



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**  
**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

---

Corso di Laurea magistrale in **Ingegneria Civile**

**Analisi prestazionale innovativa di miscele drenanti per  
pavimentazioni autostradali più sicure e resilienti**

**Innovative performance analysis of open graded mixtures for safe and  
more resilient motorway pavements**

Relatore: Chiar.mo/a

Prof. Ing. **Canestrari Francesco**

Tesi di Laurea di:

**Scarponi Andrea**

Correlatore: Chiar.mo/a

Ing. **Spadoni Sara**

**A.A. 2022 / 2023**

# Sommario

1. INTRODUZIONE .....	4
2. STATO DELL'ARTE .....	6
2.1. Strato di usura drenante .....	10
2.2. Prova Cantabro .....	16
2.3. Darmstadt Scuffing Device .....	20
3. MATERIALI E METODI DI PROVA .....	27
3.1. Conglomerati bituminosi porosi .....	27
3.1.1. Materiale A_Arezzo .....	27
3.1.2. Materiale B_Magliano Sabina .....	31
3.1.3. Materiale C_Andria .....	34
3.1.4. Materiale D_Marcianise .....	37
3.1.5. Materiale E_Loreto .....	40
3.1.6. Materiale F_Magliano RA .....	43
3.1.7. Materiale G_Marcianise RA .....	47
3.1.8. Materiale H_Rimini .....	51
3.2. Strumenti e macchinari utilizzati .....	54
3.2.1. Estrattore .....	54
3.2.2. Vibrovaglio .....	55
3.2.3. Forni di laboratorio .....	57
3.2.4. Bagno termostatico .....	58
3.2.5. Roller Sector Compactor .....	59
3.2.6. Compattatore Marshall .....	64
3.2.7. Darmstadt Scuffing Device .....	69
3.2.8. Prova Cantabro .....	74
3.3. Programma sperimentale .....	76
3.4. Analisi statistica dei dati .....	77
4. RISULTATI E DISCUSSIONE .....	79
4.1. Dati sperimentali delle miscele analizzate .....	79
4.1.1. Prove Cantabro .....	79
4.1.2. Prove con Darmstadt Scuffing Device (DSD) .....	81
4.2. Confronto valori di sgranamento delle varie miscele .....	82
4.2.1. Prove Cantabro .....	82
4.2.2. Prove con Darmstadt Scuffing Device (DSD) .....	83
4.3. Correlazioni tra i valori di sgranamento e il contenuto di vuoti .....	88

4.3.1. Prove Cantabro .....	88
4.3.2. Prove con Darmstadt Scuffing Device .....	92
4.4. Confronto risultati Cantabro – DSD .....	93
5. CONCLUSIONE.....	97
6. APPENDICE.....	99
BIBLIOGRAFIA .....	121
NORME .....	123
SITOGRAFIA .....	124

# 1. Introduzione

Ai giorni d'oggi, ancora una gran parte dei trasporti avviene su strada, dunque, la sicurezza è un elemento fondamentale per un livello di marcia confortevole. Tale sensazione di guida va garantita in tutte le tipologie di strade: dalle meno importanti a quelle di categoria A (Autostrade Urbane e Extraurbane) dove le velocità consentite sono elevate. Si ricorda che una buona percentuale dei sinistri stradali è dovuta alla strada stessa che è soggetta a continui fenomeni di degrado il che può comportare anche una riduzione della vita utile della pavimentazione; quindi, è molto importante avere un manto stradale regolare e funzionante. Per fronteggiare tali difetti si sta cercando di mettere a punto nuove tipologie di pavimentazioni sempre più sicure e resilienti. Con il primo termine si intende garantire confort di marcia in ogni condizione di percorrenza e quindi ricercare sovrastrutture stradali in grado di allontanare l'acqua evitando il cosiddetto fenomeno dell'aquaplaning. Con il termine resilienti invece, si intendono pavimentazioni che nonostante i ripetuti passaggi del carico dovuto ai vari veicoli che transitano su di esse ritornano alla loro originale conformazione limitando così fenomeni come fessurazione o ormaiamento. Focalizzando l'attenzione sulle autostrade italiane esse hanno tipicamente un pacchetto strutturale composto da diversi strati e, andando sempre più nello specifico, lo strato maggiormente interessato a tali fenomeni è quello più superficiale, detto anche strato di usura. Il materiale costituente tale strato è un conglomerato bituminoso aperto, ovvero con un contenuto di vuoti elevato al fine di far defluire l'acqua nel minor tempo possibile. L'usura, oltre a questo compito, deve resistere alle azioni di taglio generate dagli pneumatici dei veicoli in transito evitando la formazione di buche con gravi conseguenze sulla circolazione.

L'oggetto di studio della tesi, infatti, è un'analisi sperimentale avanzata su conglomerati bituminosi aperti per strati di usura drenanti autostradali. Tali miscele avendo un'elevata percentuale di vuoti sono maggiormente soggette al fenomeno dello sgranamento che si verifica al passare dello pneumatico. Questo aspetto è fondamentale dal punto di vista della sicurezza di una pavimentazione autostradale perché in quelle determinate tipologie di strade si hanno velocità di percorrenza notevoli e quindi un maggior degrado potrebbe comportare sinistri fatali. Inoltre, un'altra caratteristica che la pavimentazione autostradale deve mantenere è la capacità di allontanare l'acqua in modo rapido, il che con uno strato di usura drenante è garantito se e solo se quest'ultimo non fosse degradato. Quindi, con vari i fenomeni meteorici che si verificano negli ultimi anni, sempre più intensi e di breve durata, la pavimentazione deve essere in grado di smaltire grossi quantitativi di acqua e allo stesso tempo garantire una buona aderenza e una sicura percorrenza della strada stessa. Si cerca quindi di introdurre nella produzione miscele sempre più prestazionali composte da materiali innovativi e se possibile anche eco-friendly: ad esempio leganti bitumi modificati con fibre naturali, quantitativi maggiori di conglomerato bituminoso riciclato e la produzione di miscele in modalità tiepida al fine di abbattere le emissioni inquinanti dovute alle alte temperature di produzione e stesa.

Nella seguente tesi sono state quindi sottoposte a delle prove di laboratorio innovative alcune miscele drenanti fornite dalla società Amplia Infrastructures S.p.A. ai fini di verificare quale fossero le loro resistenze allo sgranamento. Tutte le miscele sono state prodotte in impianto e successivamente confezionate per essere poi spedite presso il Laboratorio di Strade e Trasporti dell'UnivPM. Con tali materiali verranno compattati dei provini che andranno poi sottoposti a due modalità di prova che misurano lo sgranamento e dunque la suscettibilità che ogni tipologia di miscela ha verso questo fenomeno sia nel caso in cui la pavimentazione fosse asciutta che nel caso in cui fosse bagnata. La prima modalità con la quale si eseguono le prove è quella standardizzata dalla normativa europea ai fini dell'individuazione del quantitativo di particelle di un conglomerato bituminoso poroso. Si tratta della prova Cantabro, permette di individuare la perdita percentuale di conglomerato del provino analizzato. Successivamente i risultati andranno confrontati con quelli ricavati da un altro macchinario, non molto diffuso in Italia e con una normativa non ancora del tutto completa (i. e. non si conosce la ripetibilità e la riproducibilità della prova in quanto ancora in fase di sperimentazione) ma molto più realistico. Tale macchinario prende il nome dalla Technical University di Darmstadt che lo ha messo appunto per valutare lo sgranamento dei conglomerati bituminosi porosi ed è chiamato Darmstadt Scuffing Device, DSD. Permette di effettuare una prova simulando manovre di sterzata, frenatura e accelerazione tramite uno pneumatico che esegue rotazioni e traslazioni sulla piastra testata. Si individueranno quindi due valori di sgranamento che verranno confrontati al fine di individuare la presenza o meno di una correlazione tra i due macchinari.

