



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

---

*Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile*

*DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E DELL'ARCHITETTURA (DICEA)*

**IMPIEGO DI SABBIE PROVENIENTI DAL  
TRATTAMENTO DELLE SCORIE DA RSU  
NEI CONGLOMERATI BITUMINOSI A  
CALDO**

**USE OF SANDS FROM THE MUNICIPAL SOLID WASTE  
TREATMENT IN HOT BITUMINOUS MIXTURES**

RELATORE:

*Prof. Ing. Maurizio Bocci*

CORRELATORE:

*Ing. Emiliano Prospero*

TESI DI LAUREA DI :

*Simona Caimmi*

---

*Anno Accademico 2020/2021*



**INDICE:**

<b>1. Introduzione</b>	<b>3</b>
<b>2. Stato dell'arte</b>	<b>4</b>
2.1 Edilizia e infrastrutture verso l'economia circolare	8
2.1.1 Progetto sperimentale nell'ambito dell'infrastruttura stradale	8
<b>3. Materiali</b>	<b>9</b>
3.1 Aggregati lapidei	12
3.1.1 Sabbia calcarea 0/6	13
3.1.2 Graniglia 4/8	15
3.1.3 Pietrisco 8/12	17
3.1.4 Pietrisco 12/25	18
3.1.5 Pietrisco 25/40	20
3.1.6 Graniglia basalto 4/8	21
3.1.7 Basalto artificiale 4/8	24
3.1.8 Pietrisco basalto 10/16	27
3.1.9 Filler Omya	30
3.1.10 Filler di recupero	32
3.2 Sabbia Matrix	34
3.3 Legante Drenoval	37
<b>4. Apparecchiature e metodologie di prova</b>	<b>40</b>
4.1 Determinazione della percentuale di bitume e della curva granulometrica (UNI EN 12697/1 – UNI EN 933-1)	40
4.2 Confezionamento delle miscele di conglomerato bituminoso	41
4.3 Compattazione dei provini con la pressa a taglio giratoria (UNI EN 12697-31)	47
4.4 Determinazione delle proprietà volumetriche (UNI EN 12697-5)	51
4.5 Determinazione delle caratteristiche di addensamento (UNI EN 12697-5)	52
4.6 Prova di modulo a trazione indiretta (UNI EN 12697-26)	54
4.7 Prova di Trazione Indiretta (UNI EN 12697-23)	57
4.8 Prova di sensibilità all'acqua (UNI EN 12697-12)	61

4.9 Test di cessione	63
<b>5. Analisi dei risultati sperimentali</b>	<b>66</b>
5.1 Mix design	66
5.2 Risultati Usura	70
5.2.1 Curva di addensamento	70
5.2.2 Percentuale dei vuoti	72
5.2.3 Risultati prove di modulo a trazione indiretta	72
5.2.4 Risultati prove di trazione indiretta	73
5.2.5 Risultati prova di sensibilità all'acqua	75
5.2.6 Risultati test di cessione	76
5.3 Risultati Binder	77
5.3.1 Curva di addensamento	77
5.3.2 Percentuale dei vuoti	80
5.3.3 Risultati prove di modulo a trazione indiretta	80
5.3.4 Risultati prove di trazione indiretta	81
5.3.5 Risultati prova di sensibilità all'acqua	83
5.3.6 Risultati test di cessione	84
5.4 Risultati Base	85
5.4.1 Curva di addensamento	85
5.4.2 Percentuale dei vuoti	87
5.4.3 Risultati prove di modulo a trazione indiretta	88
5.4.4 Risultati prove di trazione indiretta	89
5.3.5 Risultati test di cessione	91
<b>6. Conclusioni</b>	<b>92</b>
<b>7. Bibliografia e Sitografia</b>	<b>95</b>
<b>7.1. Bibliografia</b>	<b>95</b>
<b>7.2. Sitografia</b>	<b>95</b>

## 1. Introduzione

Il laboratorio di Strade dell'Università Politecnica delle Marche ha realizzato una sperimentazione in collaborazione con l'Officina dell'Ambiente S.p.a.

Tale sperimentazione consiste nel realizzare delle miscele di conglomerato bituminoso con una progressiva sostituzione della sabbia calcarea con la sabbia Matrix; questo realizzato per i tre strati della pavimentazione stradale: Usura, Binder e Base.

In seguito alle sostituzioni del 5 % ,10 % e 15% in peso di sabbia Matrix sono stati confrontati i risultati delle prove sperimentali con quelli ottenute da miscele vergini.

L'obiettivo principale della sperimentazione è valutare se le prestazioni e capacità delle miscele alterate sono migliori, peggiori o comparabili a quelle della miscela tradizionale.

In questo rapporto sono illustrate le modalità di esecuzione dei campioni di conglomerato bituminoso, le successive procedure di prova e i risultati ottenuti.

La presente tesi è strutturata come segue:

- Capitolo 2: introduzione generale sull'economia circolare, i cui principi sono le ipotesi della presente sperimentazione.
- Capitolo 3: spiegazione del programma sperimentale seguito, descrizione dei materiali impiegati nell'indagine, dalle curve granulometriche degli aggregati utilizzati alle caratteristiche principali dei leganti adoperati ed esposizione delle apparecchiature utilizzate per la realizzazione delle prove di laboratorio meccaniche con informazioni relative al loro funzionamento.
- Capitolo 4: descrizione ed analisi dei risultati derivanti da indagini volumetriche e meccaniche di laboratorio; quali calcolo del volume dei vuoti, misurazione del modulo di rigidità, della resistenza a trazione indiretta e della sensibilità all'acqua. Alla fine, è stato poi realizzato un confronto delle proprietà dei conglomerati realizzati con le varie miscele.

## 2. Stato dell'arte

Gli ultimi anni sono stati caratterizzati da un aumento della domanda di materie prime e allo stesso tempo a una scarsità delle risorse: molte delle materie prime e delle risorse essenziali per l'economia sono limitate, ma la popolazione mondiale continua a crescere e di conseguenza aumenta anche la richiesta di tali risorse finite.

Per risolvere questa criticità, è necessario effettuare una transizione dall'attuale modello economico lineare ad un'economia circolare; la quale, include proposte sulla progettazione di prodotti più sostenibili e sulla riduzione dei rifiuti.

L'economia circolare dunque, è un modello di produzione e consumo che implica condivisione, prestito, riutilizzo, riparazione, ricondizionamento e riciclo dei materiali e prodotti esistenti il più a lungo possibile.

Così facendo si estende il ciclo di vita dei prodotti, minimizzando la produzione di rifiuti.



*Figura 2.1 – Schema economia circolare*

Una volta che il prodotto ha terminato la sua funzione, i materiali di cui è composto vengono infatti reintrodotti, laddove possibile, nel ciclo economico. Così si possono continuamente riutilizzare all'interno del ciclo produttivo generando ulteriore valore.

Il modello economico tradizionale invece, detto anche modello lineale, è fondato sul tipico schema “estrarre, produrre, utilizzare e gettare”: questo, infatti, ha bisogno della disponibilità di grandi quantità di materiali ed energia facilmente reperibili e a basso prezzo. Inoltre, i processi di estrazione e utilizzo delle materie prime producono un grande impatto sull'ambiente e aumentano il consumo di energia e le emissioni di anidride carbonica.

L'introduzione dell'economia circolare può generare numerosi vantaggi, tra cui:

- Eliminazione dei rifiuti



*Figura 2.2 – Rifiuti di varia tipologia*

Il primo vantaggio che porta l'economia circolare è relativo alla gestione dei rifiuti. Quando la materia produttiva è di tipo biologico, una volta che il prodotto avrà raggiunto il termine del suo ciclo di vita potrà essere reintegrata nell'ecosistema senza produrre rifiuti. Se invece è di tipo tecnico, potrà essere sottoposta a processi di riciclo e riutilizzo per diventare materia prima seconda. Questo permette di vincere la sfida contro la creazione di rifiuti e contribuisce alla riduzione degli sprechi.

- Preservare le risorse naturali e ridurre l'inquinamento



*Figura 2.3 - Fonti di inquinamento*

La transizione verso un'economia circolare comporta anche un minore spreco delle risorse naturali: come le materie fossili, indispensabili nella produzione industriale. Infatti, com'è ben noto ormai, la disponibilità di queste risorse non è infinita e si è molto vicini al loro esaurimento sulla Terra. Il doppio vantaggio è generato dal momento che l'eliminazione dell'utilizzo di materie fossili, principali generatori di anidride carbonica, contribuisce a ridurre e contrastare l'inquinamento atmosferico.

- Risparmio a lungo termine

I costi delle materie prime seconde sono nettamente inferiori di quelli delle materie prime vergini, sempre più difficili da reperire. Inoltre, i processi produttivi previsti dal modello economico futuro e circolare, permetterebbero di produrre beni molto più duraturi. Inoltre, l'obiettivo di eliminare ogni forma di rifiuto è altresì vantaggioso dal punto di vista economico; abbracciando la teoria circolare i costi di smaltimento dei rifiuti saranno totalmente annullati.

Dopo aver descritto i principali aspetti positivi del modello economico circolare, è bene elencare anche gli svantaggi, seppure in numero inferiore.

- Il riciclo non è infinito

Molto spesso alcuni materiali possono essere riciclati e utilizzati ancora più a lungo. D'altra parte, per altri materiali il riciclaggio non può procedere all'infinito, e alla fine è necessario ricorrere allo smaltimento.

Dunque, non tutti i materiali sono riciclabili e quelli riciclabili possono non esserlo all'infinito: è necessario evitare l'utilizzo di materiali non riciclabili ma prediligere materiali riutilizzabili.

- L'economia circolare è più costosa

Riciclare e dare nuova vita ai materiali implica un processo più lungo e costoso rispetto al rimpiazzare un prodotto rotto o inutile con uno nuovo. L'economia circolare, infatti, comporta un risparmio economico sul lungo termine, mentre a breve termine risulta meno conveniente per quanti non hanno consapevolezza dei benefici che produce. Nella situazione attuale il costo del recupero è superiore al valore dei materiali recuperati. Pertanto, non risulta spesso conveniente adoperare il riciclo per le aziende, né per i consumatori acquistare prodotti che valgono meno di quanto costano. Si tratta di uno svantaggio principalmente dovuto alla mancanza di incentivi utili a superare questi limiti.

Nonostante i vantaggi precedentemente elencanti, nettamente in maggioranza rispetto agli svantaggi, è chiaro come sia necessaria ancora diversa strada fino al raggiungimento di un modello economico circolare, anche se risolverebbe diverse problematiche diffuse al giorno d'oggi.

## **2.1 Edilizia e infrastrutture verso l'economia circolare**

Nell'ambito delle costruzioni edili e infrastrutturali, i rapporti tra domanda e offerta di materiali recuperati sono nettamente in squilibrio.

Questo ha spinto verso la creazione di un progetto circolare i cui principi sono:

- prediligere nei settori a maggior consumo di materie prime l'impiego di "materiali rinnovati" (recuperati, riciclati, reimpiegati o reinventati) anziché il prelievo di risorse primarie;
- riqualificare le strutture esistenti anziché causare nuovo consumo di suolo;
- prevedere il rispetto di alcuni "Criteri ambientali minimi" (CAM), tra i quali un impiego consistente di materiali recuperati.

### **2.1.1 Progetto sperimentale nell'ambito dell'infrastruttura stradale**

Nella presente tesi viene descritto il progetto sperimentale che ha come ipotesi quello di applicare i principi dell'economia circolare nell'ambito stradale.

In particolare, per la realizzazione di una miscela di conglomerato bituminoso, si è provato a sostituire parzialmente la sabbia proveniente da cava con la sabbia Matrix, prodotta dall'incenerimento di rifiuti RSU. In questo modo, è stato utilizzato un contenuto di sabbia vergine inferiore e soprattutto è stato reintrodotta nel sistema un rifiuto che andava smaltito.

Tale progetto raggiungerà i suoi obiettivi solo quando la miscela di conglomerato bituminoso prodotta presenta almeno le stesse caratteristiche prestazionali della miscela vergine con il solo utilizzo di materiale da cava.

Una volta che il progetto ha raggiunto i valori prestazionali richiesti, in seguito all'utilizzo del rifiuto come aggregato della ricetta, si potrà provare a utilizzare la medesima miscela per un impasto in vera grandezza.

Nei seguenti capitoli verrà analizzata nel dettaglio la presente sperimentazione a partire dai materiali fino ad arrivare ai risultati sperimentali.

### 3. Materiali

Di seguito sono riportati dati e descrizioni dei materiali utilizzati nella presente sperimentazione: sia dal punto di vista degli aggregati, che del legante.

Tra le prove da compiere sugli aggregati, risulta di particolare importanza l'analisi granulometrica (UNI EN 933-1, 933-2, CNR 23), un insieme di operazioni dalle quali si ottiene la curva granulometrica.

Nella presente attività di laboratorio, tutti gli aggregati sono stati sottoposti ad una preventiva analisi granulometrica. Per la precisione, le classi granulometriche più grandi sono state setacciate per via secca, mentre la sabbia (0/6), come è raccomandabile, per via umida.

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, come in Figura 3.1 e 3.2.

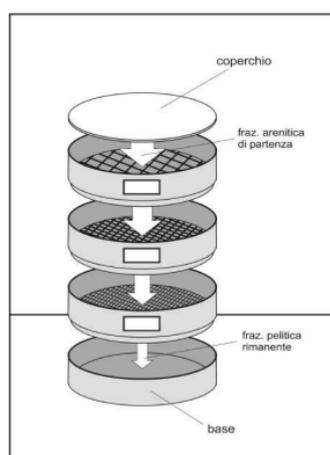


Figura 3.1 – Esempio batteria di setacci



*Figura 3.2 - Batteria setacci utilizzati*

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.



Figura 3.3 – Batteria setacci nel vibrovaglio

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:

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

dove:

$T_i$  è il trattenuto parziale in percentuale;

$P_i$  è il 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.

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

Ad esempio, il trattenuto cumulativo al terzo setaccio (dall'alto verso il basso) rappresenta la somma delle quantità (in peso) di aggregato trattenuto nel primo, nel secondo e nel terzo setaccio diviso il peso totale del campione sottoposto a vagliatura. Vengono poi calcolati i passanti cumulativi nei vari setacci calcolati come complemento a 100 dei trattenuti cumulativi, espressi in percentuale rispetto al peso totale del campione:

$$PC_i = 100 - TC_i$$

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 chiamati 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.

### **3.1 Aggregati lapidei**

Le tipologie di aggregati utilizzati e le loro pezzature sono molteplici: la maggior parte degli aggregati utilizzati in tutti i tre gli strati della pavimentazione stradale sono di natura calcarea. Tra questi, le pezzature più grandi sono utilizzate per il confezionamento dei conglomerati bituminosi per la Base. In aggiunta alla precedente

tipologia, gli aggregati di natura basaltica sono utilizzati per la realizzazione del manto di Usura. Infine, i filler scelti sono un materiale di produzione industriale e un filler di recupero.



*Figura 3.4 - Aggregati*

### **3.1.1 Sabbia calcarea 0/6**

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. La sabbia (0/6) utilizzata proviene da una cava in provincia di Ancona ed ha un peso specifico pari a 2700 kg/m<sup>3</sup>.

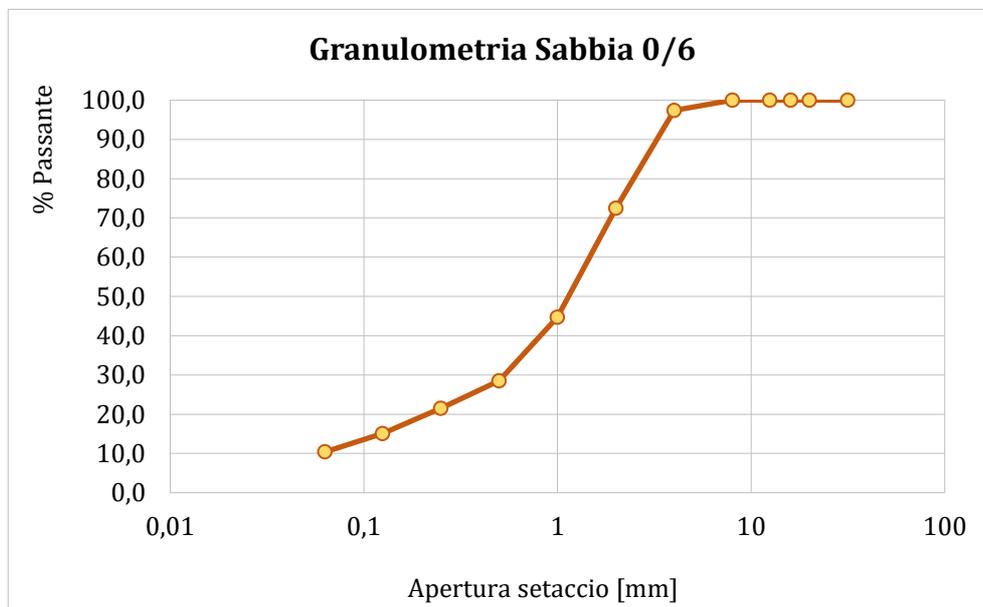


Figura 3.5 - Sabbia calcarea

In seguito, riportiamo l'analisi e la curva granulometrica.

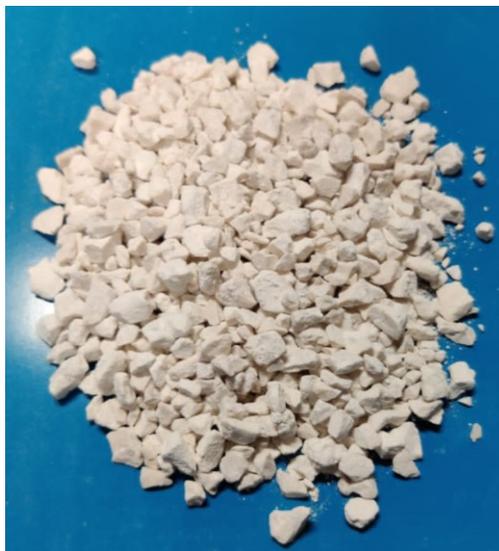
APERTURA SETACCI	Sabbia calcarea 0/6			
	TRATTENUTO			PASSANTE TOTALE
	PARZIALE	TOTALE		
d [mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
31,5	0	0	0,0	100
20	0	0	0	100
16	0	0	0	100
12,5	0	0	0	100
8	0	0	0	100
4	30,2	2,6	2,6	97,4
2	288,7	24,9	27,5	72,5
1	321,6	27,8	55,3	44,7
0,5	187,1	16,2	71,5	28,5
0,25	81	7	78,5	21,5
0,125	74,4	6,4	84,9	15,1
0,063	54	4,7	89,6	10,4
fondo (<0,063)	120,2	10,4	100	0
Totale	1157,2	100		

Tabella 3.1 - Sabbia calcarea 0/6



*Figura 3.6 - Curva granulometrica sabbia calcarea 0/6*

### **3.1.2 Graniglia 4/8**



*Figura 3.7 - Graniglia 4/8*

Il numero 4/8 è l'aggregato calcareo di pezzatura minore e fa riferimento al  $d/D$  dove  $d$  sta per diametro minimo e  $D$  per il diametro massimo.

In seguito, riportiamo l'analisi e la curva granulometrica.

APERTURA SETACCI	Graniglia 4/8			
	TRATTENUTO			PASSANTE TOTALE
	PARZIALE		TOTALE	
d [mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
31,5	0	0,0	0,0	100
20	0	0,0	0,0	100
16	0	0,0	0,0	100
12,5	0	0,0	0,0	100
8	0	0,0	0,0	100
4	684,8	77,0	77,0	23
2	169,2	19,0	96,0	4
1	19,6	2,2	98,2	1,8
0,5	0	0,0	98,2	1,8
0,25	0	0,0	98,2	1,8
0,125	0	0,0	98,2	1,8
0,063	0	0,0	98,2	1,8
fondo (<0,063)	16,2	1,8	100	0,0
Totale	889,8	100,0		

Tabella 3.2 - Graniglia 4/8

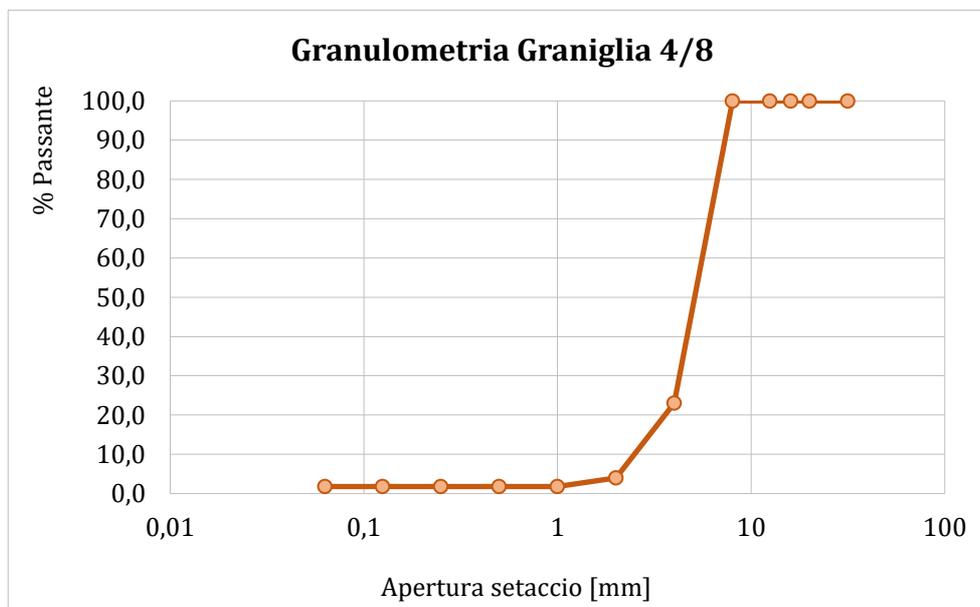


Figura 3.8 - Curva granulometrica Graniglia 4/8

**3.1.3 Pietrisco 8/12**

Figura 3.9 - Pietrisco 8/12

In seguito, riportiamo l'analisi e la curva granulometrica.

APERTURA SETACCI	Pietrisco 8/12			
	TRATTENUTO			PASSANTE TOTALE
	PARZIALE		TOTALE	
d [mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
31,5	0	0,0	0,0	100
20	0	0,0	0,0	100
16	0	0,0	0,0	100
12,5	0	0,0	0,0	100
8	800,1	71,6	71,6	28,4
4	305,3	27,3	98,9	1,1
2	0	0,0	98,9	1,1
1	0	0,0	98,9	1,1
0,5	0	0,0	98,9	1,1
0,25	0	0,0	98,9	1,1
0,125	0	0,0	98,9	1,1
0,063	0	0,0	98,9	1,1
fondo (<0,063)	11,9	1,1	100,0	0,0
Totale	1117,3	100,0		

Tabella 3.3 - Pietrisco 8/12

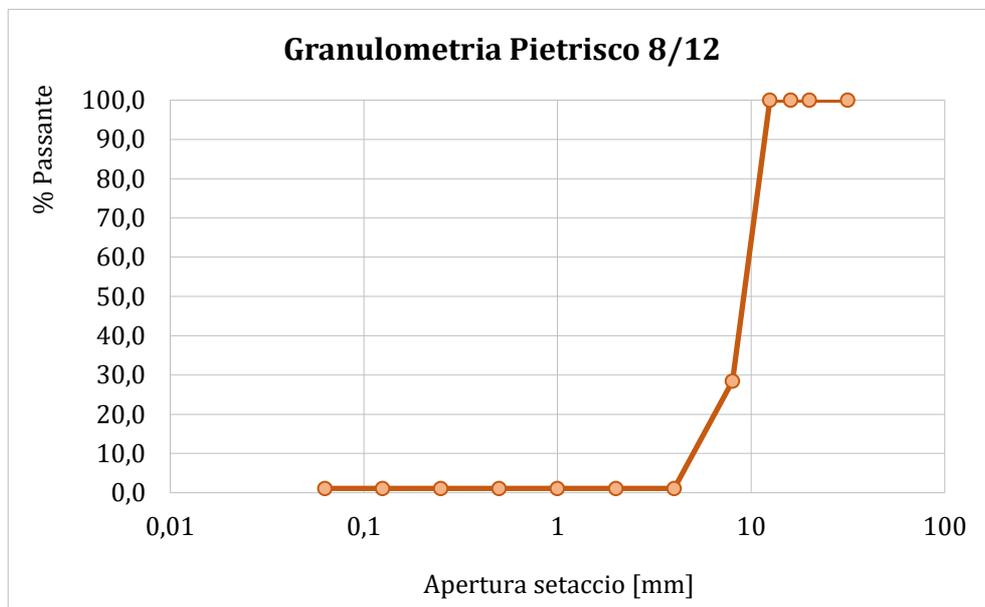


Figura 3.10 - Curva granulometrica Pietrisco 8/12

**3.1.4 Pietrisco 12/25**



Figura 3.11 - Pietrisco 12/25

In seguito, riportiamo l'analisi e la curva granulometrica.

