



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

DICEA – DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E ARCHITETTURA

**Caratterizzazione sperimentale di frazioni
di fresato ottimizzate**

**Experimental characterization of optimized RAP
fractions**

Relatore:
Prof. Ing. Francesco Canestrari

Candidato:
Matteo Fratini

ANNO ACCADEMICO 2020/2021

INDICE

INTRODUZIONE	2
1. L'IMPIEGO DEL RAP NELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI.....	5
1.1 Riduzione dell'impatto ambientale.....	5
1.2 Possibile reimpiego del RAP	7
2. INDAGINE SPERIMENTALE.....	12
2.1 Materiali	12
2.2 Apparecchiature e macchinari di laboratorio	13
2.2.1 Vibrovaglio e setacci	13
2.2.2 Vagli a barre e calibro a cursore	14
2.2.3 Apparecchiatura per prove di micro-Deval	17
2.2.4 Apparecchiature per prove CLA e Skid Tester	19
2.2.5 Macchinario per estrazione del bitume	21
3. PROGRAMMA SPERIMENTALE.....	24
3.1 Analisi granulometrica	24
3.2 Determinazione delle caratteristiche geometriche degli aggregati	26
3.2.1 Indice di Appiattimento	27
3.2.2 Indice di Forma	27
3.3 Determinazione della resistenza all'usura	27
3.4 Determinazione del coefficiente di levigazione.....	29
3.5 Determinazione del contenuto di legante	31
3.6 Riassunto programma sperimentale.....	32
4 ANALISI DEI RISULTATI.....	33
4.1 Curve granulometriche	33
4.2 Forma dell'aggregato	35
4.3 Produzione di fino mediante prove di micro-Deval	37
4.4 Coefficiente di levigazione	39
4.5 Contenuto di legante	40
CONCLUSIONI.....	49
BIBLIOGRAFIA	51

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni la tematica della sostenibilità ambientale è diventata via via sempre più centrale in ogni campo dell'Ingegneria Civile, grazie anche ad una sempre maggiore attenzione nei confronti del problema dell'inquinamento globale. In particolare, nel settore delle infrastrutture stradali, data l'impossibilità di prelevare tutti i materiali dai siti naturali per questioni ecologiche e di impatto ambientale, si è reso necessario operare nell'ottica del recupero e del reimpiego dei materiali ricavati dalla demolizione delle pavimentazioni stradali, giunte al termine della loro vita utile o fortemente ammalorate a causa dell'aumento del traffico "pesante".

Infatti, quando una pavimentazione stradale termina il compito per cui era stata progettata (oppure risulta ammalorata in alcune delle sue parti) prima di provvedere alla stesa di nuovi strati occorre *fresare* o rimuovere quelli esistenti (anche per mantenere invariate le quote di progetto della strada), ricavando così del materiale di demolizione detto "fresato" o, in inglese, *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP). Il RAP, dunque, è un materiale che viene largamente prodotto per via dello smantellamento di vecchie pavimentazioni, ma che purtroppo non può essere totalmente reimpiegato nella realizzazione di nuove pavimentazioni stradali per questioni prestazionali e no. Esistono, infatti, problemi relativi all'introduzione del RAP negli impianti di produzione di conglomerato bituminoso, a causa del bitume già parzialmente presente nel RAP, che potrebbe andare a creare problemi all'interno dei vari compartimenti dell'impianto.

Entrando nel dettaglio, nel riciclaggio a caldo in impianto il problema principale è quello del punto di immissione del RAP, che se avviene nel tamburo essiccatore deve evitare il contatto diretto con la fiamma del bruciatore. Nel caso in cui il fresato venga introdotto direttamente nel mescolatore richiede un preriscaldamento che può ossidare ulteriormente il bitume (senza questa fase si abbasserebbe la temperatura della miscela con conseguente calo della lavorabilità). Questi problemi, insieme a quelli relativi alle prestazioni che miscele contenenti elevate percentuali di RAP riescono a garantire in servizio, comportano al divario esistente tra (sovra)produzione e reimpiego limitato del materiale.

Tuttavia, un aspetto positivo del fresato (o RAP) è quello che una parte del bitume in esso contenuto è disponibile per la riattivazione poiché non tutto il legante è ossidato: ciò consente di utilizzare un quantitativo di bitume vergine inferiore nella miscela di nuova produzione, che comporta anche una minore emissione di gas inquinanti. Un altro aspetto positivo, che riguarda in particolar modo i tappeti drenanti, è che il legante utilizzato è un bitume modificato; quindi, non solo il bitume non è totalmente ossidato, ma - essendo modificato - ha anche caratteristiche prestazionali migliori rispetto al bitume di uso comune.

Da quanto appena detto è facile comprendere quale sia – oggi – l’obiettivo della Ricerca: cercare tutte quelle soluzioni ed alternative atte ad aumentare il più possibile la quantità, in termini percentuali, di RAP reimpiegato all’interno dei vari strati della pavimentazione stradale, al fine di diminuire l’impatto ambientale e i costi di costruzione per la realizzazione di nuove infrastrutture stradali.

A tal proposito, il presente lavoro di ricerca ha avuto come obiettivo quello di valutare le possibilità di reimpiego del RAP proveniente dalla fresatura di due diversi strati di pavimentazioni autostradali, mediante una *caratterizzazione sperimentale* delle frazioni del fresato stesso. Al fine di perseguire tale scopo, l’indagine sperimentale ha previsto:

1. L’analisi della distribuzione granulometrica, la determinazione di proprietà geometriche dell’aggregato, quali la dimensione e la forma, e delle sue caratteristiche fisiche, come la resistenza alla levigazione;
2. La valutazione, in un’ottica del tutto innovativa, della capacità di frantumazione del RAP del macchinario abitualmente utilizzato per la prova di micro-Deval, prevedendo diverse temperature e durate di prova;
3. La determinazione del quantitativo di legante su diverse frazioni granulometriche, pre e post prova micro-Deval.

Stante quanto fin qui affermato, la presente Tesi si sviluppa nei seguenti Capitoli:

- *Capitolo 1 – Il RAP nelle pavimentazioni stradali:* in questo capitolo verranno delineate le principali criticità riguardo il consumo di materie prime nel settore delle infrastrutture viarie, gli obiettivi da raggiungere per operare in un contesto ecologicamente sostenibile e i risultati ottenuti in ambito scientifico riguardo il riutilizzo del RAP.

- Capitolo 2 – *Indagine sperimentale*: in questo Capitolo sarà, invece, descritto il materiale oggetto di studio menzionando i trattamenti a cui quest'ultimo è stato sottoposto prima di essere utilizzato nelle prove di laboratorio. Successivamente verrà presentato l'elenco delle attrezzature e dei macchinari utilizzati nel programma sperimentale, descrivendone le caratteristiche ed i principi di funzionamento.
- Capitolo 3 – *Programma sperimentale*: qui verranno esposte le procedure operative attuate, correlate con le dovute spiegazioni sulle scelte esecutive applicate, a loro volta basate sugli aspetti della ricerca che si vogliono mettere in evidenza attraverso il programma sperimentale.
- Capitolo 4 – *Analisi dei risultati*: saranno, infine, presentati i risultati delle prove eseguite nel programma sperimentale: si effettueranno confronti tra i dati ottenuti e saranno esposte le considerazioni che ne scaturiscono.
- Capitolo 5 – *Conclusioni*: in questo ultimo capitolo verranno commentati i risultati della presente Ricerca, richiamando gli obiettivi prefissati.

1. L'IMPIEGO DEL RAP NELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI

Il RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) o fresato è un materiale di recupero proveniente dalla fresatura di pavimentazioni ammalorate, esso si costituisce di tre componenti principali:

- Aggregato lapideo, ovvero la frazione inerte, il maggior costituente della miscela.
- Filler, componente fine passante al setaccio di diametro 0,063mm, presente in quantità variabili.
- Bitume, fase legante che ha il compito di unire la frazione inerte attraverso una pellicola che riveste i grani a contatto tra loro.

Il fresato è un materiale non omogeneo perché possono essere presenti accumuli localizzati di bitume o grumi, inoltre il fango presente al suo interno è generalmente ridotto dal momento che rimane inglobato nel bitume.

Di seguito verranno presentati i principali vantaggi ottenibili dal riutilizzo del RAP, ponendo particolare attenzione alla tematica ambientale ed ai possibili campi di riutilizzo di questo materiale.

1.1 Riduzione dell'impatto ambientale

L'ambiente naturale è fonte di materie prime che vengono sfruttate dall'attività umana, ma che hanno una riserva limitata. Di fronte ad una richiesta sempre crescente e ad una scarsità di risorse naturali è importante il concetto di *life cycle assessment* (LCA) [1] (Figura 1.1), ovvero il prodotto di rifiuto dovrebbe trovare un campo di reimpiego al fine di evitare la depauperazione dei siti naturali e l'accumulo nelle discariche. Secondo tale concetto, si ha un modello di produzione, che ha alla base il riciclo e/o il riuso del prodotto; nello specifico quest'ultimo viene monitorato durante tutto il suo ciclo di vita utile con lo scopo di valutare il potenziale impatto ambientale e di fornire soluzioni per la riduzione delle emissioni inquinanti prodotte.

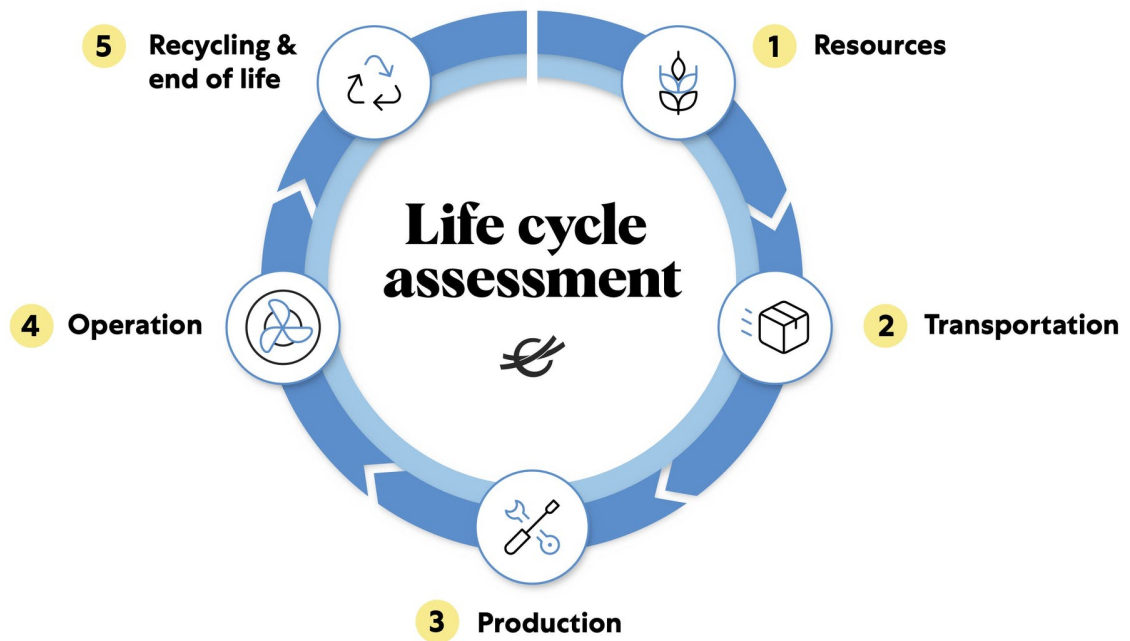


Figura 1.1 Schema del Life Cycle Assessment

Da prendere in considerazione, inoltre, il costo maggiore del rifiuto per lo smaltimento, il quale può essere evitato se il materiale di scarto viene reimpiegato.

Nel campo dell'ingegneria civile, in particolare delle infrastrutture stradali, spesso, per via della necessità di utilizzare materie prime di qualità, si ricorre ad un eccessivo consumo di materiali provenienti da siti naturali; d'altra parte lo stoccaggio del materiale fresato risente di difficoltà dovute ad una grande disponibilità non bilanciata da un'altrettanta richiesta di reimpiego. Anche per questo motivo, è necessario cercare di riutilizzare il RAP nelle miscele di conglomerato bituminoso in quantitativi possibilmente più elevati, sia per una questione economica (altrimenti il materiale avrebbe un costo energetico di smaltimento elevato), sia per questioni ambientali atte a preservare i siti naturali. Oltre al RAP ci sono altri materiali di scarto industriale come le scorie di acciaieria e le ceneri volanti che possono essere reimpiegate ed entrare all'interno del ciclo produttivo dei conglomerati bituminosi.

Frigio et al. [2] hanno posto l'attenzione su come la produzione di materiale di scarto abbia messo in crisi i siti di stoccaggio, assistendo, ogni anno, ad un aumento di quest'ultimo nei depositi. Il riuso del RAP nella realizzazione di pavimentazioni stradali, sempre secondo Frigio, deve essere ulteriormente incoraggiato, evitando di commettere l'errore di classificare il RAP

come rifiuto. Quindi, gli ingegneri stradali e gli Enti proprietari e/o gestori di arterie stradali dovrebbero cooperare al fine di trovare delle tecniche valide per riutilizzare il fresato in ogni strato della pavimentazione, garantendo allo stesso tempo prestazioni elevate.

Come disciplinato dal DM 69 del 28 marzo 2018 [3] il conglomerato cessa di essere un rifiuto (*end of waste*) divenendo un prodotto di riciclo se rispetta determinate caratteristiche :

1. viene utilizzato per scopi specifici;
2. ha un valore di mercato;
3. rispetta i requisiti tecnici richiesti;
4. il suo reimpiego non arreca danni all'ambiente;

Una volta che, attraverso opportune tecniche, il fresato viene trasformato da rifiuto a non rifiuto, rimane tale e non è soggetto alle norme che disciplinano la gestione dei rifiuti.

In sintesi, il RAP è un materiale che, se riutilizzato, presenta i seguenti vantaggi:

- riduzione dell'impiego di materiale di estrazione dai siti naturali con conseguente diminuzione dell'impatto ambientale;
- minor accumulo di materiale nei siti di stoccaggio e reimpiego di materiale che altrimenti sarebbe destinato allo smaltimento in discarica con un conseguente svantaggio economico;
- possibilità di raggiungere prestazioni comparabili a quelle dei conglomerati bituminosi composti da materiale "vergine" a patto di seguire un accurato mix design (o "progetto della miscela").

1.2 Possibile reimpiego del RAP

Stante quanto appena detto, allora, la possibilità di riutilizzare i vecchi strati della pavimentazione nella produzione di conglomerati bituminosi risulta una soluzione economicamente conveniente in quanto, apporta ad una serie di vantaggi visti in precedenza; il punto della questione è capire la quantità di RAP che può essere riutilizzato per ridurre l'impiego di materiale nuovo (Figura. 1.2)



Figura 1.2 Ciclo del fresato

I principali campi di reimpiego del conglomerato bituminoso di recupero, o RAP, sono la produzione di nuove miscele con tecniche di riciclaggio a caldo, a freddo e tiepide (o *warm*) per la realizzazione di strati di misto cementato (“sottobase”), base, collegamento (o *binder*) ed – eventualmente – per tappeti di usura dopo attento esame degli aggregati. Inoltre, i processi di riciclaggio possono essere eseguiti sia in impianto che in situ.

