



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA
Corso di Laurea Triennale in INGEGNERIA CIVILE-AMBIENTALE
Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (DICEA)

Tappeti drenanti a tessitura ottimizzata

Porous asphalt concrete for wearing courses with optimized weaving

Relatore:

Prof. Ing. Maurizio Bocci

Correlatore:

Ing. Carlo Carpani

Tesi di Laurea:

Riccardo Guercio

Anno Accademico 2022 – 2023

Sommario

Capitolo 1 – Introduzione	3
Capitolo 2 – Stato dell’Arte	5
2.1 Introduzione sulla strada	5
2.2 Composizione di una Strada	6
2.3 Riciclaggio del conglomerato bituminoso	8
2.4 Tecniche per il riciclaggio del conglomerato bituminoso	9
2.5 Conglomerato bituminoso drenante	12
Capitolo 3 - Programma sperimentale e metodi di prova	15
3.1 Obiettivo sperimentazione	15
3.2 Metodi di Prova	15
3.2.1 Preparazione dei provini	16
3.2.2 Prova a trazione indiretta ITS	20
3.2.3 Prova Cantabro	21
3.2.4 Prova SCB	23
3.3 Nomenclatura provini	24
Capitolo 4 – Materiali.....	26
4.1 Aggregati.....	26
4.1.1 Sabbia 0/4	26
4.1.2 Basalto.....	27
4.2 Filler	29
4.3 Fibre di tessuto	31
4.4 Bitume	32

Capitolo 5 – Risultati	33
5.1 Percentuale dei Vuoti	33
5.2 Prova a trazione indiretta	34
5.3 Prova Cantabro	35
5.4 Prova SCB	37
5.5 Confronti	39
5.5.1 Percentuale dei vuoti	39
5.5.2 ITS, CTI e CT-INDEX	40
5.5.3 Prova Cantabro	42
5.5.4 Prova SCB	43
Capitolo 6 – Conclusioni	44
Capitolo 7 – Sitografia	46
Ringraziamenti	47

Capitolo 1 – Introduzione

Il corpo stradale è costituito da vari strati sovrapposti, aventi materiali e spessori diversi. Il loro ruolo è quello di sopportare i carichi indotti dal traffico, assorbirli e distribuirli al terreno su cui poggiano, chiamato sottofondo. Tra questi strati è presente l'usura, che nelle principali arterie Italiane è spesso realizzato con un'alta presenza di vuoti (conglomerato drenante) al fine di diminuire le problematiche dell'acqua piovana.

Tali materiali possono essere prodotti solamente impiegando leganti modificati, poiché i leganti non modificati non garantirebbero le necessarie prestazioni al materiale a causa dell'elevato tenore dei vuoti. In questa tesi, in particolare, sono stati studiati conglomerati bituminosi drenanti variando la tipologia di legante ed il diametro massimo dell'aggregato presente nella miscela. Nei prossimi capitoli, infatti, si analizzeranno i risultati prestazionali forniti da 4 diverse miscele riprodotte in laboratorio.

La sperimentazione è stata condotta presso il Laboratorio del Dipartimento di "Ingegneria Civile, Edile ed Architettura – sezione Infrastrutture – area Strade" dell'Università Politecnica delle Marche e la caratterizzazione meccanica è stata eseguita con:

- Prove a trazione indiretta ITS
- Prova Cantabro
- Prova SCB

I risultati ottenuti da ogni prova, suddivisi per famiglia di materiale, sono poi stati successivamente commentati.

La presente tesi si sviluppa in sette capitoli:

- ❖ Capitolo 1 – Introduzione
- ❖ Capitolo 2 – Stato dell'arte

Viene affrontata una breve introduzione sulla strada, introdotto il concetto di riciclaggio del conglomerato bituminoso ed infine vengono descritti i conglomerati bituminosi drenanti.

- ❖ Capitolo 3 – Programma sperimentale e metodi di prova

Vengono elencate tutte le procedure di laboratorio eseguite, il confezionamento delle miscele e viene illustrato il programma sperimentale su cui si è sviluppata la presente tesi.

❖ Capitolo 4 – Materiali

Vengono illustrati i materiali utilizzati e le loro caratteristiche.

❖ Capitolo 5 – Risultati

Si riportano i risultati ottenuti dalle varie prove eseguite, i confronti, grafici e tabelle opportunamente presentati e commentati.

❖ Capitolo 6 – Conclusioni

❖ Capitolo 7 – Bibliografia e sitografia

Capitolo 2 – Stato dell’Arte

2.1 Introduzione sulla strada

La strada è definita come un’infrastruttura di trasporto destinata alla circolazione di veicoli terrestri (principalmente su ruota) e marginalmente a pedoni e animali.

Il concetto di strada nasce in seguito all’invenzione della ruota e dei mezzi su ruota in modo tale da essere sfruttata per il trasporto di merci e di persone.

Nel corso del tempo le tecnologie di costruzione di una strada si sono sempre più evolute. I primi costruttori di strade per eccellenza furono i Romani che utilizzavano le strade a scopi militari e commerciali, tant’è che ancora oggi riusciamo a vedere alcune strade costruite allora; infatti, il loro scopo era quello di trasportare merci e persone e di collegare vari punti dell’impero nel più breve tempo possibile. Difatti in questo periodo si sviluppò il concetto di “*strata*”, ovvero di una strada realizzata mediante strati sovrapposti e si notò come questo sistema fosse efficiente e duraturo [S1].

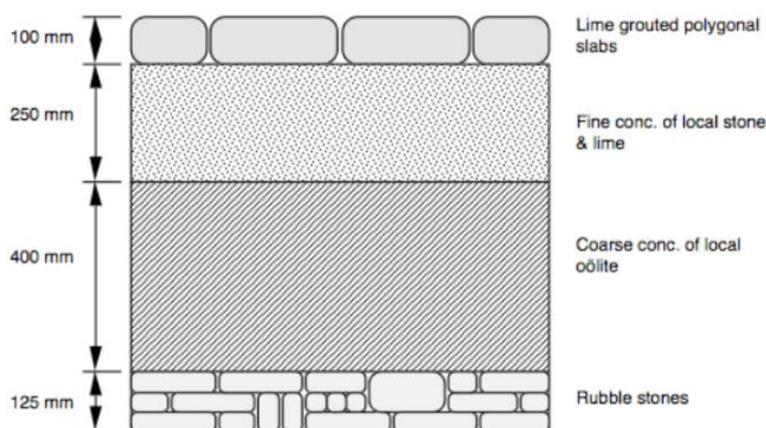


Fig.2.1 Configurazione tipica di una strada romana

Con l’avanzare del tempo, ovviamente grazie anche allo studio, si sono affinate nuove tecniche per la costruzione di strade, oltre allo sviluppo di nuovi materiali, tra cui il conglomerato bituminoso, il quale oggi è presente nella maggior parte delle strade.

L'uso dei leganti iniziò a comparire intorno al diciottesimo secolo con la comparsa dei primi veicoli a motore con ruote gommate. Infatti, i leganti dovevano risolvere alcune problematiche che iniziavano a sorgere, come ad esempio l'impraticabilità di una strada in seguito ad eventi piovosi, o problemi igienici causati da fango e polvere dopo il passaggio di un veicolo.

Nonostante ciò, anche l'uso dei leganti creò nuove problematiche riguardanti la progettazione dei materiali stradali soprattutto in considerazione del fatto che successivamente le strade avrebbero dovuto sopportare carichi di traffico sempre più crescenti.

Lo sviluppo nel corso degli anni dei metodi di costruzione e progettazione ha permesso di arrivare ad una conoscenza profonda delle caratteristiche dei materiali e delle tecniche di progettazione e manutenzione di una strada.

2.2 Composizione di una Strada

Al giorno d'oggi la strada viene definita come un insieme di strati sovrapposti realizzati con materiali differenti, ognuno avente un ruolo ben preciso. La pavimentazione stradale (o sovrastruttura) è la parte superiore del corpo stradale, ovvero l'insieme di strati di diverso materiale che poggiano sul sottofondo.

La funzione principale delle pavimentazioni è di garantire un'adeguata transitività in condizioni di sicurezza e comfort durante la guida di autovetture e mezzi pesanti. Inoltre, la pavimentazione deve evitare che gli agenti atmosferici possano causare danni o deformazioni allo strato più superficiale.

Quindi per soddisfare tutte queste esigenze, questa deve rispondere in maniera adeguata a requisiti *strutturali*: come la distribuzione del carico veicolare giornaliero (portanza) e la capacità a resistere ai fenomeni degradanti come quelli atmosferici e l'usura da utilizzo (durabilità). Oltre a questo, la pavimentazione deve avere requisiti *funzionali*: come la regolarità del manto stradale e l'aderenza dello pneumatico in qualsiasi condizione atmosferica.

In seguito allo sviluppo economico, tecnologico e scientifico degli ultimi decenni, si può notare come è notevolmente aumentato il traffico stradale dovuto al maggior numero di veicoli e mezzi pesanti, il che ha come conseguenza un carico sempre maggiore che la sovrastruttura deve sopportare e una minore durabilità da parte della strada stessa, considerando che la stima della vita utile di una strada sia di circa 20 anni. Perciò questo problema ci riguarda da vicino, visto che la rete viaria stradale italiana è piuttosto datata e non vi è modo di costruire ulteriori infrastrutture, bisognerebbe operare

con interventi di manutenzione e risanamento volti al ripristino delle caratteristiche funzionali ottimali delle pavimentazioni già esistenti e giunte al termine della loro vita utile.

L'obiettivo dell'ingegneria stradale, quindi, è quello di individuare tecniche efficienti ed ecosostenibili per arginare e risanare lo stato di degrado delle pavimentazioni allo scopo di migliorarne le condizioni e la vita utile piuttosto che sviluppare nuove reti stradali.

2.2.1 Pavimentazioni in conglomerato bituminoso

Generalmente una pavimentazione stradale può essere classificata in rigida, semirigida e flessibile a seconda dei materiali utilizzati e alla loro qualità.

Una pavimentazione è definita *rigida* quando si utilizzano lastre di calcestruzzo poste sopra ad una fondazione in misto granulare o eventualmente in misto granulare e misto cementato.

Una pavimentazione *flessibile*, invece, è composta generalmente da cinque strati, i quali sono:

- a) Strato (o tappeto) di usura (3-6 cm): è lo strato più superficiale di tutti, deve garantire regolarità, comfort e sicurezza tra pneumatico e pavimentazione stradale sia in condizione asciutta, sia in condizione bagnata. Ha una longevità stimata intorno ai 10 anni. Il manto di usura è realizzato in conglomerato bituminoso che può essere definito "chiuso" o "aperto", ovvero drenante (quest'ultimo sarà analizzato poi nel proseguo della tesi), in base alla percentuale di vuoti.
- b) Strato di Binder, o collegamento (6-8 cm): come dice la parola, la funzione di questo strato è quella di collegare e trasferire i carichi dagli strati più superficiali a quelli più profondi. Solitamente è realizzato in conglomerato chiuso o semichiuso.
- c) Strato di Base (8-30 cm): è lo strato di mezzo all' interno di una pavimentazione, la sua funzione è di tipo strutturale poiché il suo scopo è quello di assorbire le sollecitazioni dei carichi, per questo motivo lo strato non ha una profondità "standard", ma varia in base alle condizioni in cui ci troviamo. È realizzato in misto cementato, ma si può utilizzare anche il fresato, in quantità comunque non superiore al 30% in peso rispetto agli aggregati.
- d) Strato di Fondazione (15-35 cm): costituisce il penultimo strato della fondazione, il suo scopo è quello di distribuire e uniformare una seconda volta i carichi derivanti dagli strati superficiali trasferendoli al sottofondo. Generalmente è realizzato in misto cementato e/o materiali di recupero come il fresato derivante da conglomerato bituminoso, o materiale demolito da altre fondazioni o materiale derivante da scavi.

e) Sottofondo (50-100 cm): è lo strato più profondo della pavimentazione. Il suo scopo è quello di garantire un'adeguata portanza che è fondamentale per la stabilità della fondazione. Un sottofondo realizzato adeguatamente infatti, evita una perdita della sua funzionalità e una riduzione di stima della vita utile e della sua durabilità. Il terreno di sottofondo è costituito da terre stabilizzate o terre da riporto.