APERTURA SETACCI	Pietrisco 12/25			
	TRATTENUTO			PASSANTE TOTALE
	PARZIALE	TOTALE		
d [mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
31,5	0	0,0	0,0	100
20	72,8	5,0	5,0	95
16	400,3	27,4	32,4	67,6
12,5	604,8	41,4	73,8	26,2
8	354,1	24,3	98,1	1,9
4	11,1	0,8	98,9	1,1
2	5,3	0,4	99,3	0,7
1	0	0,0	99,3	0,7
0,5	0	0,0	99,3	0,7
0,25	0	0,0	99,3	0,7
0,125	0	0,0	99,3	0,7
0,063	0	0,0	99,3	0,7
fondo (<0,063)	11	0,8	100	0,0
Totale	1459,4	100		

Tabella 3.4 - Pietrisco 12/25

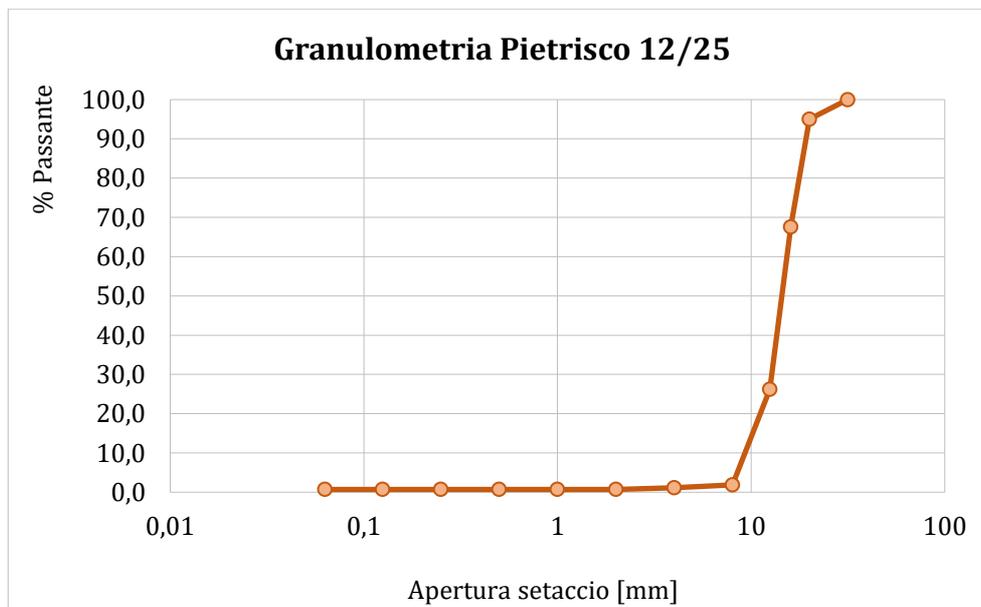


Figura 3.12 - Curva granulometrica Pietrisco 12/25

**3.1.5 Pietrisco 25/40**

Figura 3.13 – Pietrisco 25/40

Il numero 25/40 è l'aggregato calcareo di pezzatura maggiore e fa riferimento al  $d/D$  dove  $d$  sta per diametro minimo e  $D$  per il diametro massimo.

In seguito, riportiamo l'analisi e la curva granulometrica.

APERTURA SETACCI	Pietrisco 25/40			
	TRATTENUTO			PASSANTE TOTALE
	PARZIALE	TOTALE		
d [mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
31,5	557,3	17,5	17,5	82,5
20	2579,1	81,1	98,6	1,4
16	33,8	1,1	99,7	0,3
12,5	0	0,0	99,7	0,3
8	0	0,0	99,7	0,3
4	0	0,0	99,7	0,3
2	0	0,0	99,7	0,3
1	0	0,0	99,7	0,3
0,5	0	0,0	99,7	0,3
0,25	0	0,0	99,7	0,3
0,125	0	0,0	99,7	0,3
0,063	0	0,0	99,7	0,3
fondo (<0,063)	10,7	0,3	100	0,0
Totale	3180,9	100		

Tabella 3.5 – Pietrisco 25/40

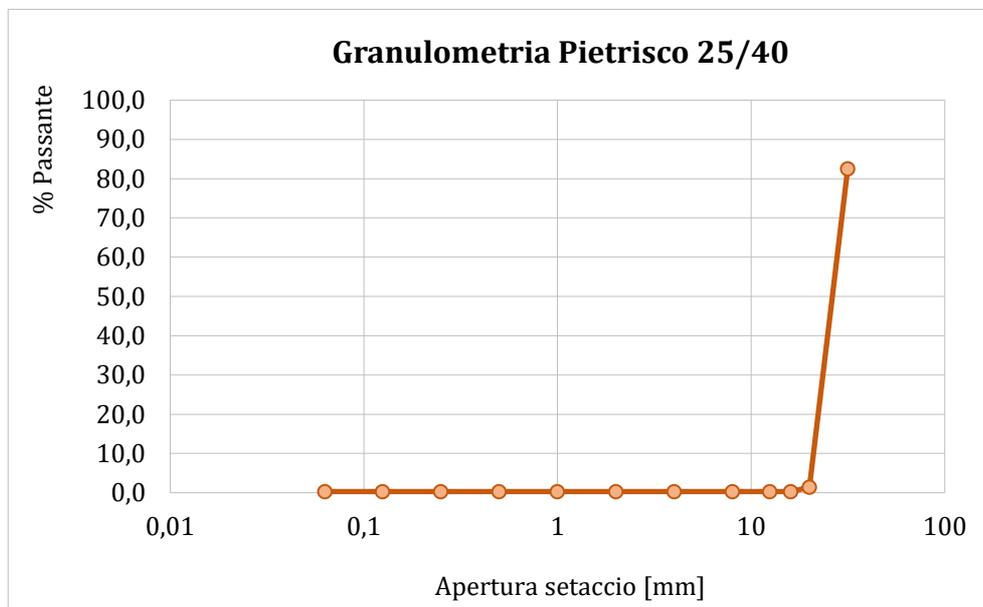


Figura 3.14 – Curva granulometrica Pietrisco 25/40

### **3.1.6 Graniglia basalto 4/8**

Il basalto è una pietra naturale di origine vulcanica formatasi dalla fuoriuscita di magma dalla litosfera. Questa roccia effusiva, contenente una percentuale di silice relativamente bassa, possiede un colore scuro o nero, dovuto alle caratteristiche del magma ultrabasico da cui si è formato. Il basalto è costituito principalmente da magnesio, pirosseni e plagioclasio calcico, alcune tipologie possono anche essere ricche di olivina. Esso presenta numerose ed ottime caratteristiche tecniche, le più importanti sono: la bassa gelività, la resistenza allo scivolamento, l'elevato grado di compattezza unito alla forte resistenza agli urti.

Proprio per i suoi vantaggi, il basalto è utilizzato per la realizzazione del manto di usura.

Nella presente sperimentazione la Graniglia 4/8 utilizzata è prodotta dalla ditta Basalti Orvieto; riportiamo in seguito la scheda tecnica.



*Figura 3.15 - Graniglia basalto 4/8*



**DICHIARAZIONE DI PRESTAZIONE**

**N. BO 12/2021**

REV. 0 EMISSIONE 04/01/2021



Certificato n°04884  
EA 2-Estrazione e lavorazione di aggregati lapidei



IT-35435



1305-CPR-0076



CERTIFIED M.S.  
EN ISO 14001:2015  
462/ITES



CERTIFIED M.S.  
OHSAS 18001:2007  
393/ITOH

Basalti Orvieto s.r.l. con Unico Socio  
Sede sociale : Via Rocca di Corno 49 / A 67100 L' Aquila  
Sede Operativa: Loc. Il Cornale snc 05014 Castelviscardo (TR)  
Partita Iva : 01289040668 Cap. Soc. : € 52.000 I.V.  
Tel. 0763 3640000 Fax 0763 3640100

- 1. CODICE DI IDENTIFICAZIONE UNICO DEL PRODOTTO-TIPO: BO A 4/8 - EN 13043
- 2. USO PREVISTO DEL PRODOTTO DA COSTRUZIONE: EN 13043:2002/AC:2004 AGGREGATI PER MISCELE BITUMINOSE
- 3. NOME E INDIRIZZO DEL FABBRICANTE: BASALTI ORVIE TO SRL CON UNICO SOCIO VIA ROCCA DI CORNO, 49 - 67100 L'AQUILA (AQ) UNITA' PRODUTTIVA: LOCALITA' IL CORNALE SNC 05014 CASTEL VISCARDO (TR)
- 5. SISTEMA DI VALUTAZIONE E VERIFICA DELLA COSTANZA DELLA PRESTAZIONE DEL PRODOTTO DA COSTRUZIONE: 2+
- 6a. NORMA ARMONIZZATA DI RIFERIMENTO E DATA DI EMISSIONE: EN 13043:2002/AC:2004 DEL 26/05/2004  
L'ORGANISMO NOTIFICATO DI CERTIFICAZIONE DEL CONTROLLO DELLA PRODUZIONE IN FABBRICA: ICMQ S.P.A. 1305 - CPR  
HA RILASCIATO IL CERTIFICATO DI CONFORMITA' DEL CONTROLLO DELLA PRODUZIONE IN FABBRICA IN BASE ALL'ESITO DELLE VALUTAZIONI E VERIFICHE CHE SEGUONO, EFFETTUATE DALLO STESSO ORGANISMO:  
i) ISPEZIONE INIZIALE DELLO STABILIMENTO DI PRODUZIONE E DEL CONTROLLO DELLA PRODUZIONE IN FABBRICA;  
ii) SORVEGLIANZA, VALUTAZIONE E VERIFICA IN MANIERA CONTINUATIVA DEL CONTROLLO DELLA PRODUZIONE IN FABBRICA.

CARATTERISTICHE ESSENZIALI	PRESTAZIONE	SPECIFICA ARMONIZZATA
DEFINIZIONE PETROGRAFICA	TEFRITE LEUCITICA	EN 13043:2002/AC:2004
DIMENSIONI	4/8	
GRANULOMETRIA	G <sub>c85/20</sub>	
TOLLERANZA	G <sub>20/15</sub>	
COEFFICIENTE DI FORMA	SI <sub>20</sub>	
COEFFICIENTE DI APPIATTIMENTO	FI <sub>20</sub>	
MASSA VOLUMICA DEI GRANULI	2,71 Mg/m <sup>3</sup>	
CONTENUTO DI POLVERI	F <sub>4</sub>	
EQUIVALENTE IN SABBIA	nr	
VALORE DI BLU	nr	
AFFINITA' AI LEGANTI BITUMINOSI	95%	
% DI PARTICELLE SCHIACCIATE/SUPERFICI FRANTUMATE	C <sub>1000</sub>	
RESISTENZA ALLA FRAMMENTAZIONE/FRANTUMAZIONE	LA <sub>20</sub> (Determinato sull'aggregato 10/16)	
RESISTENZA ALLA LEVIGABILITA'	PSV <sub>50</sub>	
RESISTENZA ALL'ABRASIONE	AAV <sub>10</sub> (Determinato sull'aggregato 10/16)	
RESISTENZA ALL'USURA DELL'AGGREGATO GROSSO	M <sub>DE10</sub> (Determinato sull'aggregato 10/16)	
RESISTENZA ALL'ABRASIONE DA PNEUMATICI SCOLPITI	NPD	
RESISTENZA ALLO SHOCK TERMICO	V <sub>LA</sub> 1,70% (Determinato sull'aggregato 10/16)	
ASSORBIMENTO DI ACQUA	WA 1,49%	
EMISSIONE DI RADIOATTIVITA'	ASSENTE	
RILASCIO DI METALLI PESANTI	ASSENTE	
RILASCIO DI IDROCARBURI POLIAROMATICI	ASSENTE	
RILASCIO DI ALTRE SOSTANZE PERICOLOSE	ASSENTE	
DURABILITA' AL GELO/DISGELO	F <sub>1</sub> (Determinato sull'aggregato 10/16)	
DURABILITA' AGLI AGENTI ATMOSFERICI	NPD	
DURABILITA' A PNEUMATICI CHIODATI	NPD	
DURABILITA' ALLO SHOCK TERMICO	V <sub>LA</sub> 1,70% (Determinato sull'aggregato 10/16)	

LA PRESTAZIONE DEL PRODOTTO SOPRA IDENTIFICATO E' CONFORME ALL'INSIEME DELLE PRESTAZIONI DICHIARATE. LA PRESENTE DICHIARAZIONE DI RESPONSABILITA' VIENE EMESSA, IN CONFORMITA' AL REGOLAMENTO (UE) N. 305/2011, SOTTO LA SOLA RESPONSABILITA' DEL FABBRICANTE SOPRA IDENTIFICATO. FIRMATO A NOME E PER CONTO DEL FABBRICANTE

CASTEL VISCARDO, 04.01.2021

**IL LEGALE RAPPRESENTANTE**  
**GIANLUCA PIZZUTI**

info@basaltiorvieto.com

www.basaltiorvieto.com

Figura 3.16 - Sceda tecnica Graniglia 4/8 Basalti Orvieto

In seguito, riportiamo l'analisi e la curva granulometrica.

APERTURA SETACCI	Graniglia basalto 4/8			
	TRATTENUTO			PASSANTE TOTALE
	PARZIALE		TOTALE	
d [mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
31,5	0	0,0	0,0	100,0
20	0	0,0	0,0	100,0
16	0	0,0	0,0	100,0
12,5	0	0,0	0,0	100,0
8	350,5	26,9	26,9	73,1
4	922,1	70,8	97,7	2,3
2	16,8	1,3	99,0	1,0
1	0	0,0	99,0	1,0
0,5	0	0,0	99,0	1,0
0,25	0	0,0	99,0	1,0
0,125	0	0,0	99,0	1,0
0,063	0	0,0	99,0	1,0
fondo (<0,063)	13,7	1,1	100	0,0
Totale	1303,1	100		

Tabella 3.6 - Graniglia 4/8

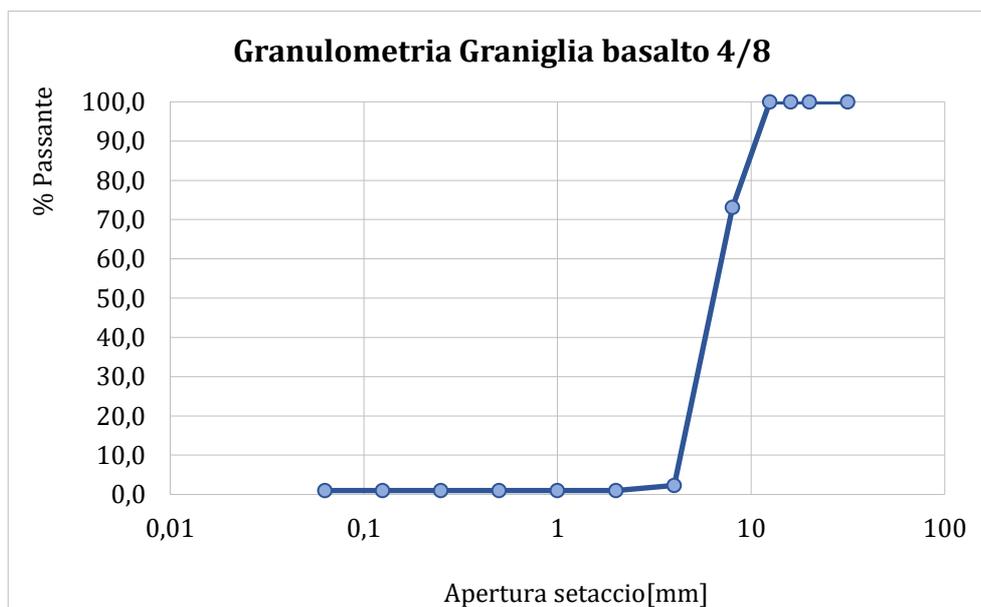


Figura 3.17 - Curva granulometrica Graniglia 4/8

### **3.1.7 Basalto artificiale 4/8**

Il basalto artificiale è un inerte sintetico ad elevate prestazioni del tutto simile ad un basalto naturale sia negli elementi chimici che lo compongono, sia nell'aspetto.

Il forno elettrico ad arco, utilizzato nell'industria siderurgica per la produzione di acciaio, genera un sottoprodotto denominato scoria di acciaieria.

Questo materiale si forma sopra il bagno di fusione dell'acciaio come risultato dell'ossidazione delle impurezze e dei composti generati dagli additivi inseriti nel forno elettrico. Il basalto artificiale è un materiale adatto al confezionamento di manti in conglomerato bituminoso speciale ad elevate prestazioni. Infatti, ha caratteristiche fisiche e meccaniche migliori rispetto agli inerti pregiati di origine effusiva, quali basalto e porfido, normalmente impiegati per il confezionamento di conglomerati bituminosi speciali ad alte prestazioni.

ZEROCENTO srl è un'azienda che dal 2010 si è specializzata nella produzione di un basalto artificiale, ricavato dallo scarto dell'industria siderurgica, e destinato alla produzione di conglomerati.

Il basalto artificiale 4/8 è stato utilizzato con la finalità di ottimizzare le caratteristiche di micro-tessitura della miscela e della sua durabilità (aderenza).



*Figura 3.18 - Basalto artificiale 4/8*

Riportiamo in seguito la scheda tecnica della Granella 4/8 fornita da ZEROCENTO srl.

Massa volumica in mucchio UNI EN 13055-2: > 2000 Kg/m<sup>3</sup>

Resistenza alla levigazione dell'aggregato grosso UNI EN 1097-8: PSV > 60

<b>REQUISITO</b>	<b>Metodo</b>	<b>u.m.</b>	<b>Classe</b>
Dimensioni dell'aggregato	UNI EN 933-1	mm	4/8
Granulometria	UNI EN 933-1	%	G <sub>c</sub> 90/10 90/15
Massa volumica delle particelle	UNI EN 1097-6	Mg/m <sup>3</sup>	ρ <sub>rd</sub> 4,06 4,04
Percentuale di superfici frantumate negli aggregati grossi	UNI EN 933-5	%	C <sub>100/1</sub>
Forma dell'aggregato grosso – Coefficiente di forma	UNI EN 933-4	-	SI <sub>15</sub>
<b>REQUISITO</b>	<b>Metodo</b>	<b>u.m.</b>	<b>Classe</b>
Forma dell'aggregato grosso – Coefficiente di appiattimento	UNI EN 933-3	-	FI <sub>10</sub>
Resistenza alla frammentazione dell'aggregato grosso	UNI EN 1097-2	-	LA <sub>15</sub>
Resistenza alla levigazione dell'aggregato grosso	UNI EN 1097-8	-	PSV <sub>50</sub>
Resistenza all'abrasione superficiale	UNI EN 1097-8 Appendice A	-	AAV <sub>10</sub>
Resistenza all'usura dell'aggregato grosso	UNI EN 1097-1		M <sub>DE</sub> 10
Resistenza allo shock termico	UNI EN 1367-5	-	V <sub>LA</sub> 1
Resistenza al gelo e disgelo	UNI EN 1367-1	%	F <sub>1</sub>
Composizione chimica	UNI EN 932-3	-	analisi chimica
Affinità degli aggregati grossi ai leganti bituminosi	UNI EN 12697-11	%	a 6h = 90% a 24h = 70%

Figura 3.19 – Scheda tecnica Basalto artificiale Zerocento

APERTURA SETACCI	Granella basalto 4/8			
	TRATTENUTO			PASSANTE TOTALE
	PARZIALE	TOTALE		
d [mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
31,5	0	0,0	0,0	100,0
20	0	0,0	0,0	100,0
16	0	0,0	0,0	100,0
12,5	0	0,0	0,0	100,0
8	32	2,9	2,9	97,1
4	1016,6	92,5	95,4	4,6
2	40,6	3,7	99,1	0,9
1	0	0,0	99,1	0,9
0,5	0	0,0	99,1	0,9
0,25	0	0,0	99,1	0,9
0,125	0	0,0	99,1	0,9
0,063	0	0,0	99,1	0,9
fondo (<0,063)	10,4	0,9	100	0,0
Totale	1099,6	100		

Tabella 3.7 - Granella 4/8

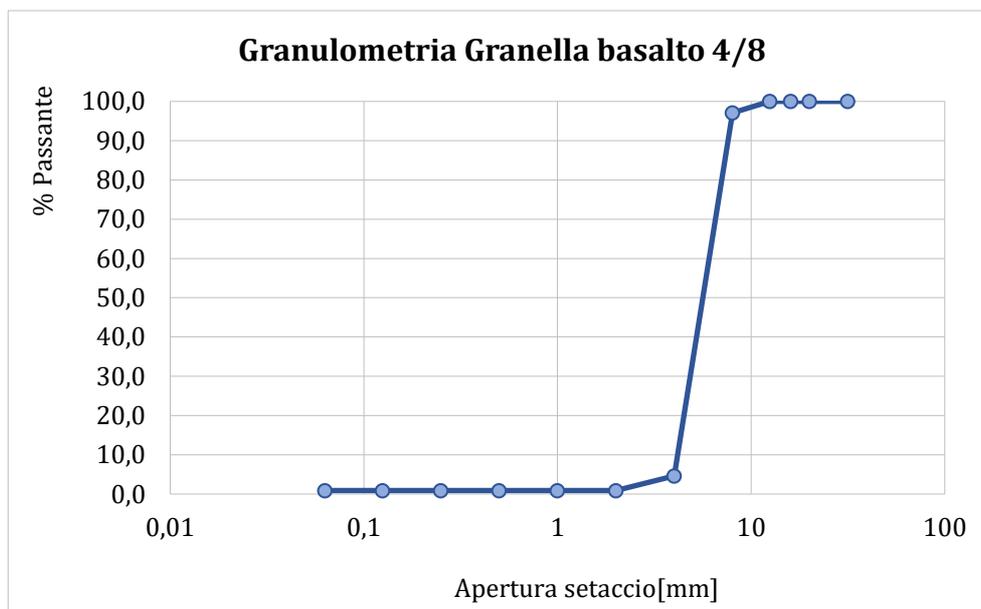


Figura 3.20 - Curva granulometrica Granella 4/8

### **3.1.8 Pietrisco basalto 10/16**

Il numero 10/16 è l'aggregato basaltico di pezzatura maggiore proveniente da Orvieto e fa riferimento al  $d/D$  dove  $d$  sta per diametro minimo e  $D$  per il diametro massimo.



*Figura 3.21 - Pietrisco basalto 10/16*

Riportiamo in seguito la scheda tecnica del presente aggregato.



**DICHIARAZIONE DI PRESTAZIONE**

**N. BO 16/2021**

REV. 0 EMISSIONE 04/01/2021

- |  |  |
|--|--|
| 1. CODICE DI IDENTIFICAZIONE UNICO DEL PRODOTTO-TIPO:  | BO A 10/16 - EN 13043  |
| 2. USO PREVISTO DEL PRODOTTO DA COSTRUZIONE:   | EN 13043:2002/AC:2004<br>AGGREGATI PER MISCELE BITUMINOSE  |
| 3. NOME E INDIRIZZO DEL FABBRICANTE:   | BASALTI ORVIETO SRL CON UNICO SOCIO<br>VIA ROCCA DI CORNO, 49 - 67100 L'AQUILA (AQ)<br>UNITA' PRODUTTIVA: LOCALITA' IL CORNALE SNC<br>05014 CASTEL VISCARDO (TR) |
| 5. SISTEMA DI VALUTAZIONE E VERIFICA DELLA COSTANZA DELLA PRESTAZIONE DEL PRODOTTO DA COSTRUZIONE:   | 2+   |
| 6a. NORMA ARMONIZZATA DI RIFERIMENTO E DATA DI EMISSIONE:  | EN 13043:2002/AC:2004 DEL 26/05/2004   |
| L'ORGANISMO NOTIFICATO DI CERTIFICAZIONE DEL CONTROLLO DELLA PRODUZIONE IN FABBRICA:   | ICMQ S.P.A. 1305 - CPR   |
| HA RILASCIATO IL CERTIFICATO DI CONFORMITA' DEL CONTROLLO DELLA PRODUZIONE IN FABBRICA IN BASE ALL'ESITO DELLE VALUTAZIONI E VERIFICHE CHE SEGUONO, EFFETTUATE DALLO STESSO ORGANISMO: |  |
| i) ISPEZIONE INIZIALE DELLO STABILIMENTO DI PRODUZIONE E DEL CONTROLLO DELLA PRODUZIONE IN FABBRICA:   |  |
| ii) SORVEGLIANZA, VALUTAZIONE E VERIFICA IN MANIERA CONTINUATIVA DEL CONTROLLO DELLA PRODUZIONE IN FABBRICA.   |  |
| 7. PRESTAZIONE DICHIARATA:   |  |

CARATTERISTICHE ESSENZIALI	PRESTAZIONE	SPECIFICA ARMONIZZATA
DEFINIZIONE PETROGRAFICA	TEFRITE LEUCITICA	<b>EN 13043:2002/AC:2004</b>
DIMENSIONI	10/16	
GRANULOMETRIA	Gc90/20	
TOLLERANZA	nr	
COEFFICIENTE DI FORMA	SI <sub>15</sub>	
COEFFICIENTE DI APPIATTIMENTO	FI <sub>10</sub>	
MASSA VOLUMICA DEI GRANULI	2,70 Mg/m <sup>3</sup>	
CONTENUTO DI POLVERI	F <sub>2</sub>	
EQUIVALENTE IN SABBIA	nr	
VALORE DI BLU	nr	
AFFINITA' AI LEGANTI BITUMINOSI	95% (Determinato sull'aggregato 4/8)	
% DI PARTICELLE SCHIACCIATE/SUPERFICI FRANTUMATE	C <sub>1000</sub>	
RESISTENZA ALLA FRAMMENTAZIONE/FRANTUMAZIONE	LA <sub>20</sub>	
RESISTENZA ALLA LEVIGABILITA'	PSV <sub>50</sub> (Determinato sull'aggregato 4/8)	
RESISTENZA ALL'ABRASIONE	AAV <sub>10</sub>	
RESISTENZA ALL'USURA DELL'AGGREGATO GROSSO	M <sub>DG10</sub>	
RESISTENZA ALL'ABRASIONE DA PNEUMATICI SCOLPITI	NPD	
RESISTENZA ALLO SHOCK TERMICO	V <sub>LA</sub> 1,70%	
ASSORBIMENTO DI ACQUA	WA 1,30%	
EMISSIONE DI RADIOATTIVITA'	ASSENTE	
RILASCIO DI METALLI PESANTI	ASSENTE	
RILASCIO DI IDROCARBURI POLIAROMATICI	ASSENTE	
RILASCIO DI ALTRE SOSTANZE PERICOLOSE	ASSENTE	
DURABILITA' AL GELO/DISGELO	F <sub>1</sub>	
DURABILITA' AGLI AGENTI ATMOSFERICI	NPD	
DURABILITA' A PNEUMATICI CHIODATI	NPD	
DURABILITA' ALLO SHOCK TERMICO	V <sub>LA</sub> 1,70%	

LA PRESTAZIONE DEL PRODOTTO SOPRA IDENTIFICATO E' CONFORME ALL'INSIEME DELLE PRESTAZIONI DICHIARATE. LA PRESENTE DICHIARAZIONE DI RESPONSABILITA' VIENE EMESSA, IN CONFORMITA' AL REGOLAMENTO (UE) N. 305/2011, SOTTO LA SOLA RESPONSABILITA' DEL FABBRICANTE SOPRA IDENTIFICATO.