## 2. Stato dell'arte

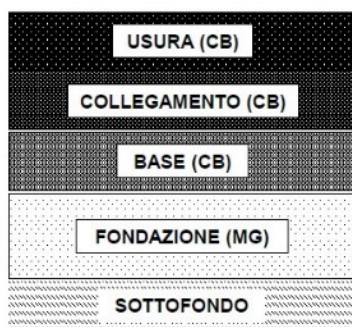
La pavimentazione stradale (detta anche sovrastruttura) è la struttura che poggia sul terreno del rilevato o, in trincea, su quello in sito, direttamente interessata dal moto dei veicoli. Essa è una struttura piana, costituita da strati sovrapposti di materiali e spessori differenti aventi le seguenti funzioni fondamentali:

- Trasmettere e distribuire i carichi veicolari al sottofondo;
- Resistere al degrado strutturale dovuto ai carichi ciclici combinati con le azioni di natura termica;
- Garantire regolarità e aderenza del piano viabile (condizioni di sicurezza e comfort di marcia);
- Proteggere il sottofondo dalle azioni dell'acqua e del gelo.

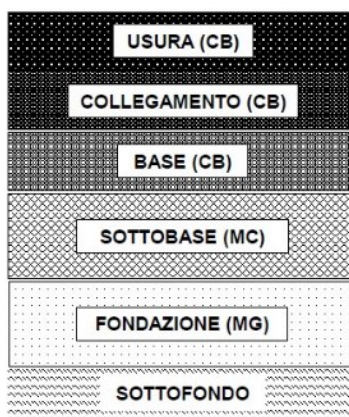
Le tipologie di pavimentazioni stradali sono principalmente tre, come mostrato in Fig. 2.1 e composte dai seguenti materiali costituenti i vari strati: conglomerato bituminoso (CB), misto granulare (MG), calcestruzzo (CLS) e misto cementato (MC).

La differenza tra queste tipologie di pavimentazioni, oltre ad essere composte da materiali diversi, sta nella distribuzione dei carichi e nei loro campi di utilizzo. Un materiale rigido si deforma meno a parità di carico e dunque una pavimentazione composta con tali materiali avrà una distribuzione delle pressioni sul sottofondo maggiore rispetto ad una pavimentazione flessibile. Quest'ultima è quindi, la più diffusa in Italia in cui gli strati sono legati solo a bitume. Quella semirigida, invece, è utilizzata nella viabilità principale dove la presenza dei mezzi pesanti è molto rilevante. La pavimentazione rigida infine è poco diffusa in Italia e presente soprattutto nei piazzali aeroportuali.

**Pavimentazione flessibile tradizionale**



**Pavimentazione semi-rigida**



**Pavimentazione rigida**

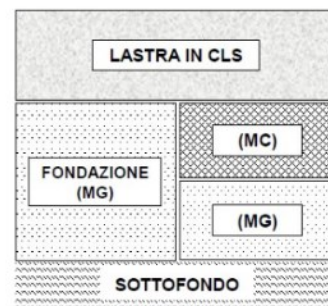


Figura 2.1. Tipologie di pavimentazioni stradali

La trasmissione dei carichi veicolari varia in base alla rigidità della sovrastruttura che è a sua volta funzione dello spessore degli strati e del tipo di materiale utilizzato. Si possono quindi individuare due principali metodologie di distribuzione degli sforzi visibili in Fig. 2.2.

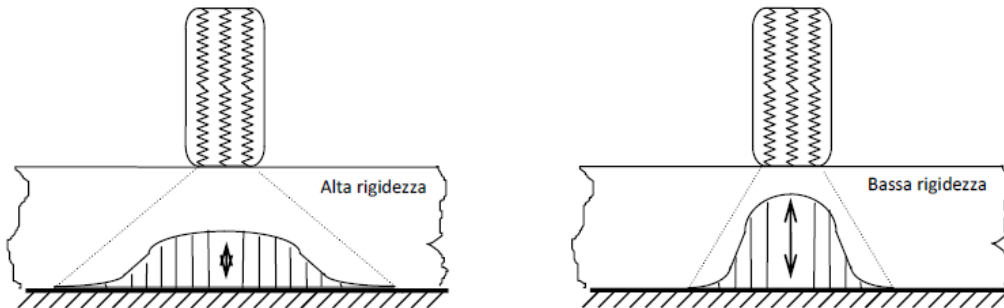


Figura 2.2. Distribuzione dei carichi veicolare nelle pavimentazioni

In ambito autostradale, si tiene conto soprattutto della pavimentazione flessibile tradizionale composta da strati in conglomerato bituminoso sovrapposti ad altri in misto granulare poggianti su un sottofondo avente una buona portanza.

La tipica stratigrafia di una pavimentazione autostradale è mostrata in Fig. 2.3.

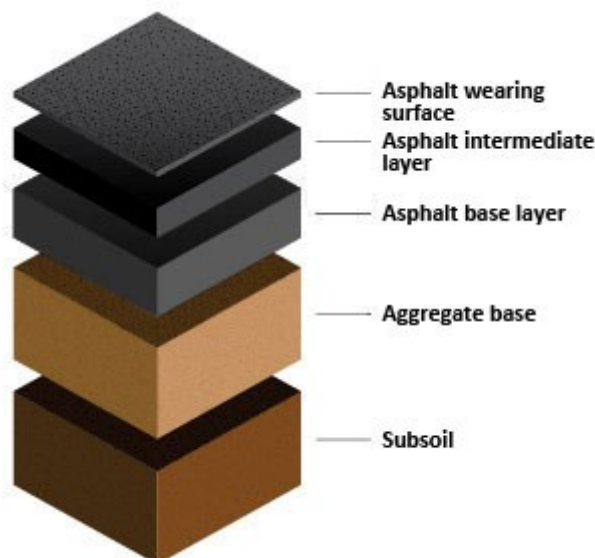


Figura 2.3. Stratigrafia pavimentazione autostradale ([www.vaasphalt.org](http://www.vaasphalt.org))

Gli spessori presenti nel “Catalogo delle pavimentazioni stradali” (L. Domenichini et al., 1993) sono rispettivamente riportati in Fig. 2.4 – 2.5 solamente per le autostrade extraurbane, ovvero appartenenti alla categoria A, secondo la classificazione del Nuovo Codice della Strada e del CNR. Si riportano di seguito gli spessori standard per le pavimentazioni con gli strati superficiali in conglomerato bituminoso, che sono principalmente influenzati dalla portanza del terreno di sottofondo (valutato tramite il modulo resiliente) e il livello di traffico a cui la pavimentazione è soggetta in esercizio.