Le percentuali di riutilizzo di fresato indicate nei capitolati ANAS [4] per i vari strati della pavimentazione, al fine di ottenere il giusto compromesso tra la quantità di materiale reimpiegato e le caratteristiche prestazionali della pavimentazione, sono di seguito riportate:

- per il confezionamento di misto cementato la percentuale in peso degli aggregati della miscela non dovrebbe superare il 30%.
- per quanto riguarda lo strato di base si consiglia una percentuale di riutilizzo di fresato almeno del 70% che sale fino al 100% nel caso di produzione in sito e nel caso di riciclaggio a freddo, per quanto concerne il riciclaggio a caldo ANAS consiglia un quantitativo di fresato nello strato di base non superiore al 30% in peso.
- nello strato di binder, che rappresenta lo strato interposto tra la base e l’usura, viene suggerito un impiego di fresato d’asfalto in quantità non superiore al 25% in peso.
- per lo strato di usura vanno invece valutate le caratteristiche fisiche e meccaniche dell’aggregato prima di considerare un eventuale reimpiego. Ad ogni modo alcuni Enti

gestori di autostrade italiane cercano di impiegare quantitativi di fresato non superiori al 15%.

La vastità dei campi reimpiego e delle tecniche di riciclo che si operano intorno al fresato rendono questo materiale oggetto di studi e di ricerche che mirano ad ottimizzare i quantitativi da poter reintrodurre nelle miscele bituminose di nuova produzione. Infatti, diversi studi finalizzati a trovare un reimpiego al RAP di risulta presente nei siti di stoccaggio, mostrano come sia possibile riutilizzare alte percentuali di fresato nei conglomerati avendo studiato le caratteristiche meccaniche di due miscele una con una percentuale di RAP del 40% ed un'altra con una percentuale del 60% rispettivamente [5]. Frigio et al. [2], come detto precedentemente, hanno ribadito il fatto che è possibile utilizzare percentuali considerevoli di fresato: in particolare viene messo in risalto come si possa impiegarlo nel confezionamento dei conglomerati bituminosi drenanti, utilizzati in ambito autostradale per i tappeti d'usura. Tale lavoro, inoltre, evidenzia come in molti Paesi non è consentito il riutilizzo di RAP per lo strato più superficiale della pavimentazione drenante, quando invece bisognerebbe incentivarne il suo reimpiego. Ad ogni modo il riutilizzo di RAP come aggregato nelle nuove pavimentazioni va sempre valutato con attenzione, per evitare che vengano compromesse la capacità portante e la durabilità della pavimentazione. Infine, ricerche sono state condotte anche sul riutilizzo di fresato proveniente da conglomerati bituminosi drenanti in percentuali pari al 15% nel confezionamento di nuove miscele [2]

Alcuni studi condotti sulla tecnica del riciclaggio a caldo, invece, hanno dimostrato come attualmente è possibile sottoporre il fresato ad alte temperature. Ciò, però, suscita dubbi sulle possibili prestazioni del fresato e non consente di raggiungere percentuali considerevoli di riutilizzo con tale tecnica, ma confermano che percentuali fino al 40% di RAP siano accettabili per il confezionamento di nuove miscele di conglomerato bituminoso [6].

Tuttavia, Huang et al. [7] sostengono che mettendo una quantità del 20% di RAP nella produzione di *Hot Mix Asphalt* (o conglomerati bituminosi tradizionali) solo una piccola parte di questo contribuisce positivamente alla produzione di legante, il restante viene a formare un rivestimento rigido intorno gli aggregati del RAP fungendo da "black rock", ovvero comportandosi come aggregato solido e non più come legante che riveste gli aggregati.

Questo fa sì che bisogna prevedere un quantitativo maggiore di bitume di primo impiego nel mix design dal momento che la frazione disponibile per la riattivazione diminuisce.

Tra gli svantaggi principali dell'utilizzo di questa tecnica di riciclaggio (a caldo) è quello delle elevate temperature di lavorazione che oltre a produrre maggiori emissioni inquinanti e avere un costo energetico maggiore, producono anche un processo ossidativo addizionale del bitume presente nel fresato d'asfalto; per questo vengono in aiuto alcuni additivi rigeneranti che sono in grado di ripristinare le caratteristiche chimiche del bitume ossidato, rendendolo al pari di un bitume di primo utilizzo. Questi additivi sono fondamentali al fine di un aumento delle percentuali di riutilizzo del RAP. In alcuni studi si è valutato come l'effetto degli additivi ringiovanenti o "*rejuvenators*" hanno prodotto dei cambiamenti apprezzabili per quanto riguarda la riattivazione del legante ossidato [8].

Mediante l'utilizzo di tecniche tiepide per la produzione di *warm mix asphalt* è possibile riutilizzare un quantitativo maggiore di fresato grazie alle temperature di lavorazione che risultano inferiori di circa 10 °C rispetto alle tradizionali tecniche a caldo e quindi le temperature più basse riducono i processi ossidativi del bitume già parzialmente ossidato.

Nell'articolo [9] viene esposto uno studio in cui si riutilizzano alte percentuali di RAP con la tecnica di produzione del conglomerato bituminoso a tiepido, nello specifico vengono messi a confronto: un conglomerato bituminoso prodotto con materiale di primo impiego e con la tradizionale tecnica di produzione a caldo, ed un conglomerato bituminoso tiepido prodotto introducendo una percentuale del 40% di fresato. In tale lavoro, si è visto come il conglomerato bituminoso tiepido abbia presentato dei valori delle proprietà analizzate paragonabili a quelli del conglomerato bituminoso caldo preso come riferimento, ad eccezione della rigidità.

Per le tecniche a freddo, invece, si possono riutilizzare quantitativi di fresato sino al 100% col vantaggio di ridurre anche le emissioni di CO₂ dovute al riscaldamento del bitume, inoltre si hanno bassi consumi energetici, ma la tecnica risulta ancora in fase di sperimentazione. Infatti, come dimostrato da Stimilli et al. [10] con un quantitativo di RAP pari al 30% in una miscela di conglomerato bituminoso riciclata a freddo per strato di base in ambito autostradale non è stato possibile garantire le proprietà meccaniche richieste e che bisognerebbe ottimizzare la miscela per le fasi di compattazione in sito agendo in particolare sul contenuto d'acqua. Quindi

la sostituzione di una miscela a caldo con una riciclata a freddo deve essere valutata attentamente per quanto riguarda la realizzazione di strati di base per strade ad elevati carichi di traffico come le autostrade poiché quest'ultima tende ad avere un comportamento fragile. Inoltre, con questo tipo di tecnica di riciclaggio è di fondamentale importanza la caratterizzazione meccanica del materiale di riciclo.

2. INDAGINE SPERIMENTALE

2.1 Materiali

Il fresato stradale, o RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), è un materiale proveniente dalla demolizione di pavimentazioni stradali giunte al termine della loro vita utile (o eccessivamente ammalorate). Le sue proprietà sono strettamente connesse alle proprietà dei materiali che lo costituiscono, quindi dalla pavimentazione di provenienza. L'indagine è stata eseguita su due materiali provenienti da una pavimentazione autostradale:

- RAP “drenante”, cioè proveniente da strati di usura; codificato nel seguito come “RAP D”;
- RAP “non drenante”, cioè non proveniente da strati di usura; codificato nel seguito come “RAP ND”.

Si sottolinea che il RAP D, essendo proveniente da strati di usura, contiene certamente bitume modificato e aggregati con caratteristiche fisiche e geometriche di primo livello, atte a garantire l'aderenza dei veicoli e il confort di marcia, diversamente dal RAP ND. A prima vista (Figura 2.2) il materiale RAP D si presenta caratterizzato dalla esclusiva presenza di

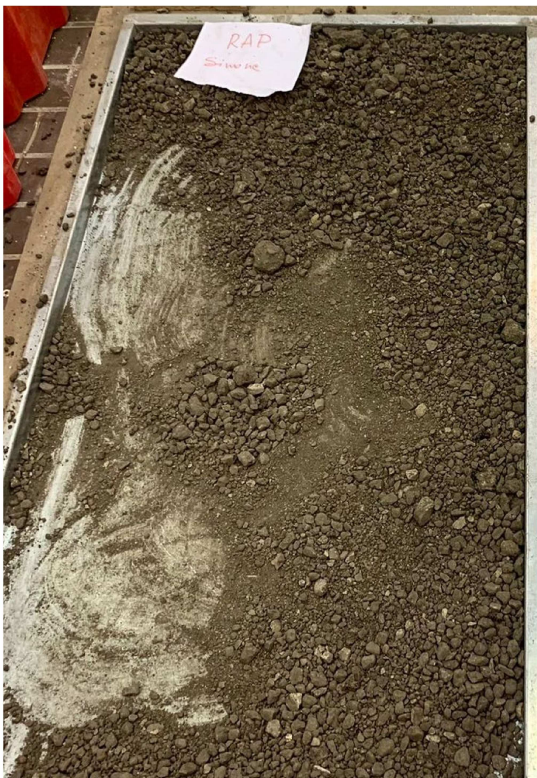


Figura 2.1 RAP non drenante



Figura 2.2 RAP drenante

aggregato basaltico, differentemente dal RAP ND (Figura 2.1), dove coesistono sia aggregati basaltici che calcarei. Tale evidenza non deve suscitare perplessità: è possibile, infatti, realizzare nuovi strati di collegamento e base con percentuali di RAP provenienti dai tappeti d'usura (che contengono per l'appunto basalto).

Appena arrivati in Laboratorio, entrambi i materiali (RAP D e RAP ND) sono stati rimossi dai contenitori nei quali erano arrivati e stesi a terra in appositi ripiani, al fine di consentire l'allontanamento, per evaporazione, dell'acqua in eccesso. Infatti, un elevato grado di umidità non avrebbe restituito risultati corretti nelle prove di laboratorio.

2.2 Apparecchiature e macchinari di laboratorio

Verranno qui di seguito descritte le apparecchiature, utilizzate per caratterizzare il materiale, ed i loro principi di funzionamento. Le apparecchiature di laboratorio utilizzate nella ricerca sono servite principalmente a determinare le caratteristiche geometriche, fisiche e meccaniche dell'aggregato nonché i quantitativi di legante presenti all'interno del materiale.

I macchinari e i dispositivi utilizzati sono:

- Vibrovaglio e setacci;
- Vagli a barre e calibro a cursore;
- Apparecchiatura per prove di micro-Deval;
- Apparecchiature per prove CLA e Skid Tester;
- Macchinario per estrazione del bitume.

2.2.1 Vibrovaglio e setacci

Il vibrovaglio (Figura 2.3) è un macchinario costituito da una base oscillante in cui viene posizionata e fissata una pila di setacci (Figura 2.4). Azionando il macchinario la base produce oscillazioni che permettono al materiale all'interno della pila di essere sottoposto all'operazione di vagliatura.

L'operazione si esegue prendendo la pila di setacci, ponendoli in ordine di apertura della maglia crescente dal basso verso l'alto, il materiale contenuto in essi viene vagliato per un periodo di tempo prestabilito e successivamente stoccato in appositi contenitori tenendo

separate le classi granulometriche dei due differenti materiali. Bisogna porre attenzione a introdurre un quantitativo di materiale idoneo alle dimensioni dei setacci in quanto i risultati possono essere compromessi dall'accumulo di materiale all'interno della pila che forma dei veri e propri "tappi" che non lasciano che alcune delle particelle provenienti dai setacci superiori attraversino la maglia portando ad una falsatura dei risultati.



Figura 2.3 Vibrovaglio



Figura 2.4 Pila di setacci

2.2.2 Vagli a barre e calibro a cursore

Per la determinazione della forma degli aggregati si utilizzano i vagli a barre ed il calibro a cursore.

I vagli a barre (Figura 2.5) servono per la determinazione dell'indice di appiattimento FI (in inglese: *flatness index*). La procedura consiste nel suddividere il materiale nelle classi granulometriche di interesse mediante setacciatura, dopodiché, nella normativa di

riferimento UNI EN 933-3 [11], sono indicati i setacci a barre da utilizzare per ogni classe granulometrica, che corrispondono ad una apertura pari alla metà del diametro massimo della classe (Tabella 2.1).



Figura 2.5 Vagli a barre

Classi granulometriche	Apertura setacci a barre [mm]
12,5/16	$8 \pm 0,2$
10/12,5	$6,3 \pm 0,2$
8/10	$5 \pm 0,2$
6,3/8	$4 \pm 0,15$
5/6,3	$3,15 \pm 0,15$
4/5	$2,5 \pm 0,15$

Tabella 2.1 Apertura dei setacci a barre prescritti dalla Norma in funzione della classe granulometrica

La procedura consiste nell'analizzare ogni classe granulometrica passandola al rispettivo vaglio a barre e successivamente determinare il peso dei granuli passanti ai vari vagli.

Per il calcolo dell'FI (indice di appiattimento) si è utilizza la seguente relazione, come prescritto dalla Normativa:

$$FI=100\frac{M_2}{M_1}$$

dove:

M_1 = somma delle masse dei granuli in ogni classe granulometrica

M_2 = somma delle masse dei granuli in ogni classe granulometrica passanti al corrispondente setaccio a barre.



Figura 2.6 Calibro a cursore

Per la determinazione dell'indice di forma SI (Shape Index) è stato utilizzato il calibro a cursore (Figura 2.6). Per ogni classe granulometrica, vengono valutati con il calibro a cursore tutti gli aggregati passanti al setaccio a barre e di quelli trattenuti solamente quelli con una forma significativamente allungata.

La procedura consiste, facendo riferimento alla norma UNI EN 933-4 [12], nel determinare se la dimensione maggiore del granulo "L" sia maggiore o meno di 3 volte la dimensione minore

“E”, misurandone la dimensione maggiore con il calibro e verificando se il granulo passa attraverso l’apertura del cursore (corrispondente a 1/3 di “L”). Se l’aggregato dovesse passare verrebbe classificato come non cubico.

Per il calcolo dell’SI si utilizza, come prescritto dalla Normativa, la seguente formula:

$$SI = 100 \frac{M_2}{M_1}$$

Dove:

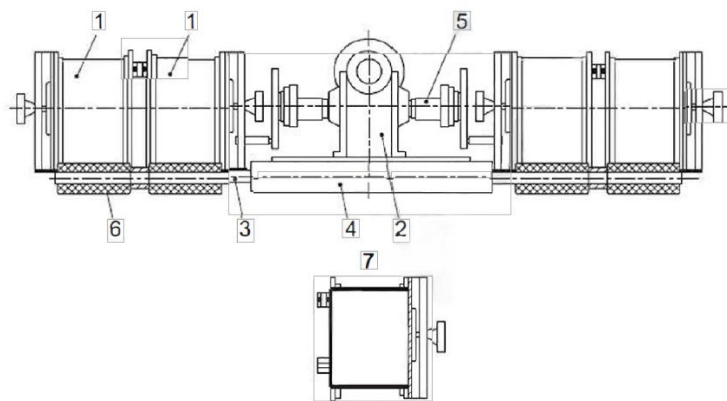
M_2 = somma delle masse dei granuli valutati come non cubici per ogni classe granulometrica.

M_1 = somma delle masse dei granuli in ogni classe granulometrica.