FIRMATO A NOME E PER CONTO DEL FABBRICANTE

CASTEL VISCARDO, 04.01.2021

**IL LEGALE RAPPRESENTANTE**  
**GIANLUCA PIZZUTI**

info@basaltiorvieto.com

www.basaltiorvieto.com



Certificato n° 04888  
Es. 2. Estrazione e lavorazione di aggregati lapidei



IT-35435



1305-CPR-0076



CERTIFIED M.S.  
EN ISO 14001:2015  
4621TES



CERTIFIED M.S.  
OHSAS 18001:2007  
39310TH

Basalti Orvieto s.r.l. con Utrico Socio  
Sede sociale : Via Rocca di Corno 49/ A 67100 L'Aquila  
Sede Operativa: Loc. Il Cornale snc 05014 Castelviscardo (TR)  
Partita Iva : 01288040668 Cap. Soc. : € 52.000 i.v.  
Tel. 0763 360000 Fax 0763 360100

Figura 3.22 - Scheda tecnica Pietrisco 10/16 Basalti Orvieto

In seguito, riportiamo l'analisi e la curva granulometrica.

APERTURA SETACCI	Pietrisco basalto 10/16			
	TRATTENUTO			PASSANTE TOTALE
	PARZIALE		TOTALE	
	d [mm]	[g]	[%]	[%]
31,5	0	0,0	0,0	100,0
20	0	0,0	0,0	100,0
16	59,1	5,8	5,8	94,2
12,5	413,1	40,7	46,5	53,5
8	528,2	52,0	98,5	1,5
4	4,9	0,5	99,0	1,0
2	0	0,0	99,0	1,0
1	0	0,0	99,0	1,0
0,5	0	0,0	99,0	1,0
0,25	0	0,0	99,0	1,0
0,125	0	0,0	99,0	1,0
0,063	0	0,0	99,0	1,0
fondo (<0,063)	10,6	1,0	100	0,0
Totale	1015,9	100		

Tabella 3.8 - Pietrisco 10/16

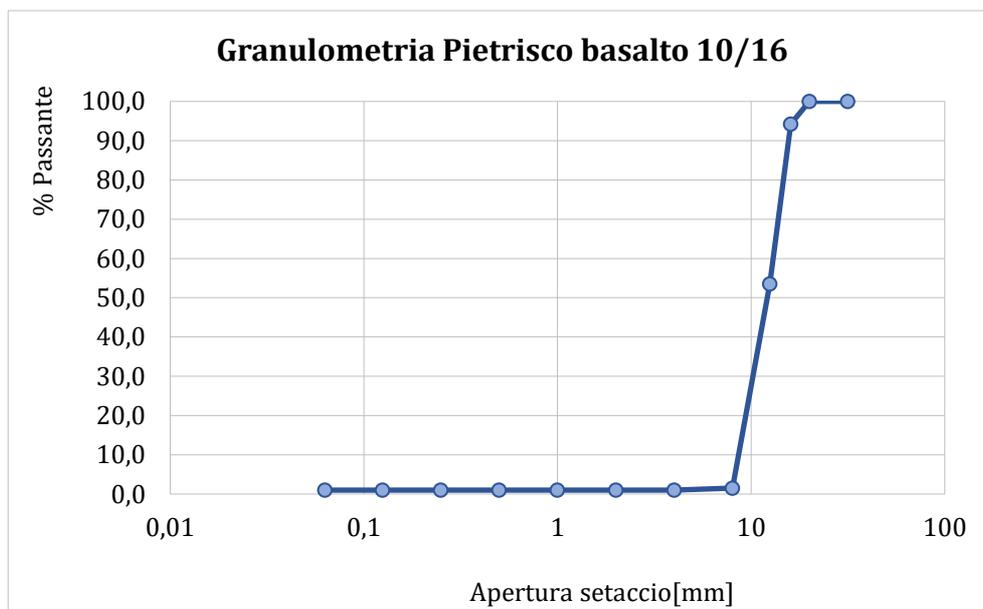


Figura 3.23 - Curva granulometrica Pietrisco 10/16

### **3.1.9 Filler Omya**

Il filler è la porzione 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). Il filler viene utilizzato nella produzione di conglomerati bituminosi per conferirgli una certa plasticità una volta unito al legante. In questa sperimentazione è

stato utilizzato un filler di natura industriale denominato filler Omya: questo materiale è composto da carbonato di calcio e calce idrata a composizione controllata di colore bianco; i costituenti sono Filler di calcare ottenuto da mulinazione e calce idrata calcica (Idrossido di calcio,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  tipo CL90-S) conforme alla Norma EN 459-1, ottobre 2001 (UNI EN 459-1, settembre 2002).

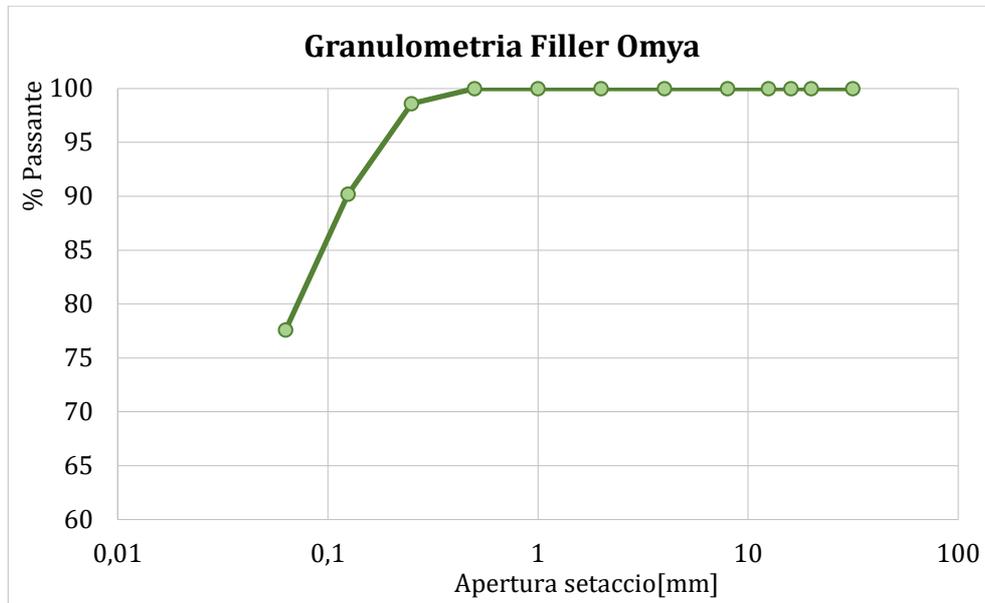


Figura 3.24 – Filler Omya

Nelle seguenti tabelle e grafici vengono riportate le analisi e le curve granulometriche.

APERTURA	Filler Omya
SETACCI	PASSANTE TOTALE
d [mm]	[%]
31,5	100
20	100
16	100
12,5	100
8	100
4	100
2	100
1	100
0,5	100
0,25	98,6
0,125	90,2
0,063	77,6

Tabella 3.9 – Filler Omya



*Figura 3.25 – Curva granulometrica Filler Omya*

### **3.1.10 Filler di recupero**

Il filler di recupero deriva dai residui di frantumazione e vagliatura degli aggregati



*Figura 3.26 – Filler di recupero*

In seguito, viene riportata l'analisi e la curva granulometrica del filler di recupero.

APERTURA	Filler Omya
SETACCI	PASSANTE TOTALE
d [mm]	[%]
31,5	100
20	100
16	100
12,5	100
8	100
4	100
2	99
1	96
0,5	91,4
0,25	86,1
0,125	78,8
0,063	69,5

Tabella 3.10 - Filler di recupero

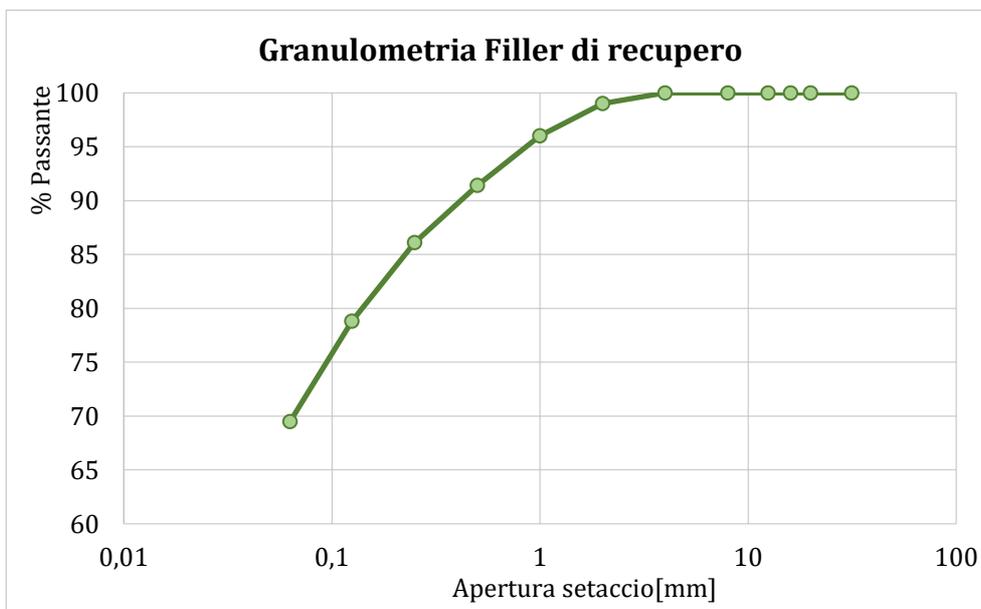


Figura 3.27 - Curva granulometrica Filler di recupero

### **3.2 Sabbia Matrix**

Da alcuni anni, Officina dell' Ambiente ha sviluppato una famiglia di aggregati artificiali denominati Matrix Family, le cui caratteristiche fisico-chimiche sono tali da renderli particolarmente idonei ad un loro sistematico impiego in svariate applicazioni nel settore dei conglomerati bituminosi.

Il Matrix è un EOW (End of Waste) che deriva dal processo di valorizzazione e recupero delle scorie da incenerimento RSU.

Il materiale si presenta simile ad una sabbia naturale, prevalentemente argillosa ed a moderato contenuto di calce, dove la qualità e la quantità dei costituenti è sensibilmente costante.



*Figura 3.28 - Sand Matrix*

Il Matrix detiene tutti i necessari standard tecnici obbligatori per un suo impiego in tutti gli strati dei conglomerati bituminosi, incluso il misto cementato sottostante, in quanto risponde alle normative UNI EN 13043 ed UNI EN 13242 per la marcatura CE. Nell'ambito delle costruzioni stradali, il Matrix viene utilizzato in varie modalità ed applicazioni, sia a caldo che a freddo.

Nella presente sperimentazione è stato utilizzato il Matrix 0/4 per la realizzazione di conglomerato bituminoso a caldo da utilizzare per Usura, Base e Binder.



*Figura 3.29 – Utilizzo di Matrix nei vari strati della pavimentazione*

Nella precedente figura vengono presentate le percentuali di Matrix che possono essere sostituite alla sabbia per ogni strato della pavimentazione.

In questa sperimentazione sono stati sostituiti il 5 %, il 10 % e il 15 % di Matrix in peso al posto dell'aggregato lapideo sabbia 0/6, per tutti i tre strati della pavimentazione.

Riportiamo in seguito la scheda tecnica della sabbia Matrix.

	<b>Scheda tecnica Sand Matrix®</b>	
	Officina dell'Ambiente Spa	
Data 1/06/2016	Rev. 3	Pag. 1 di 1

**IDENTIFICAZIONE DEL PRODOTTO**

<b>Nome</b>	Sand Matrix®
<b>Azienda produttrice</b>	Officina dell'Ambiente Spa – Stabilimenti di Lomello (PV) e Conselice (RA)
<b>Tipo di prodotto</b>	Sand Matrix® è una Materia Prima Seconda/End of Waste utilizzabile per la produzione del cemento e di laterizi (da entrambi gli stabilimenti). E' altresì utilizzabile per la produzione di manufatti in calcestruzzo, di misti cementati, di malte e di conglomerato bituminoso (limitatamente al Sand Matrix prodotto presso l'insediamento di a Lomello (PV))
<b>Origine</b>	Operazioni di recupero di ceneri pesanti provenienti da processi di termovalorizzazione di rifiuti solidi urbani
<b>Aspetto</b>	Materiale granulare sabbioso di colore grigio
<b>Granulometria</b>	Usualmente commercializzato nelle granulometrie 0-2 mm, 0-4 mm e 2-4 mm

**COMPOSIZIONE:** il materiale si presenta simile ad una sabbia naturale, prevalentemente argilloso ed a moderato contenuto di calce dove la qualità e la quantità dei macrocomponenti è sensibilmente costante.

Composizione chimica media		Composizione mineralogica e diffrattometrica media (riferita al materiale essiccato ed espresso come ossidi)	
Perdita per calcinazione	< 10 %	Anortite	Ca(Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> )
SiO <sub>2</sub>	30-45 %	Ghelenite	Ca <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> SiO <sub>7</sub>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5-15 %	Quarzo	SiO <sub>2</sub>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5-15 %	Calce e calcite	CaO e CaCO <sub>3</sub>
CaO	15-25 %	Ossidi ferrosi e ferrici	FeO e Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
MgO	2-3 %	Alluminio metallico	Al
SO <sub>3</sub>	0,5-2 %		
Cl	0,2-0,7%		
Alcali	4-5 %		

**Processo produttivo:** Sand Matrix® è un materiale ottenuto da un trattamento specifico di rifiuti di matrice inorganica costituiti da ceneri pesanti provenienti da processi di termovalorizzazione di rifiuti solidi urbani.

I rifiuti, dopo una fase di maturazione/litostabilizzazione, sono sottoposti a trattamenti di frantumazione e comminazione, vagliatura, deferrizzazione e demetallizzazione ed assumono l'aspetto di una sabbia.

**Vantaggi ambientali:** il Sand Matrix® è una materia prima che limita le opere di escavazione per l'approvvigionamento di materie naturali ed evita lo smaltimento di rifiuti speciali in discarica.

*Figura 3.30 – Scheda tecnica Sand Matrix*

L'Officina dell'ambiente ha infine confermato la piena applicabilità del Sand Matrix in sostituzione delle pezzature medio fini (sabbie), fino a percentuali del 10% sul peso della miscela di aggregati, senza alcuna ulteriore variazione rispetto alle miscele senza Sand Matrix mentre, per percentuali da 10% a 25% sul peso, possono rendersi necessarie lievi variazioni sul legante aggiunto a seconda dei casi.

In seguito, viene riportata l'analisi e la curva granulometrica della sabbia Matrix.

APERTURA	Sabbia Matrix
SETACCI	PASSANTE TOTALE
d [mm]	[%]
31,5	100,0
20	100,0
16	100,0
10	100,0
8	100,0
6,3	100,0
4	96,9
2	72,8
1	49,6
0,25	17,5
0,063	6,7

Tabella 3.11 - Sabbia Matrix

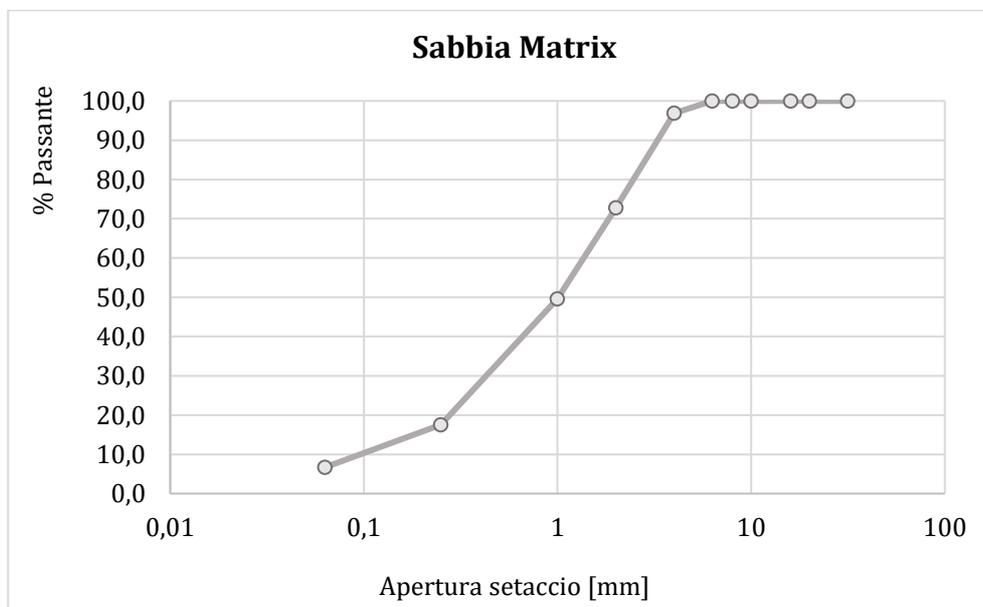


Figura 3.31 - Curva granulometrica Sabbia Matrix

### **3.3 Legante Drenoval**

Il bitume è una miscela d'idrocarburi ad alto peso molecolare. Si tratta di un materiale organico, di origine naturale o industriale, solubile in solfuro di carbonio.

Si può parlare di bitumi modificati (Polymer Modified Bitumens, PMB) ovvero bitumi tradizionali addizionati con polimeri. I polimeri più utilizzati per la creazione di PMB sono gli elastomeri (gomme sintetiche) e plastomeri (materie plastiche).

Tramite l'aggiunta di questi elementi si ha un miglioramento sotto molteplici aspetti:

- maggiore rigidità alle basse temperature;
- migliorata la resistenza all'invecchiamento;
- migliorata la resistenza alla fatica (deformazione per sollecitazione carichi);
- minore suscettibilità alle variazioni di temperatura;
- maggiori capacità elastiche.

Tutti questi potenziamenti sono conseguenti all'aggiunta di una bassissima percentuale di polimeri (2 - 10% in peso). Difatti non si parla di bitume additivato ma modificato.

Nella presente sperimentazione è stato usato il bitume Drenoal di tipo Hard, adatto alla realizzazione di conglomerati bituminosi per Base, Binder e Usura.



*Figura 3.32 - Legante Drenoal*

Riportiamo inoltre la scheda tecnica del bitume utilizzato, fornita da Valli Zabban.

## SCHEMA TECNICA

**DRENOVAL HARD M**

<b>Sito produttivo</b>	Stabilimento di Bologna Stabilimento di Trecastelli	Via del Traghetto, 42 - 40100 Bologna Via del Bosco, 27 - 60010 Trecastelli AN
<b>Gradazione</b>	<b>PmB 45/60-70</b>	
<b>Descrizione del prodotto</b>	Polymer Modified Bitumen di tipo Hard per la realizzazione di conglomerati di base, binder, usure chiuse, drenanti e S.A.M.I.	

Caratteristica	Proprietà	Metodo	U.d.M.	Prestazione		
				min	max	Classe
<b>Consistenza alle temperature intermedie di servizio</b>	Penetrazione a 25°C	UNI EN 1426	dnm	<b>45</b>	<b>70</b>	4
<b>Consistenza alle temperature elevate di servizio</b>	Punto di Rammollimento P.A.	UNI EN 1427	°C	<b>70</b>		4
<b>Coesione</b>	Force Ductility Test a 10°C	UNI EN 13289	J/cm <sup>2</sup>	<b>3,0</b>		7
		UNI EN 13703				
<b>Durabilità Resistenza all'Invecchiamento RTFOT EN12607-1</b>	Variazione di massa	-	%		<b>0,5</b>	3
	Penetrazione a 25°C residua	UNI EN 1426	%	<b>60</b>		7
	Incremento del punto di rammollimento P.A.	UNI EN 1427	°C		<b>5</b>	2
<b>Inflammità</b>	Flash point	EN ISO 2592	°C	<b>250</b>		2
<b>Viscosità dinamica</b>	Viscosità a 160°C	UNI EN 13302	Pa.s		<b>0,40</b>	
<b>Ricupero di deformazione</b>	Ritorno Elastico a 25°C.	UNI EN 13398	%	<b>80</b>		2
<b>Punto di rottura Frasse</b>	Frasse	UNI EN 12593	°C	<b>-18</b>		8
<b>Stabilità allo stoccaggio EN13399</b>	Δ Punto di rammollimento.	UNI EN 1427	°C		<b>3</b>	2
	Δ Penetrazione a 25°C	UNI EN 1426	dnm		<b>3</b>	2

Temperature di utilizzo	Valori indicativi	
Temperatura di stoccaggio	°C	<b>165 + 180</b>
Temperatura di stoccaggio prolungato oltre 5 giorni	°C	<b>100 + 120</b>
Temperatura impasto con inerti	°C	<b>165 + 180</b>
Temperatura minima di compattazione	°C	<b>&gt; 145</b>

Le caratteristiche dichiarate nella presente scheda sono garantite e sono rinverificabili su campioni omogenei di prodotto prelevati in contraddittorio alla consegna secondo le seguenti norme, in particolare la UNI EN 28 e la UNI EN 12594, scaldando il campione a 160-200°C.

Rev 1 - 09/20



Valli Zabban S.p.A. • Società Unipersonale • Capitale Sociale € 5.000.000 i.v.  
 Sede e Direzione Generale  
 50041 Calenzano (PD) Italy, via di Le Prato, 103 • tel. +39.055.328041 • fax +39.055.300300  
 www.vallizabban.com • info@vallizabban.it • vallizabban@pec.it  
 C.C.I.A.A. Firenze N. 05476750483 • R.E.A. FI 549826 • Cod. Fisc. e P. IVA 05476750483



Figura 3.33 – Scheda tecnica Drenoval

## 4. Apparecchiature e metodologie di prova

Nel paragrafo successivo saranno descritte nel dettaglio tutte le apparecchiature per il confezionamento delle miscele, per la preparazione dei provini, nonché i rispettivi protocolli di prova impiegati in laboratorio per la realizzazione del programma sperimentale che consiste nella caratterizzazione e la valutazione delle miscele di conglomerato bituminoso vergine in confronto con le miscele contenenti la sabbia Matrix.

### 4.1 Determinazione della percentuale di bitume e della curva granulometrica (UNI EN 12697/1 - UNI EN 933-1)

La curva granulometrica di progetto della miscela dei provini utilizzati per lo sviluppo della presente tesi è stata studiata in modo tale da rientrare all'interno del fuso di riferimento del Capitolato dell'ANAS.

Setaccio	FUSI					
	USURA		BINDER		BASE	
	ANAS A		ANAS		ANAS	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min
31,5	100	100	100	100	100	100
20	100	100	100	100	88	68
16	100	100	100	90	78	55
12,5	100	90	86	66	-	-
8	88	70	72	52	60	36
4	58	40	54	34	48	25
2	38	25	40	25	38	18
1	-	-	-	-	-	-
0,5	20	10	22	10	21	8
0,25	16	8	16	6	16	5
0,125	-	-	-	-	-	-
0,063	10	6	8	4	8	4

Tabella 4.1 - Fusi ANAS

Tale fuso granulometrico è costituito da due curve granulometriche ideali che fissano il limite superiore e quello inferiore. La curva granulometrica di progetto risulterà idonea se ricade all'interno del fuso.

La curva granulometrica di progetto è stata ottenuta variando manualmente le percentuali di materiale per ciascuna frazione granulometrica al fine di ottenere una curva il più possibile centrale rispetto al fuso presente nel Capitolato.