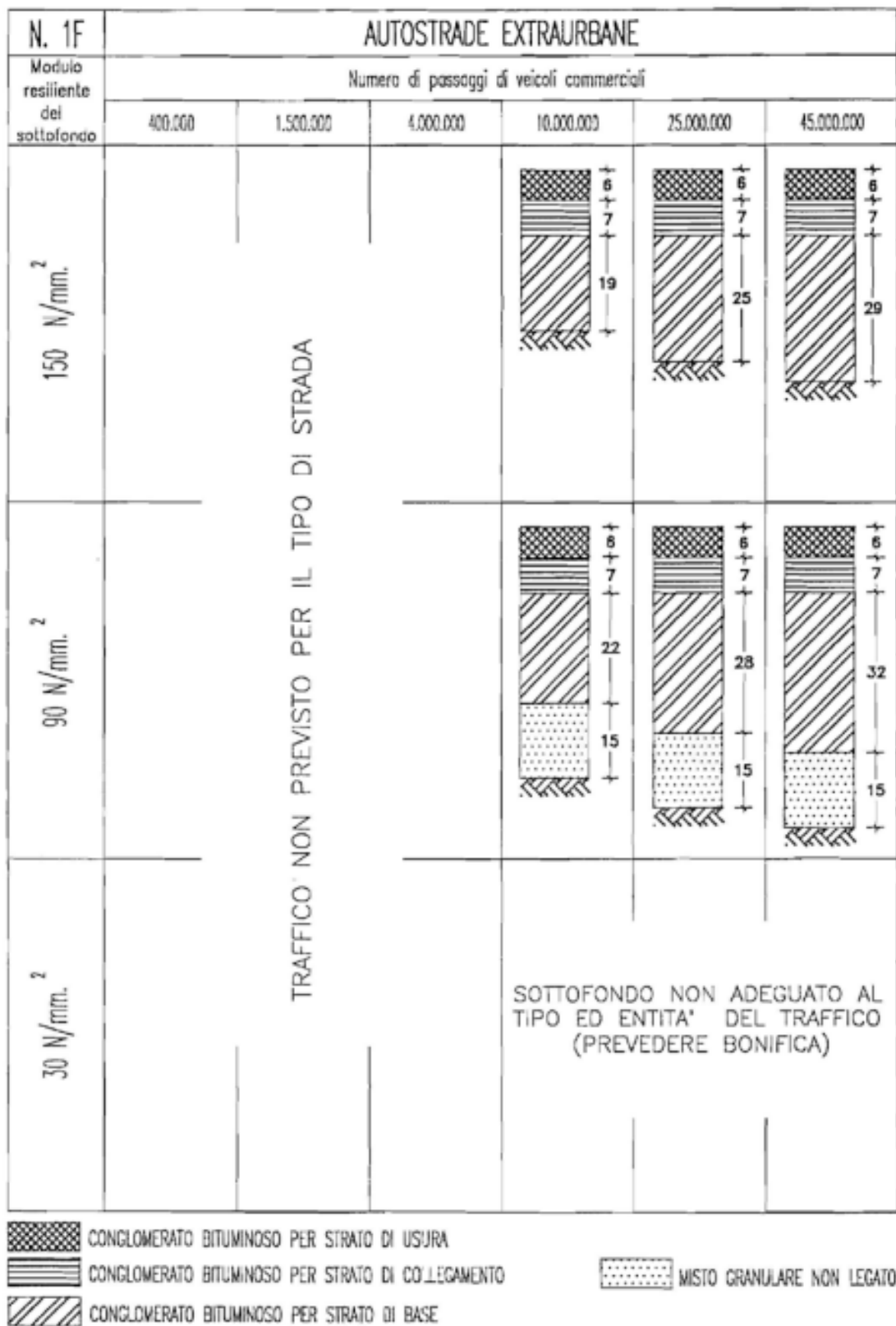


Figura 2.4. Spessori standard per Autostrade Extraurbane Flessibili



N. 1SR		AUTOSTRAD E EXTRAURBANE					
Modulo resiliente del sottofondo	Numero di passaggi di veicoli commerciali						
	400.000	1.500.000	4.000.000	10.000.000	25.000.000	45.000.000	
150 N/mm. <sup>2</sup>	TRAFFICO NON PREVISTO PER IL TIPO DI STRADA						
90 N/mm. <sup>2</sup>							
30 N/mm. <sup>2</sup>							
90 N/mm. <sup>2</sup>	TRAFFICO NON PREVISTO PER IL TIPO DI STRADA						
30 N/mm. <sup>2</sup>							
30 N/mm. <sup>2</sup>							
30 N/mm. <sup>2</sup>	SOTTOFONDO NON ADEGUATO AL TIPO ED ENTITA' DEL TRAFFICO (PREVEDERE BONIFICA)						



NB. Gli spessori sono indicati in cm.

Figura 2.5. Spessori standard per Autostrade Extraurbane Semi Rigide

Attualmente, in ambito italiano, il convenzionale pacchetto autostradale è formato da pavimentazioni flessibili o semi-rigide. In entrambi i casi, la peculiarità risiede nell'impiego di conglomerato bituminoso per il confezionamento degli strati legati del pacchetto strutturale (i.e. base, binder e usura). Essi poggiano sullo strato di fondazione che ripartisce i carichi nel terreno di appoggio detto sottofondo. In funzione delle particolari condizioni contingenti (carichi di traffico e condizioni ambientali) ogni pavimentazione avrà caratteristiche differenti in termini di numero di strati, materiali impiegati e spessori. Dato che i materiali costituenti gli strati superficiali della sovrastruttura sono molto costosi allora si punta a risparmiare risorse realizzando a regola d'arte un ottimo terreno di sottofondo.

## 2.1. Strato di usura drenante

L'elemento della pavimentazione a diretto contatto con lo pneumatico è lo strato più superficiale chiamato tappeto di usura (wearing course). Esso deve garantire regolarità del piano viabile e un'ottima aderenza tra pneumatico e pavimentazione per un periodo di tempo sufficientemente lungo (8-10 anni).

Questi requisiti sono utili al fine di permettere il transito dei veicoli in sicurezza sia in caso di pavimentazione bagnata che asciutta. Il veloce deflusso delle acque meteoriche è particolarmente fondamentale nelle pavimentazioni autostradali, poiché il velo idrico sulla superficie provocherebbe pericolosi fenomeni di aquaplaning a causa delle alte velocità di percorrenza con perdita di aderenza. Per garantire tale funzionalità, si ricorre spesso a uno strato di usura composto da conglomerato bituminoso drenante (aperto), cioè, caratterizzato da un tenore di vuoti capace di drenare istantaneamente l'acqua.

Inoltre, per assicurare un'elevata aderenza, tale materiale deve possedere un'elevata macrorugosità superficiale che si ottiene andando ad utilizzare una miscela poco ricca di sabbia e con aggregati di dimensioni monogranulari. A differenza dei conglomerati bituminosi chiusi, i drenanti consentono di smaltire l'acqua meteorica che si accumula sulla superficie con grossi vantaggi in termini di sicurezza. In questo modo si evitano conseguenze disastrose dato che in tali tipologie di strade sono consentite le percorrenze ad alte velocità (I Quaderni Tecnici per la salvaguardi delle infrastrutture, ANAS Volume V, febbraio 2019) e visto anche che i fenomeni meteorologici intensi e di breve durata sono sempre più frequenti.

Di seguito si riportano alcuni dati sperimentali di letteratura che mostrano il confronto delle durabilità tra i conglomerati bituminosi porosi e i conglomerati bituminosi chiusi. In Fig. 2.6 si individua la distribuzione delle fessure e i periodi nel quale vengono a verificarsi rispettivamente nei conglomerati drenanti (porous asphalt concrete - PAC) e nei conglomerati chiusi (dense asphalt concrete - DAC) individuando anche il periodo di intervento (H. Wu et al., 2020). Dal seguente grafico è stato dedotto che, a parità del livello di sgranamento, nei conglomerati porosi la fessurazione avviene prima al livello temporale (intorno ai sei anni di servizio) rispetto a quelle chiusi,

incrementando così anche i costi di manutenzione. Inoltre, si evidenzia il fatto che nei PAC la fessurazione aumenta in modo più che proporzionale nel tempo.