2.2.3 Apparecchiatura per prove di micro-Deval

In riferimento alla normativa UNI EN 1097-1 [13], la prova di micro-Deval (Figura 2.7) prevede l’utilizzo di un tamburo in cui all’interno viene messo il materiale oggetto di studio insieme ad una carica abrasiva costituita da sfere di metallo di diametro 10mm (Figura 2.8).

Una volta introdotto il materiale nel tamburo quest’ultimo viene chiuso con un coperchio e posizionato sul macchinario, il quale azionando dei rulli fa girare il tamburo ad una velocità di circa cento giri al minuto per una certa durata selezionata dall’operatore. La prova prevede la possibilità di testare due tamburi contemporaneamente.



*Figura 2.7 Schema tecnico macchinario per prova Micro-Deval: 1 Tamburi
2 Motore elettrico, 3 Albero fisso, 4 Telaio, 5 Giunto di accoppiamento
flessibile, 6 Ruota di trasmissione, 7 Sezione trasversale di un tamburo*



*Figura 2.8 Tamburo Micro-Deval con all'interno
materiale oggetto di studio e carica abrasiva*

Al termine della prova viene recuperato il materiale all'interno del tamburo e setacciato per determinare le variazioni granulometriche prodotte.

2.2.4 Apparecchiature per prove CLA e Skid Tester

La prova CLA prevede la preparazione di provini attraverso degli stampi in cui viene disposto l'aggregato, facendo attenzione a dare una disposizione casuale degli inerti e cercando di ricoprire la più ampia superficie possibile. Successivamente l'aggregato viene incollato mediante un'apposita resina: in tale fase operativa bisogna prima introdurre delle microsferiche di vetro che servono a lasciare uno spessore che consente alla superficie degli aggregati di sporgere rispetto alla resina di supporto, poi viene chiuso col coperchio al fine di dare la tipica forma curva alla base del provino.



Figura 2.9 Macchinario per prova CLA

Una volta ultimato, la resina viene lasciata asciugare per un certo periodo, dopodiché si rimuovono le placche laterali ed il coperchio ricavando una mattonella a base curva che verrà posizionata nel macchinario per la CLA (Figura 2.9).

In tale macchinario posizioniamo lungo una ruota (che prende il nome di ruota porta provini) 14 provini. La prova consiste in due cicli, un primo ciclo di tre ore in cui il macchinario esegue l'abrasione dell'aggregato mettendo in rotazione la ruota porta provini e facendoli venire a contatto con un ruotino in gomma; viene contemporaneamente erogato uno smeriglio mono granulare accompagnato da acqua ad una portata costante. Terminato il primo, inizia il secondo ciclo sempre della durata di tre ore, caratterizzato dalle stesse procedure, ma in cui vi è una sostituzione manuale del ruotino in gomma e viene montato un erogatore diverso dal primo che distribuisce un filler al posto dello smeriglio.

Al termine della prova si prendono i provini che hanno subito un processo di levigatura accelerato e vengono sottoposti alla prova dello Skid Tester (Figura 2.10).

Questo apparecchio è costituito da un pendolo che monta uno slider in gomma, il pendolo viene rilasciato da un'altezza prestabilita e viene fatto scorrere sulla superficie del provino (che è tenuto fermo da un apposito morsetto), per una lunghezza prestabilita. Una volta che il pendolo viene fatto passare sopra il provino si aziona un indicatore, che misura una quantità relativa all'altezza di risalita del pendolo.



Figura 2.10 Skid Tester

Questa operazione viene ripetuta per 5 volte sullo stesso provino e come valore viene presa la media delle ultime 3 ripetizioni. Si procede poi effettuando un altro ciclo di prove ruotando lo slider in gomma di 180° e alla fine si fa una media dei due valori ottenuti per la stessa tipologia di provino.

La prova CLA seguita dallo Skid Tester serve per valutare la levigazione degli aggregati, per poter stabilire se risultano idonei o meno al riutilizzo nello strato di usura, in cui debbono fornire aderenza sufficiente in fase di frenata dei veicoli. Il parametro per valutare la levigazione dell'aggregato è il PSV (Polished Stone Value) che viene determinato, facendo riferimento alla normativa UNI EN 1097-8 [14], con la seguente formula:

$$\text{PSV} = S + 56 - C$$

Dove:

S = è il valore medio sui campioni di aggregato in esame

C = è il valore medio dei provini di riferimento

Più il provino ha esercitato attrito minore sarà la risalita del pendolo e quindi il valore di "S" sarà maggiore, ciò significa che una più alta resistenza di attrito determina un PSV maggiore.

2.2.5 Macchinario per estrazione del bitume

Il macchinario per l'estrazione del bitume (Figura 2.11) consiste in un apparecchio costituito da 3 componenti principali: una camera in cui alloggia un cestello con maglia a 63 µm, che viene riempito con la miscela di materiale da valutare, poi, un secondo scompartimento in cui alloggia la capsula contenente una carta filtro, che serve per trattenere il filler passante il cestello e, infine, un terzo scompartimento che sarebbe la camera di decantazione in cui viene raccolto il bitume e recuperato il solvente da dover rimettere in ricircolo.



Figura 2.11 Macchinario per estrazione bitume Infratest

I quantitativi di materiale da introdurre in base alla classe granulometrica degli aggregati, sono indicati nella normativa di riferimento, ovvero la UNI EN 12697-28 [15].

La procedura per ricavare il quantitativo di bitume consiste nell'effettuare una serie di pesate:

1. Si prende la tara del cestello (T_1) e della capsula con carta filtro (T_2)
2. Si pesa il cestello con all'interno la miscela (P_1)
3. Dopo l'estrazione si pesano di nuovo il cestello (P_2) e la capsula (P_3)

Poi si eseguono i seguenti calcoli:

$$\text{PESO MISCELA} = P_1 - T_1$$

$$\text{PESO AGGREGATO} = P_2 - T_1$$

$$\text{PESO FILLER} = P_3 - T_2$$

$$\text{PESO BITUME} = P_1 - P_2 - \text{PESO FILLER}$$

$$\% \text{ BITUME SU AGGREGATO} = [\text{PESO BITUME}/(\text{PESO FILLER} + \text{PESO AGGREGATO})] * 100$$

$$\% \text{ BITUME SULLA MISCELA} = (\text{PESO BITUME}/\text{PESO MISCELA}) * 100$$

3. PROGRAMMA SPERIMENTALE

Il programma sperimentale ha previsto una serie di scelte procedurali. I criteri operativi e la strumentazione adottati in fase di sperimentazione hanno avuto lo scopo di ricavare le caratteristiche fisiche e geometriche, nonché i quantitativi di legante e la produzione di fino dei due materiali: il conglomerato bituminoso di recupero proveniente da pavimentazione drenante (indicato come "RAP D"), ed il conglomerato bituminoso di recupero proveniente da una pavimentazione non drenante (indicato come "RAP ND").

Saranno di seguito descritte con attenzione tutte le procedure ed i metodi di calcolo scelti per portare a termine l'obiettivo della ricerca, ovvero analizzare i materiali oggetto di studio al fine di valutarne un possibile reimpiego per la realizzazione di nuove pavimentazioni stradali. Verranno, inoltre, forniti i quantitativi di materiale sottoposti alle prove di laboratorio passate in rassegna nel capitolo precedente e il numero di campioni e/o provini prodotti.

Tutti questi dati saranno utilizzati successivamente nell'elaborazione degli stessi, infatti il presente capitolo ha come utilità anche quella di spiegare come sono stati ottenuti i risultati che verranno presentati successivamente.

3.1 Analisi granulometrica

Prima di fare la setacciatura si è provveduto a stendere il materiale per farlo asciugare per circa due giorni. Una volta asciugatosi il materiale è stato prelevato per mezzo di una sessola e introdotto nella pila di setacci. Per ogni singola prova sono stati sottoposti a vagliatura circa 2600 g di materiale per un periodo di tempo di 5 minuti, ottenendo un quantitativo totale di materiale vagliato di 96,34 kg per il RAP ND e di 128,34 kg per il RAP D. L'analisi granulometrica è stata eseguita (facendo riferimento alla normativa UNI EN 933-1 [16]), su entrambi i materiali in esame, attraverso una pila di setacci di apertura 16mm, 8mm e 4mm. Sono così state individuate 4 classi granulometriche: >16mm, 8/16 mm, 4/8 mm e <4mm. Il materiale è stato poi stoccato in appositi recipienti avendo cura di mantenere separate le classi granulometriche.

Terminata la vagliatura si è preso nota dei pesi di materiale trattenuto da ogni singolo setaccio e, noto anche il peso della miscela sottoposta a vagliatura, è stato possibile ricavare le

percentuali in peso di trattenuto ad ogni setaccio. successivamente calcolando il trattenuto percentuale cumulativo e facendone il complemento a cento si ottiene il passante (Tabella 3.1). È stata effettuata una seconda analisi granulometrica sul materiale sottoposto preventivamente alla procedura di estrazione del bitume. L'analisi granulometrica in questione ha coinvolto setacci delle seguenti dimensioni: 16mm, 12,5mm, 10mm, 8mm, 6,3mm, 5mm, 4mm; individuando le rispettive classi granulometriche, che sono servite per la successiva determinazione dei due undici FI (indice di appiattimento) e SI (indice di forma). In questa analisi granulometrica si è avuta l'accortezza di aggiungere il fino calcolato nell'estrazione del bitume, reintroducendolo nella classe granulometrica 0/4, che altrimenti sarebbe andato perso alterando la veridicità dei risultati.

Analisi Granulometrica					
Peso campione (g)	Apertura setaccio (mm)	Peso trattenuto (g)	Trattenuto parziale (%)	Trattenuto	
				cumulativo (%)	Passante (%)
P _{TOT}	16	P ₁	$T_1 = (P_1 / P_{TOT}) * 100$	T ₁	100-T ₁
	8	P ₂	$T_2 = (P_2 / P_{TOT}) * 100$	T ₁ +T ₂	100-T ₁ -T ₂
	4	P ₃	$T_3 = (P_3 / P_{TOT}) * 100$	T ₁ +T ₂ +T ₃	100-T ₁ -T ₂ -T ₃
	0	P ₄	$T_4 = (P_4 / P_{TOT}) * 100$	T ₁ +T ₂ +T ₃ +T ₄	100-T ₁ -T ₂ -T ₃ -T ₄

P_{TOT}

Tabella 3.1 Esempio di tabella di calcolo utilizzata per il calcolo del passante di una curva granulometrica

Il risultato delle analisi granulometriche sono le curve granulometriche (Figura 3.1). Sono costruite su un piano in cui si ha in ordinata il passante dell'i-esimo setaccio mentre in ascissa si riporta il logaritmo dell'apertura della maglia dei setacci (quindi la dimensione degli inerti).

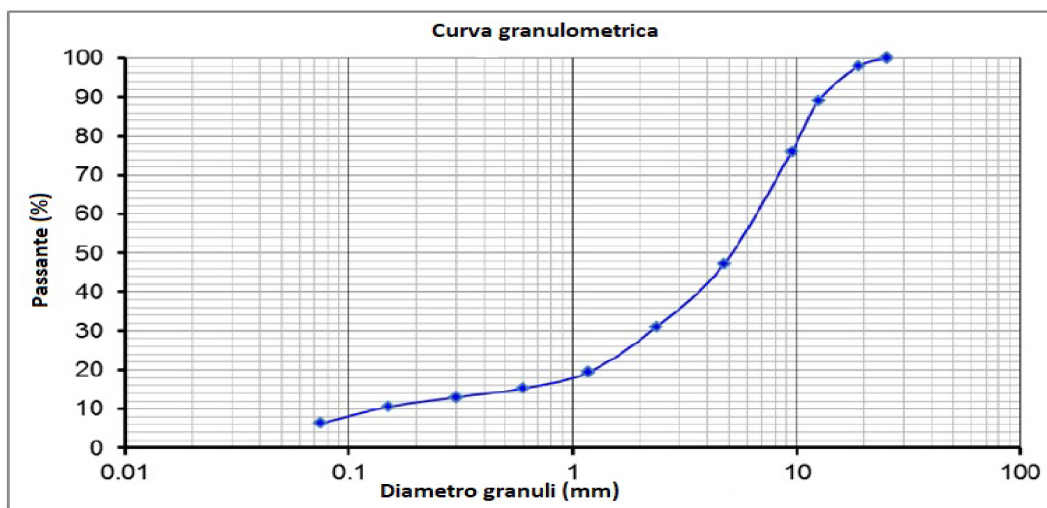


Figura 3.1 Esempio di curva granulometrica: in ascissa si ha il diametro delle particelle (o aperture dei setacci) in scala logaritmica mentre in ordinata si ha il passante.

3.2 Determinazione delle caratteristiche geometriche degli aggregati

La forma degli aggregati è stata valutata mediante la determinazione di due indici: l'indice di appiattimento FI (in inglese: *flatness index*) e l'indice di forma SI (in inglese: *shape index*). Questi due indici servono per stabilire il quantitativo di granuli forma piatta o allungata. La procedura eseguita per la determinazione dei due indici è caratterizzata dalle seguenti procedure, descritte dettagliatamente nelle normative di riferimento (UNI EN 933-3 [11] e UNI EN 933-4 [12]). Sono state effettuate analisi della forma per due frazioni, ovvero la 4/8 e la 8/16. I quantitativi da sottoporre in analisi sono determinati in base alla seguente (Tabella 3.2):

Upper aggregate size D	Test portion mass (minimum)
mm	kg
63	45
32	6
16	1
8	0,1

Tabella 3.2 valori di riferimento per la scelta del quantitativo di materiale da testare, che viene stabilito in base alla dimensione massima dell'aggregato della classe granulometrica scelta.

Per ogni classe granulometrica sono stati calcolati i due indici FI e SI, poi sono state fatte due ripetizioni per ogni indice, ovviamente su entrambi i materiali RAP D e RAP ND, per un totale di 8 indici di forma e 8 indici di appiattimento.

3.2.1 Indice di Appiattimento

L'indice di appiattimento FI è stato determinato sottoponendo ogni classe granulometrica alla vagliatura con il rispettivo vaglio a barre e successivamente determinando il peso dei granuli passanti ai vari vagli.

I quantitativi di materiale esaminato sono stati presi in riferimento alla tabella (tab. 3.2), anche se, quest'ultima riguarda il calcolo dello Shape Index.

La setacciatura al vaglio a barre è stata effettuata scuotendo il vaglio manualmente per un tempo necessario affinché non passino più altri granuli (almeno un minuto).

3.2.2 Indice di Forma

L'indice di forma SI è stato determinato in contemporanea all'indice di appiattimento, in quanto, una volta passate le varie classi granulometriche al rispettivo setaccio a barre, si è utilizzato il calibro a cursore sul passante al vaglio, mentre per il trattenuto è stato valutato solo l'inerte che a prima vista aveva una forma significativamente allungata.

Per il calcolo dell'indice di forma sono stati pesati, per ogni classe granulometrica, tutti i granuli classificati come allungati, ovvero passanti al cursore del calibro secondo le modalità descritte in precedenza.

3.3 Determinazione della resistenza all'usura

Il lavoro effettuato ha previsto un impiego innovativo del macchinario per la prova micro-Deval. È stato utilizzato per valutare il quantitativo di legante che si è perso, infatti, il fango prodotto durante l'esecuzione della prova, per l'abrasione che le sfere di metallo hanno esercitato sull'aggregato, è costituito principalmente da legante.