Nel mix design non è stato possibile far coincidere le percentuali in peso con le percentuali in volume: questo perché i materiali utilizzati presentano densità differenti. In particolare, il basalto artificiale ha una densità nettamente superiore agli altri materiali, con valori nell'ordine di  $4 \text{ g/cm}^3$ . Dovendo preparare la ricetta in oeso, è stato dunque necessario riportare la percentuale in volume del basalto artificiale in percentuale in peso. Lo stesso lavoro è stato effettuato per la sabbia Matrix, avendo densità inferiore rispetto agli altri aggregati.

#### **4.2 Confezionamento delle miscele di conglomerato bituminoso**

La miscelazione del legante con gli aggregati lapidei è avvenuta mediante l'ausilio di un miscelatore meccanico: la Figura 4.1 mostra quello in dotazione al Laboratorio di Strade dell'Università Politecnica delle Marche.



*Figura 4.1 – Miscelatore meccanico*

Il suddetto dispositivo è costituito da un recipiente in acciaio, con capacità 20 litri, all'interno del quale vengono inseriti i materiali da miscelare. Questo è dotato di due pale in acciaio di cui una, più sottile, non è rimovibile e ruota esternamente al recipiente, mentre l'altra, più larga, è asportabile e ruota centralmente. Le pale ruotano a velocità costante, miscelando così i vari componenti del conglomerato; sia la velocità che il tempo di miscelazione possono essere impostati dal pannello di controllo.

Infine, il miscelatore, in base al tipo di conglomerato che si vuole produrre, permette di impostare e mantenere costante la temperatura di miscelazione in un intervallo compreso tra 40 e 180 °C. Nel caso in esame la temperatura è stata impostata a 170 °C per le miscele dei tre strati della pavimentazione, sia per le miscele vergini, sia per quelle con la sostituzione della sabbia Matrix.

Tutti gli impasti sono stati preparati con identica modalità secondo la seguente procedura, che ha garantito un'adeguata distribuzione del legante modificato tra gli aggregati:

- Vengono pesati i materiali necessari al confezionamento dei provini di conglomerato bituminoso, secondo la ricetta precedentemente stabilita.



*Figura 4.2 - Pesatura degli aggregati*

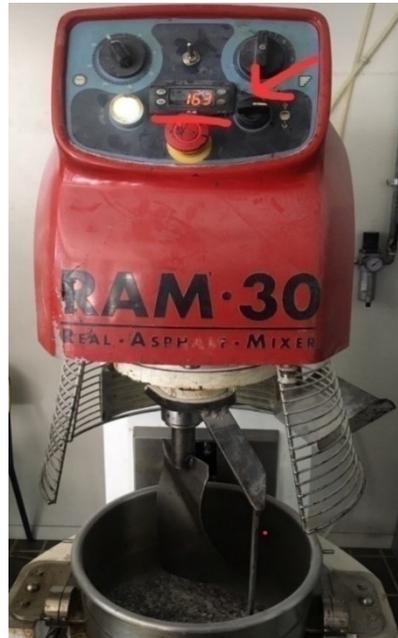
## Apparecchiature e metodologie di prova

- Successivamente, si mettono a riscaldare in forno gli aggregati alla temperatura di miscelazione adottata (170 °C nel caso in esame) ed il legante, per 3 ore in modo tale da renderlo fluido e pronto per la miscelazione.



*Figura 4.3 – Forno utilizzato in laboratorio*

- Nel frattempo, si accende il miscelatore e si attende che la temperatura salga fino a raggiungere quella impostata per il mixaggio, 170°C nel caso presente;



*Figura 4.4 – Impostazione della temperatura nella miscelatrice*

- raggiunta la temperatura, si inseriscono gli aggregati, ad esclusione del filler, nella vasca di miscelazione e si lascia girare le pale per 30 secondi circa.



*Figura 4.5 – Aggregati nella vasca di miscelazione*

- Dopodiché si versa il quantitativo, stabilito dal mix design, del legante, all'interno della vasca e si fa girare le pale per circa due minuti fino a che il legante rivesta tutti gli aggregati.



*Figura 4.6 – Aggiunta del legante fluido della vasca di miscelazione*

- Successivamente si inseriscono gli ultimi aggregati rimasti in forno, i filler.



*Figura 4.7 – Aggiunta del filler alla miscela*

- Infine, si aziona il dispositivo per ulteriori 3 minuti, al termine dei quali la miscelazione è stata considerata ultimata. Una volta terminata la miscelazione, si utilizza una spatola per rimuovere eventuali frazioni di filler rimaste sulle lame del miscelatore, separate dall'impasto.

Si conclude dunque miscelando manualmente tale filler con il composto per renderlo omogeneo.



*Figura 4.8 - Conglomerato al termine della miscelazione*

- Al termine della miscelazione, si pone il conglomerato ottenuto in un grande contenitore e si procede poi alla formazione di otto porzioni di circa 1250 g per Binder e Usura e 2500 g per la Base. Quest'ultime vengono poste in forno alla temperatura di 170 ° per un tempo di 30 minuti, per far sì che il conglomerato preparato raggiunga la temperatura desiderata. Questa procedura simula lo stoccaggio del bitume nei vari macchinari prima che esso venga disteso sulla pavimentazione stradale. In contemporanea al

Apparecchiature e metodologie di prova  
raggiungimento della temperatura da parte delle miscele, alla stessa  
temperatura, vengono riscaldate anche le fustelle d'acciaio utilizzate per la  
formazione dei provini cilindrici, per evitare che il conglomerato subisca  
eventuali shock termici durante la compattazione.



*Figura 4.9 – Conglomerato preparato delle teglie, prima della compattazione*

### **4.3 Compattazione dei provini con la pressa a taglio giratoria (UNI EN 12697-31)**

La pressa a taglio giratoria ha rappresentato un'innovazione nella metodica di costipamento dei conglomerati in laboratorio. Questa macchina fu introdotta dai tecnici dell'U.S. Army Corps of Engineers negli anni '30 e fece la propria comparsa in Europa intorno agli anni '50 grazie a dei ricercatori francesi del Laboratoire Central des Ponts et des Chaussées e fu soggetta a normativa solo nel 1972.

Essa permette di preparare campioni cilindrici aventi caratteristiche di addensamento e di organizzazione interna dei granuli di aggregato molto simili a quelle ottenute in situ mediante la compattazione dei rulli di cantiere.

La pressa esegue la compattazione mediante l'applicazione di una pressione costante di  $600 \pm 10$  kPa la cui direzione di applicazione risulta inclinata rispetto all'asse della fustella, Figura 3.10 dx, di un angolo pari a  $1,25 \pm 0,02$  °; inoltre, durante il processo di compattazione, quest'ultima ruota attorno al proprio asse ad una velocità prefissata pari 30 giri/min. La fustella è composta dal corpo centrale e da due basi, una inferiore ed una superiore.

Lo schema di funzionamento completo della pressa a taglio giratoria è riportato in Figura 4.11



Figura 4.10 – Pressa giratoria e la sua fustella

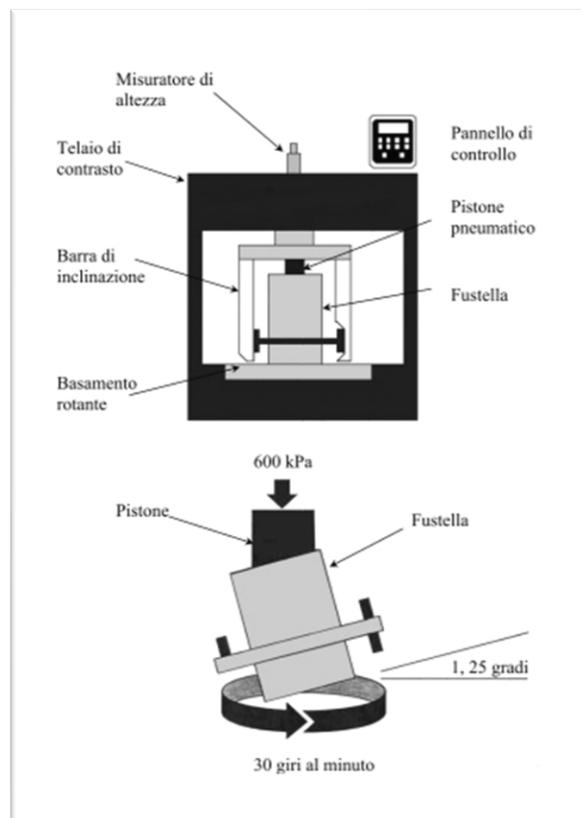
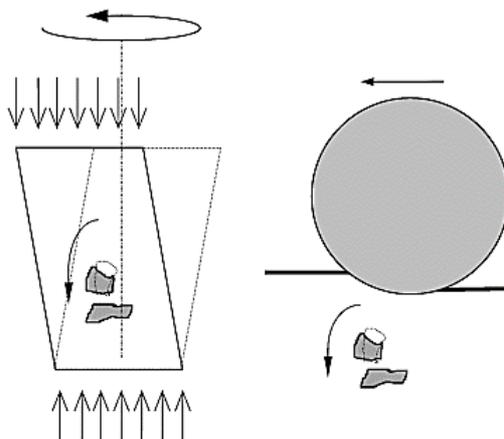


Figura 4.11 – Schema di funzionamento della pressa giratoria

Tale rotazione della fustella genera nel provino delle forze di taglio che, combinate con la compressione assiale statica, permettono di raggiungere il costipamento ottimale attraverso una continua riorganizzazione dei granuli della miscela formando,

Apparecchiature e metodologie di prova formando nuove strutture granulari aventi una distribuzione di vuoti la cui forma ed entità è simile a quella che si registra in situ, come rappresentato dalla Figura 4.12.



*Figura 4.12 - Analogia tra compattazione in laboratorio ed in situ*

Una volta completato l'impasto del conglomerato bituminoso, viene riposto in forno alla temperatura di compattazione come descritto in precedenza, insieme alle fustelle d'acciaio che saranno utilizzate per la preparazione dei provini cilindrici per evitare che il materiale versato al loro interno subisca uno shock termico. Sono state utilizzate fustelle di diametro 100 mm per il Binder e Usura, mentre fustelle da 150 mm per la Base. Passato il tempo indicato, si estrae dal forno la fustella calda, si inserisce un filtro di carta e si versa al suo interno il quantitativo prestabilito di conglomerato; di conseguenza, si inserisce un secondo filtro circolare di carta e si chiude con la base superiore della fustella ed infine si ripone la fustella all'interno della pressa a taglio giratoria.

Attraverso il pannello di controllo presente sulla pressa, quella in dotazione al Laboratorio di Strade dell'Università Politecnica delle Marche, è possibile selezionare il tipo di compattazione impostando il numero di giri (nel caso in esame, sono stati considerati 50 e 100 per ogni miscela) oppure l'altezza del provino. A seconda delle esigenze, è quindi possibile confezionare provini di altezza variabile, aventi diametro di 100 mm oppure 150 mm. A compattazione ultimata, il provino viene tenuto per almeno 10 minuti all'interno della fustella e successivamente estratto tramite apposito estrattore, come in Figura 4.13.



*Figura 4.13 - Estrazione provini dalla fustella*

Durante la compattazione dei provini si registra su un foglio apposito l'andamento delle altezze dei provini a 100 giri per costruire nel futuro una curva di addensamento. Eseguiamo poi il precedente procedimento per tutte le otto miscele precedentemente preparate: le prime tre vengono compattate dalla pressa giratoria a 100 giri, mentre le ultime tre a 50 giri. Si ottengono così otto provini per ogni tipologia di miscela effettuata.



*Figura 4.14 - Provini ottenuti alla fine della compattazione*

**4.4 Determinazione delle proprietà volumetriche (UNI EN 12697-5)**

In questo paragrafo sono elencati i protocolli di prova, utilizzati nella presente sperimentazione, per il calcolo delle proprietà volumetriche delle miscele prodotte in questa fase.

La determinazione dei vuoti di un provino di conglomerato bituminoso è stata effettuata attraverso Metodo dry:

Per la determinazione dei vuoti attraverso il “metodo dry” il provino viene prima pesato sulla bilancia e poi in acqua tramite una bilancia idrostatica (Figura 4.15), quindi attraverso la seguente formula è possibile determinare il valore dei vuoti:

$$V(\%) = \frac{\rho_{max} - \rho_{dry}}{\rho_{max}} \times 100$$

dove:

- $\rho_{max}$  = massa volumica massima della miscela ( $\frac{g}{cm^3}$ );

$$\rho_m = \frac{100}{\sum(p_i/\rho_i) + (p_b/\rho_b)}$$

- $p_i$ : percentuale dell'aggregato  $i$ -esimo usato nella miscela in  $m/m$ ;
- $\rho_i$ : massa volumica apparente dell'aggregato  $i$ -esimo in  $kg/m^3$ ;
- $p_b$ : percentuale di legante nella miscela in  $m/m$ ;
- $\rho_b$ : massa volumica del legante a 25 °C in  $kg/m^3$ .

- $\rho_{dry} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - M_2}$ ;

dove:

- $M_1$  = massa in aria del provino;
- $M_2$  = massa del provino in acqua;
- $\rho_w$  = è la densità dell'acqua alla temperatura di prova ( $\frac{Mg}{m^3}$ )

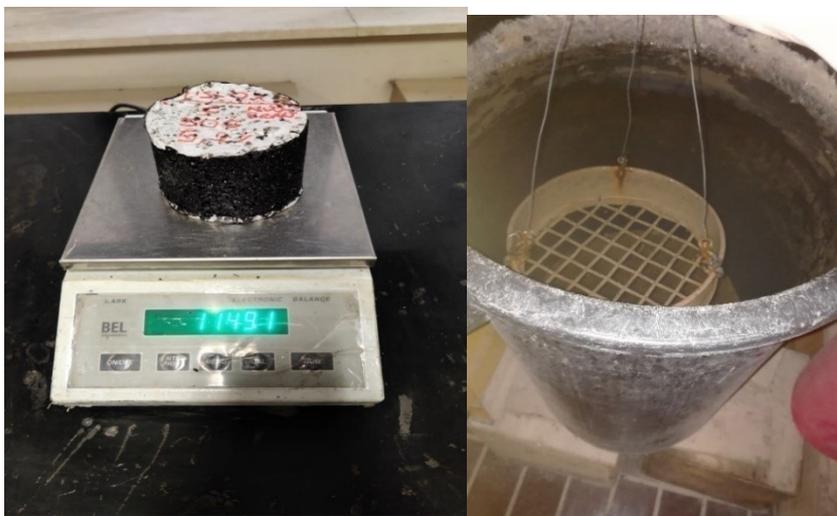


Figura 4.15 – Bilancia per la misura del peso in aria e in acqua

#### **4.5 Determinazione delle caratteristiche di addensamento (UNI EN 12697-5)**

Le caratteristiche di addensamento sono state determinate mediante l'utilizzo della pressa giratoria a taglio che permette di valutare la tendenza del materiale ad essere addensato attraverso l'analisi delle curve di compattazione desunte dai dati registrati in continuo (altezza del campione, numero di rotazioni) durante il graduale addensamento del materiale. Tali curve sono ottenute riportando in ascissa il logaritmo del numero di giri effettuati dalla pressa giratoria ed in ordinata il corrispondente grado di compattazione  $C$  [%] che viene determinato mediante la seguente espressione:

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

dove:

- $V_m$  è il contenuto dei vuoti residui in %;
- $\rho_m$  è la massa volumica massima della miscela in  $\text{kg/m}^3$ ;
- $\rho_b$  è la massa volumica apparente totale della miscela in  $\text{kg/m}^3$ .

Come si può vedere nella seguente figura, la curva di compattazione che si ottiene è assimilabile ad una retta avente un'equazione del tipo:

$$C = C_1 + k \cdot \log N$$

dove:

- C è il grado di costipamento, ovvero il complementare a 100 della percentuale dei vuoti in %;
- $C_1$  è l'addensabilità della miscela dopo il primo giro;
- k è la lavorabilità della miscela;
- N è il numero di giri compiuti dalla pressa.

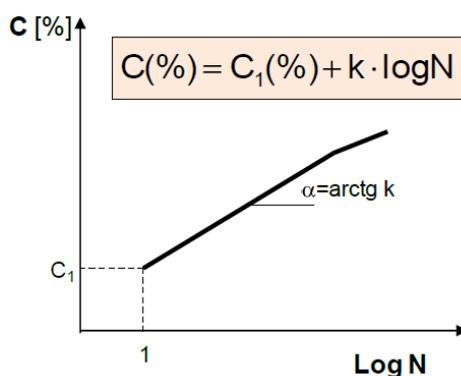


Figura 4.16 - Tipica curva di addensamento

L'addensabilità è legata alle caratteristiche granulometriche degli aggregati ed è tanto maggiore quanto più la granulometria è vicina a quella del massimo addensamento, inoltre varia con il valore d'attrito interno della miscela che risulta molto sensibile alla forma degli aggregati. La lavorabilità, invece, dipende dalle caratteristiche e dal contenuto di legante ed è associata alla viscosità della miscela.

Per poter costruire questa curva risulta necessario conoscere e quindi misurare sperimentalmente il valore di  $\rho_b$  ad ogni giro eseguito dalla pressa. Questo non è ovviamente possibile in quanto tale eventualità richiederebbe l'interruzione della compattazione e l'estrazione del provino ad ogni giro, rendendo inefficace l'addensamento stesso. Si deve, quindi, procedere andando a ricavare il valore di compattazione  $C_x$  al giro x-esimo utilizzando il valore della massa volumica apparente ( $\rho_b$ ) della miscela, misurata al termine della compattazione (100 giri) sul

Apparecchiature e metodologie di prova provino finale avente altezza  $h_{min}$ , e rapportandola all'altezza  $h_x$  del provino al giro  $x$ -esimo monitorata dalla pressa giratoria. Quanto appena esposto è tradotto analiticamente dalla seguente espressione:

$$C_x = \frac{\rho_b}{\rho_m} \cdot \frac{h_{min}}{h_x} \cdot 100$$

In definitiva, la procedura di prova consiste nell'eseguire la compattazione del provino andando a registrare ad  $tot$  giri, l'altezza del campione  $h_x$ . Al termine dell'addensamento si registra l'altezza finale del provino  $h_{min}$  e si misura la massa volumica apparente  $\rho_b$ . Nota la massa volumica massima  $\rho_m$  è possibile determinare il grado di compattazione  $C_x$  al giro  $x$ -esimo e quindi la curva di compattazione dalla quale si ricavano l'addensabilità  $C_1$  e la lavorabilità  $k$ .

#### **4.6 Prova di modulo a trazione indiretta (UNI EN 12697-26)**

Questa prova consente di misurare il valore del modulo elastico dei provini di conglomerato bituminoso in configurazione di trazione indiretta. La misurazione avviene attraverso l'utilizzo del macchinario "Nottingham Asphalt Tester (NAT)", che è costituito principalmente da un telaio di carico, un'unità pneumatica, un sistema di controllo ed acquisizione dati ed una cella climatica per il controllo della temperatura (Figura 4.17).

L'unità pneumatica è collegata ad un compressore che fornisce aria secca e pulita ad almeno 7 bar di pressione. Il telaio di carico, invece, è costituito da una base, due montanti, una trave di contrasto regolabile e da un attuatore pneumatico collegato ad un pistone che consente l'applicazione di carichi verticali che arrivano fino a 20 kN in condizioni statiche e 16 kN in condizioni dinamiche. È poi possibile controllare tutto tramite l'ausilio di un computer.



*Figura 4.17 – Nottingham Asphalt Tester (NAT)*



*Figura 4.18 – Provino disposto all'interno del NAT e pronto per la prova*

Il provino da testare deve essere per prima cosa condizionato in camera climatica ad una temperatura di 20 °C per almeno 4 ore.

In questa configurazione vengono applicati una serie di impulsi di carico che hanno la seguente forma:

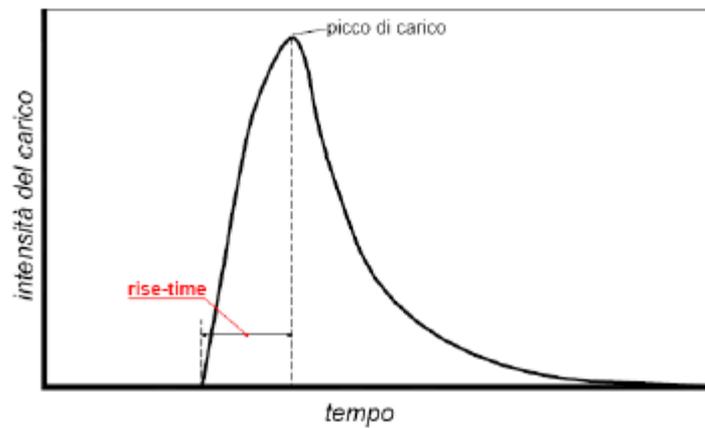


Figura 4.19 – Forma impulso di carico *i*-esimo

Il carico per arrivare al valore massimo impiega un tempo chiamato “rise time” che è pari a 124 ms. C’è poi una corrispondenza tra il rise-time e la frequenza di prova, ed in particolare la frequenza di carico con questa configurazione di prova è pari a:

$$f = \frac{1000}{4 \cdot r_t} \cong \frac{1000}{500} = 2 \text{ Hz}$$

dove:

–  $r_t = \text{rise time}$

Cioè restituisce dei valori di modulo che misureremmo con una frequenza di 2 Hz.

In questa prova si sviluppano due diversi livelli tensionali  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  (Figura 3.20), causati dal fatto che la testa di carico spinge verso il provino andandolo a schiacciare, ed in più lateralmente il provino subisce per “Effetto Poisson” uno spanciamento.

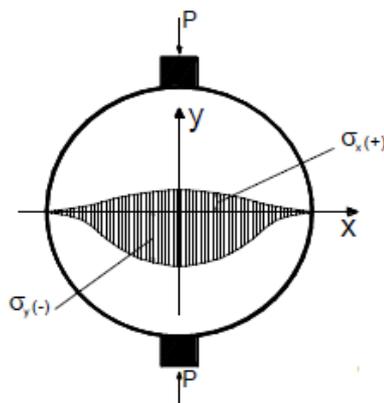


Figura 4.20 – Stato tensionale provino durante la prova di rigidezza

dove:

- $\sigma_x(\text{media}) = \frac{0.273 \cdot P}{d \cdot t}$

- $\sigma_y(\text{media}) = -\frac{P}{d \cdot t}$

E di conseguenza la deformazione in direzione “x” è pari a:

$$\varepsilon_x(\text{media}) = \frac{\sigma_x(\text{media})}{E} - \nu \cdot \frac{\sigma_y(\text{media})}{E}$$

L’ipotesi che si assume è che il modulo elastico del provino di conglomerato bituminoso sia uguale a compressione e a trazione, e questo è possibile farlo senza commettere grandi errori, facendo però la prova ad una temperatura non più alta di 20 °C.

Mentre invece il “coefficiente di Poisson” è assunto costante e pari a 0,35.

La deformazione  $\Delta$  del provino è quindi ottenuta moltiplicando la deformazione media “ $\varepsilon_d$ ” per il diametro “d” del provino, e successivamente invertendo si ottiene il valore del modulo elastico:

$$E = \frac{P}{\Delta \cdot t} \cdot (0.273 + \nu)$$

In particolare, la prova viene eseguita fissando la deformazione  $\Delta$  affinché il materiale non esca dal campo lineare in modo da evitare che il materiale si deformi irreversibilmente, e di conseguenza si trova il carico P necessario ad ottenere quella deformazione, e poi con la formula precedente è possibile trovare il modulo elastico.

Il modulo viene prima misurato in una diagonale del provino, poi successivamente il provino viene ruotato di 90°, in modo da misurare il modulo nell’altra direzione. Infine, viene effettuata la media dei moduli delle due diagonali.

Le prove di modulo possono anche essere effettuate a 5 °C e a 40 °C al fine di determinare la risposta del materiale al variare della temperatura.

#### **4.7 Prova di Trazione Indiretta (UNI EN 12697-23)**

La prova di trazione indiretta, nota anche come prova alla 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).

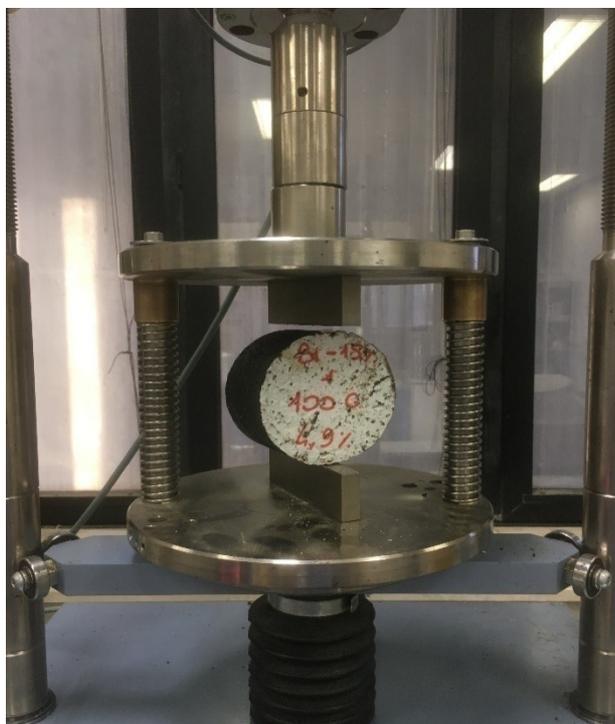
La prova di resistenza a trazione indiretta può essere eseguita ad una temperatura compresa tra i 5 ed i 25°C. In questa indagine, la prova è effettuata alla temperatura di 25°C. Quindi, prima della realizzazione della prova i provini vengono tenuti per almeno 3 ore in camera climatica a 25°C.