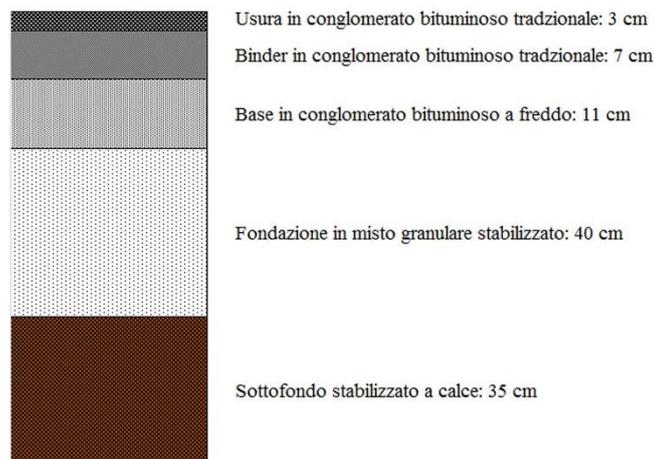


Fig.2.2 Stratigrafia di un pacchetto strutturale di una pavimentazione stradale flessibile

Una pavimentazione *semirigida* ha le stesse caratteristiche di una pavimentazione flessibile, con la sola differenza che lo strato di base è formato da conglomerato bituminoso e sotto di esso ci sarà uno strato sottobase in misto cementato [S2], [S4].

2.3 Riciclaggio del conglomerato bituminoso

Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali è diventato un argomento molto interessante e da approfondire. Negli anni passati, quando si doveva ricostruire una nuova pavimentazione era solito demolire la vecchia pavimentazione e costruire quella nuova, andando però a consumare una quantità maggiore di aggregati e bitume, di risorse non rinnovabili quindi, oltre ad una produzione elevata di materiale di scarto con conseguente difficoltà nello stoccaggio.

Nel corso degli anni, dunque, si è capito che il materiale ottenuto dalla demolizione di una vecchia pavimentazione, chiamato *fresato* o *RAP*, può essere vantaggioso per produrre nuovi strati delle pavimentazioni stradali. Infatti, il riciclo e il riutilizzo del fresato ci dà, innanzitutto, un beneficio economico con meno spese in nuovi materiali di costruzione o inerti "vergini"; poi il riuso del materiale comporta una salvaguardia dell'ambiente riducendo le emissioni di gas serra; avremo una

maggior tutela delle risorse naturali con un prelievo minore di aggregati come sabbia, sassi e ghiaia che non sono rinnovabili; avremo una minore presenza di rifiuti nelle discariche grazie al riciclo; le pavimentazioni avranno una maggior rigidità e una probabilità minore di rottura, quindi con meno riparazioni e manutenzioni nel futuro se vengono costruite con il fresato; inoltre il fresato può essere usato anche in altri ambiti, non per forza nelle pavimentazioni stradali e la sua qualità sarà comunque eccellente perché il prodotto riciclato è identico all' originale ed è riciclabile al 100% innumerevoli volte [S5], [S6].

I primi approcci di riciclaggio del conglomerato bituminoso in Italia risalgono agli anni '70. Nonostante lo sviluppo e lo studio di nuove tecniche col passare del tempo, in Italia solo il 15% del fresato e del materiale derivante dalla demolizione di pavimentazioni viene riutilizzato. Il dato è notevolmente basso in confronto agli altri paesi europei, con ogni probabilità questo può essere dovuto: o ad una carenza di una normativa tecnica di riferimento e/o una legislazione inadeguata, o ad una scarsa conoscenza da parte della stazione appaltante e dei vantaggi ottenibili, o da una convinzione comune che materiali e tecniche di riciclaggio siano più costosi rispetto a quelli tradizionali.

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

Fig.2.3 Tabella dati produzione annuale di conglomerato bituminoso e percentuali di materiale recuperato

2.4 Tecniche per il riciclaggio del conglomerato bituminoso

Per riciclare il conglomerato bituminoso ed avere tutti i benefici dei quali abbiamo parlato prima, oggi esistono due metodi: il riciclaggio del conglomerato bituminoso *a caldo* oppure il riciclaggio del conglomerato bituminoso *a freddo*. Entrambe le modalità di riciclaggio poi si possono eseguire *in impianto* con un impianto fisso, oppure *in sito* con un impianto mobile.

a) Riciclaggio a caldo in impianto: nella tecnica del riciclaggio a caldo in impianto il fresato e gli aggregati lapidei vengono riscaldati ad una temperatura di circa 150°C. Le miscele solitamente sono formate da fresato (in proporzioni variabili), aggregati vergini, bitume (tradizionale o modificato), eventuali additivi (per riattivare il bitume). Vengono aggiunti tutti questi elementi perché altrimenti otterremo un materiale troppo rigido e fragile per la realizzazione di un nuovo strato a causa del cambiamento di proprietà del bitume, che ha subito invecchiamento.

La produzione delle miscele in impianti fissi garantisce una maggior precisione nei dosaggi. È la tecnica che riesce a conferire prestazioni maggiori al conglomerato riciclato, ma allo stesso tempo con questa non riusciamo a riciclare il 100% del conglomerato presente, infatti la percentuale varia a seconda che si lavori in un impianto discontinuo o un impianto continuo. *L'impianto discontinuo* è quello più diffuso in Italia, garantisce una maggior flessibilità di utilizzo, un maggior controllo qualità del prodotto finale e una minor produzione di fumi grazie ai filtri. Come punti negativi, l'impianto discontinuo ha una produttività minore rispetto a quello continuo e un costo maggiore a causa delle componenti necessarie. Gli aggregati vergini vengono posizionati all'interno delle tramogge dove vengono pesati e viene stabilita la giusta quantità; poi tramite un nastro trasportatore vengono portati all'interno di un forno a tamburo rotante che essicca il materiale. Il forno è diviso in 3 zone: nella prima gli inerti vengono scaldati ma non perdono umidità; nella seconda gli inerti perdono tutta l'umidità, essiccandosi, a temperatura costante; nella terza gli inerti essiccati aumentano la temperatura (150-160°C) finché il materiale non esce dal cilindro. Poi gli aggregati vengono trasportati alla torre di miscelazione dove si aggiunge il bitume dosato e riscaldato a 130°-150°C. Viene effettuata la miscelazione e una volta pronto il composto finale, il conglomerato viene convogliato in delle tramogge di carico e quindi sugli automezzi.

È importante che il fresato aggiunto non venga bruciato dalla fiamma all'interno del forno e in base alle caratteristiche di miscelazione, varieranno le percentuali di fresato che possiamo aggiungere alla miscela.

Nell' *impianto continuo* invece miscelazione ed essiccamento avvengono contemporaneamente nel tamburo essiccatore che avrà quindi dimensioni maggiori. Non sono presenti vagli e torre di miscelazione per cui i costi dell'impianto sono minori e la

produttività è maggiore; tuttavia, il processo di miscelazione è meno controllato e quindi la qualità del prodotto finito è inferiore rispetto all'impianto discontinuo. In questa configurazione si riesce a recuperare fino al 70% di fresato e, come prima, quest'ultimo non deve andare a contatto con la fiamma del bruciatore per evitare fenomeni di ossidazione del bitume.

- b) Riciclaggio a caldo in sito: questo tipo di riciclaggio veniva molto utilizzato in passato per la costruzione degli strati di base. Oggi questa tecnica non viene più utilizzata ed è stata abbandonata perché considerata molto inquinante a causa delle emissioni prodotte, anche se aveva alcuni vantaggi, tra cui una riduzione dei movimenti dei mezzi di trasporto quindi riduzione dei costi e del disturbo al traffico; una riduzione del consumo di combustibile nella fase di preriscaldamento degli aggregati per togliere l'umidità; un risparmio sui costi di trattamento del materiale fresato; un minor uso di bitume nuovo.
- c) Riciclaggio a freddo in impianto: nel riciclaggio a freddo, il fresato o RAP, cioè il conglomerato demolito, non viene mai riscaldato durante tutte le varie fasi della produzione, ma rimane sempre a temperatura ambiente portando così un risparmio sia a livello economico, sia a livello ambientale. Allo stesso tempo però è garantito un alto livello prestazionale delle miscele e stabilità di produzione. Questa tecnica è molto più innovativa rispetto al riciclaggio a caldo perché permette di demolire e stoccare il materiale senza che perda lavorabilità. Le miscele sono composte da materiale di recupero, proveniente dalla fresatura; legante bituminoso, sotto forma di emulsione bituminosa o schiuma di bitume; filler (additivi); acqua di aggiunta; aggregati vergini di integrazione per correggere la curva granulometrica degli inerti provenienti dal materiale di recupero. Le varie tecniche di riciclaggio a freddo possono essere usate per migliorare strade inghiaiate/non asfaltate (depolverizzazione), oppure come riciclaggio in superficie o riciclaggio in profondità.

Nel riciclaggio *in impianto* le macchine possono essere fisse o semimoventi, le quali riducono costi e consumi di trasporto del fresato. Come nel riciclaggio a caldo, anche in quello a freddo possiamo avere un impianto discontinuo o continuo: nel primo gli inerti e il legante vengono pesati e dopo aver raggiunto un determinato quantitativo vengono inviati al ciclo produttivo. Nel secondo caso invece, l'immissione dei materiali è continua, questo rende il processo produttivo più veloce ma meno preciso in termini di dosaggio. Il fresato all'arrivo in impianto viene frantumato e rifezionato; in base alla curva granulometrica si stabilisce quanti aggregati vergini bisogna inserire per correggere la curva. RAP e aggregati,

tramite nastri trasportatori, vengono trasportati al miscelatore dove avviene la miscelazione, qui inoltre viene aggiunto il legante, acqua (per migliorare la lavorabilità), filler e additivi calcarei o silicei. Terminata la miscelazione, il composto finale viene caricato su automezzi e portato in cantiere.

- d) *Riciclaggio a freddo in sito*: come abbiamo visto il riciclaggio a freddo ha enormi vantaggi prestazionali rispetto a quello caldo, avrà inoltre vari risparmi di costi dovuti al trasporto del materiale e al suo riscaldamento e ambientali. Oltre a ciò, il riciclaggio a freddo fatto in sito tramite dei “treni di riciclaggio” mi permette di ottimizzare i tempi e avrà tempi brevi di costruzione, inoltre il treno che lavora viene posizionato su una corsia; quindi, sarà garantito anche una sicurezza alla circolazione. I treni di riciclaggio sono composti da una fresa, una macchina stabilizzatrice (pulvimixer), un’autobotte per l’emulsione bituminosa, un’autobotte per l’acqua, una livellatrice e due rulli di cui uno vibrante per la compattazione. Il riciclaggio a freddo deve essere sospeso se la temperatura dell’aria è inferiore a 10°C e comunque quando le condizioni meteorologiche possono disturbare e influenzare la corretta riuscita del lavoro. Una volta terminato il costipamento, inoltre, lo strato deve essere fatto “riposare” per qualche giorno per fare evaporare l’acqua prima di essere coperto con uno spargimento di sabbia o graniglia [S6].



Fig.2.4 Treno di riciclaggio a freddo con varie macchine all'opera

2.5 Conglomerato bituminoso drenante

Come abbiamo accennato e visto nei capitoli precedenti, sappiamo che il conglomerato prodotto, sia che sia uscito per la prima volta dall’impianto, sia che derivi da un impianto di riciclaggio, si può classificare in aperto, semichiuso o chiuso in base alla porosità (e quindi, all’indice dei vuoti): un conglomerato bituminoso chiuso avrà una percentuale di vuoti minore del 5%; un conglomerato

bituminoso semichiuso avrà i vuoti intorno al 5-10%, mentre un conglomerato bituminoso aperto avrà una percentuale di vuoti maggiore del 15-20%. Ovviamente ci sono differenze tra i vari tipi, la principale forse riguarda la durabilità; infatti, un conglomerato bituminoso chiuso o semichiuso, quindi con minor porosità, ha un'aspettativa di vita maggiore rispetto ad uno aperto, oltre ad avere prestazioni meccaniche superiori. I conglomerati bituminosi drenanti sono realizzati riducendo la quantità di aggregato fino e, di conseguenza, il grado di compattazione del materiale. Il conglomerato bituminoso aperto viene solitamente utilizzato per produrre pavimentazioni drenanti, perché una maggiore porosità facilita la dispersione dell'acqua che non si ferma all'interno dei pori ma scivola via. I tappeti drenanti vengono utilizzati soprattutto in ambito autostradale e non solo, per ridurre sia il fenomeno dell'acquaplaning, sia per eliminare l'effetto spray. Queste problematiche, infatti, sono molto sottovalutate ma allo stesso tempo molto pericolose visto che, se l'acqua non scivola via dalla pavimentazione, forma uno strato sottile che rende nulla l'aderenza e l'attrito tra lo pneumatico del veicolo in movimento e la strada stessa (acquaplaning); inoltre se l'acqua non scivolasse via e rimanesse lungo la carreggiata ridurrebbe la visibilità rispetto al veicolo che ci precede per via degli schizzi (effetto spray). Come detto, in Italia le pavimentazioni in conglomerato bituminoso drenante vengono utilizzate in tratti autostradali o in zone caratterizzate da eventi piovosi, mentre in Europa al contrario, vengono utilizzate in tutte le strade, anche quelle urbane.