La prova è stata eseguita su campioni preparati con la frazione 4/8 del materiale e del peso di 500g circa. Il campione è stato sottoposto preventivamente ad un metodo di verifica: il passante al setaccio con apertura di 6,3mm deve essere compreso tra il 60% e il 70%.

Sono state effettuate prove condizionando il materiale (per almeno 18 ore) a tre diverse temperature: -5 °C, 0 °C e 5 °C. Per ogni temperatura di prova sono stati testati provini per due tempistiche, ovvero 12 min e 24min. Essendo state fatte due ripetizioni per ogni tipologia di prova, significa che sono stati testati 12 provini sia per il RAP D che per il RAP ND; quindi, in totale sono stati realizzati 24 provini per la prova di micro-Deval.



Figura 3.2 Frazione 0/4 del materiale che è stato trattato con prova micro-Deval (fino prodotto)

Tali provini sono stati preventivamente setacciati con lo scopo di controllare che il campione verificasse i requisiti imposti dalla normativa [13]. Successivamente, sono stati introdotti all'interno del tamburo insieme alla carica abrasiva (2500g), poi una volta chiuso il tamburo con il coperchio è stato posizionato sui rulli ed è stato avviato il macchinario. Al termine della prova ogni campione, prelevato dal tamburo, è stato setacciato nuovamente sia per recuperare le sfere di metallo trattenute al setaccio da 8mm sia per ottenere il risultato (produzione di fino) dovuto all'abrasione che le sfere di metallo hanno esercitato sugli aggregati (Figura 3.2); effettivamente lo scopo della ricerca con tale macchinario è proprio quello di stabilire la produzione di fino verificatasi per le differenti temperature e tempistiche di prova.

3.4 Determinazione del coefficiente di levigazione

Il coefficiente di levigazione è un parametro che ci dà una misura di quanto gli aggregati di una determinata miscela presentino quelle caratteristiche idonee per poter essere reimpiegati nello strato di usura. È possibile intenderlo come una misura della micro-rugosità, ovvero la scabrezza che l'aggregato presenta sulla sua superficie, parametro fondamentale per la riduzione dello spazio di frenata dei veicoli in marcia.

Tale parametro si ricava attraverso la prova CLA, già descritta, in cui l'aggregato viene sottoposto ad un processo di levigazione accelerata. Per eseguire la prova, sono stati realizzati, mediante incollaggio in appositi stampi, dei provini sulla cui superficie vengono esposti gli aggregati. Si sono prodotti 2 provini curvi ("mattonelle") per ogni tipologia di materiale proveniente dalla prova micro-Deval: quindi, per ogni temperatura e tempistica di prova sono stati realizzati due provini. In totale 12 provini per ogni materiale sono stati realizzati, a cui si aggiungono altri quattro relativi ai materiali non condizionati. In totale sono state realizzate 28 mattonelle.

Per la realizzazione delle mattonelle si è tenuto conto di posizionare gli aggregati in maniera casuale, inoltre, per quanto riguarda il RAP ND essendo composto da aggregati sia di natura calcarea che basaltici sono state introdotte entrambe le tipologie di inerte con le giuste proporzioni, per far sì che il provino sia rappresentativo del materiale di partenza.

Questi provini sono stati montati sulla prova CLA seguendo una disposizione ben precisa: siccome per ogni provino sono state realizzate due mattonelle, queste sono state posizionate sulla ruota porta provini l'una alla parte opposta dell'altra. Per ogni prova è possibile testare un massimo di 14 provini, eventuali spazi vuoti sono stati occupati da dei campioni non necessari a questa ricerca.

Durante la prova CLA sono stati effettuati controlli periodici al fine di verificarne il corretto avanzamento, in particolare si è tenuto sotto controllo che i materiali di consumo (acqua e smeriglio) fossero sempre presenti e sono state effettuate brevi interruzioni per la pulizia e la rimozione del materiale di scarto prodotto.

In seguito alla prova CLA le mattonelle, prima di essere sottoposte allo Skid Tester sono state lavate per rimuovere eventuali materiali residui sulla superficie, dal momento che la loro

presenza influisce sul risultato della prova. Inoltre, i campioni sono stati posizionati all'interno di un recipiente pieno d'acqua, con la superficie rivolta verso il basso per un periodo di 30 minuti, per far sì che il provino si saturi prima della prova (Figura 3.3).



Figura 3.3 In basso alcuni provini sottoposti alla prova CLA, in alto provini immersi in acqua a con la faccia rivolta verso il basso

Infine, l'esecuzione della prova per la determinazione del coefficiente di levigabilità (Skid Tester) è stato eseguito per ogni campione con le metodologie ampiamente descritte nel capitolo precedente. Le due medie, quella degli ultimi 3 valori ricavati per il provino testato al primo giro e quella del provino testato al secondo giro (con il cursore in gomma ruotato di 180°), sono state mediate di nuovo per ottenere un unico risultato per ogni tipologia di materiale.

3.5 Determinazione del contenuto di legante

Il quantitativo di bitume è stato determinato, in primis, sul materiale di partenza (non trattato) per entrambe le frazioni 4/8 e 8/16 effettuando 3 ripetizioni per ogni materiale, per un totale di 12 estrazioni. La procedura consiste nel preparare il macchinario mettendo il campione di cui si vuole effettuare l'estrazione all'interno di un apposito cestello (Figura 3.4) che va inserito nella camera di lavaggio dove l'aggregato viene, per l'appunto, lavato con il solvente ad alte temperature. Poi è stata preparata la capsula (con all'interno una carta filtro) che alloggia in una camera separata: qui viene raccolto tutto il passante alla maglia del cestello di 63 μm . Prima di avviare il macchinario bisogna impostare il numero di cicli di lavaggio e di asciugatura: nel nostro caso sono stati fatti 6 cicli per il RAP ND e 8 cicli per il RAP D, dal momento che essendo quest'ultimo più ricco di bitume necessita quindi di un trattamento più lungo.

Una seconda serie di estrazioni è stata eseguita sul materiale proveniente da una parte del totale delle prove di micro-Deval.



Figura 3.4 Cestello dell'estrattore di bitume Infratest con coperchio

In questo caso il provino del peso di circa 500g, di materiale appartenente alla frazione 4/8, proveniente dalla prova di resistenza all'usura, è stato introdotto direttamente nel cestello dell'estrattore. Lo scopo di queste estrazioni è stato quello di determinare il quantitativo di

legante perso (passante al setaccio da 4mm perché distaccatosi dalla superficie dell'aggregato durante la prova micro-Deval), facendo la differenza tra la percentuale di bitume presente prima della prova di micro-Deval e quella presente dopo tale prova.

3.6 Riassunto programma sperimentale

In sintesi, il programma sperimentale ha previsto l'analisi dei quantitativi di materiale i cui parametri per ogni prova riportati nella tabella (Tab. 3.3).

Materiale	RAP NON DRENANTE		RAP DRENANTE	
Prova	Parametri			
Analisi Granulometrica pre-estrazione	96,34 kg	Apertura setacci 16-8-4 [mm]	128,34 kg	16-8-4 [mm]
Analisi Granulometrica post-estrazione	4 ripetizioni	Apertura setacci 16-12.5-10-8-6.3- 5-4 [mm]	4 ripetizioni	Apertura setacci 16-12.5-10-8-6.3- 5-4 [mm]
Coefficiente di Forma	4	Apertura setacci 16-12.5-10-8-6.3- 5-4 [mm]	4	Apertura setacci 16-12.5-10-8-6.3- 5-4 [mm]
Coefficiente di appiattimento	4	Apertura setacci 16-12.5-10-8-6.3- 5-4 [mm]	4	Apertura setacci 16-12.5-10-8-6.3- 5-4 [mm]
Prova micro-Deval	Campione 500g Biglie 2500g	12-24[min] -5,0,5[°C]	Campione 500g Biglie 2500g	12-24[min] -5,0,5[°C]
Prova CLA	14 provini	Frazione 4/8	14 provini	Frazione 4/8
Skid Tester	14 provini		14 provini	
Estrazione bitume	11 estrazioni	Frazione 4/8 e 8/16	9 estrazioni	Frazione 4/8 e 8/16

Tab. 3.3 Macro-tabella riassuntiva del lavoro svolto previsto dal programma sperimentale

4. ANALISI DEI RISULTATI

In questo capitolo verranno presentati ed analizzati i dati ottenuti attraverso le prove descritte precedentemente. I dati saranno esposti in forma grafica con curve e istogrammi relativi ai fogli di calcolo utilizzati per l'elaborazione dei dati sperimentali.

4.1 Curve granulometriche

Di seguito è presentato un confronto tra le curve granulometriche ottenute per il RAP D e per il RAP ND (Figura 4.1) riguardanti le setacciature effettuate sul materiale non sottoposto a estrazione di bitume.

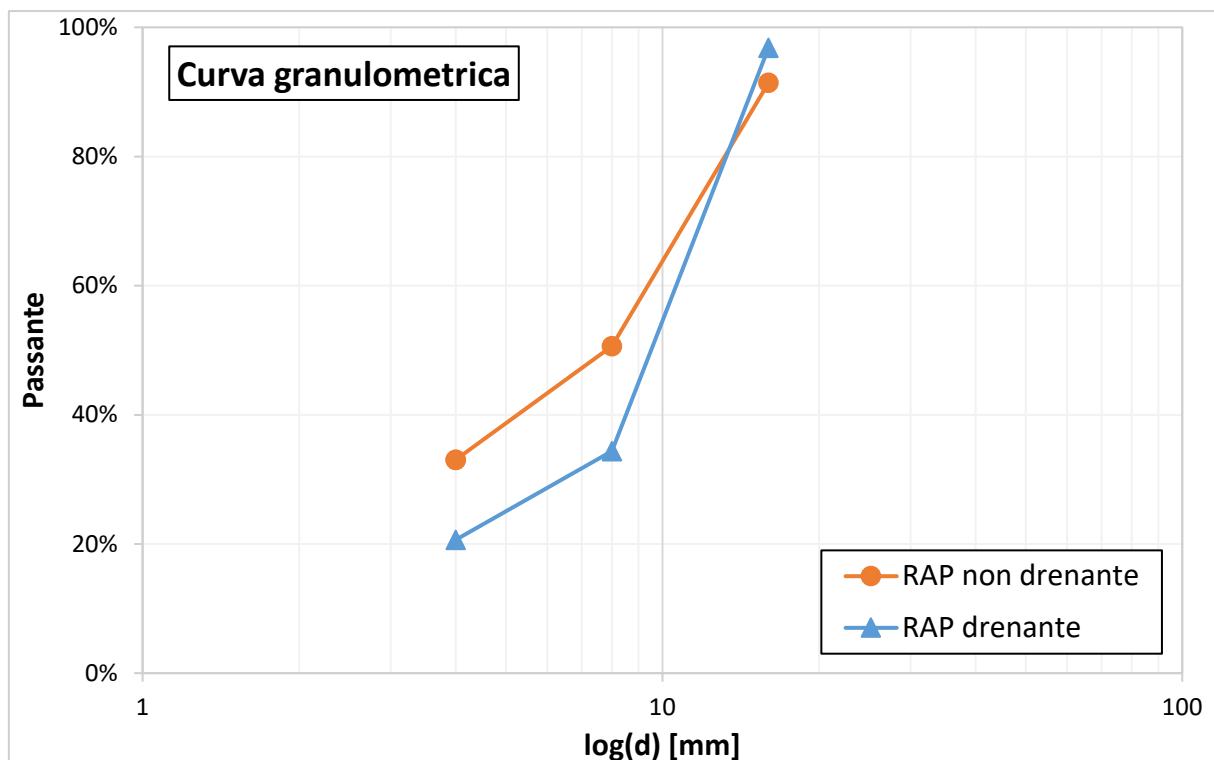


Figura 4.1 Grafico che rappresenta un confronto tra la curva granulometrica del RAP D e la curva granulometrica del RAP ND

Dal confronto tra le due curve granulometriche si evince come il RAP D (linea azzurra con triangoli) abbia un contenuto di fino (passante al setaccio di apertura 4mm) inferiore rispetto al RAP ND (linea arancione con pallini). Infatti, essendo il RAP D proveniente da uno strato di usura drenante, e dovendo quindi garantire un certo volume dei vuoti per assolvere alle sue funzioni di drenaggio, la sua composizione granulometrica non può che prevedere pochissime

quantità di materiale fino, che – altrimenti – andrebbe a saturare quei vuoti che invece si cercano con la miscela di tipo drenante.

Di seguito viene, invece, presentata l'analisi granulometrica sul materiale costituito dall'inerte pulito dal bitume (Figura 4.2), ovvero i risultati dall'analisi granulometrica di questo materiale sono stati ottenuti setacciando il materiale derivato dall'estrazione, dalla quale successivamente, alcuni inerti inizialmente uniti insieme dal bitume si sono separati.