## Apparecchiature e metodologie di prova

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:  $15 \pm 2$  mm;
- spessore:  $4 \pm 1$  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 4.21 – Posizionamento del provino tra i piatti della pressa*

Durante la prova la testa di carico inferiore viene fatta avanzare ad una velocità costante di  $50 \pm 2$  mm/min. Il sistema di controllo, mediante due comparatori, permette di misurare sia la deformazione verticale 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.



*Figura 4.22 – 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 il software UTM II.

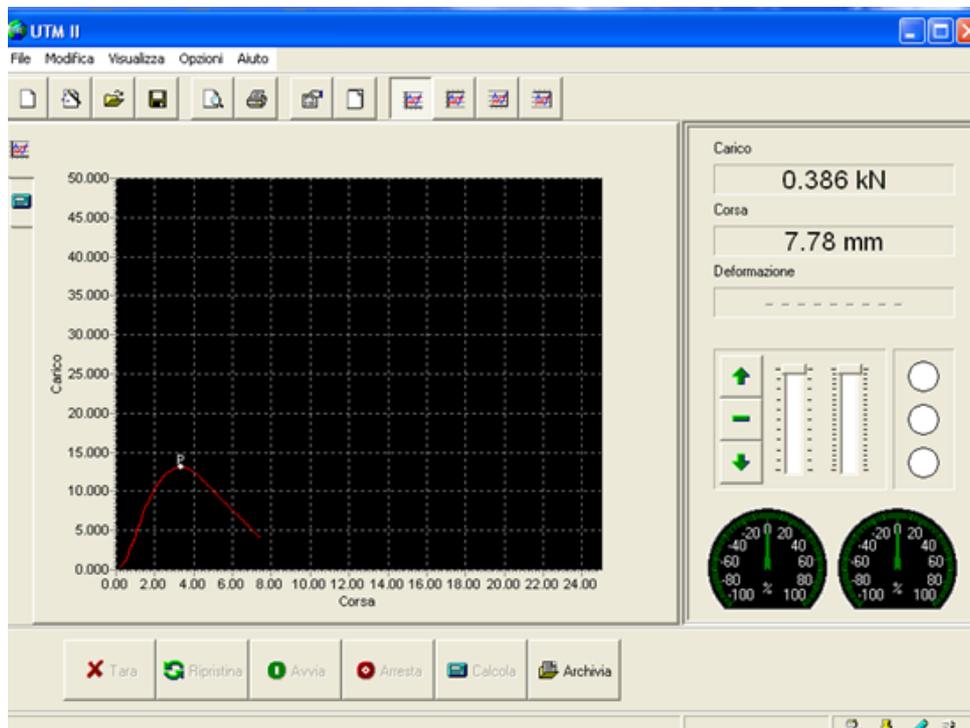


Figura 4.23 – Curva sforzo-deformazione risultante

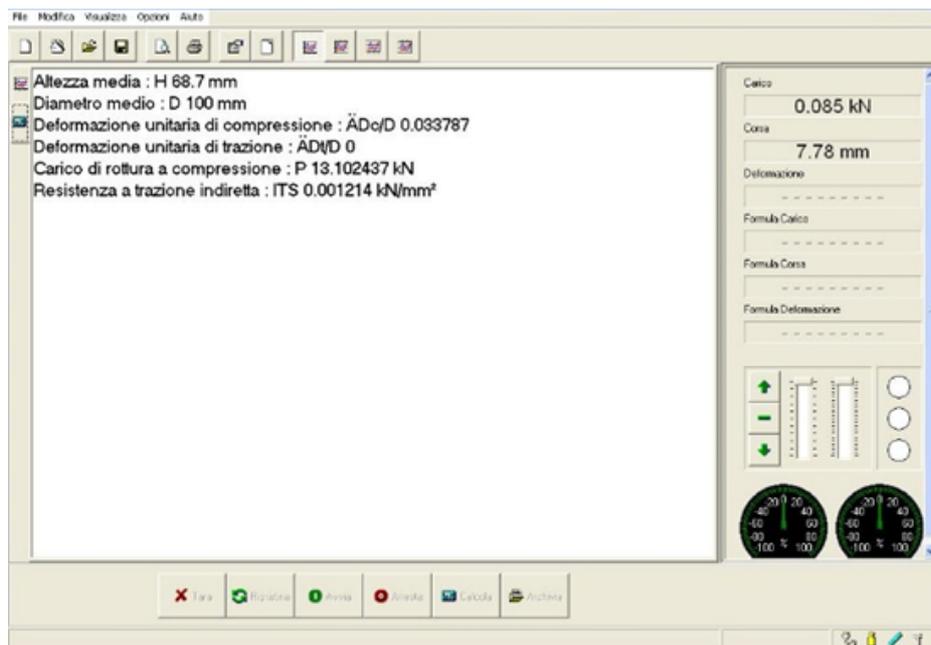


Figura 4.24 – Schermata con rielaborazione dei risultati

La resistenza a trazione indiretta ITS (Indirect Tensile Strength), cioè la massima tensione di trazione applicata al provino, viene calcolata partendo 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.

#### **4.8 Prova di sensibilità all'acqua (UNI EN 12697-12)**

La norma UNI EN 12697-12 descrive tre metodi per determinare l'effetto della saturazione e del condizionamento accelerato in acqua.

Questi metodi possono essere utilizzati per valutare l'effetto dell'umidità con o senza l'utilizzo di attivanti di adesione.

Il metodo utilizzato nella sperimentazione è il Metodo A, il quale utilizza la resistenza a trazione indiretta di un provino cilindrico di conglomerante bituminoso; si presenta in seguito la procedura.

I provini cilindrici sono divisi in due serie, ognuna mantenuta ad opportune condizioni. La prima viene mantenuta in un ambiente asciutto in camera climatica, mentre la seconda viene immersa in acqua ad un'elevata temperatura di condizionamento.



Figura 4.25 – Serie di provini durante il condizionamento in acqua

In seguito al condizionamento viene determinata la resistenza a trazione indiretta di entrambe le serie di provini in accordo con la norma EN 12697-23 alla temperatura di prova stabilita. Il rapporto tra la resistenza a trazione indiretta della serie di provini tenuti in acqua e quella dei provini tenuti in camera climatica è espressa in percentuale.

Le apparecchiature e gli strumenti di prova utilizzati sono:

- Bagno d'acqua controllato termostaticamente che possa essere usato per mantenere la temperatura di condizionamento dei provini a  $(40 \pm 1)^\circ\text{C}$  e  $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ . Il bagno deve avere un letto forato alla sommità dei sostegni sul fondo del bagno. Il bagno deve essere sufficientemente grande perché la parte superiore dei provini si trovi 20 mm al di sotto della superficie dell'acqua;
- Apparecchiatura per la prova di trazione indiretta;
- Camera climatica.

La seconda serie di provini, costituita da 8 provini compattati a 50 giri, viene collocata nella vasca descritta precedentemente per effettuare un bagno d'acqua a  $(40 \pm 1)^\circ\text{C}$  per 72 ore.

Una volta che sono trascorsi 3 giorni viene cambiata la temperatura del condizionamento dell'acqua da 40 a  $25^\circ\text{C}$ , i provini vengono dunque mantenuti in tali condizioni per ulteriori 3 ore.

Contemporaneamente la prima serie di 8 provini viene posta in camera climatica a 25 °C per 3 ore.

Trascorse le 3 ore si asciuga la superficie dei provini precedentemente immersi in acqua e si procede subito alla prova di resistenza a trazione indiretta per determinare ITSM.

Eseguita la medesima prova anche sulla seconda serie di provini, precedentemente in camera climatica, si calcola il rapporto:

$$ITSR = 100 \cdot \frac{ITS_w}{ITS_d}$$

dove :

- ITSR: è il rapporto di resistenza a trazione indiretta espresso in percentuale (%);
- ITSw è la media delle resistenze a trazione indiretta della serie “wet” espressa in KPa;
- ITSD è la media delle resistenze a trazione indiretta della serie “dry” espressa in KPa.

#### **4.9 Test di cessione**

Durante la sperimentazione, contestualmente alle prestazioni meccaniche, è stata valutata la compatibilità ambientale dei provini in conglomerato bituminoso contenenti Matrix.

Tenendo in considerazione la particolare natura dei materiali di origine industriale, è stato necessario controllare l’impatto a lungo termine generato dall’uso di Matrix® nella produzione del conglomerato bituminoso.

A questo scopo, i provini contenenti Matrix® sono stati sottoposti a test di cessione per misurare il potenziale rilascio di inquinanti quando saranno giunti a “FINE VITA” e verranno demoliti e/o fresati.

I risultati sono poi stati confrontati con i limiti stabiliti dalle norme vigenti in tema di recupero dei rifiuti.

Lo scopo finale è quello che il prodotto bituminoso che contiene Matrix, giunto al termine della sua vita utile, sia caratterizzato da livelli di cessione degli inquinanti inferiori a quelli previsti dal D.M. 5/02/1998 e s.m.i., andando così a caratterizzarsi come un “tradizionale” fresato d’asfalto che è possibile recuperare in impianti autorizzati per rifiuti inerti per opere di sottofondo o di rilevato stradale oppure

Apparecchiature e metodologie di prova ancora come aggregato per la produzione di calcestruzzo o di conglomerato bituminoso.

Il test di cessione (anche detto test di lisciviazione o leaching test) è un particolare tipo di estrazione chimica, generalmente usato nella chimica analitica, come attività preparativa a successive analisi. Il test consiste in un "lavaggio", studiato per consentire il passaggio all'interno di un liquido (una soluzione detta eluato), delle sostanze mobili presenti in un campione solido. L'eluato prodotto verrà sottoposto ad un set di analisi chimiche che consentiranno la valutazione del "potenziale di rilascio", o di "cessione", del campione iniziale.

Tale processo è usato nella classificazione di matrici filtranti, terreni, rifiuti e compost, nonché in molte attività di ricerca sperimentale o in esperimenti a scala di laboratorio. Di particolare interesse è il fatto che il test consenta di stimare il potenziale di emissione nel lungo termine dei composti mobili contenuti nei suoli o nei rifiuti, in particolare di quelli che potrebbero costituire un potenziale inquinamento dell'ambiente o un pericolo per la salute umana.

Durante il test di cessione, un campione di materiale solido viene messo a contatto con un liquido lisciviante (usato come agente materiale di separazione), seguendo le metodiche illustrate nel successivo capitolo. Questo liquido funge da solvente, facendo sì che al suo interno si concentrino (in soluzione) tutte o parte delle sostanze miscibili presenti nel campione solido iniziale. Il risultato dell'operazione è un liquido arricchito di svariati elementi e composti detto eluato, che verrà poi separato dalla parte solida mediante filtrazione.

Le sostanze mobili che costituiranno l'eluato saranno pertanto quelle che si trovavano precedentemente assorbite o adsorbite nelle porosità del campione e quelle presenti in condizioni solubili, in forma ionica o mobile.

Il test di cessione si esegue in accordo alla norma tecnica UNI EN 12457-2 e prevede:

- Frantumazione dei provini fino ad una granulometria inferiore a 4 mm;
- Immersione di una porzione del provino in acqua demineralizzata, sotto agitazione, per un tempo pari a 24 ore, con un rapporto campione: acqua pari a 1:10;

- Al termine, il residuo solido viene separato dall'acqua mediante filtrazione e, su di essa, vengono eseguite le determinazioni analitiche previste dal DM 5/2/98

Nella sperimentazione di conglomerato bituminoso con l'aggiunta graduale di Sabbia Matrix, è stato effettuato il test di cessione prima e dopo l'invecchiamento.

Il primo test è stato effettuato su provini realizzati, compattati e testati fino a rottura; mentre il secondo test è stato effettuato dopo l'invecchiamento, simulato ponendo i provini per 80 ore a 160 °C.

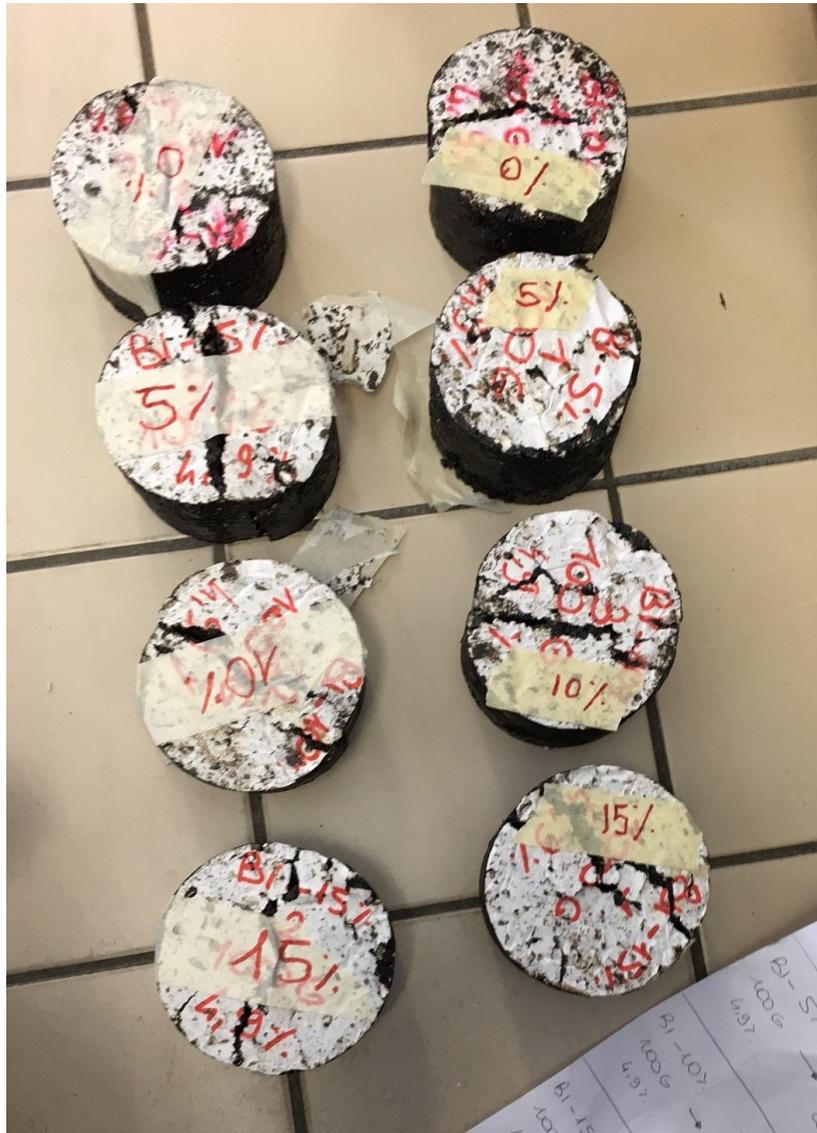


Figura 4.26 – Serie di provini prima del test di cessione

## 5. Analisi dei risultati sperimentali

### 5.1 Mix design

Il mix design, in peso, delle miscele di conglomerato bituminoso utilizzate per lo studio delle prestazioni meccaniche è riportato nella seguente tabella. Le seguenti percentuali sono espresse in peso.

	USURA				BINDER				BASE			
	0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%
Sabbia 0/6	34,1%	29,1%	24,1%	19,1%	39,0%	34,0%	29,0%	24,0%	30,0%	25,0%	20,0%	15,0%
Graniglia 4/8	-	-	-	-	19,0%	19,0%	19,0%	19,0%	13,0%	13,0%	13,0%	13,0%
Pietrisco 8/12	11,1%	11,1%	11,1%	11,1%	8,0%	8,0%	8,0%	8,0%	15,0%	15,0%	15,0%	15,0%
Pietrisco 12/25	-	-	-	-	32,0%	31,7%	31,5%	31,2%	15,0%	15,0%	15,0%	15,0%
Pietrisco 25/40	-	-	-	-	-	-	-	-	24,0%	23,8%	23,5%	23,2%
Graniglia 4/8 Basalto	15,2%	15,0%	14,7%	14,4%	-	-	-	-	-	-	-	-
Basalto artificiale 4/8	23,5%	23,5%	23,5%	23,5%	-	-	-	-	-	-	-	-
Pietrisco 10/15 Basalto	12,0%	12,0%	12,0%	12,0%	-	-	-	-	-	-	-	-
Matrix	-	5,0%	10,0%	15,0%	-	5,0%	10,0%	15,0%	-	5,0%	10,0%	15,0%
Filler Omya	4,1%	4,1%	4,1%	4,1%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%
Filler Recupero	-	0,2%	0,5%	0,8%	-	0,3%	0,5%	0,8%	1,0%	1,2%	1,5%	1,8%

Tabella 5.1 – Mix design in peso

Al fine di tracciare le curve granulometriche di progetto delle miscele testate, sono state trasformate in volume, tutte le percentuali in peso precedentemente espresse, tenendo conto delle differenti masse volumiche della granella di basalto e della sabbia Matrix. Si fa notare come la percentuale di filler Omya sia stata aumentata all'aumentare del Matrix al fine di garantire delle curve granulometriche quanto più sovrapponibili.

	USURA				BINDER				BASE			
	0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%
Sabbia 0/6	37,0%	31,3%	25,7%	20,2%	39,0%	33,7%	28,6%	23,7%	30,0%	24,8%	19,7%	14,7%
Graniglia 4/8	-	-	-	-	19,0%	18,9%	18,7%	18,6%	13,0%	12,9%	12,8%	12,7%
Pietrisco 8/12	12,0%	11,9%	11,8%	11,7%	8,0%	7,9%	7,9%	7,8%	15,0%	14,9%	14,8%	14,7%
Pietrisco 12/25	-	-	-	-	32,0%	31,5%	31,0%	30,3%	15,0%	14,9%	14,8%	14,7%
Pietrisco 25/40	-	-	-	-	-	-	-	-	24,0%	23,6%	23,1%	22,7%
Graniglia 4/8 Basalto	16,5%	16,2%	15,7%	15,3%	-	-	-	-	-	-	-	-
Basalto artificiale 4/8	17,0%	16,9%	16,7%	16,6%	-	-	-	-	-	-	-	-
Pietrisco 10/15 Basalto	13,0%	12,9%	12,8%	12,7%	-	-	-	-	-	-	-	-
Matrix	-	6,2%	12,3%	18,3%	-	5,7%	11,4%	16,9%	-	5,7%	11,4%	16,9%
Filler Omya	4,5%	4,5%	4,4%	4,4%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%	2,0%
Filler Recupero	-	0,2%	0,5%	0,8%	0,0%	0,3%	0,5%	0,8%	1,0%	1,2%	1,5%	1,8%

Tabella 5.2 – Mix design in volume

Una volta determinato il mix design, è necessario verificare se la curva granulometrica (in volume) delle miscele che andremo a realizzare rientrano nel fuso ANAS precedentemente descritto.

Vengono riportate nella seguente tabella le percentuali di passante in funzione del diametro del setaccio e le percentuali di bitume impiegate. Si fa notare come, al fine di mantenere un tenore dei vuoti pressoché costante all'aumentare del Matrix, la percentuale di bitume della miscela "Base 15%" sia stata aumentata di 0,2%.

d [mm]	USURA				BINDER				BASE			
	0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%	0%	5%	10%	15%
	Passante %				Passante %				Passante %			
31,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	95,8	95,9	95,9	96,0
20	100,0	100,0	100,0	100,0	98,4	98,4	98,4	98,5	75,6	76,0	76,4	76,9
16	99,2	99,3	99,3	99,3	89,6	89,8	89,9	90,2	71,2	71,6	72,1	72,6
12,5	94,0	94,0	94,1	94,1	76,4	76,8	77,1	77,6	65,0	65,5	66,0	66,6
8	73,7	73,9	74,2	74,5	62,9	63,5	63,9	64,7	50,6	51,2	51,9	52,5
4	42,0	43,3	44,3	44,1	44,8	45,5	46,0	46,9	35,6	36,3	37,0	37,7
2	31,9	33,1	33,1	33,8	31,3	32,0	32,5	33,2	25,6	26,2	26,8	27,5
1	21,6	23,1	23,1	23,9	20,1	20,8	21,5	22,3	16,9	17,6	18,4	19,1
0,5	15,6	15,0	15,0	14,7	13,8	13,5	13,2	13,0	12,0	11,7	11,5	11,3
0,25	13,0	13,1	13,1	13,2	11,0	11,1	11,1	11,3	9,9	9,9	10,0	10,1
0,063	7,9	7,9	7,9	7,9	6,3	6,3	6,2	6,3	5,9	5,9	5,9	6,0
% Bitume	5,6%	5,6%	5,6%	5,6%	4,9%	4,9%	4,9%	4,9%	4,5%	4,5%	4,5%	4,7%

Tabella 5.3 – Curve granulometriche di progetto

Riportiamo inoltre le curve granulometriche inserite nel fuso ANAS.