Una pavimentazione che prevede uno strato drenante superficiale deve essere opportunamente progettata. In particolare, essa deve prevedere uno strato di conglomerato bituminoso chiuso sottostante, che deve avere una certa pendenza, in modo tale che l'acqua che passa attraverso lo strato drenante (vuoti di circa il 15-20%) possa essere accompagnata al di fuori della piattaforma stradale e non creare problemi ai veicoli. Tra i *vantaggi*, come già detto precedentemente, si avrà una maggiore sicurezza alla guida grazie ad una maggiore aderenza. Poi con l'asfalto drenante, secondo alcuni studi, si ottiene una riduzione del rumore del traffico veicolare, soprattutto in strade a scorrimento veloce; difatti i tappeti drenanti sono fonoassorbenti, riducono il rumore provocato dal rotolamento e assorbe quello dei motori. Questo è spiegato nell'*effetto corno*: il rumore prodotto dallo pneumatico "rimbalza" più volte all'interno dei pori più grandi dei tappeti drenanti e ne esce più "debole". Infine, questa tipologia di asfalto consente di ridurre drasticamente il riflesso dei fari abbaglianti/anabbaglianti garantendo un aumento della sicurezza per gli automobilisti. Lo svantaggio principale del conglomerato bituminoso drenante è invece dato dalla sua scarsa resistenza e durabilità, poiché avendo appunto pori più larghi e meno fitti, il materiale tende di più

a sgretolarsi e a disgregarsi, soprattutto nei pressi di curve dove il movimento non rettilineo dello pneumatico rovinerà maggiormente l'asfalto. A causa di questo ultimo aspetto, questo materiale può essere realizzato solamente impiegando bitumi modificati. I bitumi tradizionali, infatti, non riescono a garantire un'adeguata vita utile alla pavimentazione [S7], [S8], [S9].

Capitolo 3 - Programma sperimentale e metodi di prova

3.1 Obiettivo sperimentazione

In questo capitolo della tesi verrà illustrata l'attività sperimentale svolta presso il laboratorio di strade del dipartimento di "Ingegneria Civile, Edile e Architettura" dell'Università Politecnica delle Marche.

In particolare, sono stati analizzati tappeti di usura drenanti, partendo dalla produzione delle miscele, fino alla realizzazione dei provini e successivamente il test degli stessi. Nello specifico, sono state prodotte 4 diverse miscele, differenti le une dalle altre sia per diametro degli aggregati, sia per il tipo di bitume utilizzato.

L'obiettivo principale della tesi era quello di testare una nuova tipologia di bitumi ad elevatissimo tenore di polimero e quindi confrontarla con i tradizionali bitumi modificati normalmente impiegati per la realizzazione degli strati drenanti. Tale confronto è stato realizzato sia per miscele con diametro massimo di 12 mm, tradizionali nelle autostrade, ma anche con diametro massimo di 10 mm. Quindi il secondo obiettivo era quello di confrontare le prestazioni delle due diverse miscele realizzate con i due diversi diametri massimi. Prima di fare questo ogni miscela è stata opportunamente progettata in modo tale da ottenere un tenore dei vuoti di circa il 20%. Questo studio è stato tuttavia realizzato in un lavoro di tesi precedente.

3.2 Metodi di Prova

Come accennato precedentemente, il programma di sperimentazione riguardava la produzione dei provini secondo le varie fasi, la compattazione e la rottura di questi e infine l'analisi dei dati.

È importante analizzare il procedimento e i vari passaggi che i provini hanno subito tra la fase di compattazione e quella di rottura (nel dettaglio, i procedimenti di miscelazione, compattazione, rottura e analisi dei dati verranno descritti in seguito).

3.2.1 Preparazione dei provini

Fase 1: preparazione della giusta quantità di materiale, miscelazione e sporzionamento

La prima operazione da eseguire per confezionare provini è quella di scegliere i vari materiali e preparare la ricetta con le quantità giuste dei materiali. I materiali che sono stati utilizzati erano: sabbia 0/4, basalto 4/8 o 8/12, filler calcareo, filler di recupero, fibre di tessuto e bitume.

Una volta preparate le giuste quantità, gli aggregati vengono messi in forno dove verranno riscaldati ad una temperatura di 165°C per almeno 3 ore affinché venga eliminata l'umidità e il materiale raggiunga la giusta temperatura. Successivamente si mette in forno, sempre a 165°C, anche il bitume, questa volta però per 2 ore, il tempo necessario affinché diventi liquido.

Il passo successivo è mescolare i vari elementi nel miscelatore meccanico, anch'esso portato alla temperatura di 165°C per far rimanere caldi gli aggregati e non far avere uno shock termico ai vari materiali. Il miscelatore meccanico, tramite delle pale meccaniche riesce a miscelare i vari materiali che si aggiungono a mano a mano, ottenendo alla fine un composto omogeneo. Inizialmente vengono messi all'interno del miscelatore gli aggregati (ovvero la sabbia e il basalto) e le fibre e si mescola il tutto per 30 secondi (fig.3.1). In un secondo momento viene aggiunta la giusta quantità di bitume (fig.3.2). Questo è un passaggio molto delicato ma importante allo stesso tempo, visto che un dosaggio sbagliato di bitume rovinerebbe l'intero impasto e influenzerebbe negativamente le prove che si faranno in seguito perché così il provino avrà caratteristiche diverse da quelle che ci aspettiamo. Aggiunto il bitume si "mescola" il tutto per 120 secondi (due minuti). Infine, vengono aggiunti il filler calcareo e il filler di recupero e si "mescola" per altri 180 secondi (tre minuti) (fig.3.3).

Terminata questa fase, il conglomerato è pronto e si può procedere con lo sporzionamento (fig.3.4). Lo sporzionamento consiste nel mettere le giuste quantità di impasto preparato in delle ciotole, quella precisa quantità poi verrà compattata, ognuna con diverse tecniche. Prima di iniziare la fase di compattazione però, il materiale viene messo in forno sempre a 165°C per 30 minuti per farlo rimanere in una temperatura adeguata e simulare la fase di trasporto del materiale dall'impianto al cantiere.



Fig.3.1 Aggiunta degli aggregati riscaldati e fibre di tessuto nel miscelatore



Fig.3.2 Aggiunta del bitume liquido



Fig.3.3 Aggiunta del filler calcareo e di recupero



Fig.3.4 Conglomerato bituminoso finale pronto per lo sporzionamento

Fase 2: compattazione dei provini

Lo sporzionamento della giusta quantità di conglomerato bituminoso dipende dal provino, se deve essere compattato con la pressa taglio giratoria o con la pressa Marshall.

Con la pressa a taglio giratoria sono stati compattati 6 provini che poi successivamente sono stati portati a rottura con la prova a trazione indiretta ITS; in questo caso la quantità di conglomerato bituminoso era intorno a 930-940 g e il materiale veniva inserito in una fustella di diametro 100 mm. Con la pressa giratoria, però, sono stati compattati anche i 2 provini più grandi dai quali, tramite dei tagli eseguiti con delle macchine specifiche, sono state ottenute 8 semilune, testate con la pressa SCB. In questo caso la quantità di conglomerato bituminoso era intorno ai 4000 g ed è stata usata la fustella di diametro 150 mm. Infine, i 8 provini che venivano compattati con 50 colpi per faccia con la pressa Marshall, avevano un peso intorno a 1000 g e questi sono stati portati a rottura tramite la prova Cantabro.

La pressa a taglio giratoria (fig.3.5) è composta da un telaio di carico, scomposta al suo interno da un supporto inclinabile, dove verrà inserita la fustella, un pistone di carico che permette l'applicazione del carico verticale, e una base rotante. Il sistema è collegato ad un computer dove, oltre ad essere rilevati i vari dati, tra cui l'altezza del provino durante le fasi di applicazione del carico, si può impostare il tipo di prova, il numero di giri, la pressione (600 kPa) e il diametro della fustella.

La fase di compattazione inizia con la preparazione della fustella (che, come abbiamo visto, può essere di diametro diverso, 100 mm o 150 mm): infatti, anche la fustella stessa deve essere riscaldata in forno a 165°C, poi va aggiunta una piastra di base ed un dischetto di carta-filtro per evitare l'adesione del conglomerato bituminoso alla piastra. A questo punto si inserisce il materiale che stava in forno al suo interno, poi alla sommità si mette un altro dischetto di carta-filtro per evitare di sporcare il pistone di carico. Ora la fustella è pronta e si può procedere alla compattazione tramite pressa giratoria. È importante anche mettere del grasso sopra il piano di base e negli snodi all'interno della pressa onde evitare che l'attrito tra la fustella metallica e il piano di base rovini la pressa. Si posiziona la fustella all'interno della camera di prova fino ad incontrare l'apposito contrasto posto alla sua base. Poi si setta il macchinario con precise impostazioni tramite il pannello di controllo. I 6 provini per la prova ITS avevano come impostazione della pressa: pressione 600 kPa, diametro 100 mm, numero di giri 130. Invece, per compattare i 2 provini più grandi dai quali si ottiene le mezzelune, la pressa aveva come impostazioni: pressione 600 kPa, diametro 150 mm, numero di giri 130. La prova inizia quando il pistone di carico verticale si abbassa fino a raggiungere

la pressione impostata. Dopodiché i supporti laterali si sollevano determinando un'inclinazione della fustella, che, di conseguenza, inizierà a ruotare. Il processo di compattazione prevede che, mentre la fustella ruota attorno al proprio asse ad una velocità prestabilita, il pistone imprime sulla miscela una pressione costante con un'applicazione in direzione inclinata rispetto all'asse della fustella. Terminato il numero di rivoluzioni preimpostato precedentemente, la prova finisce: la pressa si ferma automaticamente, il pistone risale alla sua posizione iniziale e tramite un martinetto idraulico ad aria compressa è possibile estrarre, dal basso verso l'alto, il provino di conglomerato bituminoso compattato dalla fustella. Una volta che il provino si è raffreddato, con un calibro di precisione si misurano due altezze prese in punti diversi del provino e si nomina con una sigla e/o numero il provino.

I provini così ottenuti, dopo essere stati condizionati adeguatamente, possono essere portati a rottura.

La pressa a taglio giratoria consente di ottenere dei provini in conglomerato compattato che sono in grado di simulare bene le proprietà fisico-meccaniche di carote di pavimentazioni realizzate con la stessa miscela e prelevate in opera.



Fig.3.5 Pressa a taglio giratoria in laboratorio



Fig.3.6 Provino estratto dalla fustella

3.2.2 Prova a trazione indiretta ITS

Prima di poter eseguire la prova a trazione indiretta sui 6 provini che sono stati ricavati dalla pressa giratoria con fustella di diametro 100 mm, si devono mettere a condizionare i provini: 3 provini saranno testati in condizione *dry/asciutta*, lasciati in camera climatica ad una temperatura di 25°C per tre giorni; gli altri 3 provini saranno invece testati in condizione *wet/bagnata*, lasciati nel bagno termostatico a 40°C per tre giorni e poi a 25°C, sempre nel bagno termostatico, per almeno 3 ore. Dopo questi passaggi, si può portare a rottura il provino.

La prova di trazione indiretta consiste nel comprimere i provini fino a portarli a rottura lungo un piano diametrale verticale. L'apparecchiatura (fig.3.7) per questa 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 verso la testa di carico superiore. Il carico perpendicolare viene trasferito al provino che è posizionato centralmente rispetto al listello inferiore e perpendicolarmente rispetto a quello superiore. Quando si avvia la prova (o manualmente tramite la macchina da un pannello di controllo o da un computer collegato alla macchina), la parte inferiore della base sale verso l'alto, il provino viene compresso e inizia a rompersi seguendo lo spazio tra gli aggregati e non rompendo l'aggregato stesso. Il sistema di controllo ci consente di misurare sia la deformazione (verticale ed orizzontale) subito dal provino durante l'applicazione del carico, sia la forza del carico stesso. La prova, in accordo con la norma UNI EN 12697-23, viene svolta in controllo di deformazione. La prova si può ritenere conclusa quando il provino si è rotto lungo la sua verticale e non viene applicata più nessuna forza. Quindi alla fine otteniamo una curva carico-corsa (carico-deformazione verticale, visualizzabile già durante l'esecuzione del test con tutti i punti che formano tale curva) e i valori di carico di rottura a compressione, di deformazione a compressione e dell'ITS (resistenza a trazione indiretta, ovvero la massima tensione applicata al provino).