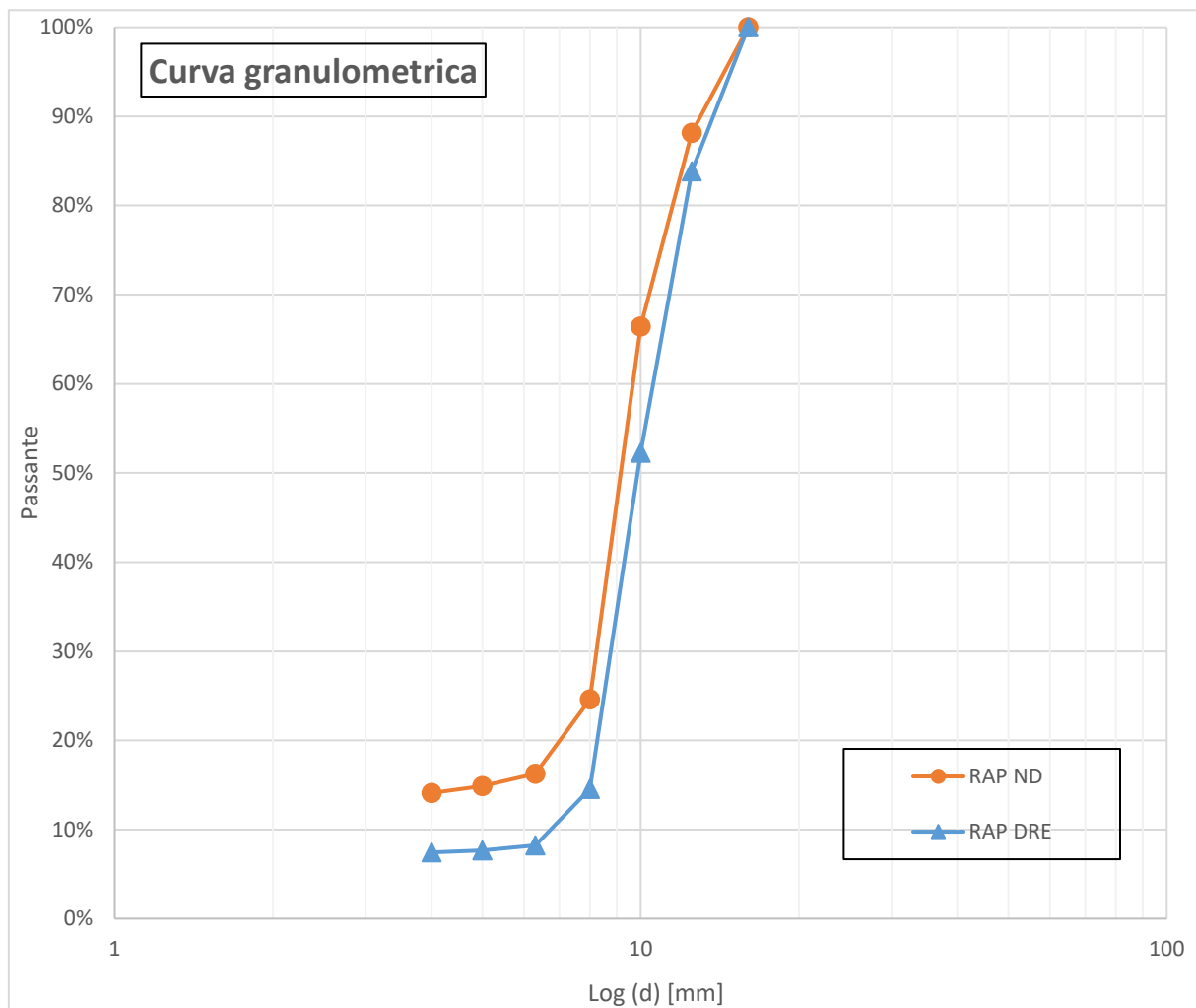
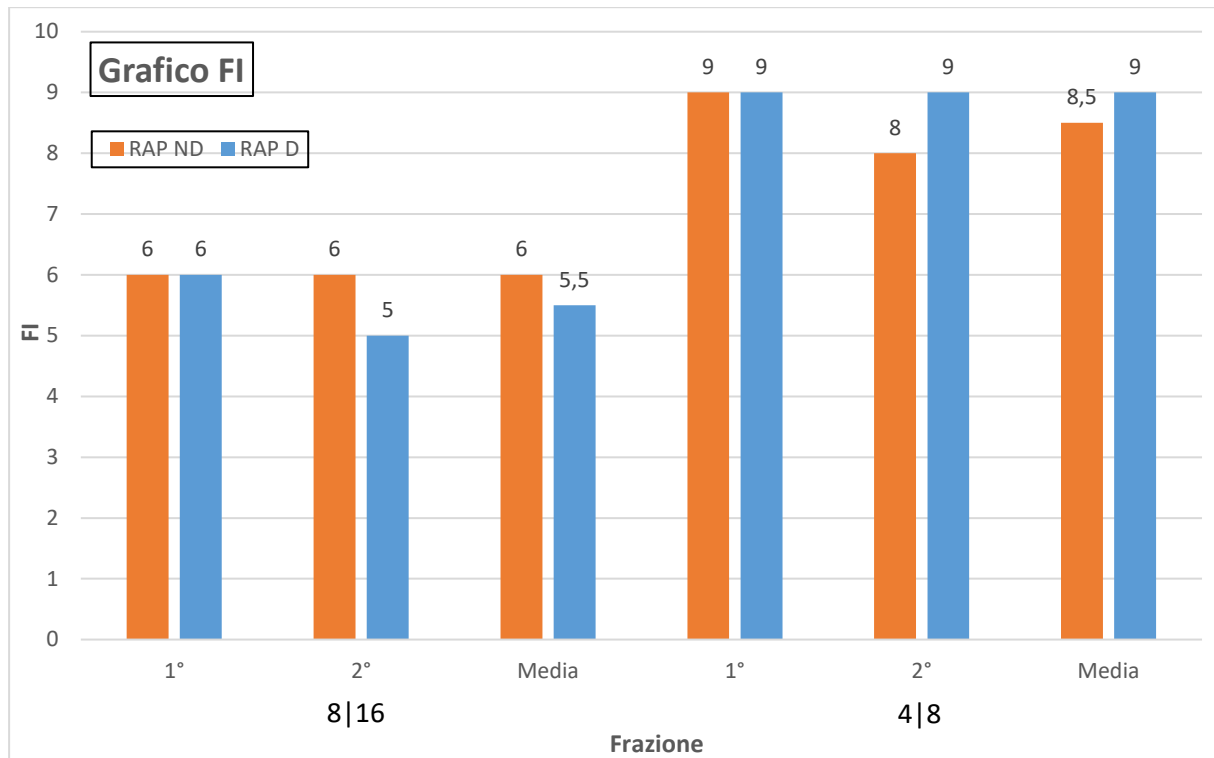


Figura 4.2 Grafico che rappresenta il confronto tra la curva granulometrica del RAP D e la curva del RAP ND dopo l'estrazione del materiale

Anche qui si riconferma la maggior presenza di fino nel RAP ND (linea arancione con pallini) a seguito dell'estrazione, rispetto al RAP D (linea azzurra con triangoli). Dall'analisi dei risultati delle curve granulometriche, quindi, si può affermare che i due materiali sono effettivamente provenienti da due strati di pavimentazione con caratteristiche di mix design differenti.

4.2 Forma dell'aggregato

Di seguito sono presentati i risultati ottenuti per le caratteristiche geometriche dell'aggregato: l'indice di appiattimento (FI) in Figura 4.3, mentre l'indice di forma (SI) in Figura 4.4.



4.3 Grafico di confronto degli indici di appiattimento ricavati per il RAP ND e per il RAP D per le frazioni granulometriche 8/16 e 4/8

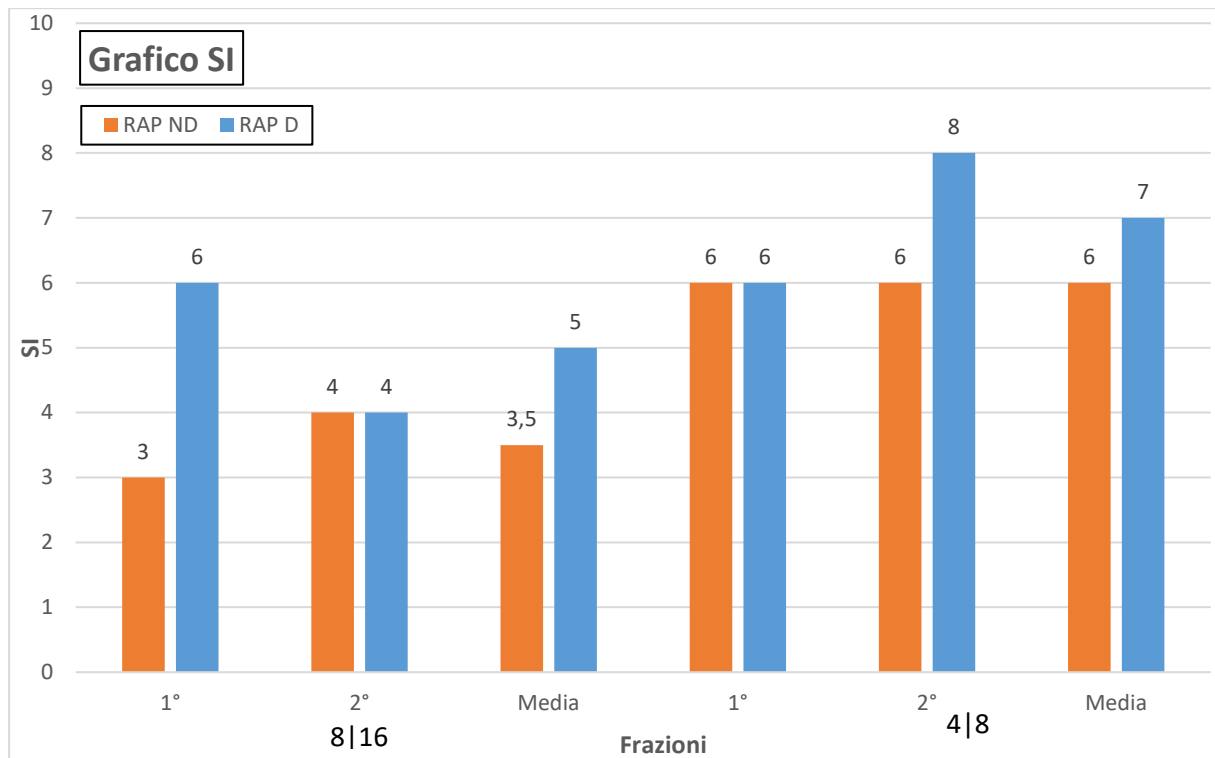


Figura 4.4 Grafico di confronto degli indici di forma ricavati per il RAP ND e per il RAP D per le frazioni granulometriche 8|16 e 4|8

In questi due istogrammi si può notare come le percentuali di granuli appiattiti e di granuli definiti non cubici (di forma allungata) siano abbastanza basse (mantenendosi sotto un valore di 9); quindi, il materiale è idoneo per essere reimpiegato nello strato di usura, dal momento che granuli di forma regolare (Figura 4.5) sono privilegiati rispetto ai granuli non cubici.



Figura 4.5 Esempio di granulo con forma regolare quindi classificabile come granulo cubico, il cui rapporto tra il lato maggiore e quello minore è sicuramente minore di 3

4.3 Produzione di fino mediante prove di micro-Deval

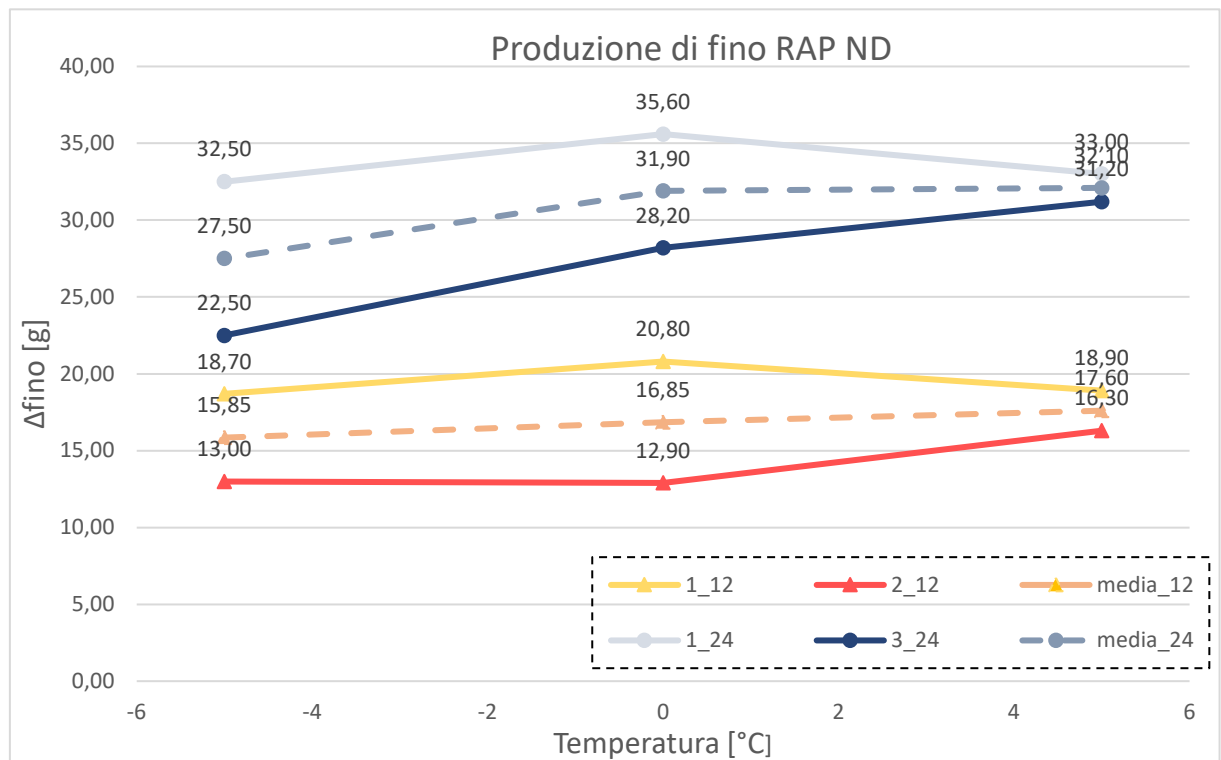


Figura 4.6 Grafico dei valori della produzione di fino in seguito alla prova micro-Deval per il RAP ND.

Nel grafico sopra (Figura 4.6) sono riportati i valori della produzione di fino in seguito alla prova micro-Deval per il RAP ND alle 3 temperature di prova e le due tempistiche di 12 minuti (curve in toni caldi) e 24 minuti (curve in toni freddi). Ad un primo esame dei dati risulta evidente come non sia individuabile una tendenza tra le prove effettuate alle differenti temperature e tempistiche. L'unico dato certo è però quello relativo al fino prodotto (frazione 0/4) in funzione della durata della prova: a 24 minuti la frazione 0/4 prodotta è maggiore che a 12 minuti di prova.

Diverso è il discorso sul RAP D (Figura 4.7), che oltre a riconfermare la maggiore produzione di fino per le prove effettuate a 24 minuti, mette in risalto un andamento secondo cui la maggiore produzione di fino la si è avuta alla temperatura di 0°C.

Pertanto, non vi è la necessità di effettuare altre prove ad altre temperature, dal momento che sembrerebbe essere già stata individuata quella per cui si produce più fino.

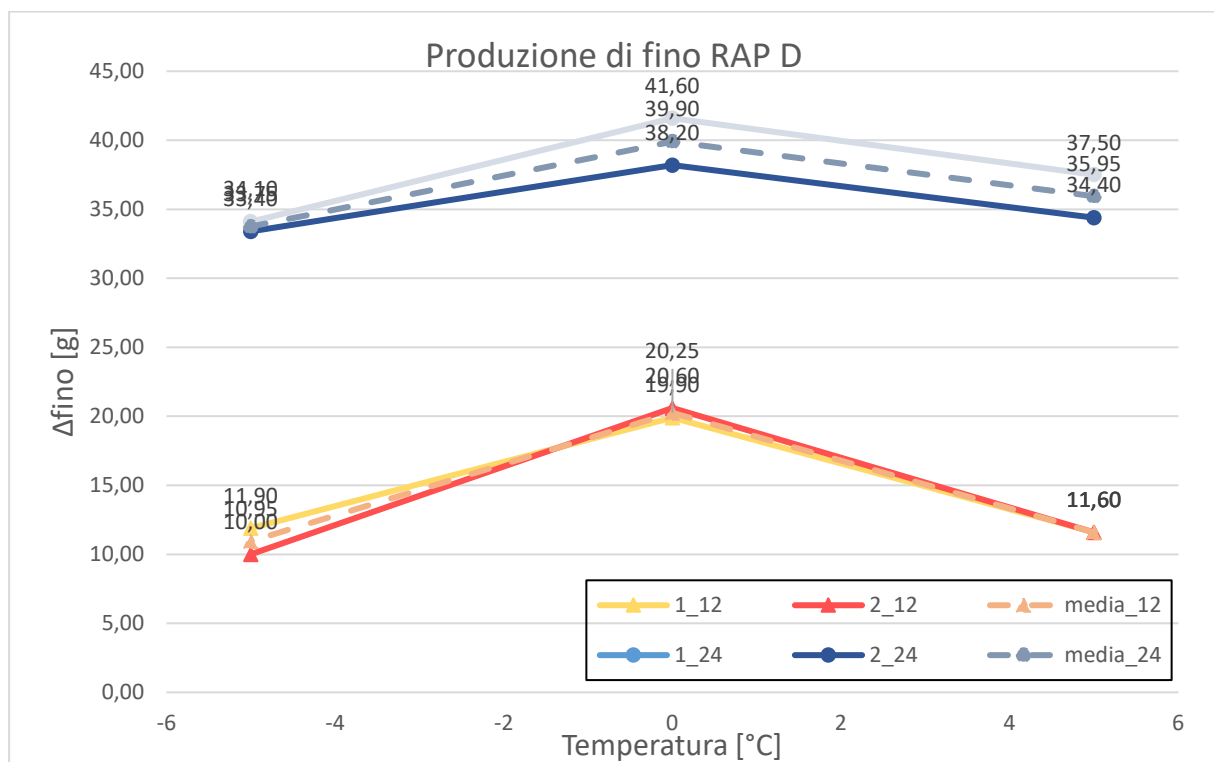


Figura 4.7 Grafico dei valori della produzione di fino in seguito alla prova micro-Deval per il RAP D.