- Usura

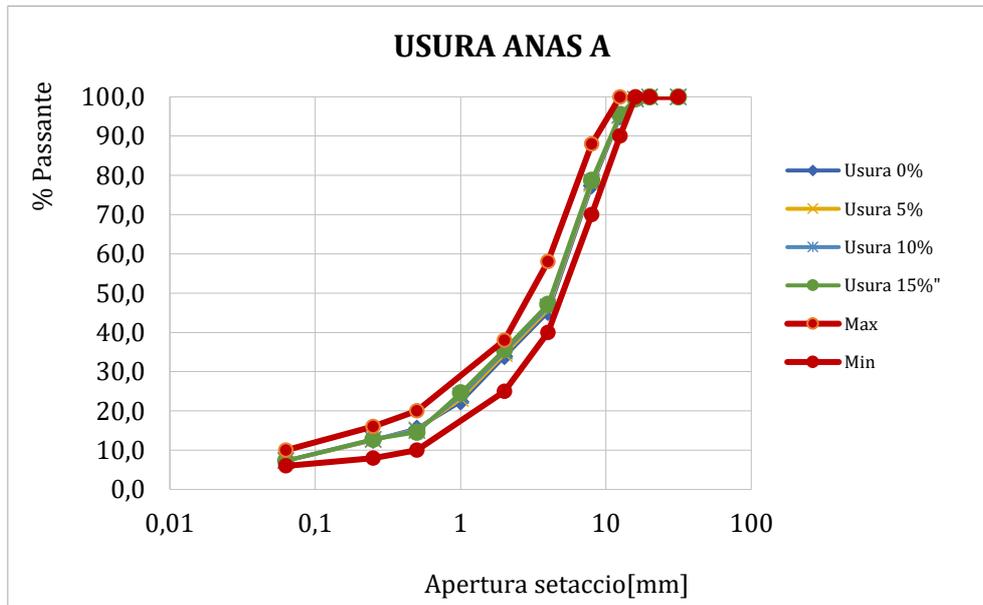


Figura 5.1 – Fuso Usura ANAS

- Binder

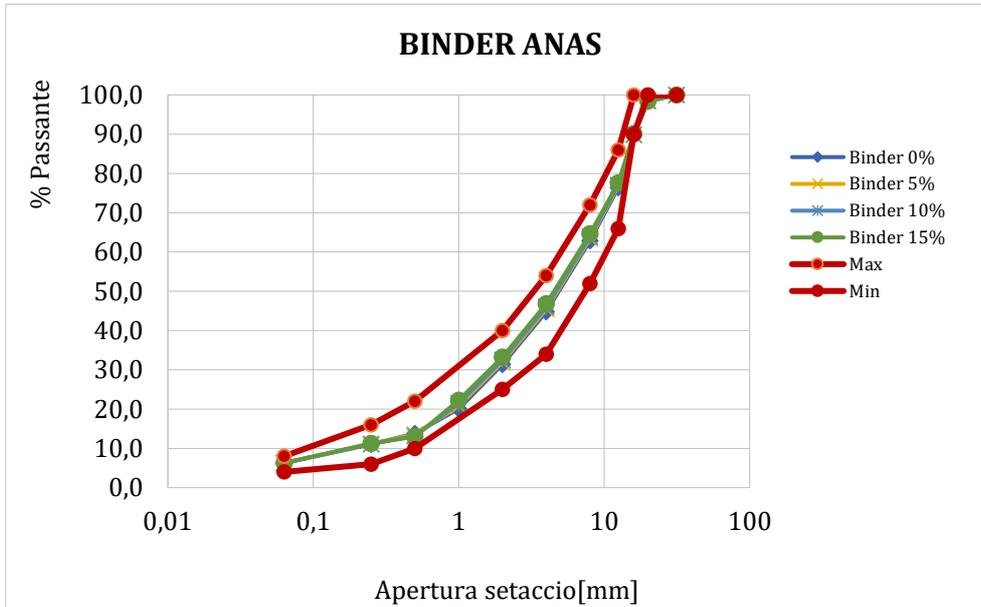


Figura 5.2 – Fuso Binder ANAS

- Base

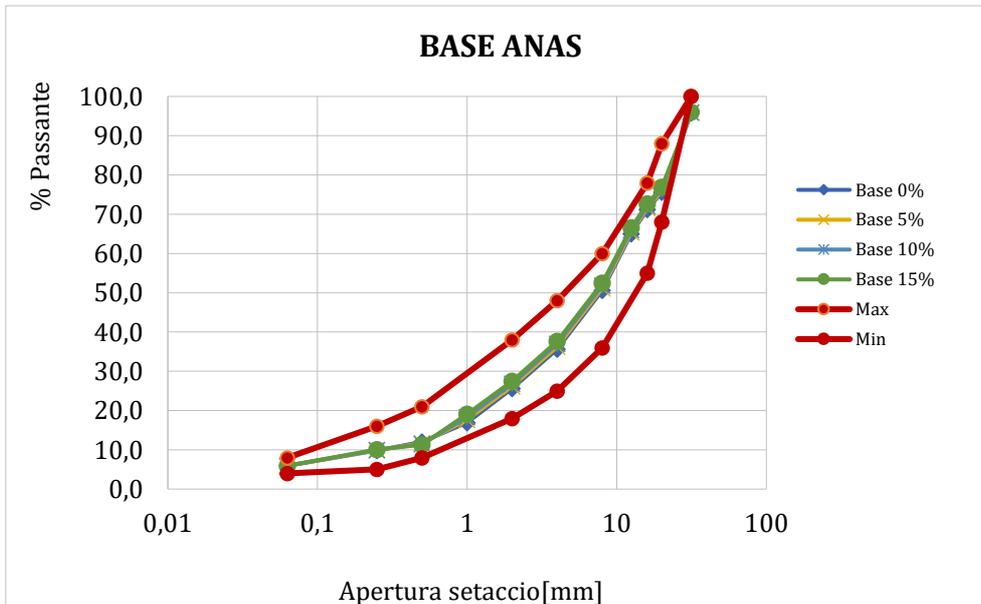


Figura 5.3 – Fuso Base ANAS

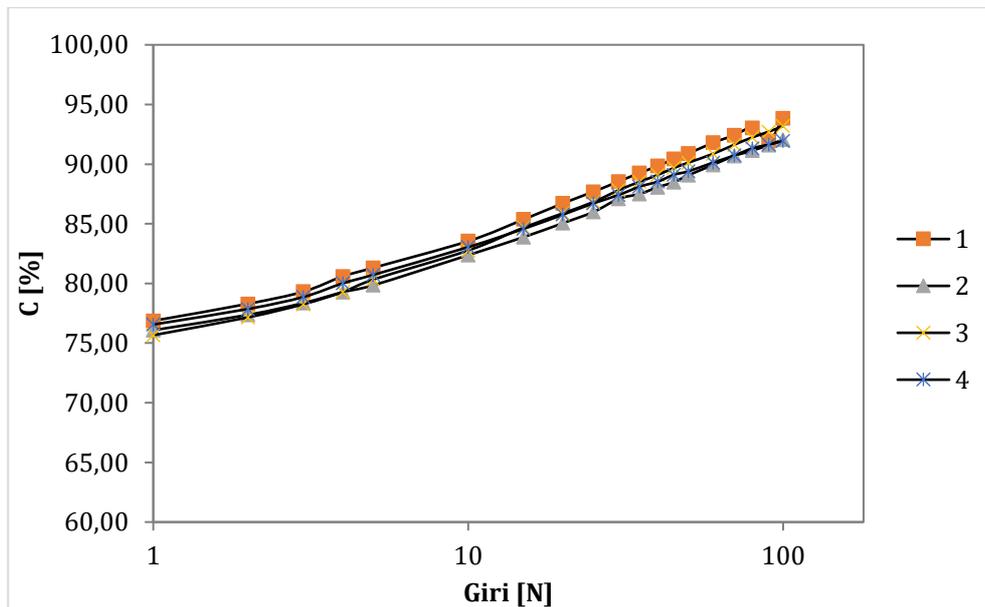
## **5.2 Risultati Usura**

Nel presente paragrafo vengono presentati i risultati ottenuti in laboratorio dalle prove effettuate sui provini di conglomerato bituminoso realizzato per l'Usura.

### **5.2.1 Curva di addensamento**

Per ciascun provino compattato a 100 giri si è costruita la curva di compattabilità.

Nelle figure successive sono riportate, rispettivamente, le curve di compattazione ottenute per i 4 provini di conglomerato bituminoso con 0 %, 5% ,10% e 15% di sabbia Matrix.



*Figura 5.4 - Curva di compattabilità Usura 0% Matrix*

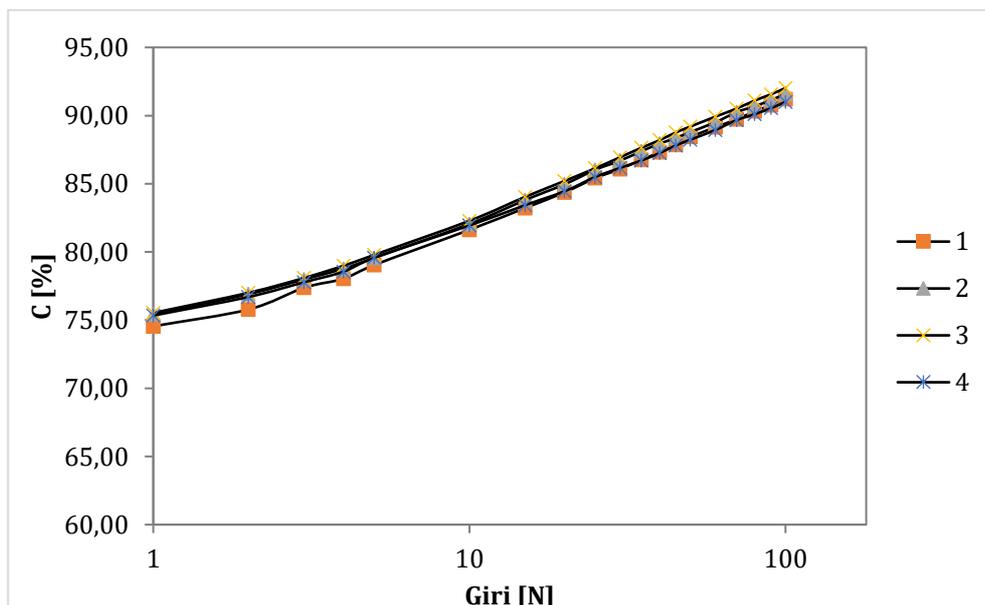


Figura 5.5 - Curva di compattabilità Usura 5% Matrix

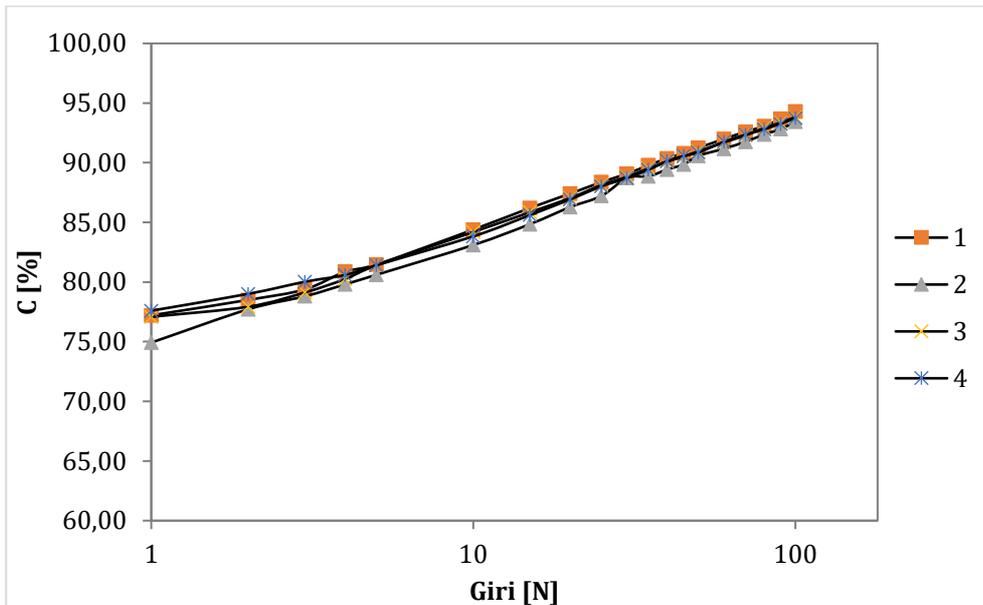


Figura 5.6 - Curva di compattabilità Usura 10% Matrix

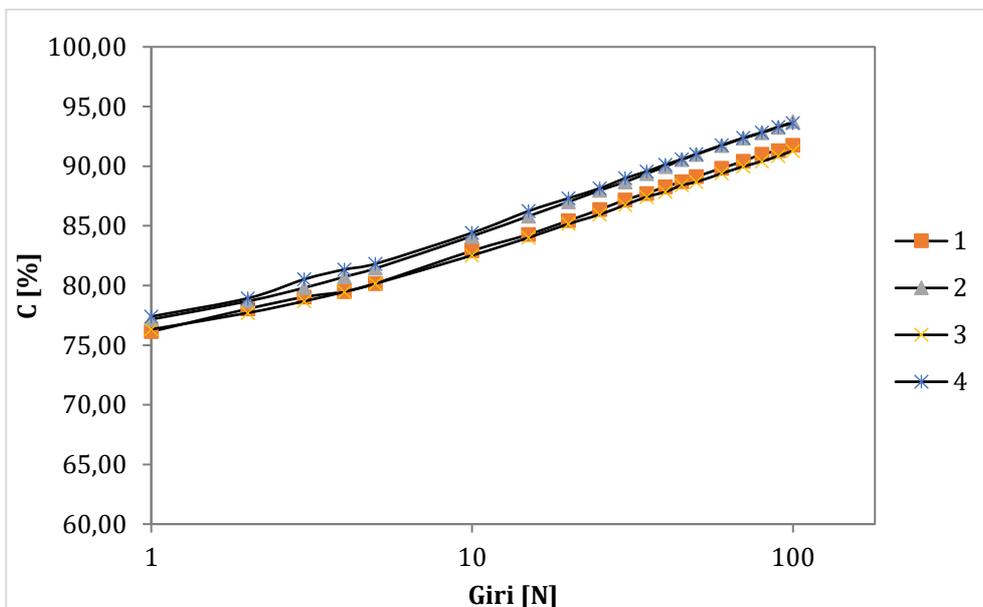


Figura 5.7 - Curva di compattabilità Usura 15% Matrix

Appare evidente che, sostanzialmente, i quattro provini si sono compattati tutti alla stessa maniera, senza manifestare un qualsiasi comportamento anomalo, raggiungendo circa lo stesso livello di addensamento finale.

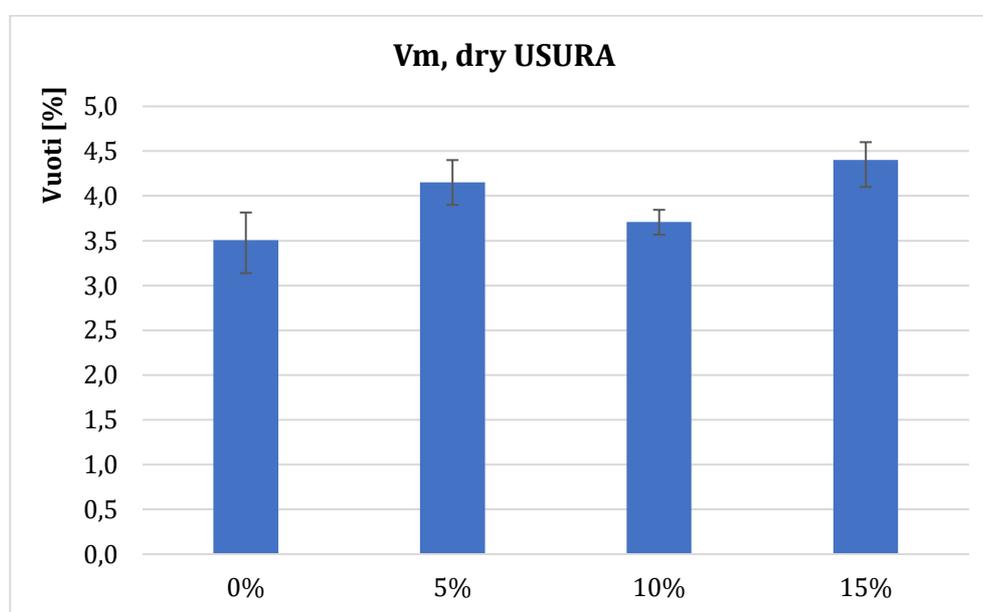
### **5.2.2 Percentuale dei vuoti**

In seguito, vengono riportati i valori dei vuoti calcolati con il metodo Dry.

<b>VM,DRY USURA</b>				
<b>% MATRIX</b>	0%	5%	10%	15%
	3,4	4,0	3,8	4,5
	3,8	3,9	3,7	4,6
	3,1	4,4	3,6	4,1
	3,7	4,3	3,6	4,4
<b>MEDIA</b>	3,5	4,2	3,7	4,4

*Tabella 5.4 - Vuoti dry Usura*

Il grafico successivo mostra il confronto delle proprietà volumetriche (vuoti) dei quattro diversi conglomerati bituminosi realizzati.



*Figura 5.8 - Andamento vuoti dry Usura*

Da questo grafico si può osservare che mantenendo costante la percentuale di bitume aggiunta, pari al 5,6%, il valore di vuoti mantiene lo stesso ordine di grandezza.

### **5.2.3 Risultati prove di modulo a trazione indiretta**

I risultati della prova di modulo sono riportati in seguito.

% MATRIX	ITSM USURA [MPa]			
	0%	5%	10%	15%
	5731,5	5321	4318,5	5011
	5272,0	5135	4766,5	4912
	6672,0	5453	4244	5543
	6008,0	5388	4452	5145
<b>MEDIA</b>	5921	5324	4512	5153

Tabella 5.5 - ITSM Usura

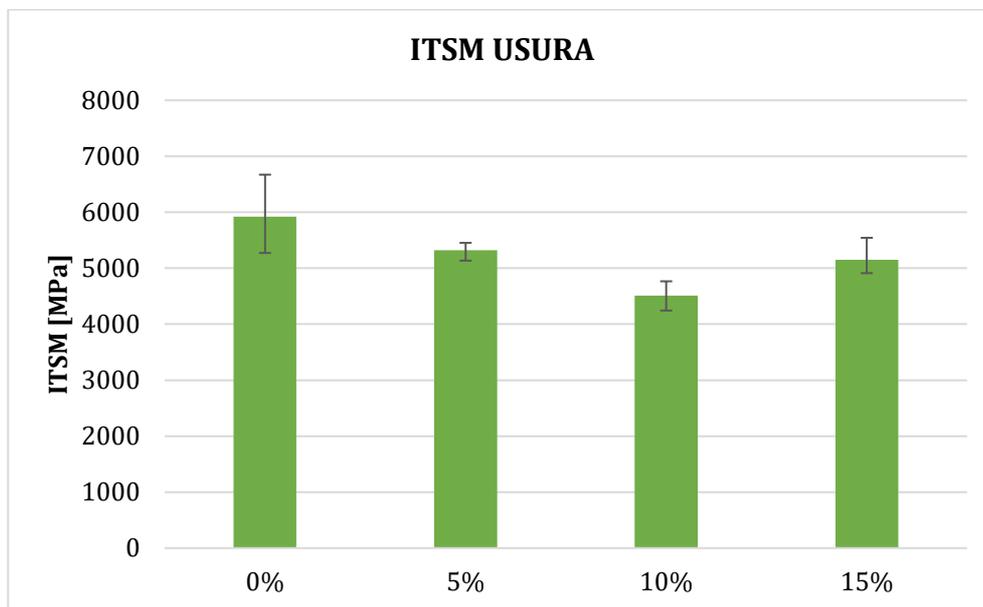


Figura 5.9 - Andamento ITSM Usura

Dal precedente grafico si può osservare che aumentando la percentuale di Matrix aggiunta alla miscela si ottiene un andamento decrescente del modulo: tuttavia l'ordine di grandezza rimane pressoché costante.

#### **5.2.4 Risultati prove di trazione indiretta**

Di seguito si inserisce una tabella con tutti i risultati delle prove di resistenza a trazione indiretta di tutte e quattro le miscele testate. La prova è stata effettuata dopo aver condizionato il materiale a 25 °C.

		<b>ITS USURA [MPa]</b>			
<b>% MATRIX</b>		0%	5%	10%	15%
		1,25	1,05	1,11	0,99
		1,18	1,12	1,16	1,03
		1,27	1,10	1,23	0,98
		1,22	1,10	1,20	1,02
<b>MEDIA</b>		1,23	1,09	1,18	1,01

Tabella 5.6 - ITS Usura

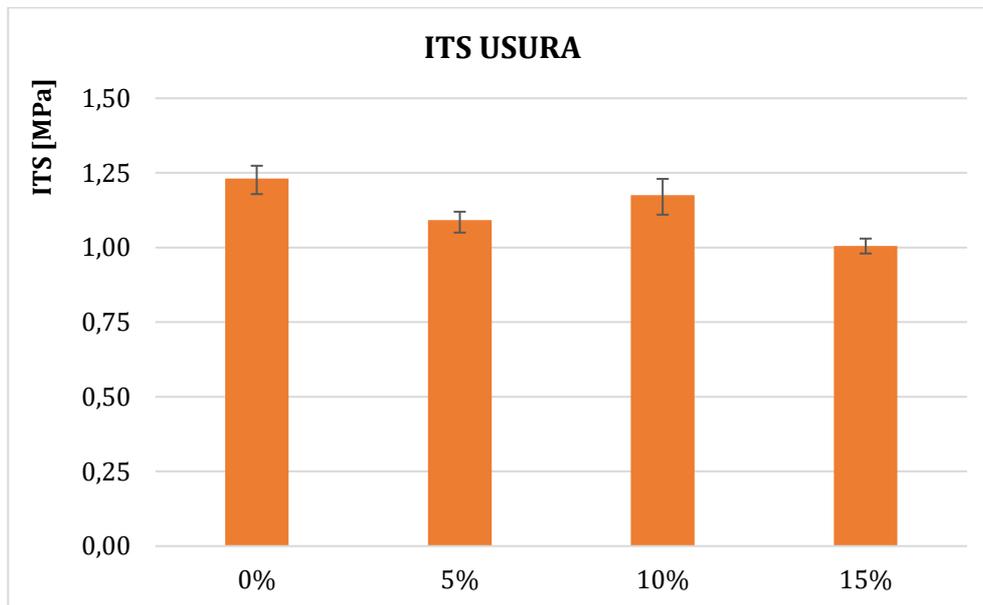


Figura 5.10 - Andamento ITS Usura

		<b>CTI USURA [MPa]</b>			
<b>% MATRIX</b>		0%	5%	10%	15%
		73,8	71,3	57,7	76,40
		64,7	62,4	56,9	71,80
		60,5	60,7	56,6	79,20
		66,3	61,2	67,5	81,40
<b>MEDIA</b>		66,3	63,9	59,7	77,2

Tabella 5.7 - CTI Usura

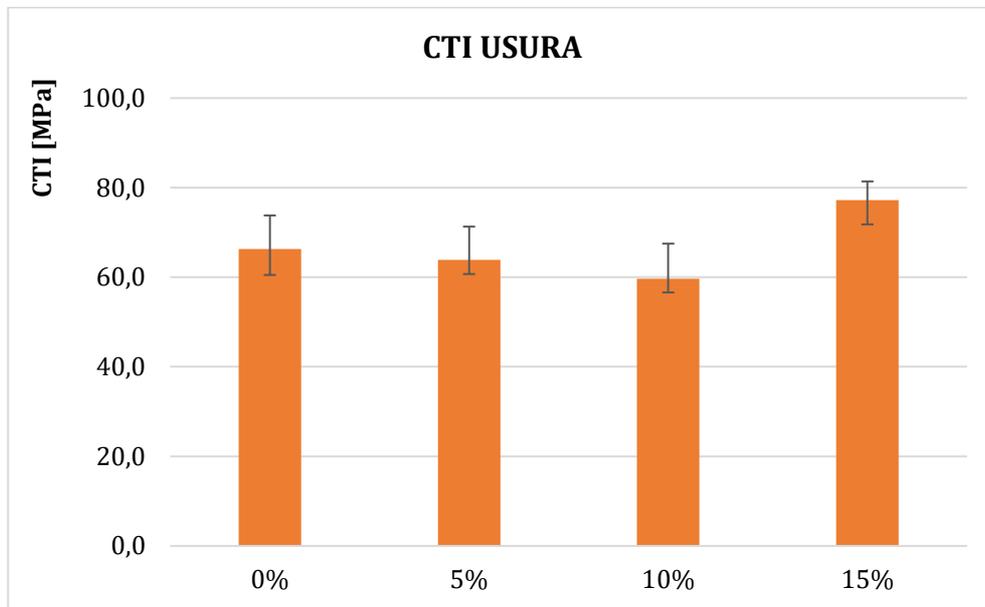


Figura 5.11 - Andamento CTI Usura

Entrambi gli andamenti dell'ITS e del CTI mantengono lo stesso ordine di grandezza con la graduale aggiunta di Matrix alla miscela.

### **5.2.5 Risultati prova di sensibilità all'acqua**

Riportiamo i risultati della prova di sensibilità all'acqua, effettuata sui provini di conglomerato bituminoso realizzato per l'usura.

	<b>ITSR</b>
<b>0%</b>	97,65
<b>5%</b>	93,73
<b>10%</b>	95,90
<b>15%</b>	93,67

Tabella 5.8 - ITSR Usura

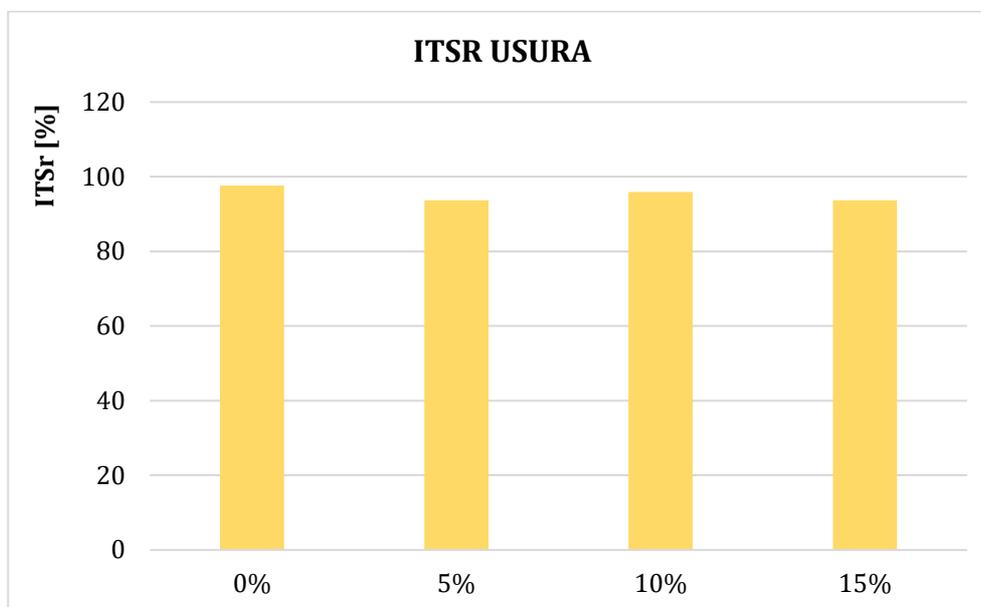


Figura 5.12 - Andamento ITSR Usura

Dal precedente andamento possiamo notare che la sensibilità all'acqua dei provini realizzati per l'usura rimane pressoché costante.

### **5.2.6 Risultati test di cessione**

In questo paragrafo vengono riportati i risultati del test di cessione effettuato sui provini dell'Usura Aged con l'aggiunta dello 0% e del 15 % di sabbia Matrix.

		AGED	
Parametro	Limiti	0%	15%
Cloruri	100	2,75	12,6
Fluoruri	1,5	n.r	n.r
Nitrati	50	< 0,1	< 0.1
Solfati	250	0,49	5,22
Arsenico	50	n.r	n.r
Bario	1	0,0024	0,012
Berillio	10	n.r	n.r
Cadmio	5	n.r	n.r
Cobalto	250	n.r	n.r
Cromo	50	< 1,27	2,73

Rame	0,05	<0,0018	<0,0018
Mercurio	1	<0,065	n.r
Nichel	10	n.r	n.r
Piombo	50	n.r	n.r
Selenio	10	n.r	n.r
Vanadio	250	< 1,45	<1,45
Zinco	3	0,0083	0,0039
COD	30	24,0	24,0
Cianuri	50	<10	<10
Amianto	30	< 0,1	< 0,1

Tabella 5.9 - Risultati test cessione Usura

I parametri sottoposti a test di cessione presentano un eluato conforme ai limiti previsti.

### **5.3 Risultati Binder**

Nel presente paragrafo vengono presentati i risultati ottenuti in laboratorio dalle prove effettuate sui provini di conglomerato bituminoso realizzato per il Binder.

#### **5.3.1 Curva di addensamento**

Per ciascun provino compattato a 100 giri si è costruita la curva di compattabilità. Nelle figure successive sono riportate, rispettivamente, le curve di compattazione ottenute per i 4 provini di conglomerato bituminoso con 0 %, 5% ,10% e 15% di sabbia Matrix.