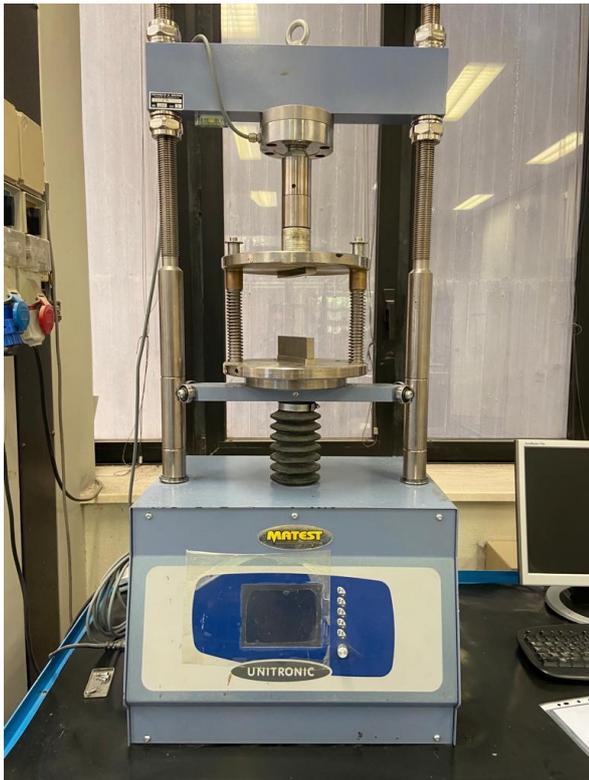


Fig.3.7 Pressa a trazione indiretta ITS in laboratorio

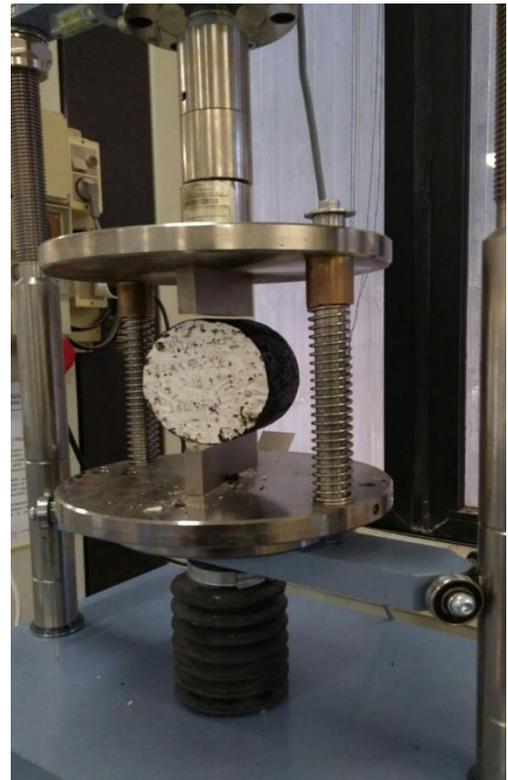


Fig.3.8 Provino prima della rottura

3.2.3 Prova Cantabro

La prova Cantabro viene eseguita sui 8 provini che sono stati compattati con la pressa Marshall con 50 colpi su entrambe le facce del provino. La pressa Marshall costituisce un'alternativa alla pressa giratoria; la quantità di conglomerato bituminoso, sporzionata precedentemente, viene messa all'interno di una fustella rigida molto piccola; alla base e alla sommità viene posizionato sempre un dischetto di carta sia per evitare la perdita di materiale e sia che sporchi la fustella. A questo punto si aziona la pressa che con 50 colpi per ogni faccia compatta il provino. Infine, tramite un pistone idraulico manuale si estrae il provino compattato dalla corona della fustella. Anche in questo caso i provini devono subire un periodo di condizionamento: 4 provini saranno testati in condizione *dry/asciutta* dopo essere stati in una camera climatica a 25°C per 3 giorni, altri 4 provini saranno testati in condizioni *wet/bagnate* dopo essere stati in un bagno termostatico a 40°C per 3 giorni e poi spostati nella camera climatica a 25°C per almeno 3 ore. La prova Cantabro si basa sulla perdita di massa che il provino subisce prima e dopo la prova; infatti, la prima operazione da fare è quella di misurare con una bilancia di precisione la massa iniziale del provino, che più o meno dovrebbe corrispondere a quella del materiale sporzionato precedentemente. Poi si inserisce il provino in un macchinario cilindrico chiuso avente al suo interno un setto disposto lungo la generatrice in modo

da formare un risalto, si setta il numero di giri che esso deve compiere (in questo caso il cilindro ha eseguito sempre 300 giri) e si fa iniziare la prova (fig.3.9). Il provino ruotando all'interno del cilindro metallico si disgregherà e perderà un po' della sua massa. Una volta completati i vari giri il macchinario si ferma automaticamente, si estrae il provino e si misura tramite la bilancia il peso finale. A seconda dei vari materiali, del bitume utilizzato, delle condizioni in cui è stato condizionato, si è potuta vedere la differenza di massa nei vari provini.



Fig.3.9 Cilindro usato per la prova Cantabro

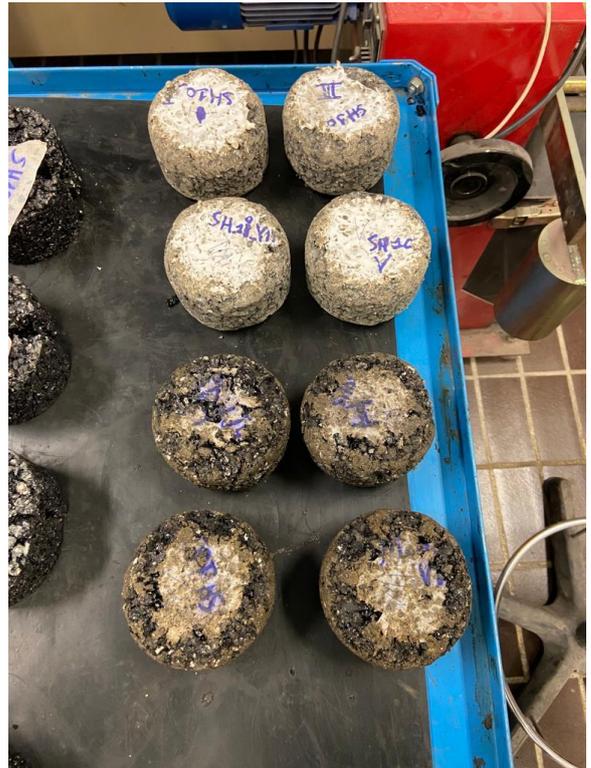


Fig.3.10 Provini wet/dry post prova Cantabro

3.2.4 Prova SCB

La prova SCB si esegue nello stesso macchinario utilizzato per la prova a trazione indiretta con lo stesso procedimento, con la sola differenza del piano di base di appoggio: invece di un listello rettangolare, si usa una base diversa per l'appoggio delle otto semilune. Le semilune si ricavano dal taglio dei due provini di dimensioni più grandi ottenuti dalla compattazione con la pressa giratoria del materiale nella fustella di diametro 150 mm. Una volta pronte, alla base e ai lati delle semilune si applicano due piastrine di alluminio (attaccate tramite un po' di bitume riscaldato) per facilitare il posizionamento nel macchinario ed evitare lo spostamento durante l'esecuzione della prova. Come visto precedentemente, anche qui prima le semilune vanno condizionate: 4 saranno testate in condizione *dry/asciutta*, messe in camera climatica a 25°C per 3 giorni e poi spostate in un'altra camera climatica a 10°C per almeno 3 ore, le altre 4 semilune invece saranno testate in condizioni *wet/bagnate* e vanno messe in un bagno termostatico a 40°C per 3 giorni e poi spostate nella camera climatica a 10°C per almeno 3 ore. Una volta condizionata, la semiluna si posiziona al centro della base e si avvia il macchinario (anche in questo caso questa operazione può essere fatta o dal pannello di controllo della macchina o dal computer collegato ad essa), dopo aver inserito i dati richiesti (tra cui l'area della sezione della mezzaluna che si può calcolare conoscendo l'intaglio centrale del provino e il diametro). Successivamente la base inizierà a salire finché il provino non inizierà a rompersi (fig.3.11). È importante, secondo quanto dice la normativa di riferimento, che la mezzaluna si rompa all'interno di una "V" di larghezza prestabilita altrimenti la prova può considerarsi nulla. La prova terminerà quando la pressa non applicherà più nessuna forza nella semiluna e possiamo ricavarci la curva carico-corsa/carico-deformazione verticale.

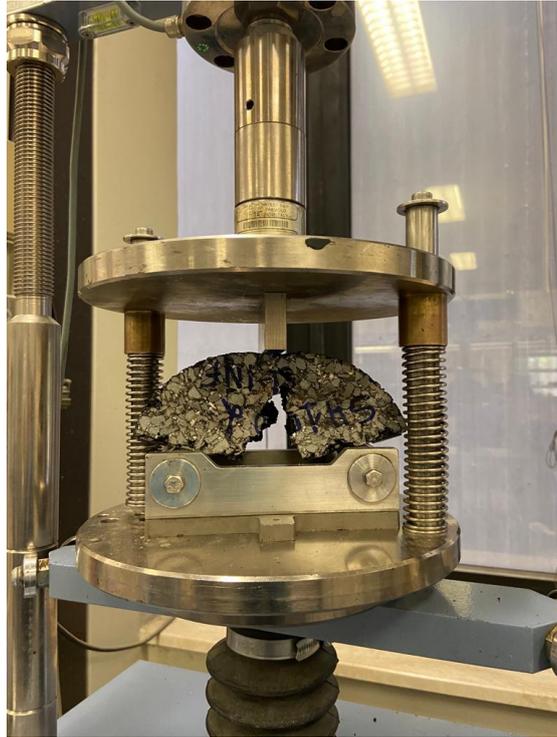


Fig.3.11 Semiluna testata con prova SCB

3.3 Nomenclatura provini

Durante il periodo di tirocinio, ho analizzato 4 diverse miscele, ognuna formata da percentuali e quantità di materiali e bitume diversa. Nello specifico ho lavorato e prodotto miscele con sigla H10, SH10, H12, SH12.

La sigla “H” o “SH” sta ad indicare il tipo di bitume utilizzato: “H” sta per Hard, mentre “SH” per SuperHard. In ogni caso si produrrà una miscela con del bitume modificato.

I numeri 10 o 12, invece, indicano la dimensione massima degli aggregati e con la giusta quantità poi sono stati confezionati i provini.