4.4 Coefficiente di levigazione

La resistenza alla levigazione è una proprietà dell'aggregato fondamentale per valutare se è idoneo ad essere reimpiegato nello strato di usura. Infatti, minore è la resistenza alla levigazione dell'aggregato e più la sua superficie sarà liscia: quindi presenterà una bassa micro-rugosità che non renderà idoneo l'aggregato per l'uso all'interno di un tappeto d'usura (la rugosità è un parametro essenziale per garantire una buona aderenza durante la guida).

Di seguito sono riportati i valori del PSV (Polished Stone Value) determinati con lo skid tester sia per il RAP D (Figura 4.8) che per il RAP ND (Figura 4.9), per le temperature di -5, 0 e 5 °C mentre con "nn" si intende rappresentare il provino non condizionato

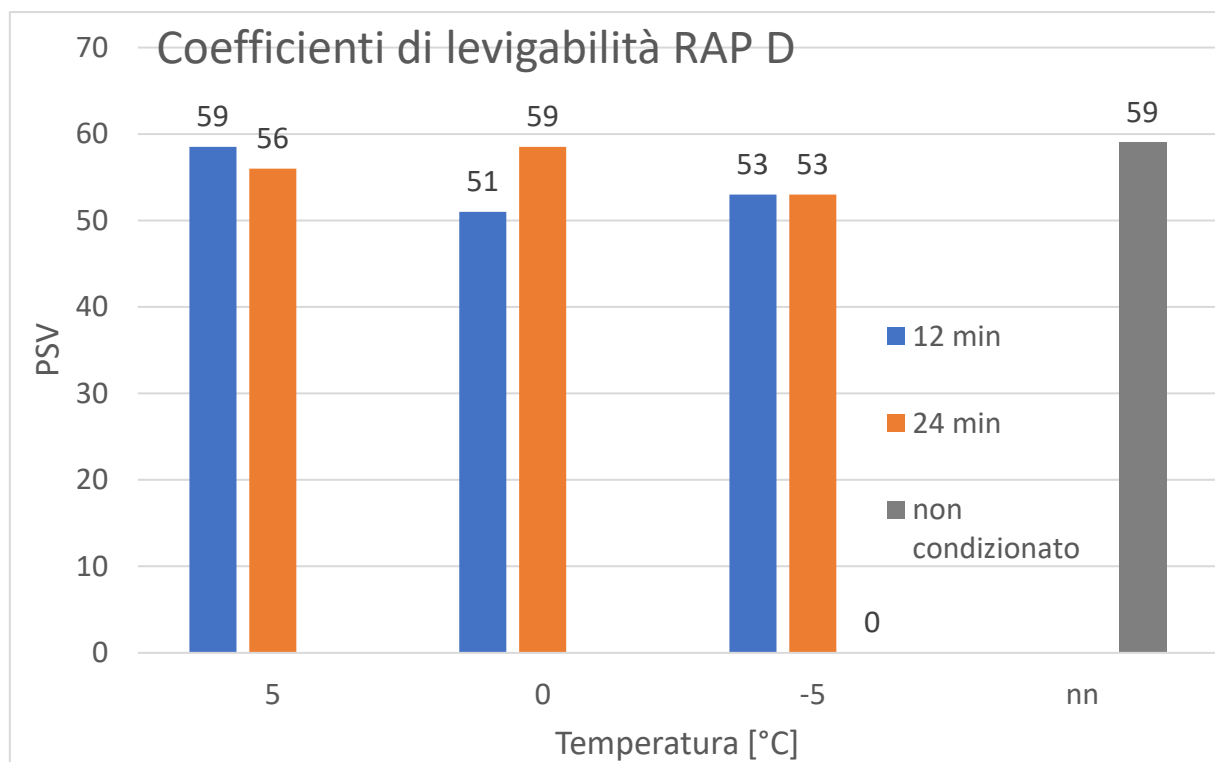


Figura 4.8 Grafico dei valori del coefficiente di levigazione per il RAP D sia a 12 che a 24 minuti per le 3 temperature di prova -5°C, 0°C e 5°C e per il campione non condizionato (colonna grigia)

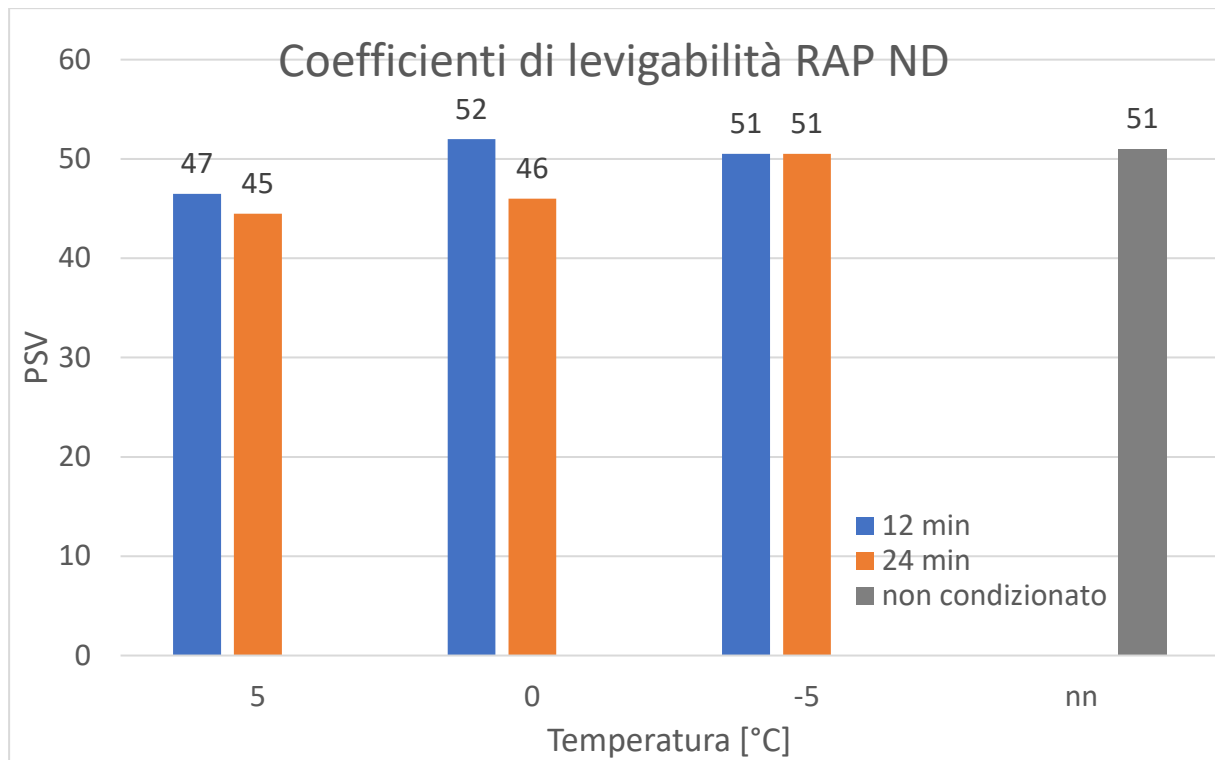


Figura 4.9 Grafico dei valori del coefficiente di levigazione per il RAP ND sia a 12 che a 24 minuti per le 3 temperature di prova -5°C, 0°C e 5°C e per il campione non condizionato (colonna grigia)

Nei grafici sopra (Figura 4.8 e Figura 4.9) i valori della resistenza alla levigazione sono sufficientemente alti per entrambi i materiali. Tuttavia, contrariamente a quanto ci si potesse aspettare, l'aggregato sottoposto a prove di micro-Deval non ha subito una significativa azione levigante della carica abrasiva. Cioè l'aggregato avrebbe dovuto mostrare dei valori di resistenza alla levigazione (cioè dei valori del coefficiente PSV) più bassi rispetto a quelli forniti dall'aggregato non condizionato (colonna grigia).

4.5 Contenuto di legante

Per quanto riguarda le estrazioni di bitume è possibile distinguere il lavoro in due fasi: la prima in cui il materiale non trattato viene sottoposto all'estrazione di bitume, la seconda fase in cui il materiale precedentemente trattato con prova di micro-Deval, viene sottoposto all'estrazione di bitume.

Per quanto riguarda le estrazioni eseguite prima della micro-Deval, si hanno una serie di risultati di seguito esposti.

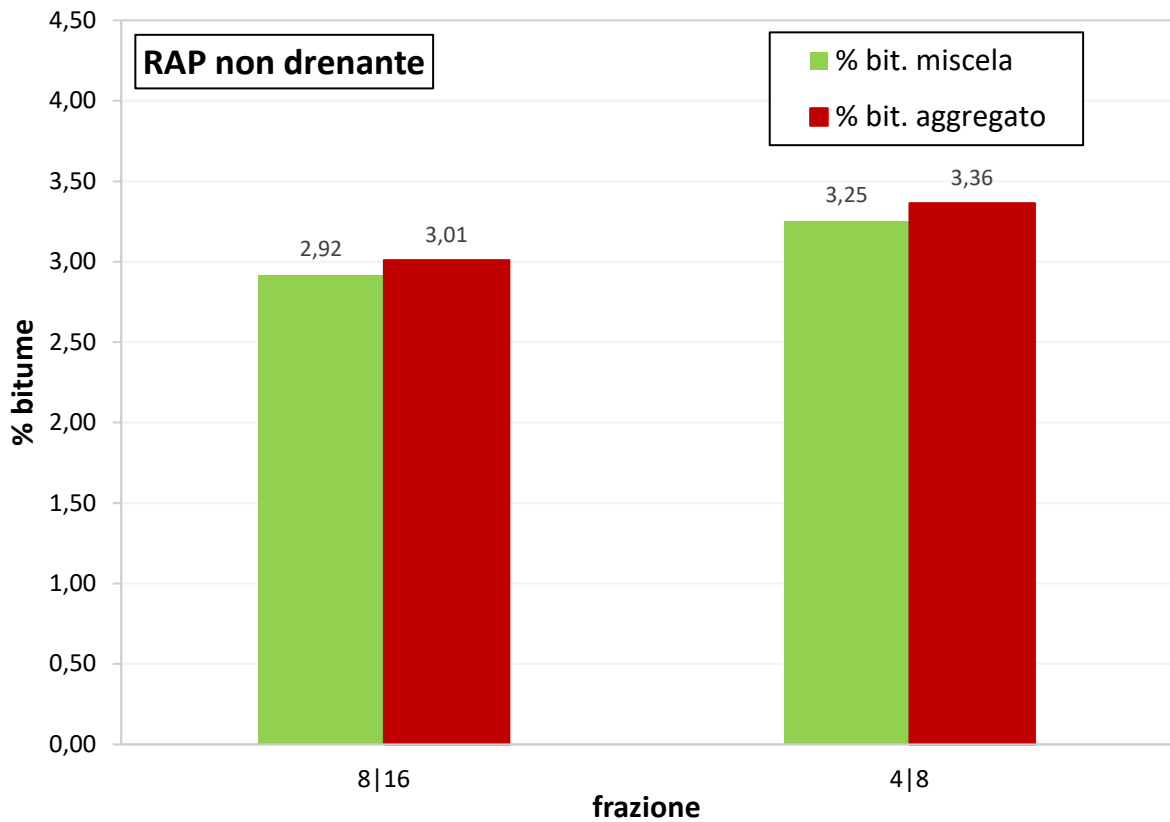
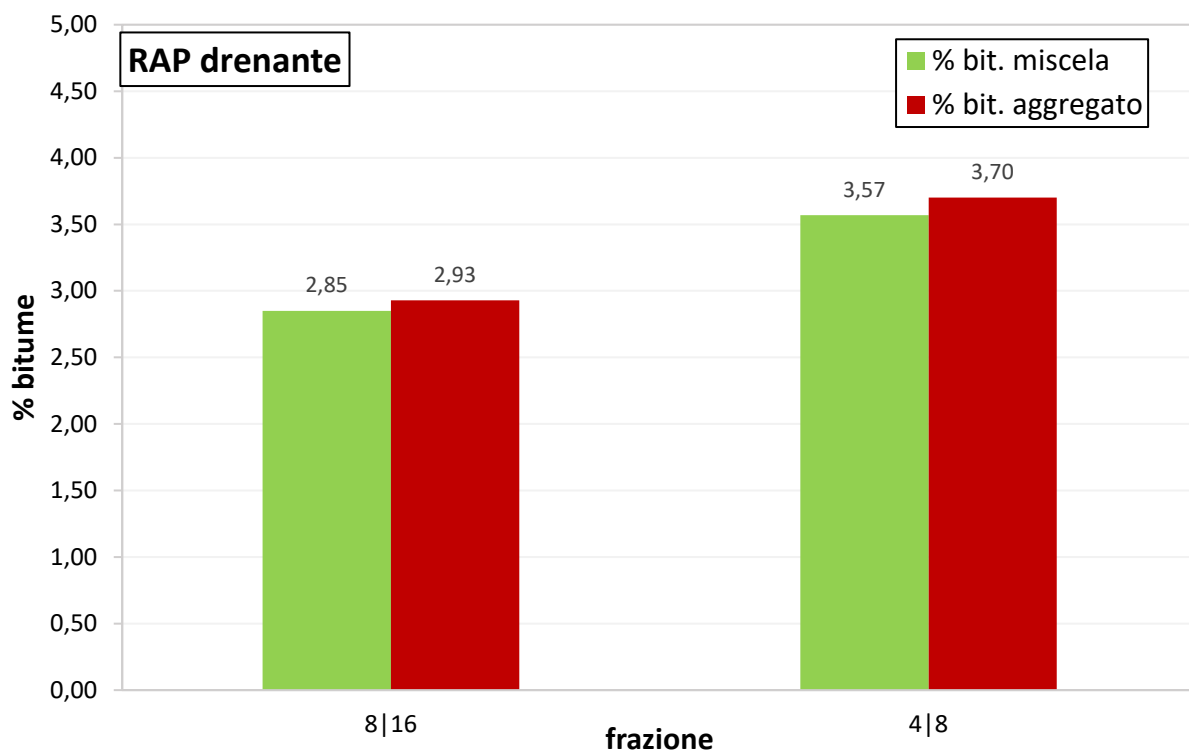


Figura 4.10 Grafico di confronto tra la percentuale di bitume sull'aggregato e sulla miscela per le frazioni 4/8 e 8/16 del RAP ND

Nel grafico sopra (Figura 4.10) abbiamo un confronto tra le percentuali di bitume sulla miscela (colonne in verde) e le percentuali di bitume sull'aggregato (colonne in rosso) per il RAP ND. Effettivamente si vede come la percentuale di bitume calcolata sia sull'aggregato che sulla miscela sia maggiore nella frazione 4/8 piuttosto che in quella 8/16, questo perché dal momento che gli inerti sono più piccoli hanno una superficie specifica maggiore e quindi un più alto contenuto di legante.