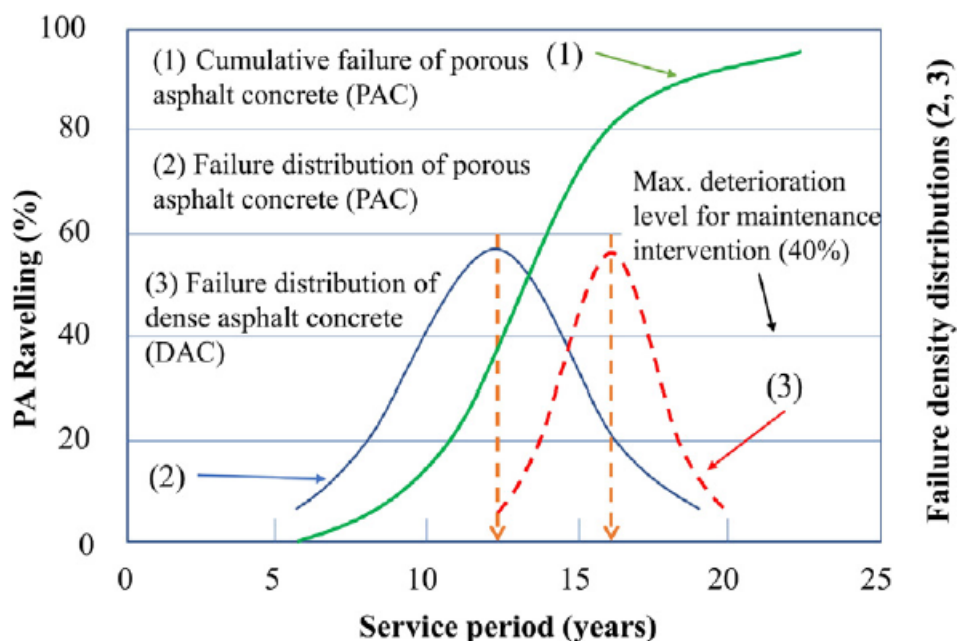


Figura 2.6. grafico schematico delle prestazioni dei conglomerati (H. Wu et al., 2020)

Per quanto riguarda le caratteristiche di drenaggio dei seguenti conglomerati porosi (Open Graded Friction Course (OGFC) pavement), si è visto che nelle l'acqua viene velocemente allontanata e la visibilità aumenta notevolmente soprattutto nei giorni piovosi avendo un deflusso migliore rispetto ai Dense Graded Asphalt (DGA). La Tab. 2.1 mostra anche la riduzione di inquinanti dovuta all'utilizzo delle OGFC pavements aventi una porosità minima del 18% e una permeabilità minima di 100 m/day secondo le norme ASTM (H. Wu et al., 2020).

Pollutant	Reduction (%)
Total Suspended Solids	91
Total Kjeldahl Nitrogen	2
Total Phosphorus	35
Total Copper	47
Total Lead	90
Total Zinc	75
Dissolved Zinc	30

Tabella 2.1 Riduzione degli inquinanti dovuti alle acque piovane (H. Wu et al., 2020)

Un ulteriore vantaggio degli OGFC è la riduzione del rumore dato dall'interazione tra pneumatico e pavimentazione grazie alla loro porosità. I principali fattori che influenzano la rumorosità sono due: la tessitura ruvida che aumenta la vibrazione dello pneumatico incrementando così il rumore di rotolamento e le caratteristiche di assorbimento acustico dello strato stesso. In generale, minore è la

profondità della macrotestitura e minore è il rumore della pavimentazione. Tuttavia, quando la macrostruttura è troppo bassa, i livelli di rumore aumenteranno a causa del pompaggio dell'aria all'interfaccia pneumatico/pavimentazione.

Sono state fatte anche delle analisi costi/benefici riguardanti la produzione e l'utilizzo dei OGFC e Non-OGFC analizzando la produzione e posa in opera di queste miscele in diverse sezioni stradali in Tennessee e si è dedotto che l'utilizzo degli OGFC risulta conveniente. Infatti, come mostrato in Fig. 2.7, si nota che gli OGFC stesi in diverse sezioni stradali tendono a ridurre mediamente gli incidenti sia sotto condizioni di pavimentazioni asciutte che in condizioni di pavimentazioni bagnate (H. Wu et al., 2020).

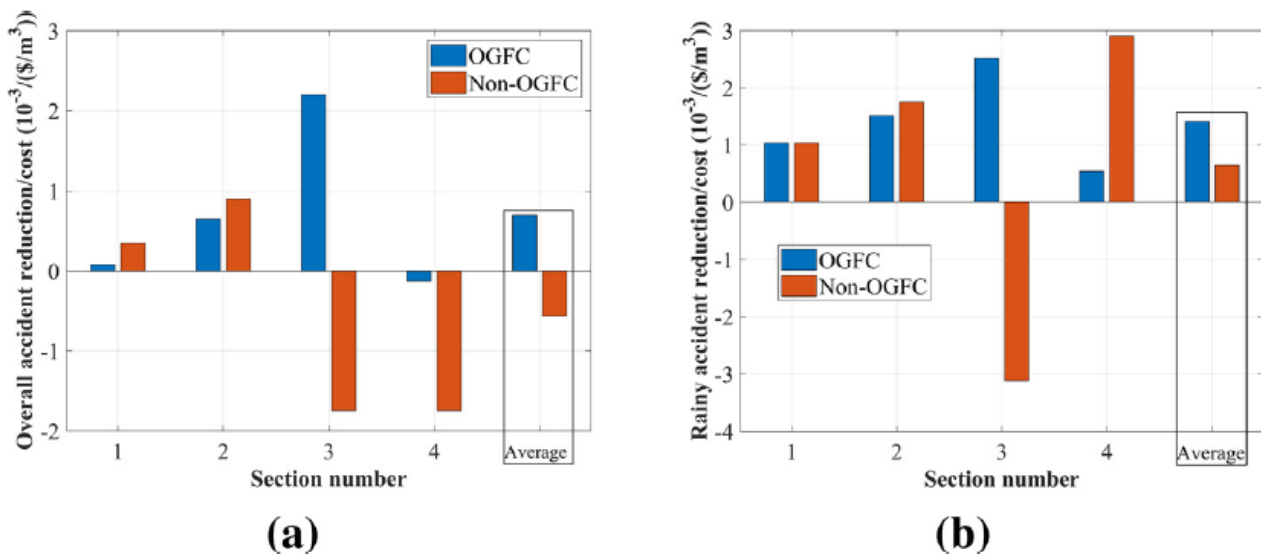


Figura 2.7. Analisi costi-benefici (H. Wu et al., 2020)

Dal punto di vista della sicurezza, A. Smit and Jorge A. Prozzi nel 2013 hanno condotto uno studio in Texas su come i conglomerati bituminosi porosi con le loro caratteristiche influenzino l'incidentalità su strada. Dai loro dati si è quindi dedotto che dall'introduzione dei conglomerati bituminosi porosi si è ottenuta una notevole riduzione dei sinistri stradali (fatali e non) nelle località principalmente soggette ad eventi piovosi intensi. Ciò è dimostrato in Fig. 2.8 che esprime l'andamento dell'incidentalità per corsia da sei mesi prima fino a sei mesi dopo l'introduzione dei conglomerati bituminosi porosi (PFC) con i dati ricavati dal Crash Record Informations Systems, CRIS.