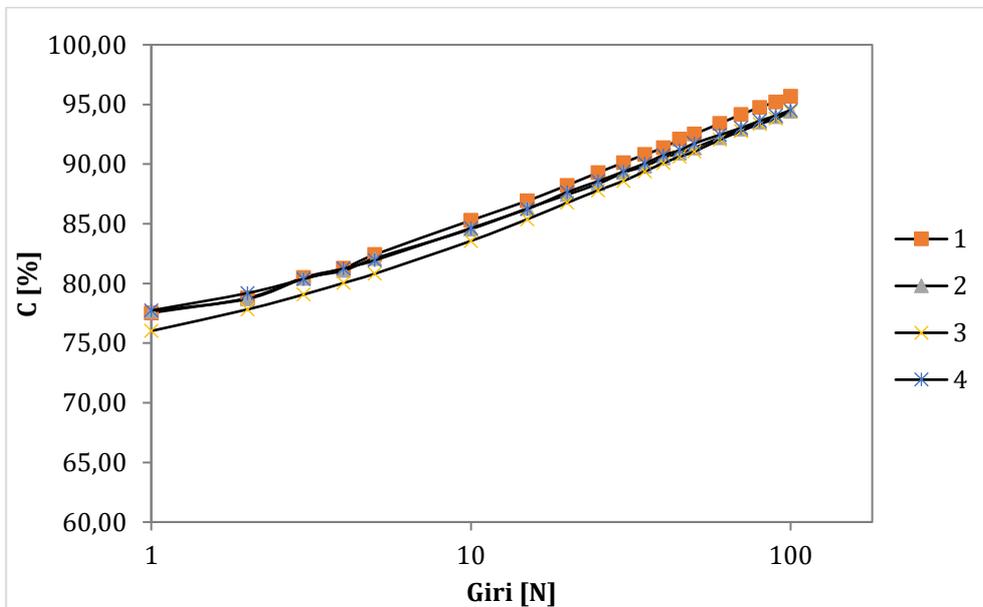


Figura 5.13 - Curva di compattabilità Binder 0% Matrix

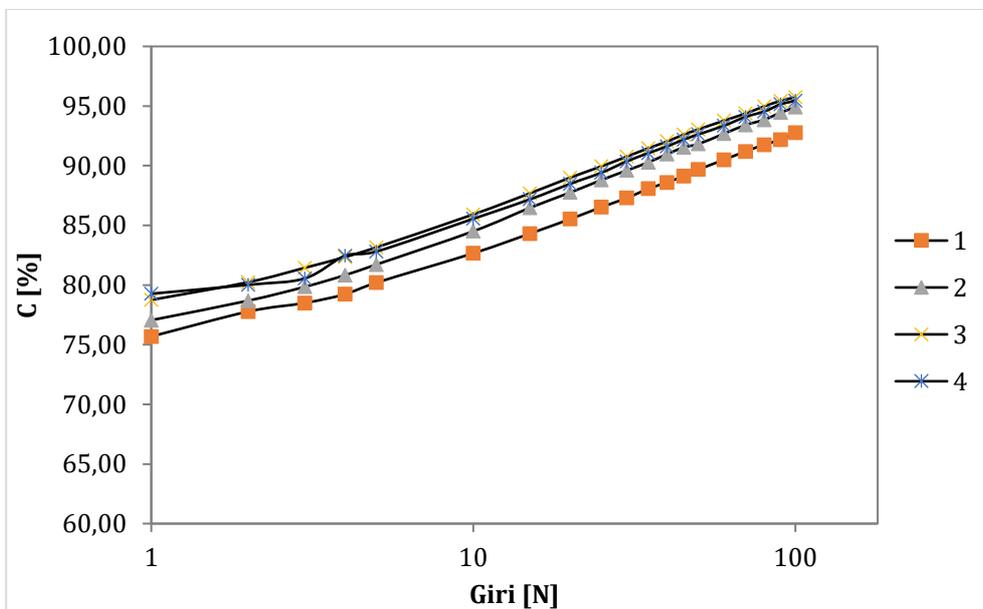


Figura 5.14 - Curva di compattabilità Binder 5% Matrix

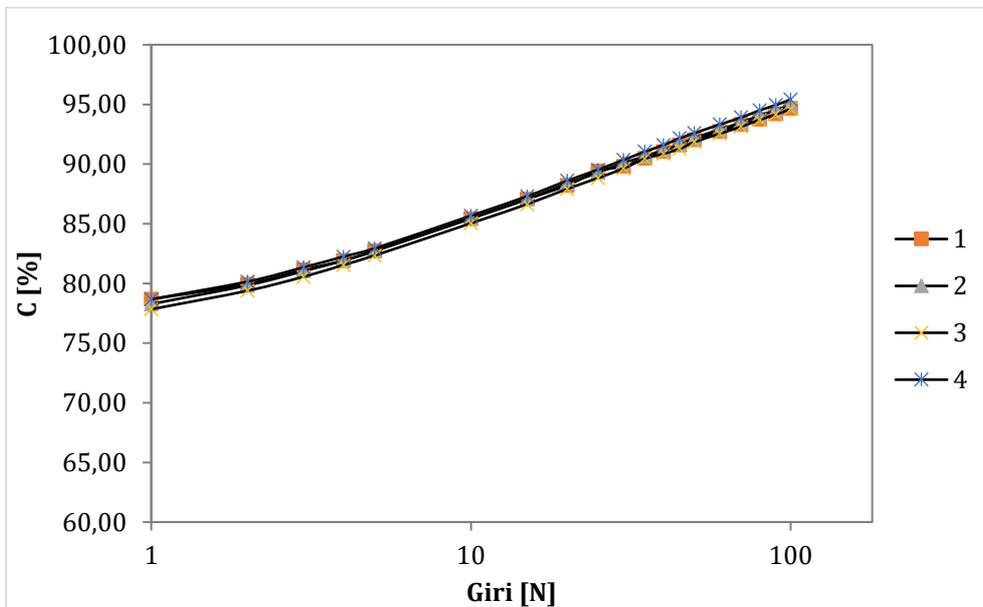


Figura 5.15 - Curva di compattabilità Binder 10% Matrix

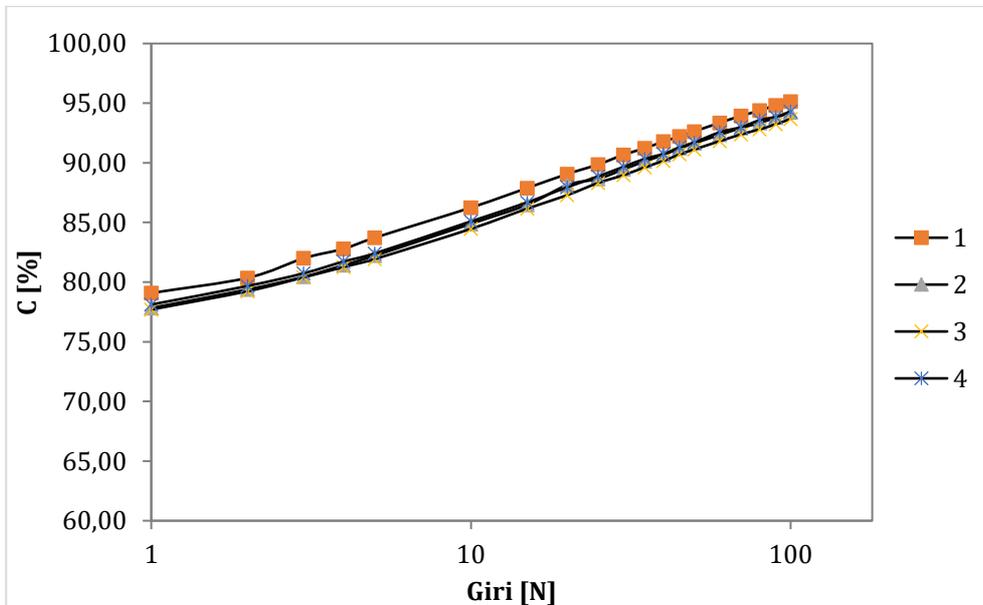


Figura 5.16 - Curva di compattabilità Binder 15% Matrix

Appare evidente che, sostanzialmente, i quattro provini si sono compattati tutti alla stessa maniera, senza manifestare un qualsiasi comportamento anomalo, raggiungendo circa lo stesso livello di addensamento finale.

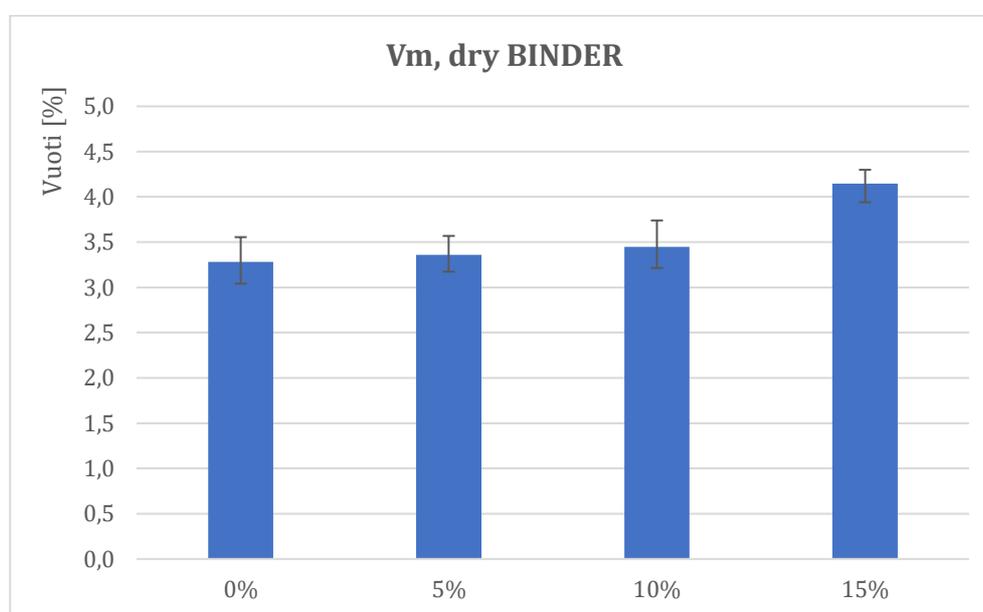
### **5.3.2 Percentuale dei vuoti**

In seguito, vengono riportati i valori dei vuoti calcolati con il metodo Dry.

<b>VM,DRY BINDER</b>				
<b>% MATRIX</b>	0%	5%	10%	15%
	3,6	3,5	3,7	4,3
	3,4	3,2	3,2	4,1
	3,0	3,2	3,3	3,9
	3,1	3,6	3,4	4,2
<b>MEDIA</b>	3,3	3,4	3,4	4,1

*Tabella 5.10 - Vuoti dry Binder*

Il grafico successivo mostra il confronto delle proprietà volumetriche (vuoti) dei quattro diversi conglomerati bituminosi realizzati.



*Figura 5.17 - Andamento vuoti dry Binder*

Da questo grafico si può osservare che mantenendo costante la percentuale di bitume aggiunta, pari al 4,9%, aumentando la percentuale di Sabbia Matrix aggiunta, il valore dei vuoti tende a crescere.

### **5.3.3 Risultati prove di modulo a trazione indiretta**

I risultati della prova di modulo sono riportati in seguito.

% MATRIX	ITSM BINDER [MPa]			
	0%	5%	10%	15%
	6743,0	6889,5	6392,5	6264
	7193,5	7049,5	5769	5415
	7290,5	6857,5	6059	6035,5
	7067,5	6454,5	6078,5	5665,5
<b>MEDIA</b>	7074	6813	6080	5845

Tabella 5.11 - ITSM Binder

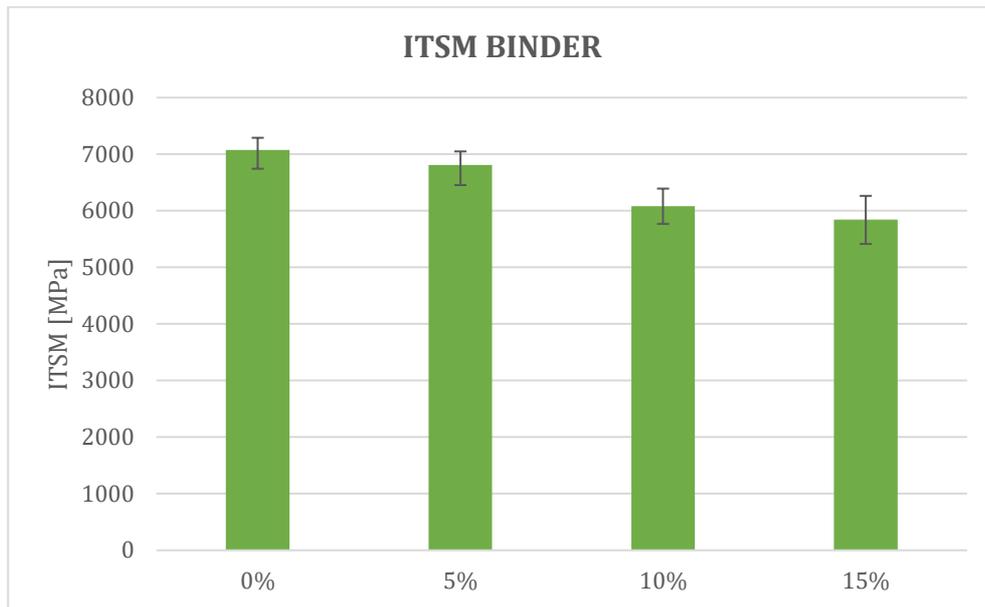


Figura 5.18 - Andamento ITSM Binder

Dal precedente grafico si può osservare che aumentando la percentuale di Matrix aggiunta alla miscela si ottiene un andamento decrescente del modulo: tuttavia l'ordine di grandezza rimane pressoché costante.

### **5.3.4 Risultati prove di trazione indiretta**

Di seguito si inserisce una tabella con tutti i risultati delle prove di resistenza a trazione indiretta di tutte e quattro le miscele testate. La prova è stata effettuata dopo aver condizionato il materiale a 25 °C.

% MATRIX	ITS BINDER [MPa]			
	0%	5%	10%	15%
	1,05	0,93	1,08	1,12
	1,07	1,16	1,10	1,10
	1,09	1,16	1,17	1,03
	1,09	1,19	1,23	1,12
<b>MEDIA</b>	1,07	1,11	1,14	1,09

Tabella 5.12 - ITS Binder

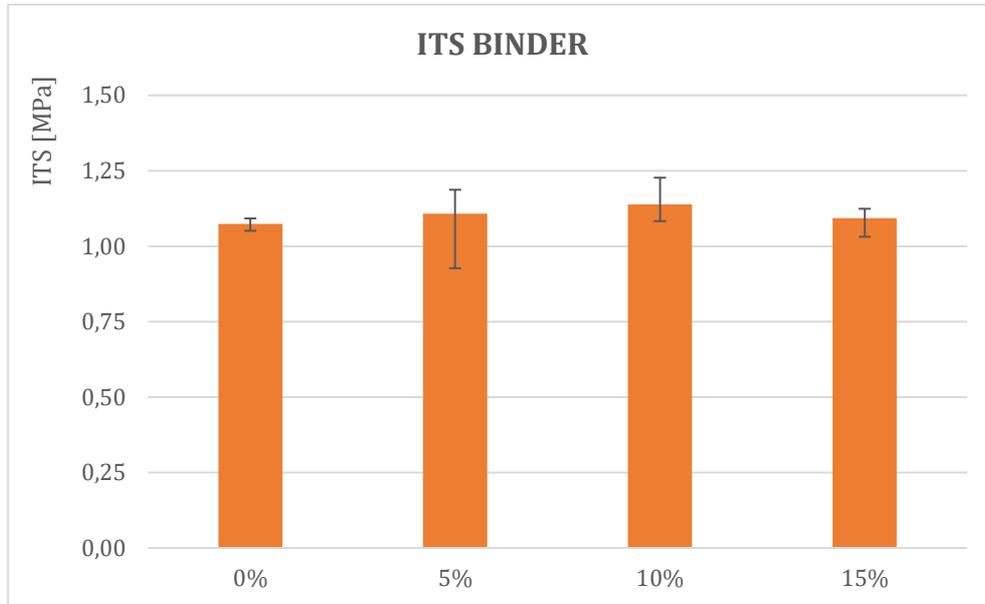


Figura 5.19 - Andamento ITS Binder

% MATRIX	CTI [MPa]			
	0%	5%	10%	15%
	71,7	64,2	66,7	42,02
	61,7	55,4	50,4	64,18
	47,0	66,9	62,3	47,02
	57,1	58,0	72,3	80,06
<b>MEDIA</b>	59,4	61,1	63,1	58,3

Tabella 5.13 - CTI Binder

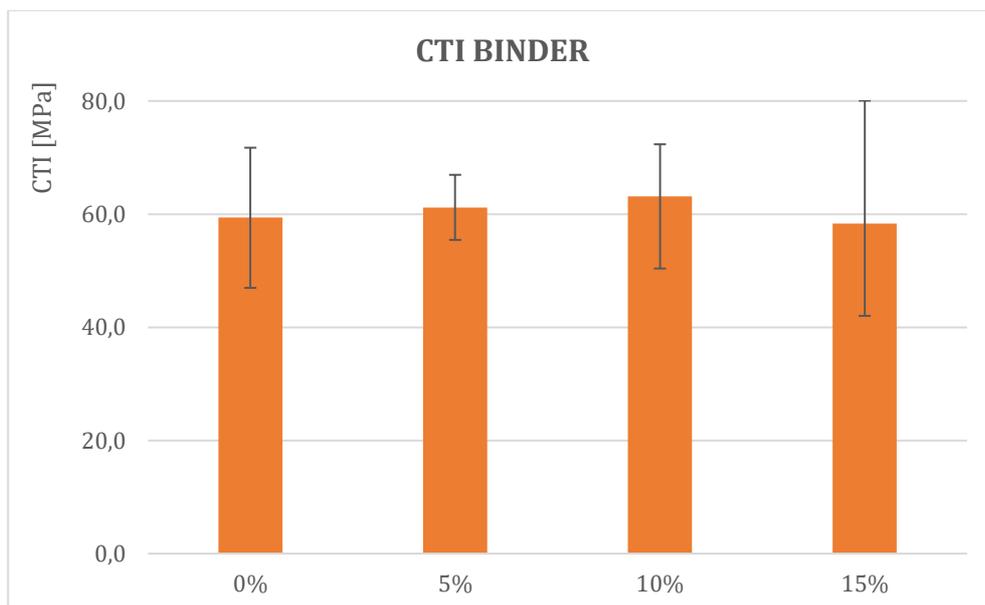


Figura 5.20 - Andamento CTI Binder

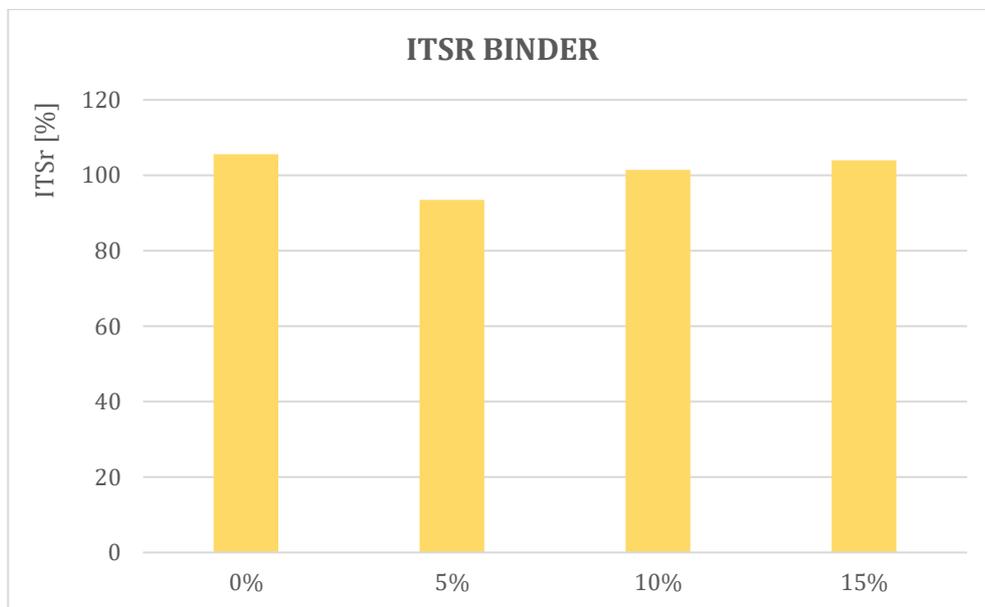
Entrambi gli andamenti dell'ITS e del CTI risultano pressoché costanti con la graduale aggiunta di Matrix alla miscela.

### **5.3.5 Risultati prova di sensibilità all'acqua**

Riportiamo i risultati della prova di sensibilità all'acqua, effettuata sui provini di conglomerato bituminoso realizzato per il Binder.

<b>ITSR BINDER</b>	
<b>0%</b>	105,58
<b>5%</b>	93,44
<b>10%</b>	101,41
<b>15%</b>	104,03

*Tabella 5.14 - ITSR Binder*



*Figura 5.21 - Andamento ITSR Binder*

Dal precedente andamento possiamo notare che la sensibilità all'acqua dei provini realizzati per il binder rimane dello stesso ordine di grandezza.

### 5.3.6 Risultati test di cessione

In questo paragrafo vengono riportati i risultati del test di cessione effettuato sui provini del Binder Unaged.

		UNAGED			
Parametro	Limiti	0%	5%	10%	15%
Cloruri	100	7,12	14	19,2	48
Fluoruri	1,5	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1
Nitrati	50	1,03	0,37	0,28	0,27
Solfati	250	0,86	7,76	8,8	23,4
Arsenico	50	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.
Bario	1	0,006	0,014	0,018	0,0206
Berillio	10	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.
Cadmio	5	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.
Cobalto	250	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.
Cromo	50	n.r.	6,27	6,15	15,5
Rame	0,05	< 0,002	< 0,002	0,002	0,0046
Mercurio	1	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.
Nichel	10	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.
Piombo	50	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.
Selenio	10	n.r.	n.r.	n.r.	n.r.
Vanadio	250	n.r.	< 2,11	< 2,11	< 2,11
Zinco	3	0,006	0,003	0,003	0,0026
COD	30	16	17	19	20
Cianuri	50	< 10	< 10	< 10	< 10
Amianto	30	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1

Tabella 5.15 – Risultati test cessione Binder

Per quanto riguarda i risultati del test di cessione effettuato prima dell'invecchiamento, tutti i provini rispettano i limiti imposti dal DM 5/02/98 per il recupero semplificato. I sali più prontamente solubili sono abbastanza proporzionali al contenuto di Matrix ma comunque molto lontani dai rispettivi limiti; i valori del COD sono costanti in tutti i provini indicando che sono da attribuire al bitume o a qualche additivo di natura

organica; tutti gli altri parametri sono molto molto bassi o addirittura inferiori ai limiti strumentali.

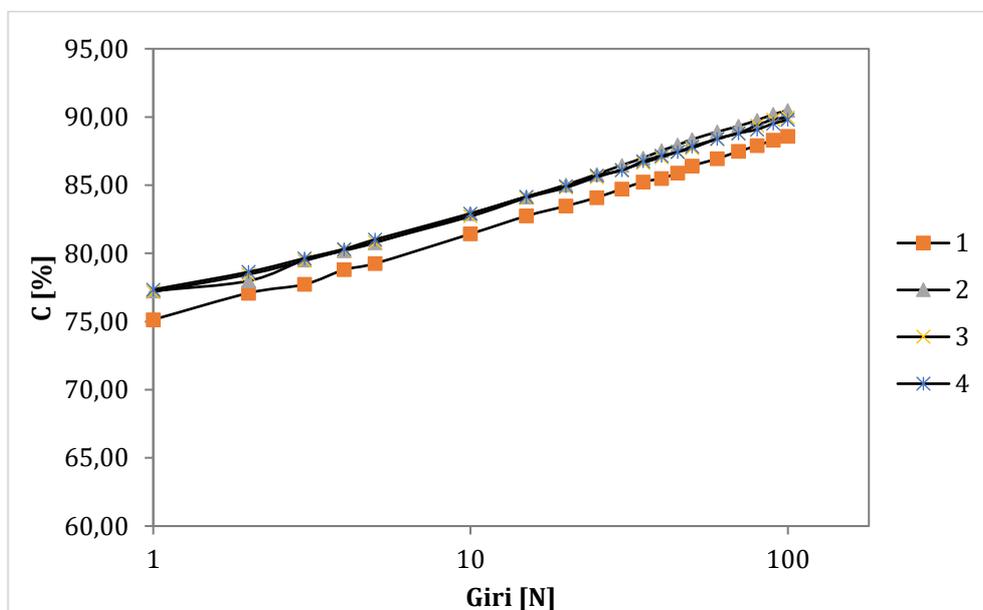
## **5.4 Risultati Base**

Nel presente paragrafo vengono presentati i risultati ottenuti in laboratorio dalle prove effettuate sui provini di conglomerato bituminoso realizzato per la Base.