Un risultato del tutto simile si ha per il RAP D (Figura 4.11). Per la frazione 4/8 del RAP D i valori percentuali di contenuto di legante sono più alti rispetto a quelli del RAP ND.



4.11 Grafico di confronto tra la percentuale di bitume sull'aggregato e sulla miscela per le frazioni 4/8 e 8/16 del RAP D

In altri grafici sono state messe a confronto le medie delle percentuali di bitume sulla miscela (Figura 4.12) e sull'aggregato (Figura 4.13) per entrambi i materiali (RAP D e RAP ND).

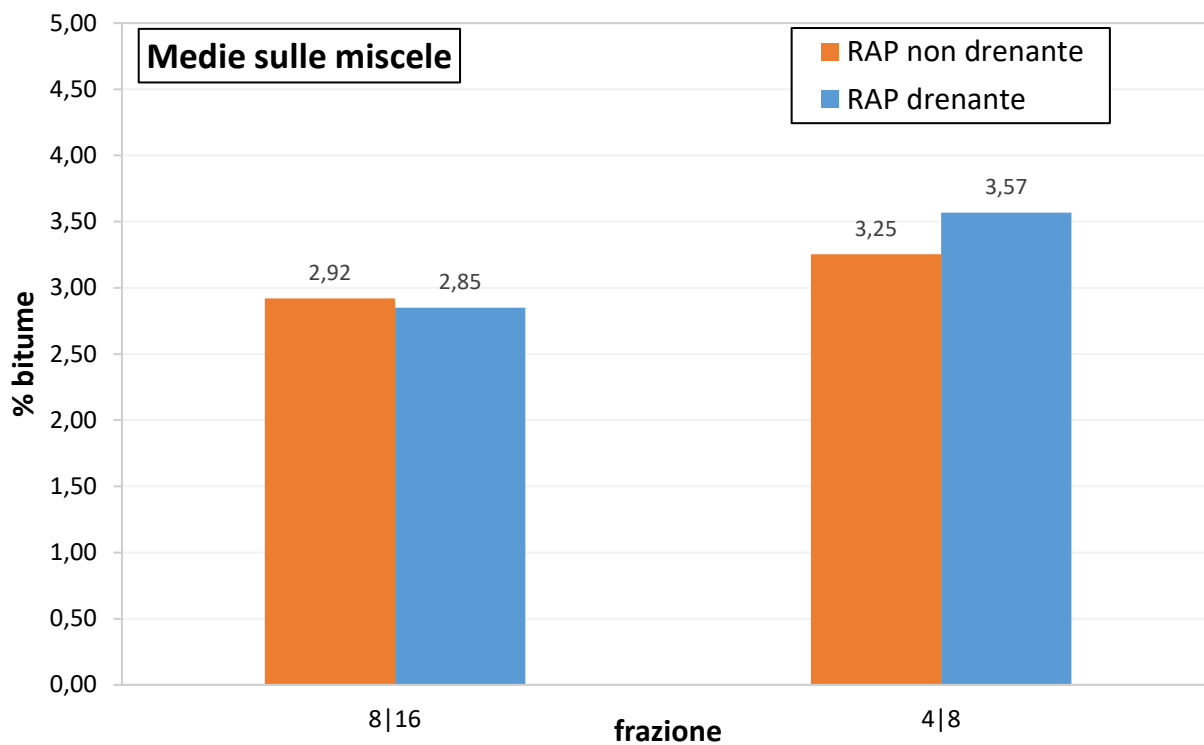


Figura 4.12 Confronto medie sulle miscele per i due materiali RAP D e RAP ND sulle due frazioni 8/16 e 4/8

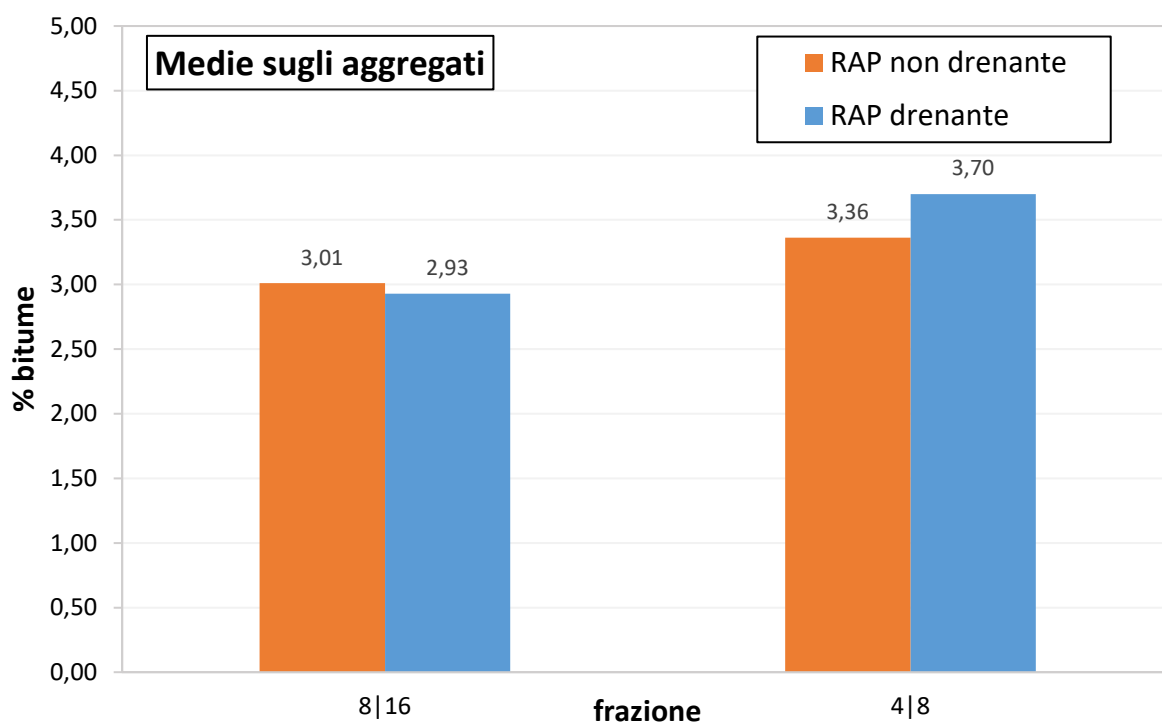


Figura 4.13 Confronto medie sugli aggregati per i due materiali RAP D e RAP ND sulle due frazioni 8/16 e 4/8

Da questi risultati si desume che il RAP D ed il RAP ND hanno un contenuto di bitume maggiore per la frazione 4/8. Inoltre, il RAP D ha un contenuto di bitume maggiore rispetto al RAP ND se si fa riferimento ai risultati delle colonne relative alla frazione 4/8.

Per quanto riguarda le estrazioni di bitume dopo la prova micro-Deval, invece, i grafici sono stati costruiti con la parte dei dati che si è scelto di elaborare ai fini della ricerca.

In questo grafico (Figura 4.14) vengono riportate le percentuali di bitume sia sulla miscela che sull'aggregato per le 3 temperature di prova e un tempo di 12 minuti per il RAP ND.

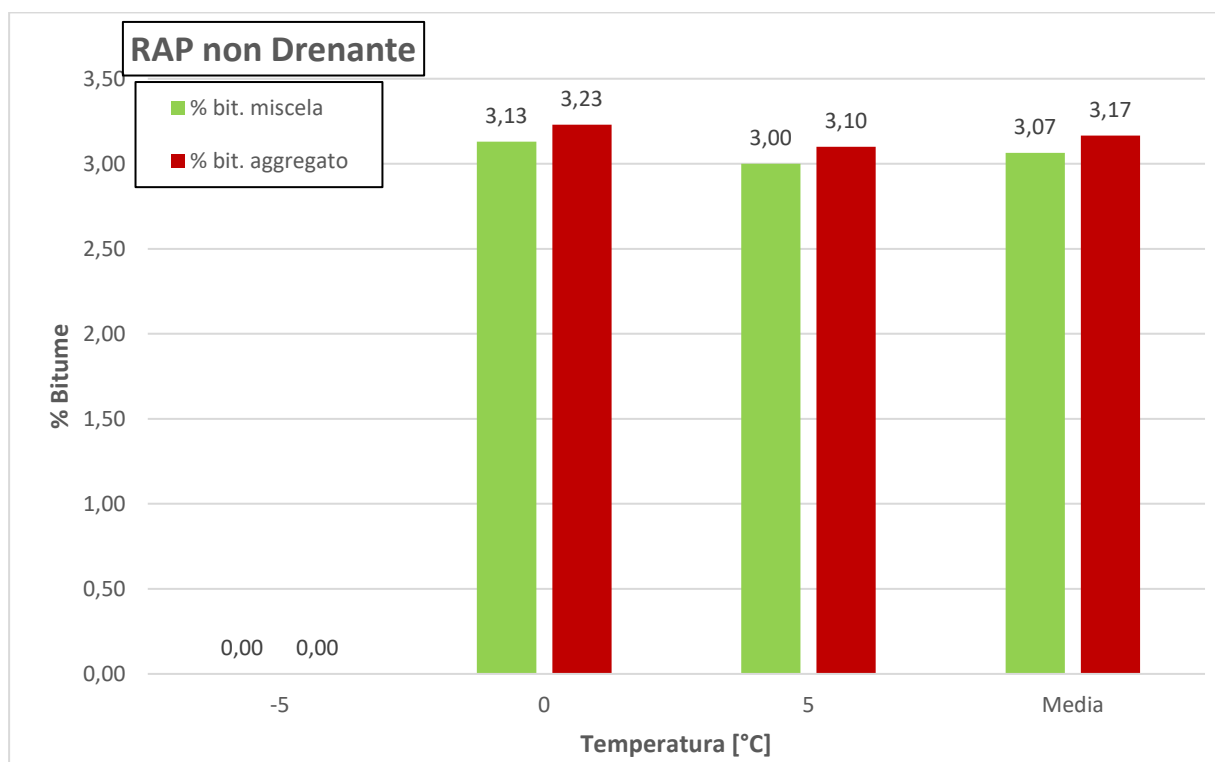


Figura 4.14 Grafico di confronto tra la percentuale di bitume sull'aggregato e quella sulla miscela per le diverse temperature di prova a 12 minuti sul RAP ND; le ultime due colonne a destra mi danno la media.

Lo stesso grafico è stato prodotto per il RAP D con i dati elaborati (Figura 4.15).

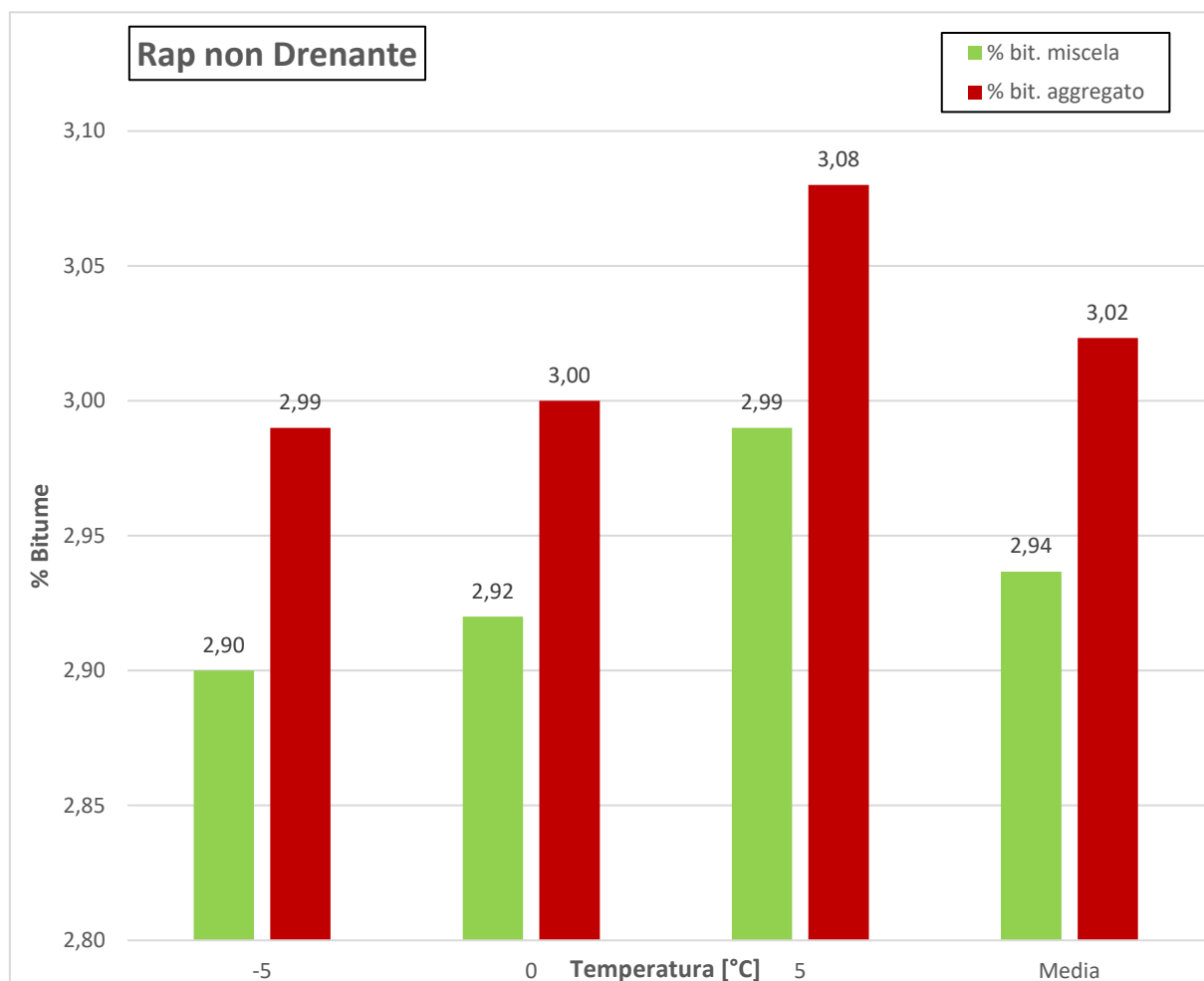


Figura 4.15 Grafico di confronto tra la percentuale di bitume sull'aggregato e quella sulla miscela per le diverse temperature di prova a 12 minuti sul RAP D; le ultime due colonne a destra mi danno la media.

Altri grafici importanti per quanto riguarda le estrazioni post micro-Deval sono i seguenti (Figura 4.16 e Figura 4.17), che riportano le differenze di bitume ("Δbit") prima e dopo la prova micro-Deval, calcolate sempre per le temperature e tempistiche di cui si sono elaborati i dati.