Figura 2.8. Analisi incidenti prima e dopo l'introduzione dei conglomerati bituminosi porosi (A. Smit et al., 2013)

Sono stati inoltre confrontati con le relative percentuali di incidenti in strade con conglomerati bituminosi chiusi (TYC) sotto determinate condizioni stradali (pavimentazione asciutta/bagnata) e meteorologiche (piovoso/nuvoloso), mostrati in Fig. 2.9. Da questa analisi è stato dedotto che i PFC sono molto efficienti soprattutto in condizioni di strada bagnata.

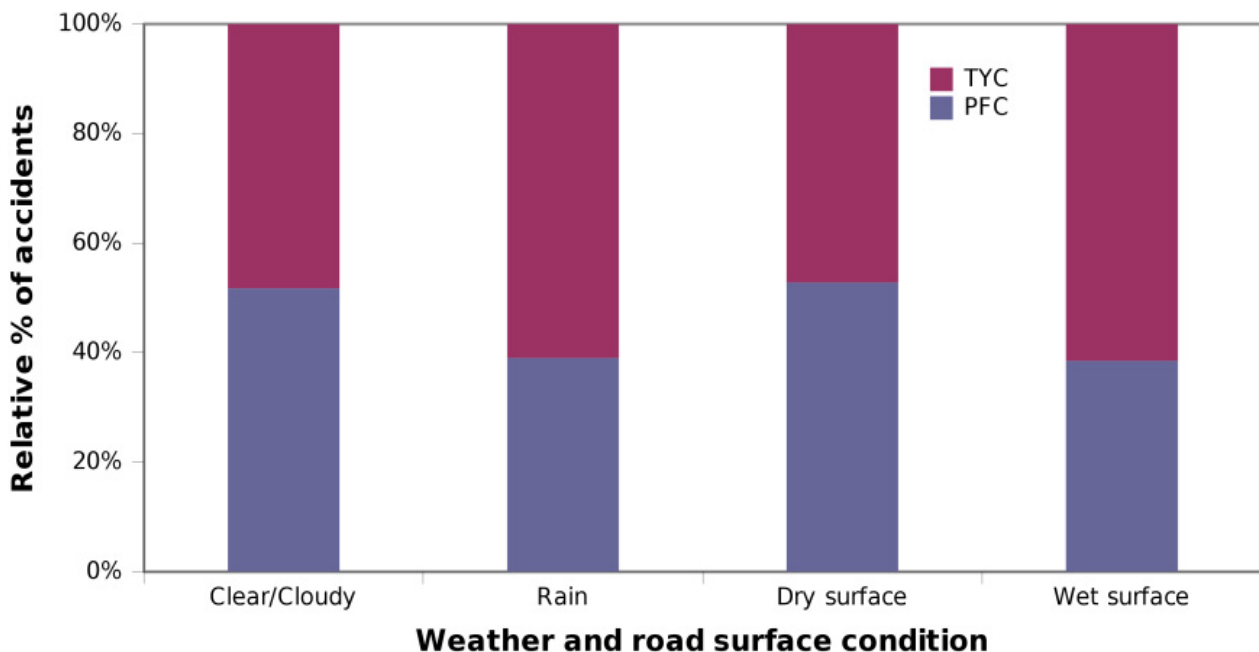


Figura 2.9. Ripartizione degli infortuni per condizioni meteorologiche e stradali (A. Smit et al., 2013)

Ai giorni d'oggi, in molte città i conglomerati bituminosi porosi sono utilizzati nella gran parte delle autostrade grazie ai loro benefici di riduzione del rumore veicolare e all'incremento di sicurezza e visibilità durante le condizioni di pavimentazione bagnata (aumentando anche l'aderenza).

Riassumendo, si possono notare molti vantaggi nell'uso dei conglomerati bituminosi porosi (Porous Asphalt, PA) grazie alla loro elevata percentuale di vuoti compresa tra il 20% e il 25% (Arrieta, 2014):

- Mantenimento di alta aderenza ad elevate velocità;
- Aumento di visibilità con la strada bagnata;
- Comportamento meccanico adeguato;
- Superficie stradale comfort e silenziosa al passaggio dello pneumatico;
- Alta resistenza alle deformazioni plastiche grazie allo scheletro solido monogranulare.

Nonostante questi vantaggi, è nota la loro durabilità ridotta dovuto al fatto che hanno un tenore di vuoti elevato.

Le problematiche delle miscele PA riguardano i seguenti aspetti:

- Durabilità: alta percentuale di vuoti che provoca l'invecchiamento del bitume con una conseguente riduzione di adesione tra aggregati e legante;
- Top-down cracking (TDC): tale fenomeno si basa sulla formazione di fessure che si originano in superficie e se non risanate si diffondono anche all'interno di tutta la sovrastruttura causandone il degrado. Il TDC è un difetto comune nelle OGFC dovuto alla loro scarsa resistenza alla fessurazione e bassa rigidità che è funzione del loro alto tenore di vuoti. Al fine di limitare il TDC si sono fatti degli OGFC con l'aggiunta di polymer modified asphalt emulsion (PMAE) andando ad aumentare notevolmente la resistenza alla fessurazione delle OGFC (F. Canestrari, L.P. Ingrassia, 2020);
- Guida sicura: il fatto che le PAM riducano notevolmente l'effetto aqua planin può comportare l'aumento della velocità da parte del guidatore quando la strada è bagnata;
- Intasamento: qualora la percentuale dei vuoti risulti minore del 20% allora c'è la possibilità che le PAM si intasino perdendo tutti i loro vantaggi legati alla porosità, ecco perché più grandi sono gli aggregati e maggiori sono i canali di passaggio dell'acqua che evita tale fenomeno. Inoltre, l'intasamento provocherebbe un notevole aumento del rumore dovuto al passaggio dello pneumatico sulla superficie stradale;
- Attrito: l'aderenza varia in modo più che proporzionale al tipo di superficie stradale, alla costituzione degli strati granulari e alle condizioni ambientali. Ovvero la macrorugosità della superficie che talvolta potrebbe essere intasata andrebbe a ridurre l'attrito che si ha nelle normali condizioni di percorrenza;
- Riparazione e manutenzione: ci si basa sulle riparazioni locali o totali che vanno dalle semplici buche al rifacimento dell'intero strato di conglomerato bituminoso poroso. Quindi, al fine di garantire un'adeguata vita utile allo strato limitando al tempo stesso le interruzioni del traffico stradale, si cerca di redigere un piano di monitoraggio e seguente programmazione di

interventi manutentivi mirati per evitare totali rifacimenti con chiusure di intere tratte stradali;

- Il progetto, la produzione e la stesa ad opera d'arte: queste tre procedure devono essere perfettamente eseguite perché ad esempio un'insufficiente compattazione può incrementare notevolmente il numero dei vuoti diminuendo rigidità e durabilità, viceversa un'eccessiva compattazione comprometterebbe la permeabilità della pavimentazione stessa.

Inoltre, l'alto tenore dei vuoti rende tali miscele molto suscettibili al ravelling (perdita di aggregati superficialmente), oggetto di studio della presente tesi, causato da due principali meccanismi di rottura: coesivo dove il danneggiamento avviene all'interno del legante/mastice adesivo dove viene meno il legame tra bitume e aggregati. Entrambi i meccanismi sono affetti dall'acqua e dall'invecchiamento specialmente nei PA dove il contatto tra aggregati e legante avviene in una zona ridotta a causa dell'alto tenore dei vuoti presenti in queste miscele (F.Frigio et al., 2013).