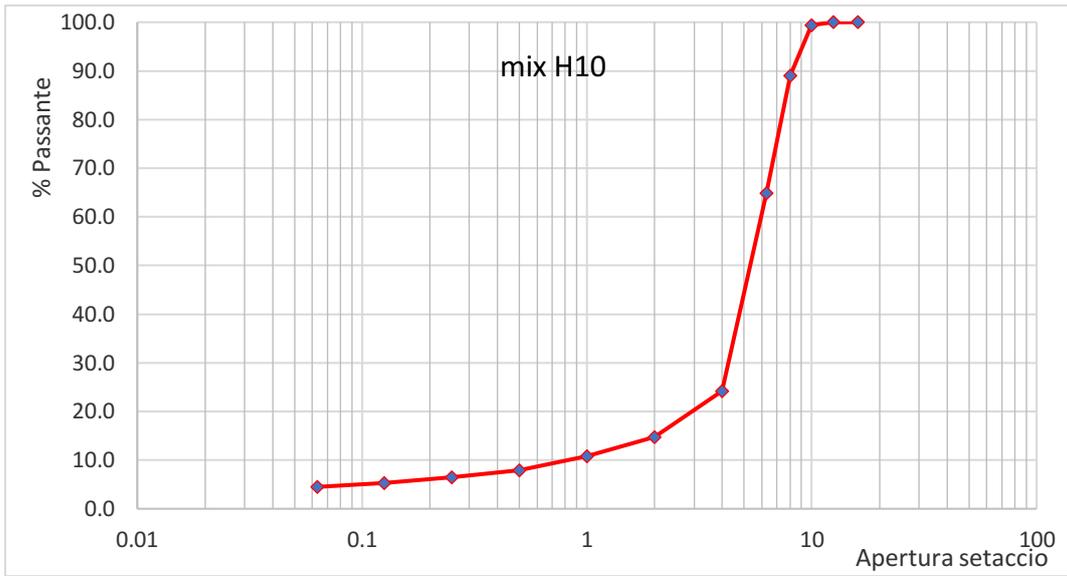


Fig.3.12 Curva granulometrica miscela H10

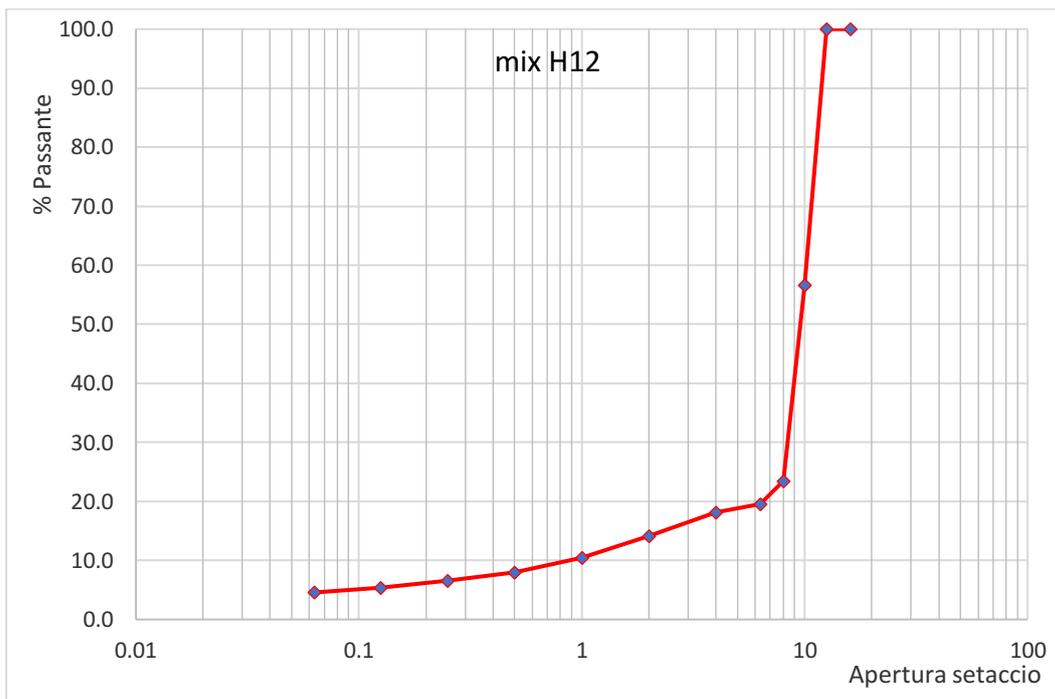


Fig.3.13 Curva granulometrica miscela H12

Capitolo 4 – Materiali

In questo capitolo della tesi, verranno descritti i vari materiali che sono stati utilizzati per il confezionamento dei provini di conglomerato bituminoso che poi sono stati portati a rottura. Tra questi troviamo gli aggregati (sabbia 0/4 e basalto 4/8 – basalto 8/12), i filler (calcareao e di recupero), le fibre di tessuto e il bitume.

4.1 Aggregati

4.1.1 Sabbia 0/4

Durante le varie miscele è stata utilizzata una sabbia di natura calcarea, di un colore bianco-panna. Gli aggregati calcarei hanno un comportamento basico e una maggiore aderenza al bitume e quindi un'elevata aderenza bitume-aggregato. In tutte le miscele la sabbia era caratterizzata da una pezzatura 0/4.



Fig.4.1 Sabbia 0/4 utilizzata nelle miscele

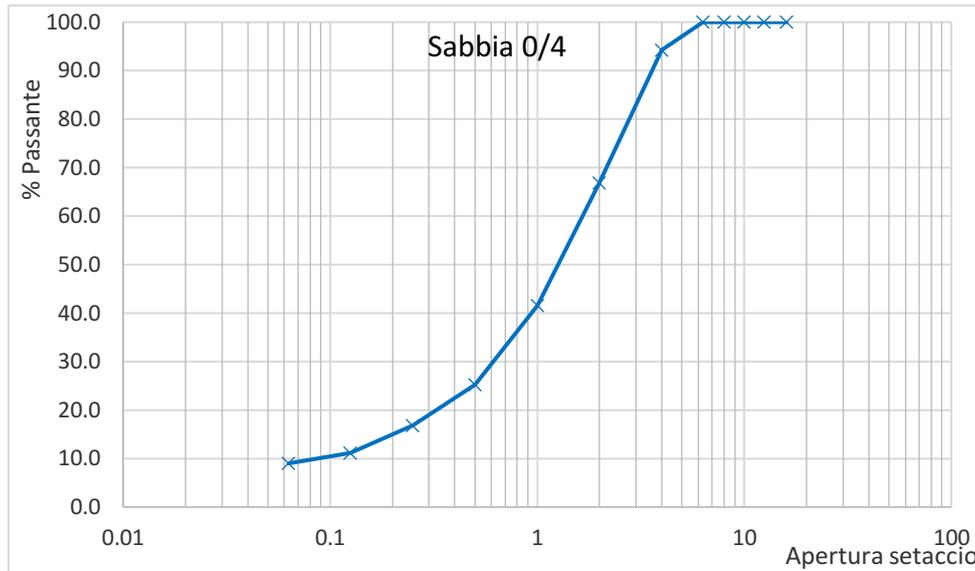


Fig.4.2 Curva granulometrica della Sabbia 0/4

4.1.2 Basalto

Per quanto riguarda il basalto invece, durante la sperimentazione e la preparazione delle ricette sono stati usati due tipi di basalto diversi: il basalto 4/8 e il basalto 8/12: il basalto 4/8 è l'aggregato calcareo più piccolo a livello di pezzatura con un colore tendente al grigio scuro, mentre il basalto 8/12 è quello più grande a livello di pezzatura ed ha un colore grigio più chiaro. In entrambi i casi, nella classificazione, il primo numero indica il diametro minimo dell'aggregato (d), il secondo numero indica il diametro massimo (D).



Fig.4.3 Basalto 4/8 utilizzato nelle miscele



Fig.4.4 Basalto 8/12 utilizzato nelle miscele

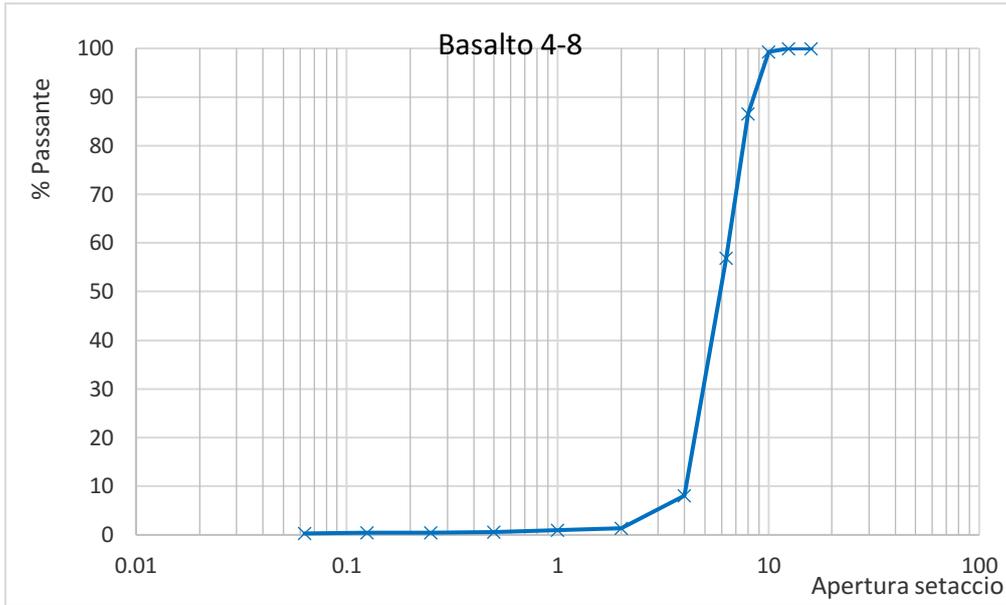


Fig.4.5 Curva granulometrica Basalto 4/8

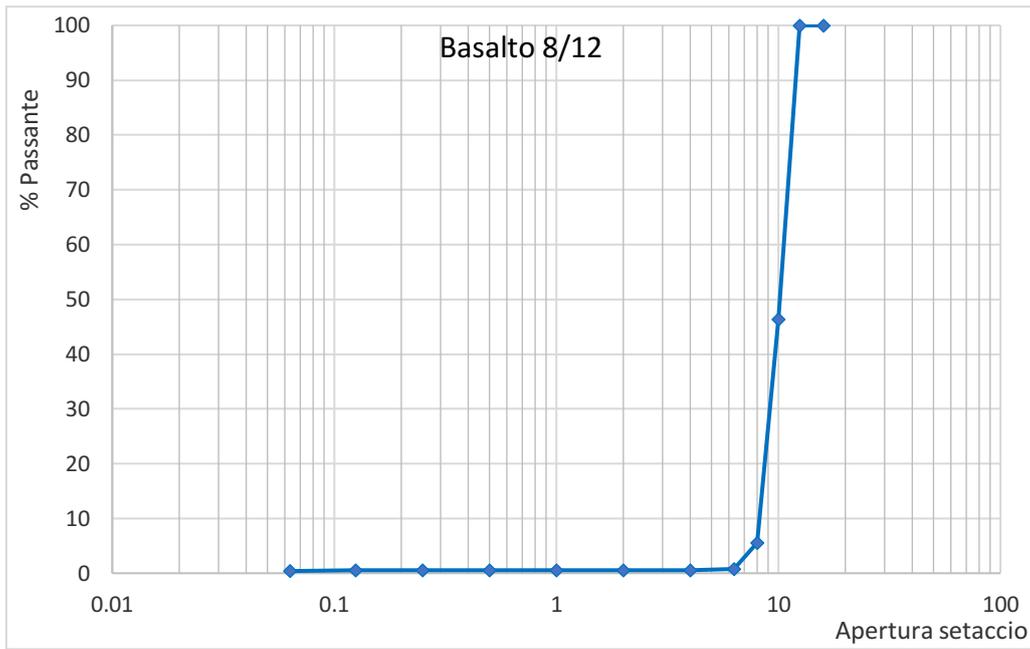


Fig.4.6 Curva granulometrica Basalto 8/12

4.2 Filler

I filler utilizzati per la preparazione dei provini di conglomerato bituminoso sono due: il filler calcareo e il filler di recupero. Il primo è ottenuto dalla frantumazione della roccia calcarea, mentre il secondo è recuperato durante la fase di produzione dei conglomerati bituminosi. Entrambi costituiscono la parte più fina all'interno della miscela. Il dosaggio e la composizione sono particolarmente importanti perché la sua presenza, unito al bitume, portano alla formazione del mastice. Questo assicura molteplici proprietà alle miscele come la capacità di evitare fenomeni di trasudamento, di prevenire lo spogliamento e di migliorare la stabilità.

Secondo le normative vigenti, si può definire come filler la frazione di aggregato con dimensioni minori a 0.075 mm, mentre per la normativa UNI EN 933-1 la dimensione massima è di 0,063 mm.