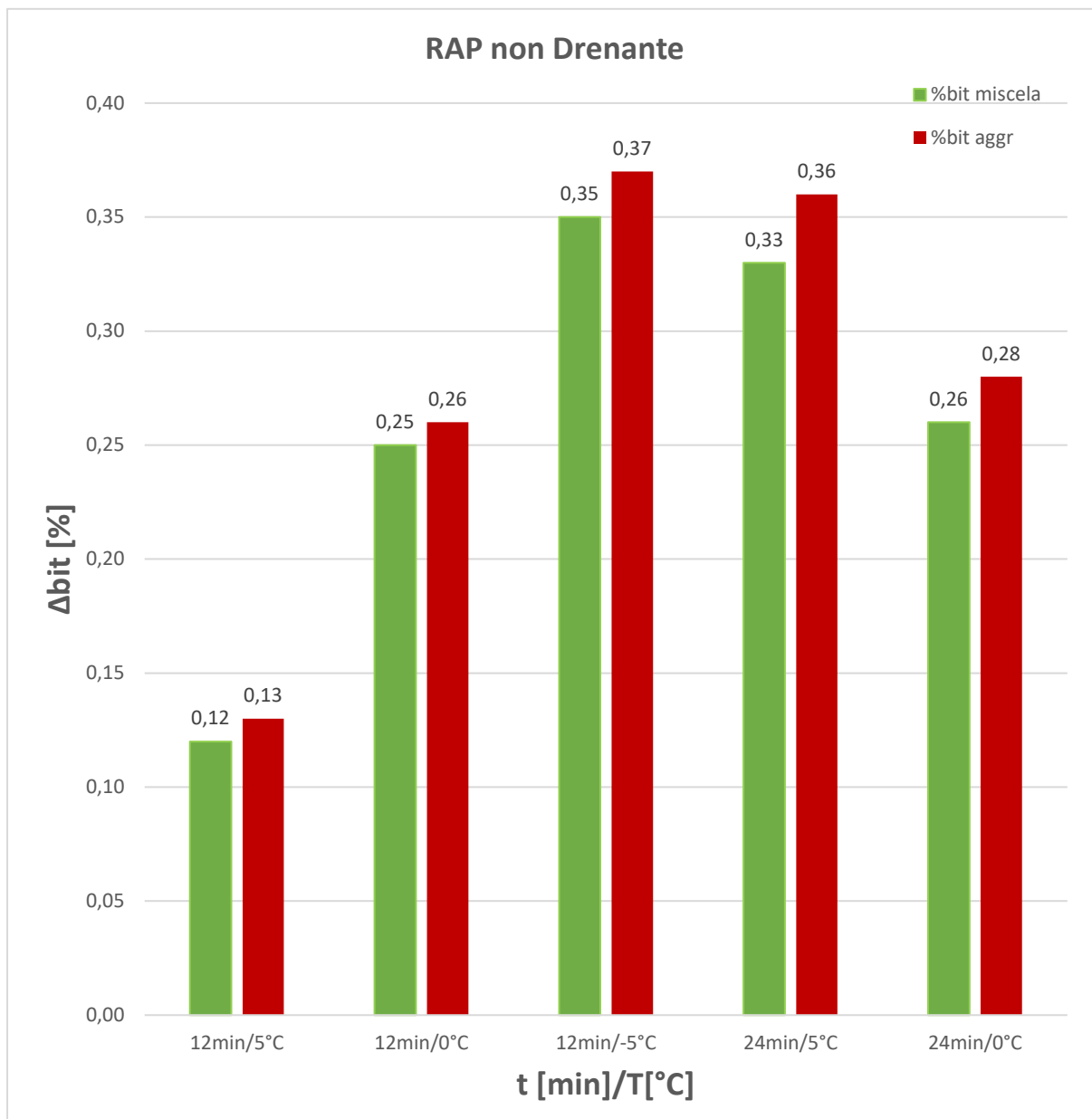


Figura 4.16 Grafico di confronto dei quantitativi di bitume perso in seguito alla prova micro-Deval alle varie temperature e tempistiche di prova per il RAP ND

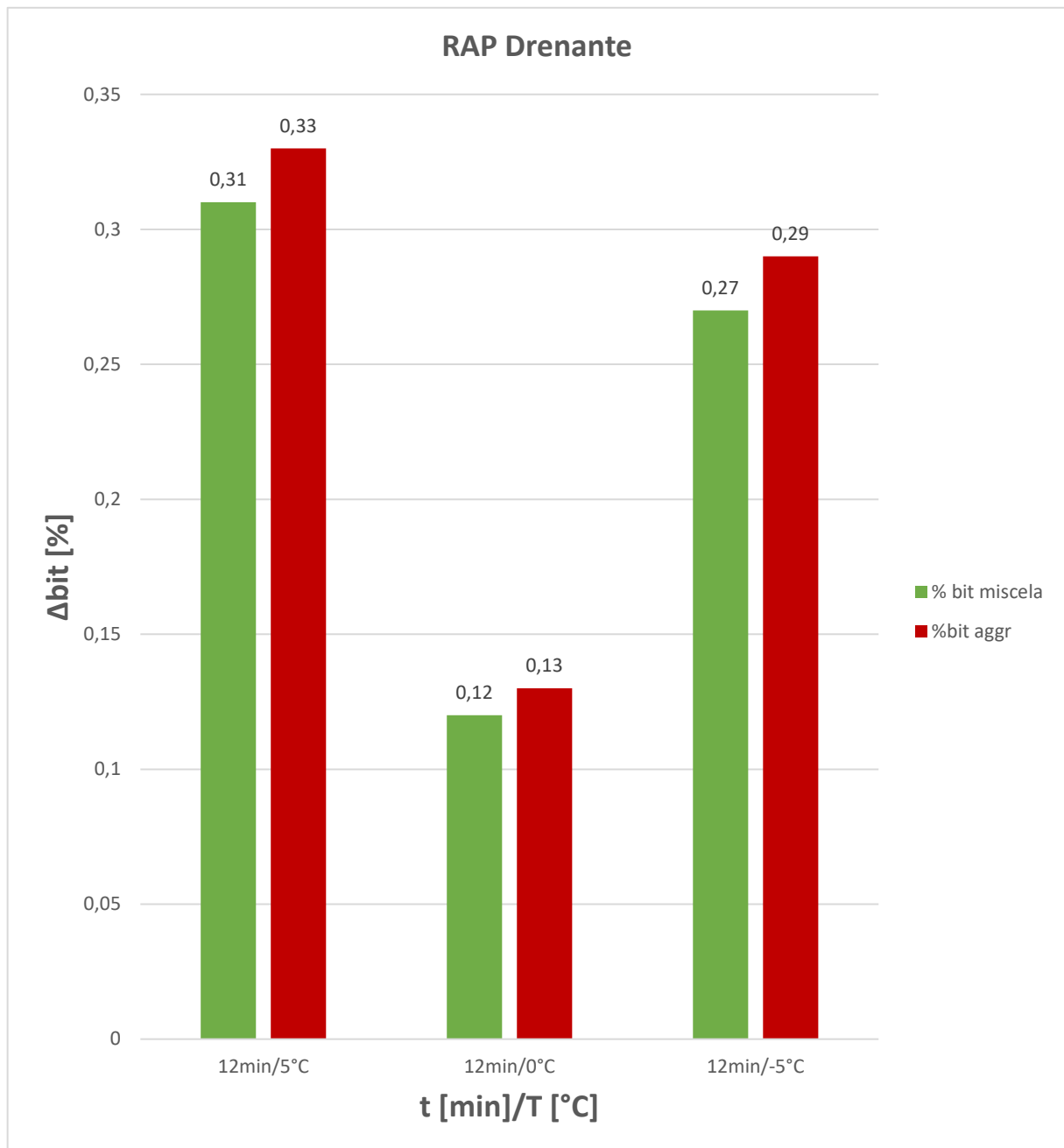


Figura 4.17 Grafico di confronto dei quantitativi di bitume perso in seguito alla prova micro-Deval alle varie temperature e tempistiche di prova per il RAP D

Il risultato, da come ci si aspettava, è quello che il materiale sottoposto a micro-Deval ha un contenuto di bitume inferiore perché parte di questo viene allontanato con il fino prodotto durante la prova. L'unico risultato anomalo è dovuto al fatto che, nonostante la maggior quantità di fino prodotto alla temperatura di 0 °C mediante prova di micro-Deval, alla

medesima temperatura sembrerebbe non esserci il picco anche nella perdita percentuale di bitume rispetto all'aggregato non trattato con prova di micro-Deval. Tale evidenza è riscontrabile sia sui dati a 12 minuti che su quelli a 24 minuti.

Sarebbe utile in futuro prevedere un'ulteriore tempistica di prova (ad esempio di 32 minuti) per verificare se aumentando ulteriormente la durata, si ha una riduzione del contenuto di legante (come è lecito aspettarsi).

CONCLUSIONI

In questo programma sperimentale si sono valutate due tipologie di fresato un RAP ND (conglomerato bituminoso di recupero proveniente da una pavimentazione con strato di usura non drenante) e un RAP D (conglomerato bituminoso di recupero proveniente da una pavimentazione con strato di usura drenante).

Facendo riferimento alle normative citate, entrambi i materiali sono stati oggetto di diverse prove volte alla caratterizzazione fisica e geometrica degli aggregati, alla determinazione della resistenza all'usura e del contenuto di legante. Sono stati poi realizzati dei grafici da cui poter interpretare i dati ricavati dalle tabelle di calcolo.

Tale lavoro, eseguito su entrambi i materiali, ha portato alle seguenti conclusioni:

- Essendo uno degli obiettivi principali della ricerca quello di ricavare le caratteristiche fisiche e geometriche dell'aggregato proveniente da frazioni di RAP, i risultati sperimentali dimostrano come sia possibile riutilizzarlo – eventualmente – in uno strato di usura, poiché ha mostrato una buona resistenza alla levigazione. In particolare, l'aggregato del RAP D essendo tutto costituito da roccia basaltica ha delle caratteristiche fisiche migliori. Inoltre, sono emersi dei risultati soddisfacenti anche per quanto riguarda le caratteristiche geometriche dell'inerte di entrambi i materiali: i valori del flatness index e dello shape index sono bassi, ciò vuol dire che le percentuali di aggregato piatto e allungato sono minime. Ovviamente è importante che il granulo abbia una forma il più possibile cubica, affinché si realizzi una struttura omogenea con una distribuzione regolare dei contatti che si esplicano tra i singoli grani.
- Un altro scopo è stato quello di valutare in un'ottica del tutto innovativa la produzione di fino mediante la prova di micro-Deval: eseguendo la prova sui campioni condizionati in camera climatica a diverse temperature. Per il RAP D è stata individuata la temperatura di 0°C come quella in cui il materiale presenta una resistenza all'usura minore, cioè si ha una maggiore produzione di fino per l'azione della carica abrasiva. Inoltre, essendo state previste due tempistiche di prova, in particolare 12 minuti e 24 minuti, si è visto come la maggior durata della prova ha inciso sull'aumento della produzione di fino per entrambi i materiali.

- Ultimo punto di fondamentale importanza è quello delle estrazioni, le quali hanno evidenziato la presenza di un certo quantitativo di legante, in particolare per il materiale che non ha subito il trattamento della prova micro-Deval, si hanno percentuali di bitume intorno al 3,2% per il RAP ND mentre per il RAP D aumentano sensibilmente fino a valori del 3,7%. Ovviamente il bitume presente nel fresato può essere riusato nella produzione di nuove miscele, andando a ridurre il consumo di bitume di primo impiego, il che comporta un risparmio in termini economici. Per quanto concerne le estrazioni del materiale trattato con la prova di micro-Deval, viene messa in evidenza una riduzione del contenuto di legante rispetto al materiale non trattato. Questo risultato è giustificato dal fatto che con la prova di micro-Deval si produce un certo quantitativo di fino, che contiene in buona parte del bitume che viene eroso per l'abrasione esercitata dalle sfere metalliche sulla superficie del granulo. Dal momento che, la differenza tra il bitume presente nel materiale prima di essere testato e quello presente nel materiale dopo la prova di micro-Deval non ha dato quantitativi di legante maggiori nella prova a 24 minuti rispetto alla prova a 12 minuti, risulta utile, in futuro, prevedere un'ulteriore tempistica di prova (ad esempio a 32 minuti).

Risulta evidente come il RAP sia un materiale avente determinate caratteristiche che gli consentono di essere reimpiegato all'interno del ciclo produttivo delle pavimentazioni stradali, anziché essere considerato come un rifiuto. Molti degli studi sperimentali recenti hanno come obiettivo quello di incrementare i quantitativi di fresato nella produzione di nuove miscele, dal momento che nei depositi vi è una grande quantità di materiale in attesa di trovare un possibile reimpiego. In conclusione, quindi, questa tesi di Ricerca ha voluto mettere ulteriormente in evidenza le peculiarità di questo materiale, al fine di incentivarne il riutilizzo nelle applicazioni stradali.

BIBLIOGRAFIA

- [1] https://it.wikipedia.org/wiki/Analisi_del_ciclo_di_vita
- [2] Use of Reclaimed Asphalt in Porous Asphalt Mixtures: Laboratory and Field Evaluations di F. Frigio; E. Pasquini; M. N. Parti e F. Canestrari, 2015
- [3] Regolamento recante disciplina della cessazione della qualifica di rifiuto di conglomerato bituminoso ai sensi dell'articolo 184-ter, comma 2 del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152.
- [4] Quaderni tecnici per la salvaguardia delle infrastrutture "Volume V", ANAS, 2019
- [5] Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement" di G. Valdés, F. Pérez, R. Miró, A. Martínez e R. Botella, 2010
- [6] In Plant Production of Hot Recycled Mixtures with High Reclaimed Asphalt Pavement Content: A Performance Evaluation" di A. Stimilli, A. Virgili, F. Giuliani e F. Canestrari
- [7] "Laboratory Investigation of Mixing Hot-Mix Asphalt with Reclaimed Asphalt Pavement" di B. Huang, G. Li, D. Vukosavljevic, X. Shu e B. K. Egan, 2005
- [8] "Testing of Reclaimed Asphalt Model Systems for the Evaluation of the Effectiveness of Rejuvenators" di D. Dalmazzo, L. Urbano, P. P. Riviera e E. Santagata
- [9] "International Evaluation of the Performance of Warm Mix Asphalts with High Reclaimed Asphalt Content" di P. Marsac, E. Bocci, F. Cardone, A. Cannone Falchetto, X. Carbonneau, M. Zaumanis, A. Carter, M. C. Rubio-Gámez, M. Del Sol Sánchez, E. V. Dave, G. Tebaldi
- [10] "Performance evaluation of a cold-recycled mixture containing high percentage of reclaimed asphalt" redatto da A. Stimilli, G. Ferrotti, A. Graziani e F. Canestrari, 2013
- [11] UNI EN 933-3, Tests for geometrical properties of aggregates Determination of particle shape. Flakiness index, 2004
- [12] UNI EN 933-4, Tests for geometrical properties of aggregates - Part 4: Determination of particle shape - Shape index, 2008
- [13] UNI EN 1097-1, Tests for mechanical and physical properties of aggregates Determination of the resistance to wear (micro-Deval), 2011

[14] UNI EN 1097-8, Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 8:
Determination of the polished stone value, 2020

[15] UNI EN 12697-28, Bituminous mixtures - Test methods - Part 28: Preparation of samples for
determining binder content, water content and grading, 2020

[16] UNI EN 933-1, Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle
size distribution - Sieving method, 2012