Analizzando la vita utile dei conglomerati bituminosi porosi, un fenomeno di degrado da tenere in considerazione è lo sgranamento. Questo è molto importante dal punto di vista della sicurezza stradale per due diversi motivi. Il primo riguarda un'eccessiva perdita di materiale con conseguente formazione di buche autostradali e successivi sinistri connessi a questo degrado. Il secondo, invece, connesso al precedente si basa sulla viabilità dell'infrastruttura stessa che può essere compromessa a causa dell'eccessiva usura (levigazione aggregato) e quindi perdita di aderenza oppure dell'intasamento del drenante stesso con la formazione di un velo idrico di acqua. Tale conseguenza è pericolosa per l'utente che può incorrere nel fenomeno dell'aquaplaning. Dunque, la perdita di tessitura superficiale è dovuta all'azione levigante relativa al passaggio degli pneumatici che, unitamente agli effetti disgreganti dell'acqua e del gelo, provocano una progressiva asportazione della microrugosità dei grani lapidei esposti in superficie e la riduzione della microrugosità del manto fino a renderlo molto liscio e poco efficiente ai fini dell'aderenza. Infine, tale sgranamento può sfociare in vera e propria perdita di aggregati con conseguente variazione della macrorugosità che porta a un decremento della sicurezza e confort di marcia.

I metodi quotidianamente utilizzati per classificare un conglomerato bituminoso poroso come scarso o efficiente nei confronti dello sgranamento si basano sull'esecuzione di prove in laboratorio che prevedono l'impiego di appositi provini e macchinari opportunamente normati. I seguenti strumenti si basano soprattutto sull'individuazione del quantitativo di materiale perso dal provino sottoposto a differenti stimoli. Si cerca quindi di prevedere per ogni materiale lo "sgranamento" che si avrebbe durante la vita in esercizio che, ad oggi, è uno dei principali difetti dei conglomerati bituminosi aperti i quali mirano a ridurre il rumore veicolare ed aumentare il deflusso delle acque grazie al loro tenore di vuoti elevato (Beltzung et al, 2023).

## 2.2. Prova Cantabro

L'esecuzione di questa prova di origine spagnola è la più comune tra i vari test per la caratterizzazione delle miscele stradali, motivo per cui è presente un'ampia banca dati. Nonostante questa modalità non sia molto realistica in quanto non è rappresentativa degli sforzi di tagli che avvengono nelle pavimentazioni, è utile per un confronto relativo ma non assoluto delle prestazioni di una miscela. L'invecchiamento del bitume e l'alto contenuto dei vuoti inducono la frattura adesiva che si verifica tra gli aggregati e il bitume, tale fenomeno è chiamato ravelling. Quest'ultimo è il fenomeno più frequente nelle miscele di conglomerato bituminoso poroso e ciò ne influenza la loro durabilità. Dunque, durante la progettazione di queste miscele la prova Cantabro è stata utilizzata per valutare e controllare la perdita di materiale dovuto al ravelling sulle miscele sotto condizioni di pavimentazione asciutta o bagnata (DU Shaowen and LI Shanshan, 2011).

Tale metodologia di prova è standardizzata ed effettuata al fine di individuare, tramite una perdita di peso, la resistenza allo sgranamento del conglomerato analizzato. Essa prevede di sottoporre un provino cilindrico, compattato in laboratorio con la metodologia Marshall, a 300 cicli di rotazione del cilindro Los Angeles.

In accordo con la norma UNI EN 12697-17, la prova va effettuata a  $25 \pm 5$  °C. La perdita in peso da misurare è individuabile per ciascuna prova su provino come una percentuale detta Particle Loss, PL. Si determina andando a sottrarre al peso del provino iniziale il peso dello stesso provino dopo averlo testato e dividere il tutto per il peso iniziale. Moltiplicano il risultato ottenuto o per cento si ottiene la percentuale voluta.

I limiti di accettazione delle miscele in conglomerato nei confronti dello sgranamento in termini di perdita in peso varia in funzione della destinazione d'uso del materiale e del suo condizionamento. Il Capitolato di Autostrade per l'Italia per provini condizionati in ambiente asciutto richiede una perdita in peso (particle loss, PL) inferiore al 20 %.

Nella casistica dei PA, l'elevato tenore di vuoti legato al contenuto di bitume nella miscela accelera l'ossidazione del legante bituminoso (Nicholls, 2001). Ciò induce lo sgranamento, ovvero la perdita di coesione tra i granuli della miscela stessa, influenzando notevolmente la durabilità del materiale utilizzato.

Molteplici prove Cantabro sono state eseguite sulle PAM, e si è dedotto che per provini contenenti un dosaggio di bitume minore del 4,5%, confezionati in modalità dry e testati a temperatura di prova intorno ai 25 °C la perdita di materiale non dovrebbe eccedere il 25% del peso totale. Viceversa, in modalità wet, ovvero dopo aver condizionato il provino per un determinato periodo di tempo in acqua ad una temperatura prestabilita, non si dovrebbe superare la perdita del 40%, il che non sempre risulta verificato (Arrieta, 2014).

Altre casistiche deducono che questa modalità di prova non è influenzata dalla tipologia di compattazione del provino e quindi dal loro diametro. Infatti, sono stati testati materiali compattati con il Superpave giratory compactor (SGC) e confrontati



con i risultati Cantabro di ulteriori provini compattati con la metodologia Marshall, concludendo che il PL rimane sempre al di sotto del 20% (Donald et al., 2004).

Si è dimostrato inoltre che la prova Cantabro è molto utile per valutare la durabilità del materiale testato individuando come il PL incrementa all'aumentare del numero dei vuoti della miscela e del contenuto percentuale di conglomerato bituminoso riciclato (Raclaimed Apshalt, RA) (Ben C. Cox et al., 2017).

Altri autori, dimostrano invece, che aggiungendo del Reclaimed Asphalt (RA) la perdita in peso di un provino soggetto ad una prova Cantabro sia in condizioni dry che wet diminuisce come visibile in Fig. 2.10. Il che è dovuto alla presenza di bitume invecchiato che garantisce ulteriore resistenza alla miscela. Ora sono in corso ulteriori studi per indagare le caratteristiche prestazionali aggiuntive che il RA fornisce alla miscela con la quale viene mescolato, cercando di individuarne anche un quantitativo ottimale.

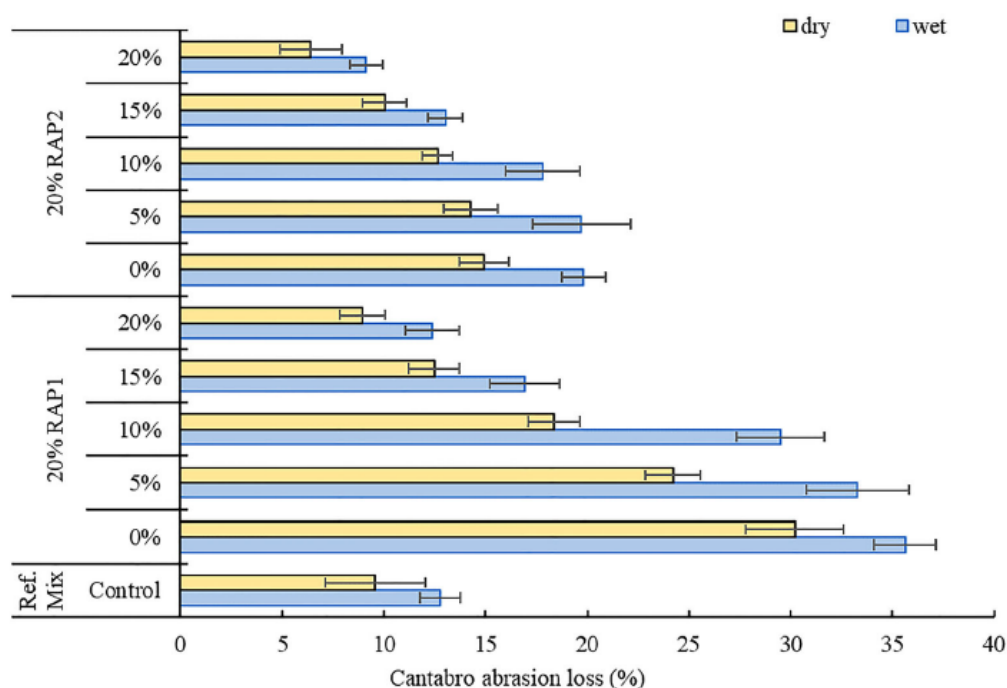


Figura 2.10. Effetto del RA sulle miscele in conglomerato bituminoso poroso (I. Holleran et al., 2021)