Fig.4.7 Filler Calcareo utilizzato nelle miscele

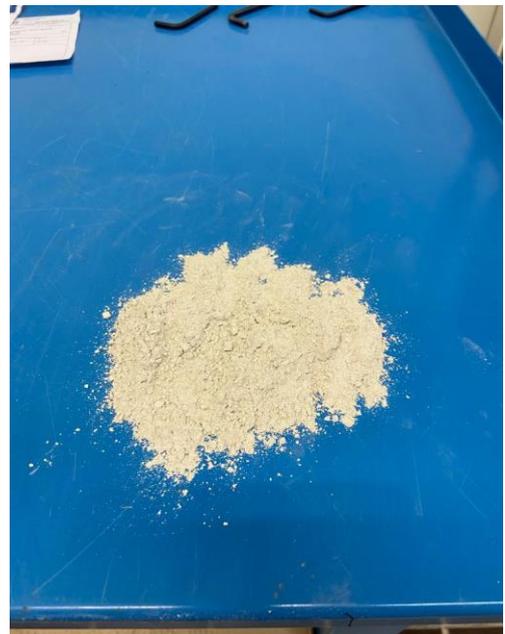


Fig.4.8 Filler di Recupero utilizzato nelle miscele

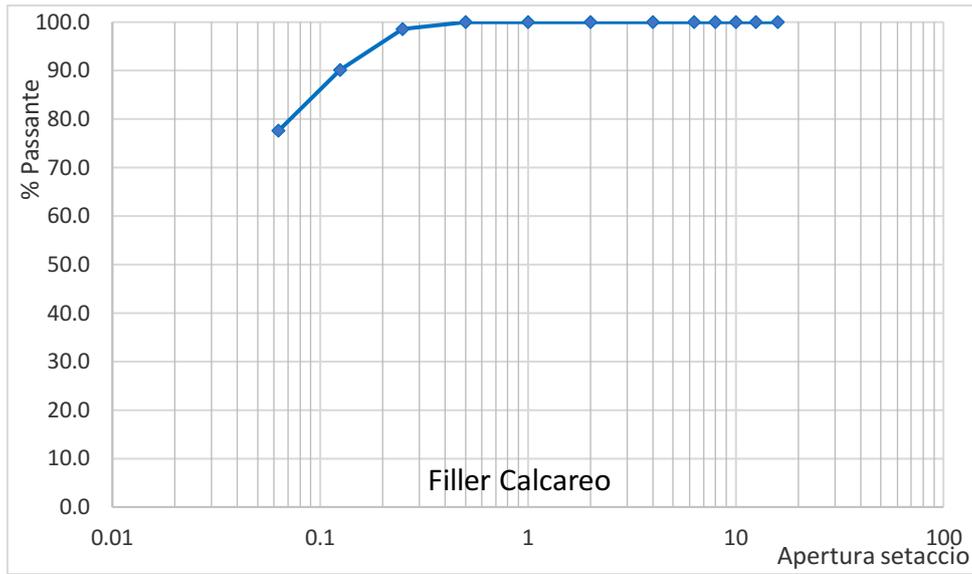


Fig.4.9 Curva granulometrica Filler Calcereo

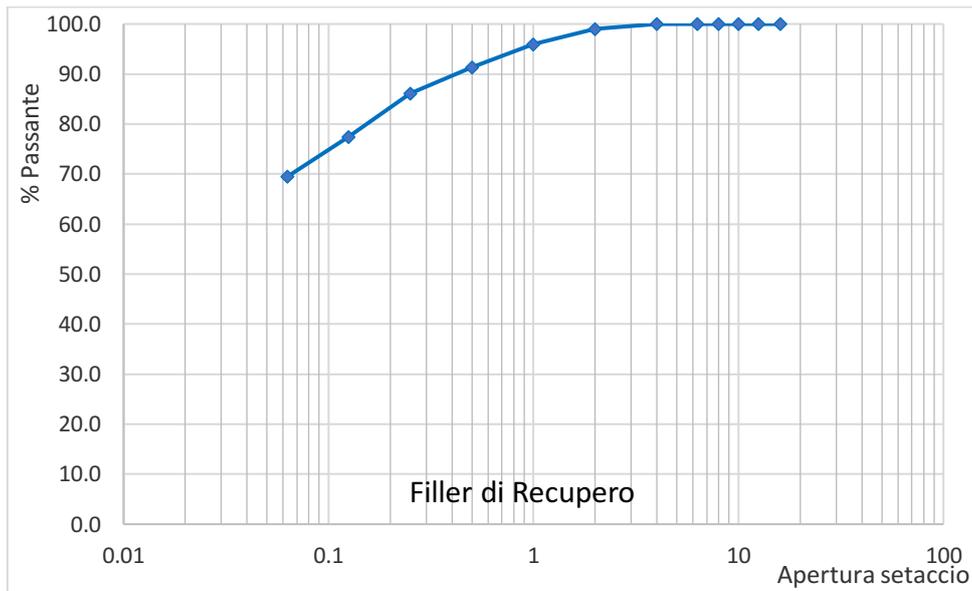


Fig.4.10 Curva granulometrica Filler di Recupero

4.3 Fibre di tessuto

Le fibre di tessuto sono di un colore tendente al verde, vengono inserite all'interno del conglomerato bituminoso per evitare il trasudamento del bitume dovuto all'eccessivo quantitativo di bitume presente nelle miscele drenanti, oltre alla ridotta presenza di aggregato fino, che normalmente tende ad assorbire il bitume. Inoltre, permette di migliorare le prestazioni in termini di rugosità superficiale, resistenza agli sbalzi termici e resistenza alla deformazione. Nella miscela non vengono inserite grandi quantità di fibre e, anche se sono poche, riescono a compiere e svolgere il loro lavoro.



Fig.4.11 Fibre di tessuto utilizzate nelle miscele

4.4 Bitume

Il bitume deriva dai processi di raffinazione del petrolio grezzo, questo rappresenta una delle componenti principali all'interno della miscela di conglomerato bituminoso viste le sue proprietà leganti che lo caratterizzano. Il suo scopo è infatti quello di garantire: adesione (tra bitume e aggregati), coesione (tra le particelle di bitume) e impermeabilizzazione. Le proprietà comunque variano a seconda della temperatura in cui si trova, infatti ad esempio, per produrre i provini, il bitume è stato messo in forno a 165°C per almeno due ore affinché si potesse sciogliere ed essere liquido, visto che a temperatura ambiente si trova in uno stato semi-solido. Questa proprietà di trovarsi in stati diversi a diverse temperature costituisce un grosso pregio e un grosso vantaggio.

Nell'ambito stradale i bitumi convenzionali hanno offerto prestazioni buone e soddisfacenti per molti anni: nel corso degli anni però la "richiesta stradale" è cambiata, con progetti sempre più difficili da realizzare, ed è per questo che al giorno d'oggi sono stati elaborati altri tipi di bitume, oltre a quello tradizionale (Hard) con contenuto di polimero tra il 4-5%. Infatti, attraverso l'aggiunta di polimeri, si può ottenere un bitume modificato, che si adatta alle diverse situazioni nelle quali deve essere utilizzato, garantendone prestazioni più elevate in termini di resistenza e durabilità. Ne è un esempio il bitume SuperHard che ho avuto modo di utilizzare per la produzione di miscele in laboratorio (quantitativo di polimeri SBS intorno all'8-9%) [S9].

Capitolo 5 – Risultati

In questo capitolo vengono analizzati i risultati elaborati in seguito alle varie prove eseguite sulle 4 diverse miscele prodotte in laboratorio.

5.1 Percentuale dei Vuoti

Nella tabella sottostante sono elencate le percentuali di vuoti che sono state ricavate per le 4 miscele drenanti:

codice provino	D	h1	h2	hm	m [g]	ρ_{max}	V [mm ³]	V [cm ³]	ρ_{geom}	V _{vuoti} [%]
H12_1	100	60,6	60,7	60,7	921,5	2,486	476344,0	476,344	1,9345	22,20
H12_2	100	60,7	60,9	60,8	927,5		477522,1	477,5221	1,9423	21,88
H12_3	100	61,5	61,7	61,6	924,8		483805,3	483,8053	1,9115	23,12
H12_4	100	61	61,7	61,4	928,8		481841,8	481,8418	1,9276	22,48
H12_5	100	61,4	61,6	61,5	927,9		483019,9	483,0199	1,9210	22,74
H12_6	100	62	61,9	62,0	926,9		486554,2	486,5542	1,9050	23,38
										22,63

Fig.5.1 Percentuale dei vuoti miscela H12

codice provino	D	h1	h2	hm	m [g]	ρ_{max}	V [mm ³]	V [cm ³]	ρ_{geom}	V _{vuoti} [%]
SH12_1	100	62,1	61,8	61,95	928,8	2,486	486554,2	486,554	1,908934446	23,23
SH12_2	100	60,9	61,1	61	926,6		479092,9	479,093	1,934071741	22,22
SH12_3	100	57,7	57,8	57,75	913,1		453567,4	453,567	2,013151564	19,04
SH12_4	100	58,9	59,1	59	926		463384,9	463,385	1,998338675	19,63
SH12_5	100	55,2	55,2	55,2	914		433539,8	433,54	2,108226348	15,21
SH12_6	100	55	55	55	915,7		431969,0	431,969	2,119828093	14,75
										21,03

Fig.5.2 Percentuale dei vuoti miscela SH12

In questa miscela i provini SH12_5 e SH12_6 sono stati esclusi dal calcolo della media per un problema durante la fase di compattazione.

codice provino	D	h1	h2	hm	m [g]	ρ_{max}	V [mm ³]	V [cm ³]	ρ_{geom}	V _{vuoti} [%]
H10_1	100	59,4	59,2	59,3	933,1	2,480	465741,1	465,7411	2,0035	19,23
H10_2	100	59,5	59,7	59,6	934		468097,3	468,0973	1,9953	19,56
H10_3	100	59	58,9	59,0	930,9		462992,2	462,9922	2,0106	18,94
H10_4	100	59,5	59,6	59,6	934,8		467704,6	467,7046	1,9987	19,42
H10_5	100	59,2	59,3	59,3	933,2		465348,4	465,3484	2,0054	19,15
H10_6	100	58,4	58,3	58,4	930,7		458279,8	458,2798	2,0309	18,12
										19,07

Fig.5.3 Percentuale dei vuoti miscela H10

codice provino	D	h1	h2	hm	m [g]	ρ_{max}	V [mm ³]	V [cm ³]	ρ_{geom}	V _{vuoti} [%]
SH10_1	100	60,6	60,5	60,6	928,2	2,480	475558,6	476	1,9518	21,3
SH10_2	100	60,5	60,5	60,5	928,4		475165,9	475	1,9538	21,2
SH10_3	100	60,6	60,7	60,7	929,3		476344,0	476	1,9509	21,3
SH10_4	100	60,3	60,3	60,3	927,8		473595,1	474	1,9591	21,0
SH10_5	100	60,2	60,4	60,3	928,3		473595,1	474	1,9601	21,0
SH10_6	100	58,8	58,6	58,7	898,2		461028,7	461	1,9483	21,5
										21,2

Fig.5.4 Percentuale dei vuoti miscela SH12

5.2 Prova a trazione indiretta

codice provino	dry					wet				
	ϵ	P [kN]	ITS [MPa]	CTI [MPa]	CT-index	ϵ	P [kN]	ITS [MPa]	CTI [MPa]	CT-index
H12_1	0,0272	4,741	0,498	28,4	133,5					
H12_2						0,0344	3,89	0,407	18,9	486,8
H12_3	0,0292	4,571	0,472	25,4	257,8					
H12_4						0,0312	3,835	0,398	19,93	310,2
H12_5	0,0303	4,355	0,451	23,4	226,5					
H12_6						0,0555	4,307	0,442	13,4	362,6
			0,474	25,4	226,5			0,416	18,9	362,6

Fig.5.5 Risultati prova a trazione indiretta in condizioni DRY e WET miscela H12

codice provino	dry					wet				
	ϵ	P [kN]	ITS [MPa]	CTI [MPa]	CT-index	ϵ	P [kN]	ITS [MPa]	CTI [MPa]	CT-index
SH12_1	0,0434	5,544	0,569	21,1	800,7					
SH12_2						0,048	4,793	0,5	16	5837,3
SH12_3	0,0442	6,444	0,71	23,38	1284,3					
SH12_4						0,0402	5,319	0,574	21,87	1523,5
SH12_5	0,0453	8,2	0,946	29,8	1863,3					
SH12_6						0,0455	7,519	0,87	27,7	1110,9
			0,640	23,38	1284,3			0,537	21,87	1523,5

Fig.5.6 Risultati prova a trazione indiretta in condizioni DRY e WET miscela SH12

codice provino	dry					wet				
	ϵ	P [kN]	ITS [MPa]	CTI [MPa]	CT-index	ϵ	P [kN]	ITS [MPa]	CTI [MPa]	CT-index
H10_1	0,0288	4,939	0,53	27,9	161,7					
H10_2						0,0364	5,243	0,56	23,3	184,5
H10_3	0,0262	5,507	0,594	34,26	131,2					
H10_4						0,0283	5,735	0,613	34,23	145,3
H10_5	0,0255	5,608	0,602	37,5	95,7					
H10_6						0,0282	5,973	0,651	34,5	141,8
			0,575	34,26	131,2			0,608	34,23	145,3

Fig.5.7 Risultati prova a trazione indiretta in condizioni DRY e WET miscela H10

codice provino	dry					wet				
	ϵ	P [kN]	ITS [MPa]	CTI [MPa]	CT-index	ϵ	P [kN]	ITS [MPa]	CTI [MPa]	CTI-INDEX
SH10_1	0,0477	5,398	0,573	16,9	741,1					
SH10_2						0,0479	5,514	0,583	18,4	1251,3
SH10_3	0,0407	5,869	0,621	23,78	736,1					
SH10_4						0,0426	5,957	0,632	23,63	810,4
SH10_5	0,0417	6,258	0,664	24,7	1826,7					
SH10_6						0,0411	0,607	0,612	22,5	598,6
			0,619	23,78	741,1			0,609	22,5	810,4

Fig.5.8 Risultati prova a trazione indiretta in condizioni DRY e WET miscela SH10

5.3 Prova Cantabro

codice provino	dry			wet		
	mi [g]	mf [g]	Particle Loss, PL [%]	mi [g]	mf [g]	Particle Loss, PL [%]
H12_I	1012,8	763,2	24,6			
H12_II				1023,2	756,6	26,1
H12_III	1005,3	872,3	13,2			
H12_IV				1020,8	715,2	29,9
H12_V	1001,1	909,3	9,2			
H12_VI				1014,6	846,1	16,6
H12_VII	995,5	931,4	6,4			
H12_VIII				971	937,2	3,5
			11,2			26,1

Fig.5.9 Risultati prova Cantabro miscela H12

In questa miscela l'ultimo provino (H12_VIII) è stato escluso dai calcoli per via della percentuale dei vuoti più bassa.