### **5.4.1 Curva di addensamento**

Per ciascun provino compattato a 100 giri si è costruita la curva di compattabilità.

Nelle figure successive sono riportate, rispettivamente, le curve di compattazione ottenute per i 4 provini di conglomerato bituminoso con 0 %, 5% ,10% e 15% di sabbia Matrix.



*Figura 5.22 - Curva di compattabilità Base 0% Matrix*

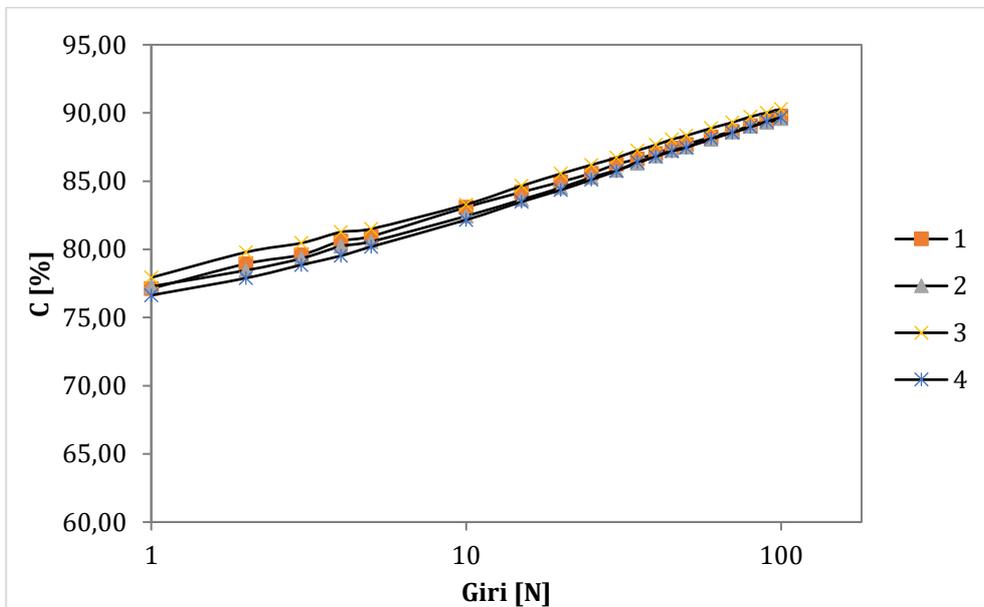


Figura 5.23 - Curva di compattabilità Base 5% Matrix

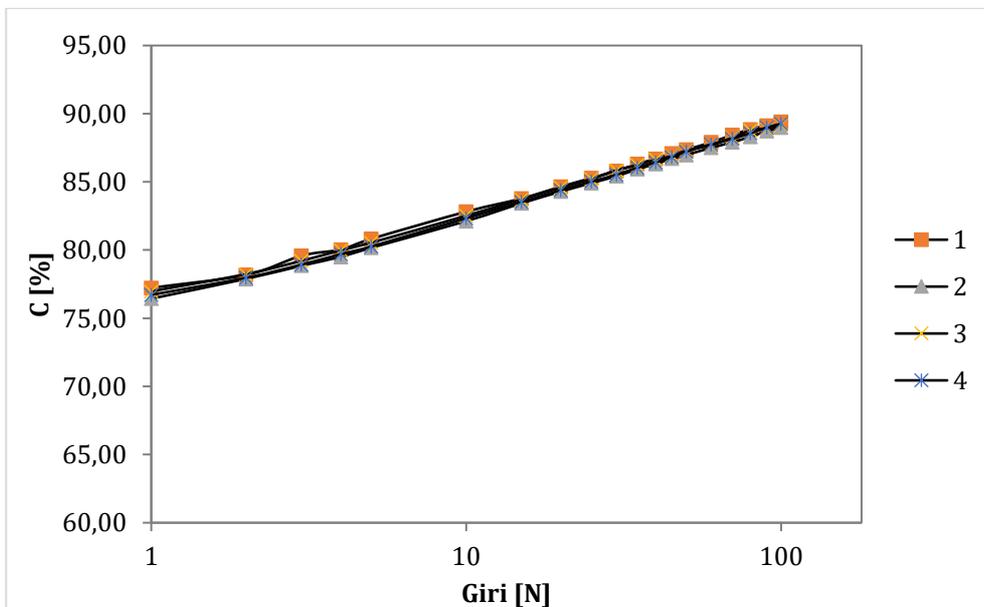


Figura 5.24 - Curva di compattabilità Base 10% Matrix

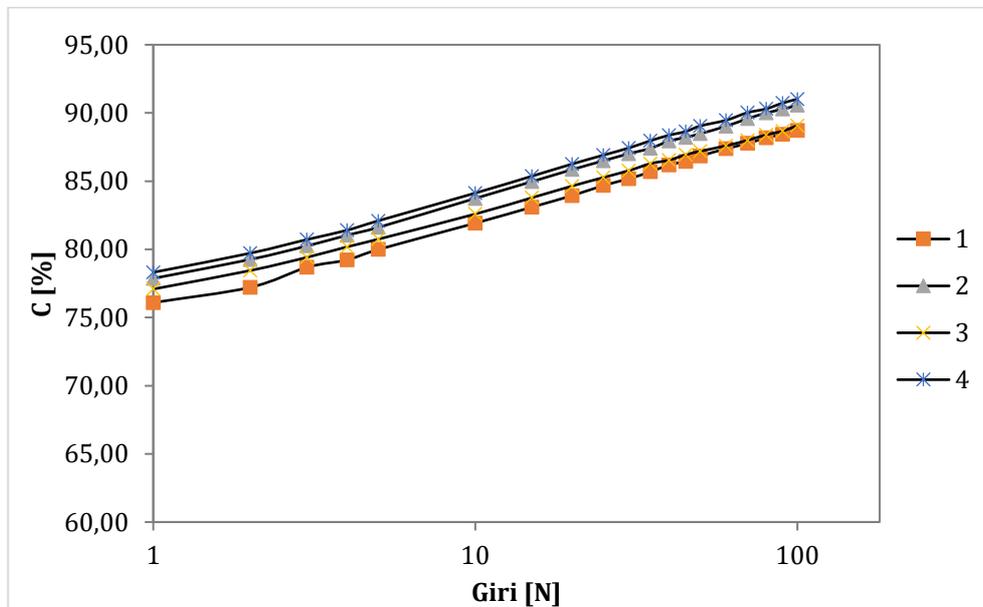


Figura 5.25 - Curva di compattabilità Base 15% Matrix

Appare evidente che, sostanzialmente, i quattro provini si sono compattati tutti alla stessa maniera, senza manifestare un qualsiasi comportamento anomalo, raggiungendo circa lo stesso livello di addensamento finale.

### 5.4.2 Percentuale dei vuoti

In seguito, vengono riportati i valori dei vuoti calcolati con il metodo Dry.

% MATRIX	VM,DRY BASE			
	0%	5%	10%	15%
	3,9	4,0	4,6	4,4
	4,0	4,6	4,5	4,6
	4,7	4,2	4,7	4,3
	4,1	4,3	3,9	4,3
<b>MEDIA</b>	4,2	4,3	4,4	4,4

Tabella 5.16 - Vuoti dry Base

Il grafico successivo mostra il confronto delle proprietà volumetriche (vuoti) dei quattro diversi conglomerati bituminosi realizzati.

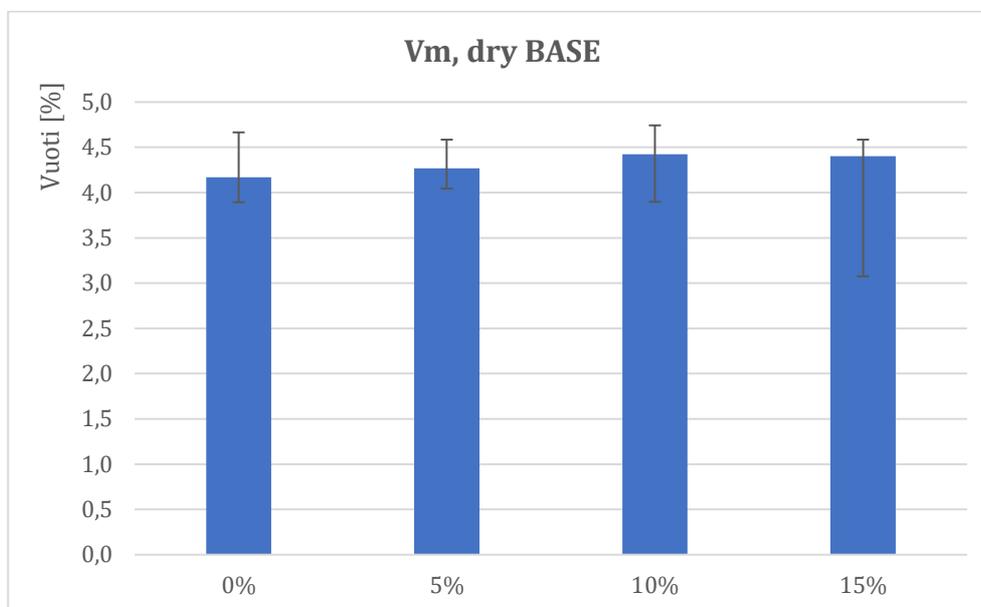


Figura 5.26 - Andamento vuoti dry Base

In questo grafico si può osservare che mantenendo costante la percentuale di bitume aggiunta, pari al 4,5% per le prime tre miscele di conglomerato bituminoso con 0 %, 5% e 10 % di Matrix aggiunto, la percentuale dei vuoti tende leggermente a crescere. Per quanto riguarda l'ultima miscela con il 15% di Matrix aggiunto, ci si aspettava un valore ancora crescente dei vuoti mantenendo la stessa percentuale di bitume pari al 4,5%.

Per evitare che il valore dei vuoti uscisse fuori dal limite stabilito, si è scelto di aumentare la percentuale di bitume pari al 4,7%, così da mantenere costante la percentuale dei vuoti rispetto all'impasto con il 10% di Matrix.

### **5.4.3 Risultati prove di modulo a trazione indiretta**

I risultati della prova di modulo sono riportati in seguito.

% MATRIX	ITSM BASE [MPA]			
	0%	5%	10%	15%
	5431,5	5957	5851,5	6727
	5930,0	5653,5	7429,5	6645,5
	5380,0	5524,5	6972	6830
	6180,0	6386,5	7048	7170,5
<b>MEDIA</b>	5730	5880	6825	6882

Tabella 5.17 - ITSM Base

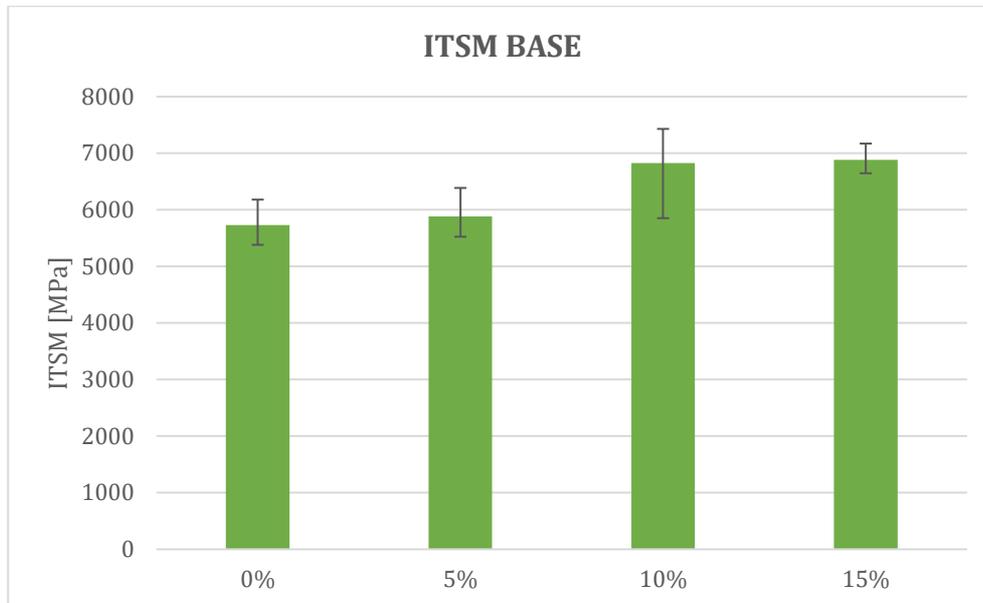


Figura 5.27 - Andamento ITSM Base

Dal precedente grafico si può osservare che aumentando la percentuale di Matrix aggiunta alla miscela si ottiene un andamento crescente del modulo: tuttavia l'ordine di grandezza rimane pressoché costante.

Notiamo inoltre che l'andamento crescente tende a diventare quasi costante per gli ultimi due impasti.

#### **5.4.4 Risultati prove di trazione indiretta**

Di seguito si inserisce una tabella con tutti i risultati delle prove di resistenza a trazione indiretta di tutte e quattro le miscele testate. La prova è stata effettuata dopo aver condizionato il materiale a 25 °C.

% MATRIX	ITS BASE [MPA]			
	0%	5%	10%	15%
	1,11	0,92	1,04	1,11
	1,02	0,92	1,01	1,22
	1,04	1,01	1,07	1,17
	1,06	0,97	1,14	1,26
<b>MEDIA</b>	1,06	0,96	1,07	1,22

Tabella 5.18 - ITS Base

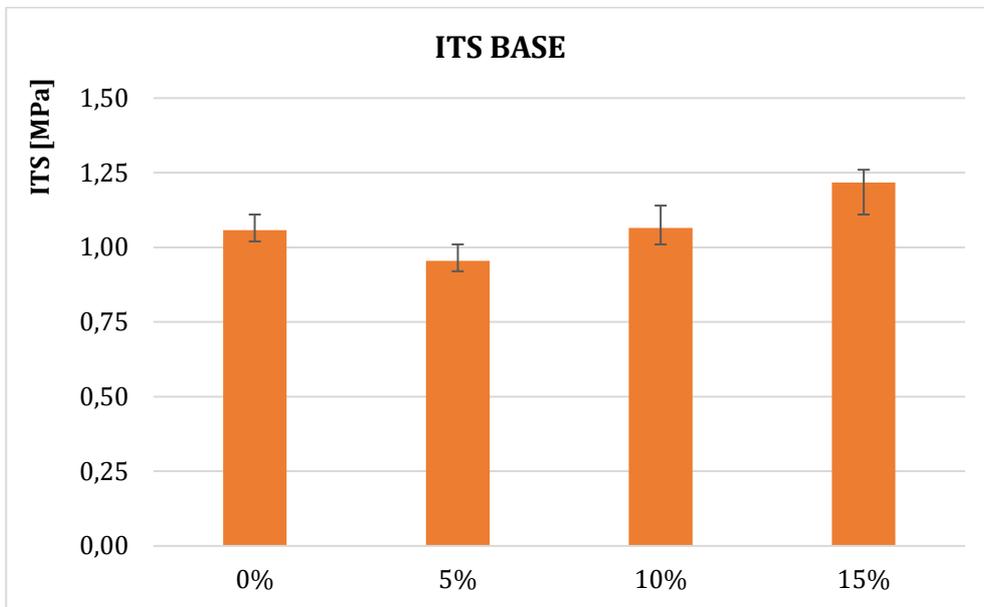


Figura 5.28 - Andamento ITS Base

		<b>CTI BASE [MPa]</b>			
<b>% MATRIX</b>		0%	5%	10%	15%
		62,2	61,3	50,7	90,60
		52,1	45,4	72,1	94,70
		75,7	71,5	43,1	71,30
		65,6	68,8	87,2	72,50
<b>MEDIA</b>		63,9	61,8	63,3	79,5

Tabella 5.19 - CTI Base

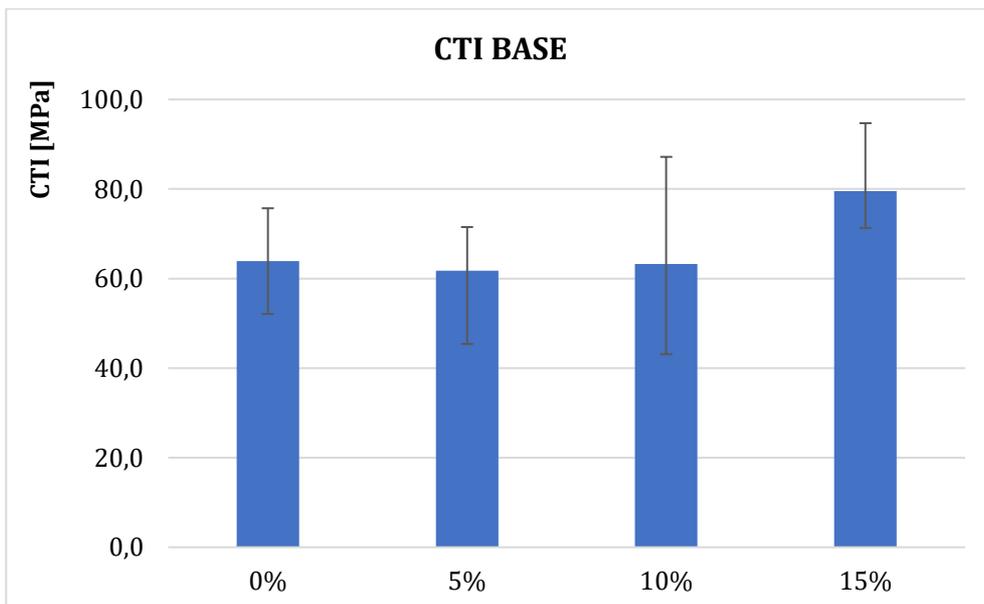


Figura 5.29 - Andamento CTI Base

Entrambi gli andamenti dell'ITS e del CTI hanno un andamento inizialmente decrescente dall'impasto con 0% di Matrix fino a quello con il 5% di Matrix, successivamente hanno un andamento crescente fino alla miscela con il 15% di Matrix.

### **5.3.5 Risultati test di cessione**

In questo paragrafo vengono riportati i risultati del test di cessione effettuato sui provini della Base Aged con lo 0% e il 15% di sabbia Matrix aggiunta.

		AGED	
Parametro	Limiti	0%	15%
Cloruri	100	1,93	31,0
Fluoruri	1,5	n.r	< 0,1
Nitrati	50	< 0,1	< 0,1
Solfati	250	2,53	2,76
Arsenico	50	n.r	n.r
Bario	1	0,0053	0,0045
Berillio	10	n.r	n.r
Cadmio	5	n.r	n.r
Cobalto	250	n.r	n.r
Cromo	50	n.r	1,50
Rame	0,05	<0,0018	<0,0018
Mercurio	1	n.r	n.r
Nichel	10	< 1,55	< 1,55
Piombo	50	n.r	n.r
Selenio	10	n.r	n.r
Vanadio	250	n.r	n.r
Zinco	3	0,0061	0,0043
COD	30	18,0	20,0
Cianuri	50	< 10	< 10
Amianto	30	< 0,1	< 0,1

Tabella 5.20 – Risultati test cessione Base

I parametri sottoposti a test di cessione presentano un eluato conforme ai limiti previsti.

## 6. Conclusioni

Il programma sperimentale trattato nella presente tesi in realtà si inserisce in un grande studio che riguarda la caratterizzazione e l'analisi dei conglomerati riciclati, ovvero quelli dotati di una parziale sostituzione degli aggregati vergini con materiale di recupero.

Nella sperimentazione sono state eseguite delle indagini su provini di conglomerato confezionato con diverse percentuali di sabbia Matrix, prodotta dall'incenerimento dei rifiuti RSU, sostituite alla sabbia calcarea. Tali indagini sono state effettuate per valutare le caratteristiche volumetriche e meccaniche per i tre strati della pavimentazione stradale. I valori così ottenuti per ogni miscela, con un differente contenuto di Matrix, sono stati poi messi a confronto con quelli acquisiti da prove effettuate su conglomerati ottenuti con solo aggregati vergini, sempre per ogni tipologia di strato.

Attraverso la sperimentazione di laboratorio, per tutte le miscele analizzate, sono stati ottenuti i seguenti risultati:

- ❖ Per quanto riguarda l'analisi volumetrica, sembrerebbe che il valore dei vuoti calcolati sulle miscele realizzate con la sabbia Matrix, sia tendenzialmente superiore al valore dei vuoti delle miscele vergini. Tuttavia, tale aumento rimane comunque al di sotto del punto percentuale: si può quindi concludere che la sostituzione di sabbia Matrix fa mantenere il valore dei vuoti dello stesso ordine di grandezza delle miscele vergini, in media pari al 4%, come fissato da norma.
- ❖ Dall'analisi sono emersi dei valori di modulo a trazione indiretta (ITSM), di resistenza a trazione indiretta (ITS), di coefficiente di trazione indiretta (CTI) e di sensibilità all'acqua (ITSR) delle miscele contenenti la sabbia Matrix comparabili e dello stesso ordine di grandezza delle miscele vergini.

Dunque, si può affermare che l'utilizzo parziale di sabbia Matrix nei conglomerati bituminosi non ne peggiora le caratteristiche prestazionali ma le mantiene quasi inalterate. Quindi è possibile introdurre negli impasti fino al 15% di sabbia Matrix, facendo attenzione a non discostarsi troppo dal valore pari a 4% per i vuoti e ai limiti di capitolato per ITSM e ITS.

Al termine dell'analisi effettuata in laboratorio, le miscele realizzate sono state sottoposte a test di cessione, per valutare la quantità di inquinanti che la miscela rilascia a fine vita. Tali test sono stati effettuati inizialmente sulle miscele vergini, contenenti 0% di Matrix, per poi confrontare i risultati con quelli ottenuti in seguito al test effettuato sulle miscele invecchiate con il 15 % di sabbia Matrix, condizione più sfavorevole. Il presente test serve per dimostrare che utilizzando un rifiuto, nel presente caso la sabbia Matrix, in una miscela che verrà poi utilizzata nell'ambiente, non si apportino problemi al pianeta nell'immediato e prossimo futuro.

Infatti, per i principi dell'economia circolare è bene che l'utilizzo di materiale di rifiuto non vada a posticipare le problematiche attuali ma bensì a risolverle ed estinguerle.

Al termine dei precedenti confronti è possibile dunque concludere che tutti i provini testati per la cessione rispettano i limiti imposti dal DM 5/2/98 per il recupero di rifiuti inerti e che non vi sono significative differenze di cessione di inquinanti fra provini in bianco e provini con Matrix.

Di conseguenza, il conglomerato bituminoso contenente Matrix mostra una perfetta compatibilità ambientale poiché analogo al prodotto realizzato con materiali tradizionali.

Il possibile impiego futuro della sabbia Matrix nei conglomerati bituminosi presenta però delle limitazioni: la presente sperimentazione ha utilizzato infatti solo fino ad un massimo di 15% di sabbia sostituita.

L'idea di aggiungere un contenuto maggiore di percentuale di Matrix non risulta possibile per due motivazioni: in primo luogo l'aumento della percentuale di aggregato riciclato comporterebbe necessariamente un aumento della quantità di inquinanti

rilasciati in seguito al test di cessione; superando la soglia di accettabilità degli inquinanti il materiale non può più essere utilizzato come materiale di recupero.

In secondo luogo, l'aumento eccessivo della percentuale di sabbia Matrix sostituita comporta una perdita delle prestazioni del conglomerato bituminoso: infatti, così facendo aumenterebbe il contenuto di materiale fine e di conseguenza la capacità degli aggregati di assorbire il bitume, peggiorandone le prestazioni e la lavorabilità.

In conclusione, la sostituzione di sabbia calcarea con la sabbia prodotta dall'incenerimento dei rifiuti RSU risulta possibile fino ad un massimo del 15 %, dopo il quale le miscele non sono più utilizzabili per le pavimentazioni stradali.

Si può dunque concludere che tale sperimentazione ha raggiunto risultati positivi che mirano verso il raggiungimento di un'economia circolare, con la speranza di risolvere problematiche dell'oggi collegata allo smaltimento e al riutilizzo dei rifiuti.

## 7. Bibliografia e Sitografia

### 7.1. Bibliografia

- [1] UNI EN 1097-06 del 2008 – “Calcolo della massa volumica degli aggregati
- [2] ANAS – “Capitolato speciale d’appalto di servizi. Parte tecnica”
- [3] UNI EN 12697-26 del 2004 – “Metodi di prova per la stima della Rigidezza di conglomerati bituminosi a caldo”
- [4] UNI EN 1267-23 del 2006 – “*Metodi di prova per la stima della resistenza a trazione indiretta per conglomerati bituminosi a caldo*”
- [5] Provincia di Bolzano – “Capitolato speciale d’appalto per opere pubbliche”

### 7.2. Sitografia

- [1] <https://www.ediliziainpietra.it/>
- [2] <https://www.basaltiorvieto.com/dati-tecnici/>
- [3] <http://www.pietraineditilia.com/>
- [4] <https://vallizabban.com/>
- [5] <https://www.matrixoda.it/>
- [6] <https://zerocento.eu/basalto-artificiale/>
- [7] <https://www.cittadiniecologisti.it/tecnologie-sostenibili/bitume-modificato/>
- [8] [https://www.wikizero.com/it/Test di cessione](https://www.wikizero.com/it/Test%20di%20cessione)
- [9] <https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/economy>
- [10] <https://www.centromateriarinnovabile.it>