Un'altra dimostrazione dell'aggiunta di RA è data da F. Frigio et al., 2013 dove si confrontano sia situazioni DRY che WET per lo stesso materiale incrementando ogni volta il quantitativo di RA nella miscela con i risultati visibili in Fig. 2.11. I materiali confrontati sono: una miscela di riferimento con il 5,00% di bitume in peso sugli aggregati (PPA\_5.00%) e diverse miscele con RA al 15% variando i quantitativi di bitume nominate con RPA.

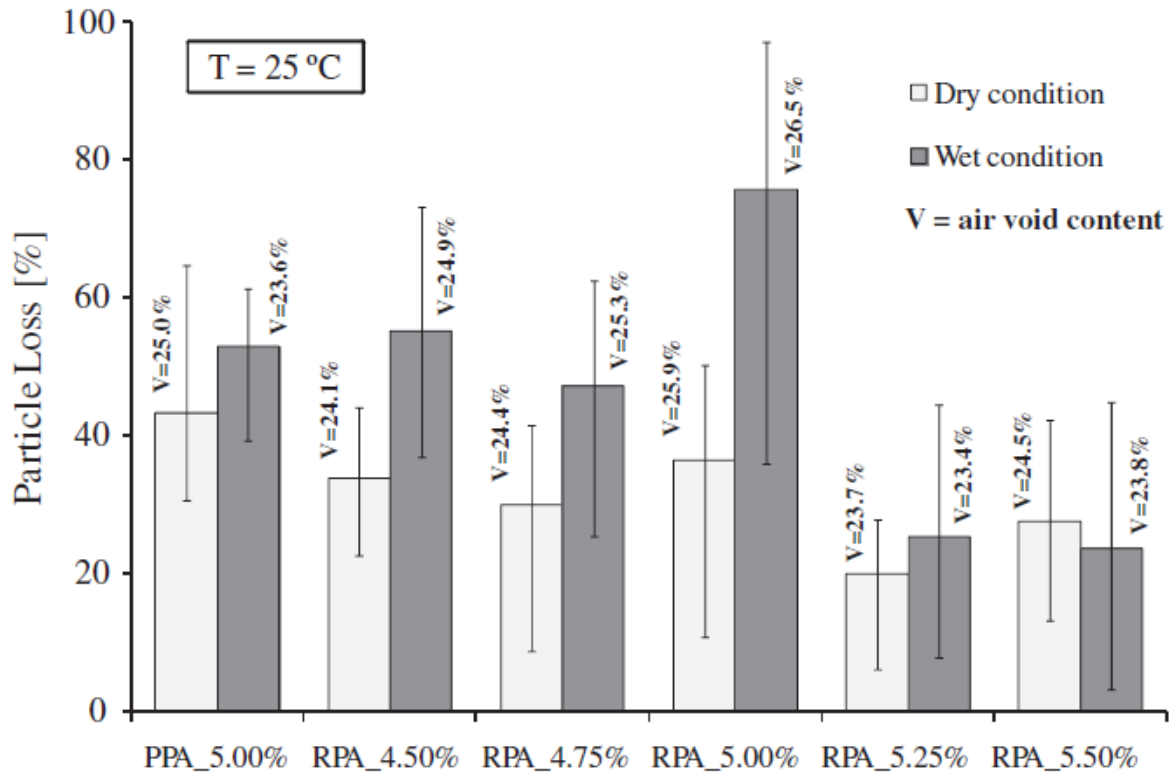


Figura 2.11. Risultati test Cantabro (F. Frigio et al., 2013)

È stata inoltre individuata una correlazione (Fig. 2.12) tra la percentuale dei vuoti dei provini con RA e la loro perdita in peso.

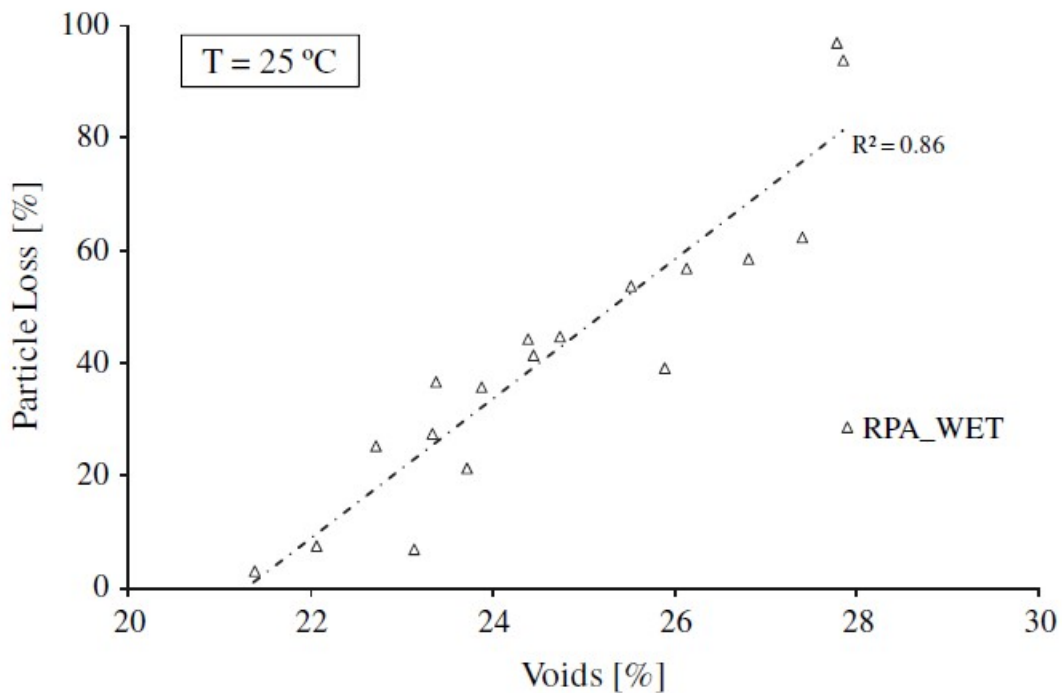


Figura 2.12. Perdita in peso VS percentuale di vuoti (F. Frigio et al., 2013)

Un'ulteriore analisi relativa all'influenza dei vuoti sulla perdita di materiale nella prova Cantabro è stata fatta da R. Gubler et al. nel 2005, andando a testare provini condizionati in modalità dry e wet con un tenore di vuoti differente. I risultati presenti in Fig. 2.13 evidenziano una perdita di peso più rilevante nelle serie wet a parità di vuoti.

