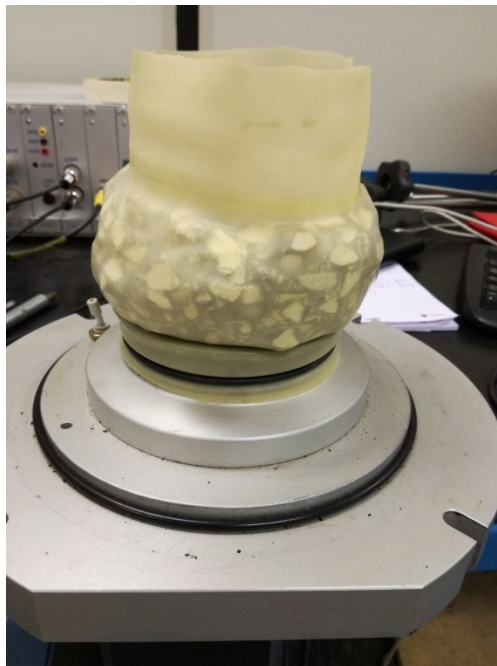


Fig.3.54 Terzo provino Mix A dopo la prova di deformazione

Conclusioni

Nella presente tesi ci si è occupati dell'invecchiamento a breve termine del conglomerato bituminoso, realizzato con materiale di risulta, e dell'eccessiva ossidazione del bitume vergine nella fase di confezionamento effettuata a diverse temperature in base al tipo di bitume trattato (per i Mix 1,2,3,4 e 5 si è mantenuta sempre la stessa temperatura di 140°C). In particolare è stata testata la capacità di diversi additivi rigeneranti nel recuperare il bitume vecchio contenuto nel fresato, valutando la lavorabilità della miscela, la rigidità, la resistenza a trazione indiretta e le deformazioni permanenti dei provini confezionati.

Alla fine di questo lavoro sperimentale possiamo concludere che:

Dal confronto tra i Mix 1,3,4 e 5 risulta che

- dal punto di vista delle caratteristiche volumetriche tutte le miscele sono risultate soddisfacenti in quanto rientrano nel range previsto dal capitolato ANAS
- l'aggiunta di tutti gli additivi tende a far diminuire il modulo di rigidità rispetto alla miscela realizzata senza nessun additivo. In particolare, si può notare come entrambi i Rigenerval (Mix 3 e 4) danno un contributo maggiore rispetto ad ACF1000 (Mix 5).
- come i due bitumi Rigenerval riescono a riportare il valore della resistenza a trazione indiretta all'interno del range di Capitolato. L'additivo ACF diminuisce un po' il valore di ITS ma non lo riporta ancora su valori accettabili.
- Per quanto riguarda il coefficiente di trazione indiretta si può notare come tutte le miscele rispettino le prescrizioni tranne il mix realizzato con Rigenerval non modificato.
- L'unico impasto che rispetta entrambi i requisiti (ITS, CTI) risulta quindi essere quello realizzato inserendo Rigenerval modificato.

Mentre dal confronto tra i Mix A, B e C risulta che

- la miscela Nybit 190 (Mix C) ha una migliore resistenza all'accumulo di deformazione permanente rispetto a quella di riferimento Nynas 50/70 (Mix B). Infatti ha registrato, come trend, una deformazione minore. Inoltre anche i parametri f_c , B e $e_{1000,calc}$ sono in generale più bassi.
- Rigenerval tende a deformarsi meno nei primi cicli, infatti le curve sono posizionate in generale molto in basso nel grafico di confronto. Ma dai parametri f_c e B, che dicono con quanta rapidità il materiale accumula deformazione all'aumentare del numero di cicli, il Rigenerval ha i valori più alti, quindi soffre un po' di più. Non a caso è stato proprio un Rigenerval l'unico provino che è collassato.

Bibliografia

- [1] Felice A. Santagata, “Strade: teoria e tecnica delle costruzioni stradali”, Pearson. Vol. 1 e vol.2;
- [2] Tesi di Laurea di varie sperimentazioni realizzate all'interno del Laboratorio di Strade del DICEA dell'Università Politecnica delle Marche;
- [3] UNI EN 12697-5 - Determinazione della massa volumica massima - 2008;
- [4] UNI EN 12697-6 - Determinazione della massa volumica in mucchio di provini bituminosi - 2012;
- [5] UNI EN 12697-8 - Determinazione delle caratteristiche dei vuoti di provini bituminosi - 2003;
- [6] UNI EN 12697-26 - Rigidezza - 2012;
- [7] UNI EN 12697-23 - Determinazione della resistenza a trazione indiretta di provini bituminosi - 2006;
- [8] UNI EN 12697-25 – Prova di compressione ciclica
- [9] ANAS – “Capitolato speciale d’appalto di servizi. Parte tecnica”
- [10] Arianna Stimilli, Amedeo Virgili, Felice Giuliani and Francesco Canestrari. “In Plant Production of Hot Recycled Mixtures with High Reclaimed Asphalt Pavement Content:A Performance Evaluation”
- [11] Edoardo Bocci, Andrea Grilli, Maurizio Bocci, Vitor Gomes. “Recycling of high percentages of reclaimed asphalt using a biorejuvenator”– a case study

Sitografia

- http://pqrs-ltm.it/images/stories/documenti/Le_pavimentazioni_stradali.pdf.
- <http://www.vallizabban.com/strade/bitumi-modificati-ce/stabilimento-di-bologna/rigenerval/>
- [https://notes.nynas.com/Apps/1112.nsf/wpds/GB_EN_Nynas_50_70/\\$File/Nynas_50_70_GB_EN_PDS.pdf](https://notes.nynas.com/Apps/1112.nsf/wpds/GB_EN_Nynas_50_70/$File/Nynas_50_70_GB_EN_PDS.pdf)
- <https://iterchimica.it/prodotti/iterlow/>
- [https://notes.nynas.com/Apps/1112.nsf/wpds/GB_EN_Nybit_E_190/\\$File/Nybit_E_190_GB_EN_PDS.pdf](https://notes.nynas.com/Apps/1112.nsf/wpds/GB_EN_Nybit_E_190/$File/Nybit_E_190_GB_EN_PDS.pdf)