codice provino	dry			wet		
	mi [g]	mf [g]	Particle Loss, PL [%]	mi [g]	mf [g]	Particle Loss, PL [%]
SH12_I	1008,1	944,8	6,3			
SH12_II				1025,4	406,9	60,3
SH12_III	1010,1	917,6	9,2			
SH12_IV				1022,6	511,1	50,0
SH12_V	1012,1	888,1	12,3			
SH12_VI				1026	410,9	60,0
SH12_VII	1010,8	889,7	12,0			
SH12_VIII				1024,6	437,5	57,3
			10,6			58,6

Fig.5.10 Risultati prova Cantabro miscela SH12

codice provino	dry			wet		
	mi [g]	mf [g]	Particle Loss, PL [%]	mi [g]	mf [g]	Particle Loss, PL [%]
H10_I	1018	943,8	7,3			
H10_II				1046	841,7	19,5
H10_III	1020,7	935	8,4			
H10_IV				1048	859,1	18,0
H10_V	1020,6	932,8	8,6			
H10_VI				1048	852	18,7
H10_VII	1016,6	909,3	10,6			
H10_VIII				1047,1	888	15,2
			8,5			18,7

Fig.5.11 Risultati prova Cantabro miscela H10

codice provino	dry			wet		
	mi [g]	mf [g]	Particle Loss, PL [%]	mi [g]	mf [g]	Particle Loss, PL [%]
SH10_I	1014,1	979	3,5			
SH10_II				1044,7	882,1	15,6
SH10_III	1012,6	961	5,1			
SH10_IV				1038,7	867,9	16,4
SH10_V	1013,9	980,7	3,3			
SH10_VI				1043,8	887	15,0
SH10_VII	1018,5	981,9	3,6			
SH10_VIII				1042,7	917,4	12,0
			3,5			15,6

Fig.5.12 Risultati prova Cantabro miscela SH10

5.4 Prova SCB

codice provino		D [mm]	s [mm]	h [mm]	i [mm]	dry		wet	
						S _{max} [mm]	F _{max} [mm]	S _{max} [mm]	F _{max} [mm]
H12_α	H12_α_sup_1	150	75	50,9	10	0,822	3,146		
	H12_α_sup_2	150	75	51,3	10			0,849	3,508
	H12_α_inf_1	150	75	50,7	10	0,787	3,526		
	H12_α_inf_2	150	75	49,6	10			1,012	3,477
H12_β	H12_β_sup_1	150	75	49,6	10	1,161	2,641		
	H12_β_sup_2	150	75	50,6	10			1,068	3,012
	H12_β_inf_1	150	75	51,2	10	0,811	3,176		
	H12_β_inf_2	150	75	50,3	10			1,168	3,386

Fig.5.13 Risultati prova SCB miscela H12

codice provino		D [mm]	s [mm]	h [mm]	i [mm]	dry		wet	
						S _{max} [mm]	F _{max} [mm]	S _{max} [mm]	F _{max} [mm]
SH12_α	SH12_α_sup_1	150	75	50	10	2,971	4,036		
	SH12_α_sup_2	150	75	50,2	10			1,797	3,529
	SH12_α_inf_1	150	75	49,8	10	1,842	4,517		
	SH12_α_inf_2	150	75	50,6	10			1,485	3,216
SH12_β	SH12_β_sup_1	150	75	50	10	1,344	4,316		
	SH12_β_sup_2	150	75	50,5	10			1,138	3,313
	SH12_β_inf_1	150	75	51,6	10	1,099	3,286		
	SH12_β_inf_2	150	75	49,9	10			1,311	3,641

Fig.5.14 Risultati prova SCB miscela SH12

codice provino		D [mm]	s [mm]	h [mm]	i [mm]	dry		wet	
						S _{max} [mm]	F _{max} [mm]	S _{max} [mm]	F _{max} [mm]
H10_α	H10_α_sup_1	150	75	51,2	10	1,041	3,355		
	H10_α_sup_2	150	75	49,9	10	0,84		0,830	3,167
	H10_α_inf_1	150	75	50,2	10	0,935	3,501		
	H10_α_inf_2	150	75	50,9	10	2,992		2,983	3,739
H10_β	H10_β_sup_1	150	75	50,8	10	0,606	3,723		
	H10_β_sup_2	150	75	51	10	0,827		0,818	3,736
	H10_β_inf_1	150	75	50,5	10	0,762	3,966		
	H10_β_inf_2	150	75	49,6	10	2,022		2,023	4,356

Fig.5.15 Risultati prova SCB miscela H10

codice provino		D [mm]	s [mm]	h [mm]	i [mm]	dry		wet	
						S _{max} [mm]	F _{max} [mm]	S _{max} [mm]	F _{max} [mm]
SH10_α	SH10_α_sup_1	150	75	48,2	10	1,245	3,179		
	SH10_α_sup_2	150	75	50	10			1,104	3,088
	SH10_α_inf_1	150	75	50,2	10	1,070	3,079		
	SH10_α_inf_2	150	75	50	10			0,985	3,556
SH10_β	SH10_β_sup_1	150	75	49,2	10	1,438	3,717		
	SH10_β_sup_2	150	75	50,6	10			0,950	4,021
	SH10_β_inf_1	150	75	50	10	1,037	3,681		
	SH10_β_inf_2	150	75	48,5	10			2,899	3,517

Fig.5.16 Risultati prova SCB miscela SH10

5.5 Confronti

5.5.1 Percentuale dei vuoti

	Vgeom (%)
H12	22,63
SH12	21,03
H10	19,07
SH10	21,22

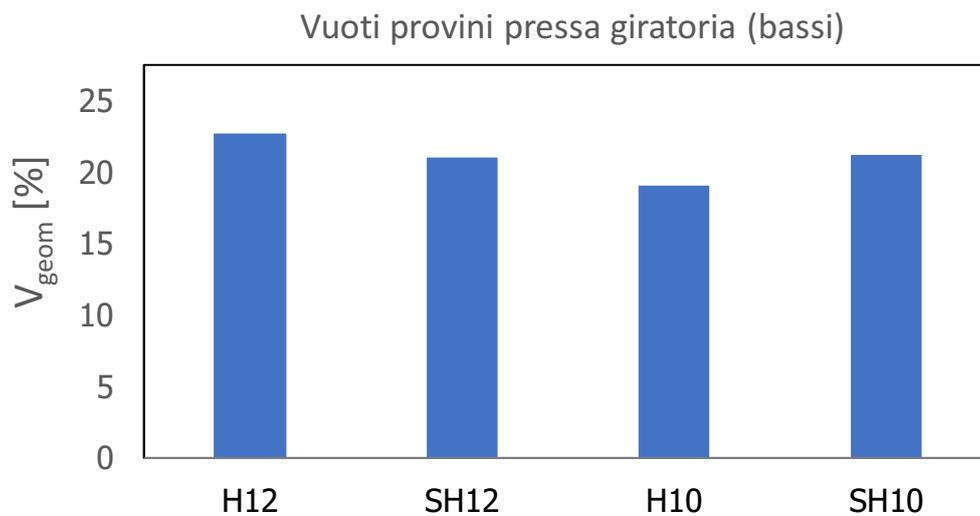


Fig.5.17 Tabella e istogramma percentuale vuoti

Come si può notare dall'istogramma (fig. 5.17), le quattro diverse miscele hanno più o meno tutte una percentuale di vuoti che si aggira al 20%, poiché a monte di questa sperimentazione è stata effettuata un'analisi per tarare le miscele in modo tale da ottenere tale contenuto dei vuoti. Piccoli scostamenti dal valore del 20% sono stati ottenuti nel caso della miscela H12, che ha un valore dei vuoti qualche punto percentuale superiore alla media, e nel caso di H10, con valori di un punto percentuale inferiore al target.

5.5.2 ITS, CTI e CT-INDEX

	ITS (MPa)		CTI		CT-index	
	dry	wet	dry	wet	dry	wet
H12	0,47	0,4	25,4	18,9	226,5	362,6
SH12	0,64	0,54	23,38	21,87	1284,30	1523,50
H10	0,58	0,6	34,26	34,23	131,2	145,3
SH10	0,62	0,6	23,78	22,5	741,1	810,4

Fig.5.18 Tabella dati ITS, CTI, CT-INDEX

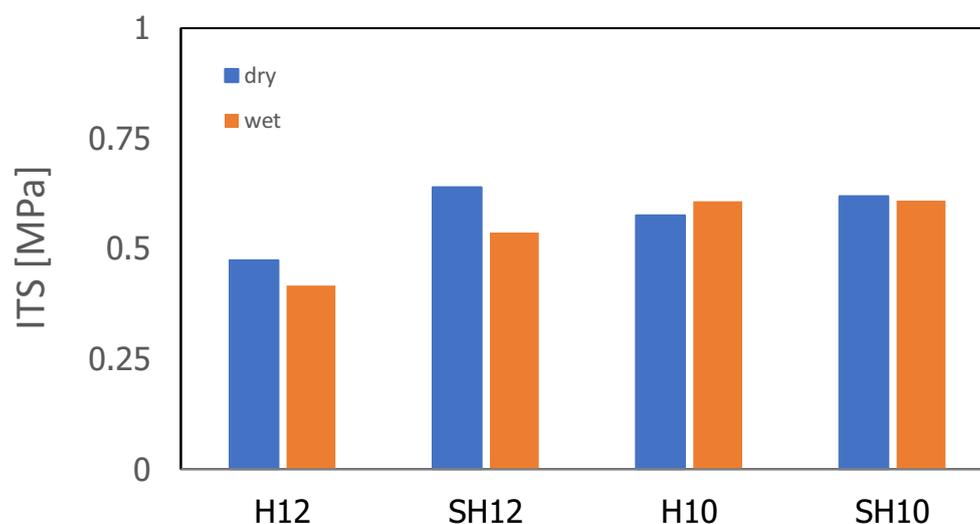


Fig.5.19 Istogramma dati ITS

Dal grafico 5.19 è possibile osservare come ci siano delle leggere differenze tra le miscele caratterizzate da un diametro massimo di 12 mm e quelle di 10 mm. Questa differenza, tuttavia, è visibile solamente quando si utilizza un bitume modificato tradizionale, mentre con un bitume super modificato le resistenze in condizioni asciutte (dry) addirittura migliorano. Inoltre, analizzando i risultati delle stesse prove effettuate in condizioni bagnate (wet) si nota come nelle miscele H12 le resistenze peggiorino leggermente rispetto alle condizioni asciutte (dry), mentre questo non accade nelle miscele con diametro massimo 10.

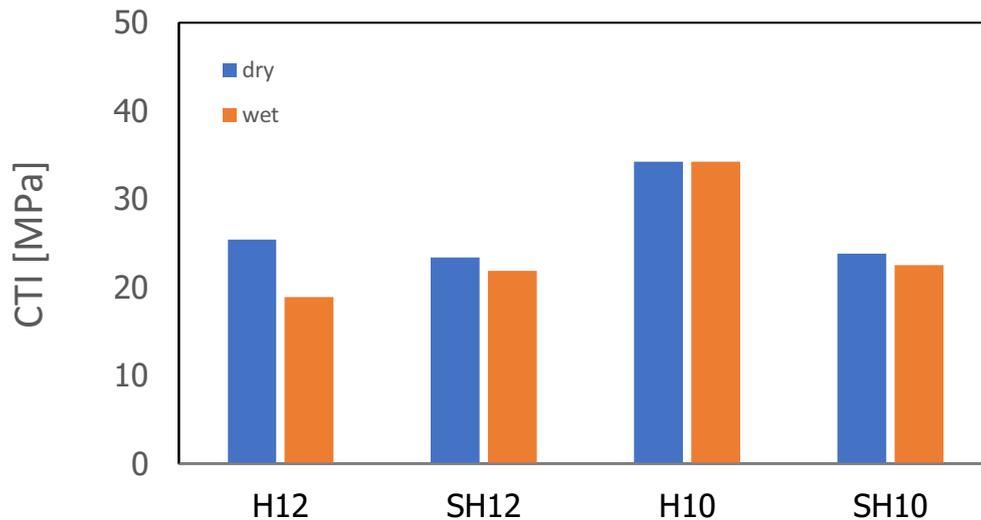


Fig.5.20 Istogramma dati CTI

In termini di rigidezza CTI (fig. 5.20) tutte le miscele hanno valori simili ed intorno a 22-24 MPa. La differenza che si nota nella miscela H10 è dovuta più al ridotto contenuto di vuoti dei provini, che del legante usato o del diametro massimo dell'aggregato.

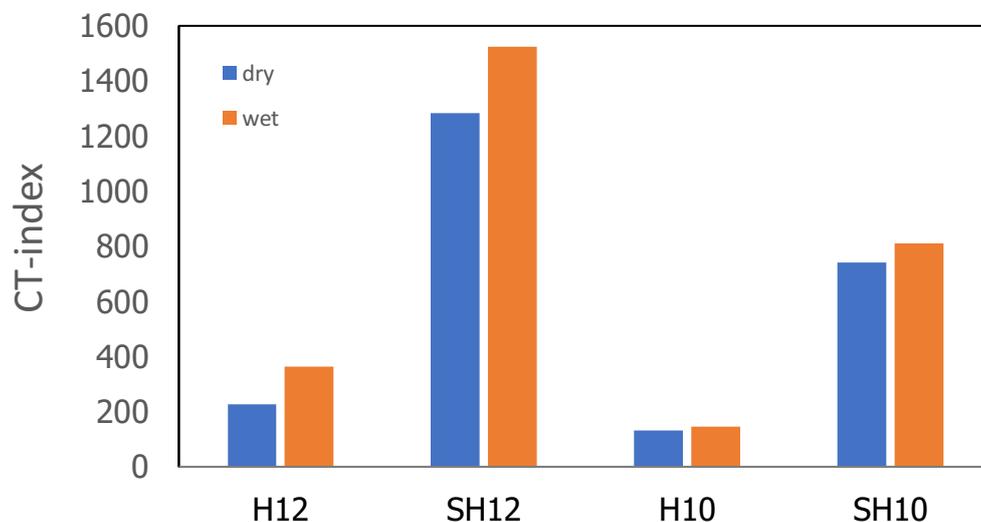


Fig.5.21 Istogramma dati CT-INDEX

Nell'indice CT-INDEX, invece, ci sono delle differenze tra le miscele come si può notare negli istogrammi (fig.5.21). In primo luogo, si può notare che le miscele con legante super modificato (SH12 e SH10) hanno un valore di energia a rottura notevolmente più alto rispetto alle miscele con bitume hard (H12 e H10). Questo è dovuto alla maggiore presenza di polimero SBS all'interno, il quale incrementa notevolmente l'elasticità del materiale. Tra le miscele con bitume super hard (SH), quella con diametro massimo 12 mm restituisce valori di energia (CT-index) di circa il doppio più alti.

5.5.3 Prova Cantabro

	Perdita di massa (%)	
	dry	wet
H12	11,20	26,1
SH12	10,57	58,63
H10	8,50	18,7
SH10	3,53	15,6

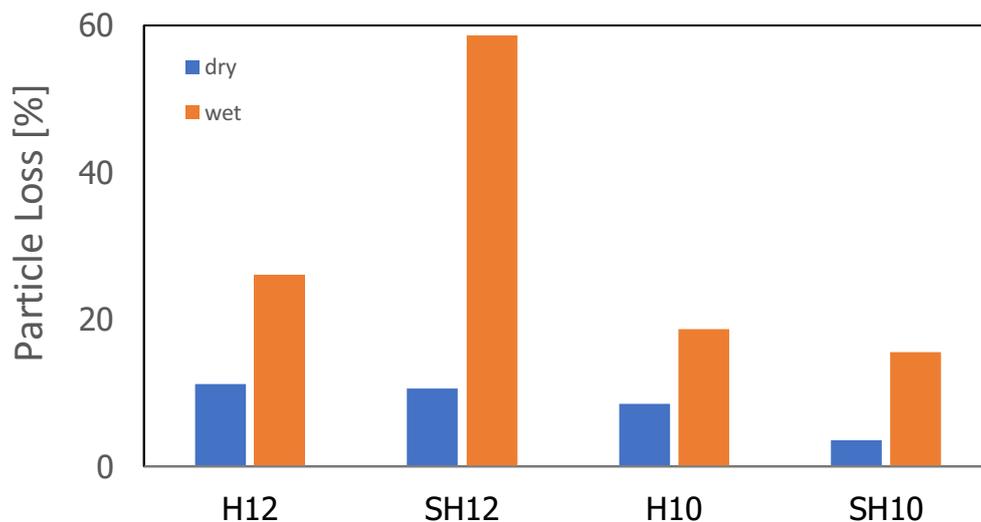


Fig.5.22 Tabella e istogramma risultati prova Cantabro

Dalla tabella e dall'istogramma (fig. 5.22) si può notare come i provini abbiano perso più massa dopo essere stati condizionati in condizioni bagnate (wet). La differenza più evidente si nota soprattutto nella miscela SH12 dove la differenza di perdita di massa tra provini condizionati in modo asciutto e in modo bagnato è del 50% in più (circa). Questo è probabilmente dovuto al diverso legante impiegato, il quale soffre il contatto con l'acqua. Tale problema si riduce notevolmente nel caso di miscela con diametro massimo 10 mm.

5.5.4 Prova SCB

	SCB_forza massima	
	dry	wet
H12	3,12	3,35
SH12	4,04	3,42
H10	3,64	3,7
SH10	3,41	3,5

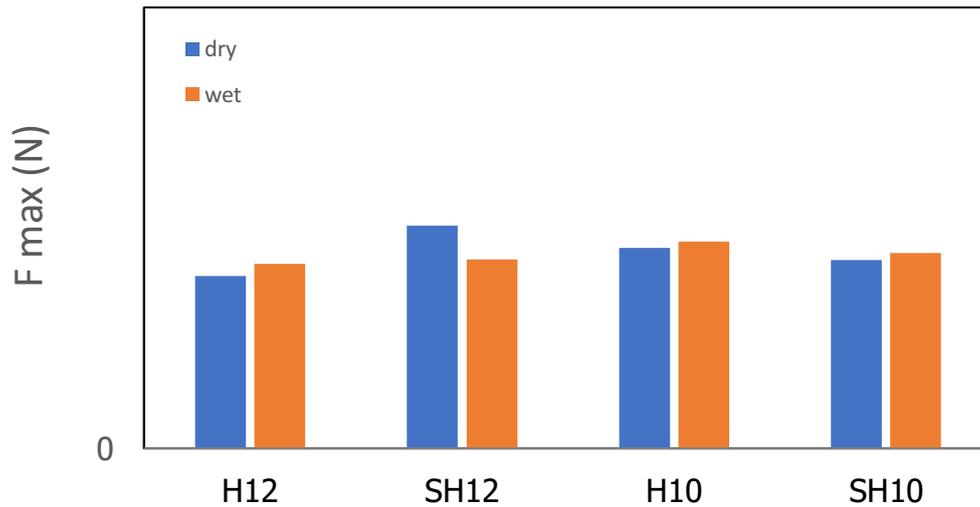


Fig.5.23 Tabella e istogramma risultati prove SCB

Dai dati estratti per la prova SCB (fig. 5.23) si può vedere come la forza massima impressa dalla pressa sul provino per romperlo sia pressoché uguale in tutte le diverse miscele condizionate sia in modo asciutto, sia in modo bagnato.

Capitolo 6 – Conclusioni

La sperimentazione oggetto della tesi, condotta presso il Laboratorio del Dipartimento di “Ingegneria Civile, Edile ed Architettura – sezione Infrastrutture – area Strade” dell’Università Politecnica delle Marche, è stata svolta al fine studiare i tappeti drenanti e vedere quale miscela ha condizioni migliori e reagisce meglio in base: al diametro massimo degli aggregati, al tipo di bitume utilizzato e alle condizioni asciutte/bagnate. In particolare, sono state valutate 4 famiglie di miscele:

- H12
- SH12
- H10
- SH10

Per ogni famiglia di miscele sono stati prodotti:

- 6 provini testati con la prova a trazione indiretta ITS
- 8 provini testati con la prova Cantabro
- 8 semilune testate con la prova SCB

Tutti i provini sono stati portati a rottura dopo un condizionamento che variava a seconda delle condizioni asciutte o bagnate.

Dall’analisi dei risultati è possibile trarre le seguenti considerazioni:

- Non c’è una grande differenza in percentuale di vuoti nelle diverse miscele;
- C’è una leggera differenza nella prova a trazione indiretta a seconda che si utilizzi come diametro massimo 12 mm o 10 mm;
- Per la rigidità CTI tutte le miscele hanno valori simili;
- Per quanto riguarda in CT-index, invece, esso è notevolmente più elevato per le miscele prodotte con bitume super modificato;
- Nella prova Cantabro la miscela SH12 in condizione bagnata perde più massa rispetto alle altre tre miscele;
- Nella prova SCB la forza per rompere i provini è praticamente quasi uguale per tutti;

In conclusione, si può dedurre che l'impiego di un legante super modificato rispetto ad uno modificato tradizionale, non consente di ottenere sufficienti benefici tali da giustificare il notevole maggior costo di produzione. Inoltre, la scelta di un diametro massimo di 12 mm della miscela, piuttosto che uno da 10 mm, non comporta sostanziali differenze in termini prestazionali.

Capitolo 7 – Sitografia

[S1] <https://it.wikipedia.org/wiki/Strada>

[S2] https://it.wikipedia.org/wiki/Conglomerato_bituminoso

[S3] <https://blog.tradimalt.com/cemento-2/>

[S4] <https://futuraconglomerati.it/la-pavimentazione-stradale/>

[S5] <https://eu.camsrecycling.com/riciclo-asfalto/fresato-dasfalto-i-benefici-del-riciclo-e-il-processo-di-recupero/>

[S6] <https://geoconsultingitalia.com/riciclaggio-asfalto-a-freddo/>

[S7] <https://cori-srl.com/asfalto-drenante/>

[S8] <https://www.asfalti.it/asfalto-modificato/>

[S9] <https://it.wikipedia.org/wiki/Bitume>

Ringraziamenti

Finalmente sono giunto alla conclusione di questo mio primo percorso universitario, ora è arrivato il momento dei ringraziamenti. Generalmente io non sono una persona a cui piace scegliere le cose più semplici e a “vincere facile” come si dice, e così è stato anche per la scelta del mio percorso universitario. Certamente questi quasi 5 anni hanno voluto dire tanto per me personalmente, sono stati un’altalena di emozioni: dall’adrenalina e felicità post superamento di un esame, a momenti di sconforto totale dopo una bocciatura, passando per l’ansia, le paure e le insicurezze dei giorni preesame. Quindi il primo ringraziamento va a me stesso, per avercela messa sempre tutta, per non essermi mai abbattuto e per aver raggiunto l’obiettivo finale; questa era una sorta di sfida e di rivincita per me contro tutti coloro che pensavano che non ce l’avrei mai fatta. Ovvio, dopo un percorso più lungo del dovuto sono consapevole di aver commesso degli errori (e sono autocritico nei miei confronti), ma questo credo faccia parte del gioco e di tutti gli errori/scelte sbagliate ne farò tesoro per il futuro. Ora come ora, dopo gli svariati sacrifici che ho fatto, posso finalmente dire di avercela fatta!

Un ENORME ringraziamento va ai miei genitori (e anche a mio fratello) che mi hanno sia permesso di proseguire con gli studi universitari una volta terminato il liceo (non una cosa così scontata oggiogiorno), sia supportato nei periodi negativi, come ad esempio dopo le bocciature, spingendomi a crederci sempre di più e a non mollare mai.

Un pensiero va alla mia ragazza, non presente da subito alla mia causa, ma poi anche lei partecipa al 100% alle ansie, preoccupazioni, paure preesame e sempre pronta, così come i miei genitori, a confortarmi e a spendere sempre una, o più, parole positive, di conforto, di aiuto.

Un grazie anche ad alcuni miei compagni di studio, con qualcuno dei quali poi sono diventato grande amico e con qualcuno lo ero già prima di iniziare il percorso. Non li cito tutti, anche perché chi mi ha aiutato durante gli anni lo sa, non servono presentazioni. Ci siamo confrontati, scambiati appunti, dato esami insieme, supportati a vicenda e (loro prima di me) anche laureati. È stato un bel percorso.

Ultimo, ma non per importanza, un grazie al professor Bocci che con tutta la sua professionalità mi ha coinvolto pienamente nel suo corso di studio e mi ha permesso di svolgere il tirocinio nel laboratorio di strade dell’Università. Lì ho conosciuto il suo dottorando, l’ingegner Carlo Carpani e un GRANDE grazie va anche a lui. Con la sua gentilezza, disponibilità per qualsiasi dubbio/cosa e le

sue grandi capacità mi ha insegnato e trasmesso tantissime cose nuove che non sapevo e conoscevo; in questo periodo non ho smesso mai di imparare, facendomi appassionare ulteriormente a tutto ciò che riguarda il mondo ingegneristico delle strade ed infrastrutture.

Ora, conscio di tutte le cose positive che questo percorso mi ha dato, chiudo questo primo capitolo universitario (e della mia vita), pronto ad affrontare il secondo con il giusto spirito e con ancora più determinazione, guardando con positività al futuro.