<b>Table 11 - Summary of Cantabro test</b>			
<b>Mixture type</b>	<b>Air void content [%]</b>	<b>Average of weight loss [%]</b>	<b>Standard deviation</b>
<b>Dry series</b>			
Dense graded	5.70	10.16	0.77
	10.57	9.69	3.08
Open graded	12.79	6.82	1.52
	22.34	18.25	2.72
<b>Wet series</b>			
Dense graded	5.70	13.30	2.01
	10.57	14.87	3.84
Open graded	12.79	9.90	3.25
	22.34	28.64	17.81

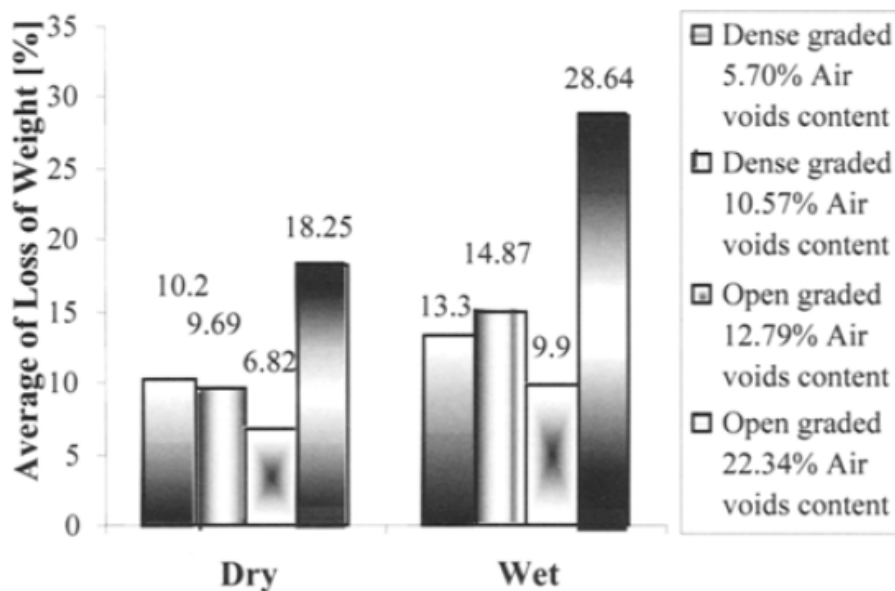


Figura 2.13. Prove Cantabro in modalità di condizionamento differenti (R. Gubler et al., 2005)

## 2.3. Darmstadt Scuffing Device

In Europa sono stati introdotti quattro differenti dispositivi per simulare lo sgranamento dovuto agli sforzi di taglio indotti dal carico veicolare, rispettanti le specifiche tecniche CEN/TS 12967-50 (Beltzung et al., 2023).

I quattro dispositivi utilizzati sono i seguenti:

- Aachener Raveling Tester (ARTe)
- Darmstadt Scuffing Device (DSD)
- Rotating Surface Abrasion Test (RSAT)
- TriboRoute Device (TRD)

La Conference of European Directors of Roads (CEDR) ha come obiettivo quello di standardizzare le tipologie di prova sopraelencate tramite varie sperimentazioni su differenti materiali, pubblicando i risultati nel progetto “Development of Ravelling Test” (DRaT). Tale progetto mira ad uniformare le metodologie di misura dello sgranamento cercando di simulare al meglio quello che è l’effetto dello pneumatico sulla strada, ovvero lo sforzo normale dato dal peso del veicolo e lo sforzo di taglio dato dalle eventuali manovre di sterzata (Nicholls et al., 2021) che inducono le rotazioni degli aggregati come schematizzato in Fig. 2.14.

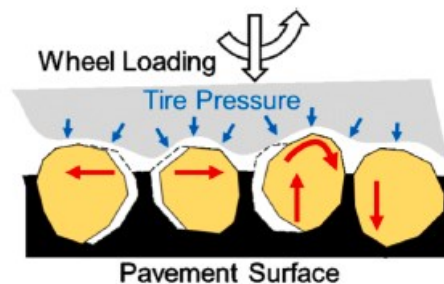


Figura 2.14. Effetti dello pneumatico sulla superficie stradale (Beltzung et al., 2023)

Ogni macchinario simula ciò che è chiamato “scuffing” o “raveling” che sta ad indicare l’azione dello pneumatico sullo strato superficiale della pavimentazione nel momento in cui si ha una rotazione rispetto alla direzione principale di marcia del veicolo. Nicholls et al., 2021 hanno redatto la Tab. 2.2 dove, per ogni dispositivo, elencano i principali aspetti senza però stabilire quale tra i quattro sia il più affidabile e capace di simulare al meglio ciò che avviene in sito.

Device	Test samples		Direction of movement	Length of test run	Principal measurement methods
	Slabs	Cores			
ARTe	Laboratory produced slab	3 x 150 mm $\varnothing$ cores per sample	All directions	600 cycles in 2 h	Weight-loss of sample Loss of coarse aggregate Change of texture depth
DSD	Laboratory produced slab	3 x 150 mm $\varnothing$ cores per sample Single cores	Forward and back	10 cycles	Weight-loss of sample
RSAT	Laboratory produced slab	3 x 150 mm $\varnothing$ cores per sample	All directions	86.600 cycles in 24 h	Weight-loss of sample Loss of coarse aggregate
TRD	Laboratory produced slab	n/a	Forward and back	6.000 cycles	Weight-loss of sample

Tabella 2.2. Tabella identificativa delle principali caratteristiche dei dispositivi "scuffing" (Nicholls et al., 2021)

In particolare, il DSD è il macchinario utilizzato nella presente tesi. Il Belgian Road Research Centre (BRRC) utilizza il DSD visibile in Fig. 2.15 al fine di testare la resistenza allo sgranamento delle diverse miscele drenanti utilizzate negli strati superficiali della pavimentazione stradale. Tale centro di ricerca testa miscele autostradale in conglomerato bituminoso poroso andando alla ricerca di risultati che permettono di standardizzare, al livello europeo, questa nuova metodologia di prova data dal DSD (Visscher and Vanelstraete, 2015).



Figura 2.15. Dispositivo DSD e piastra testata (Visscher and Vanelstraete, 2015)

La sollecitazione di questo macchinario prevede la combinazione di due sforzi: uno normale ed uno di taglio dati dalla simulazione del passaggio dello pneumatico durante una rotazione, accelerazione o frenatura. Tale riproduzione si effettua su una piastra compattata con i vuoti di progetto avente dimensioni (26 x 26 cm<sup>2</sup>). Essa è fissata su un apposito appoggio dotato di autoriscaldamento in grado di compiere movimenti rotativi in contemporanea a delle traslazioni lungo la direzione principale dello pneumatico. Il BRRC effettua queste prove con una pressione dello pneumatico pari a 300 kPa, un carico verticale di 1000 N e una velocità di rotazione pari a 6 rpm.

La temperatura di prova, tipica per le miscele porose, è di 40 °C, il che può avere delle oscillazioni in quanto la superficie della piastra può raggiungere temperature leggermente differenti durante la prova. La metodologia di test prevede di aspirare ogni due cicli, ognuno di essi è composto da una rotazione di 180° e cinque traslazioni. Si effettuano fino a 10 cicli e si misura la perdita incrementale raccolta con un apposito aspiratore. Alla fine delle misurazioni la piastra viene rimossa dal sostegno e pesata per avere un'ulteriore conferma sulla perdita di materiale (Visscher and Vanelstraete, 2015). Il BRRC ha effettuato dei test su delle miscele Stone Mastic Asphalt, SMA con le quali si realizzano gli strati superficiali delle loro autostrade. Sono state confrontate miscele con diverse tipologie di bitume e temperature differenti i cui risultati sono visibili in Fig. 2.16.

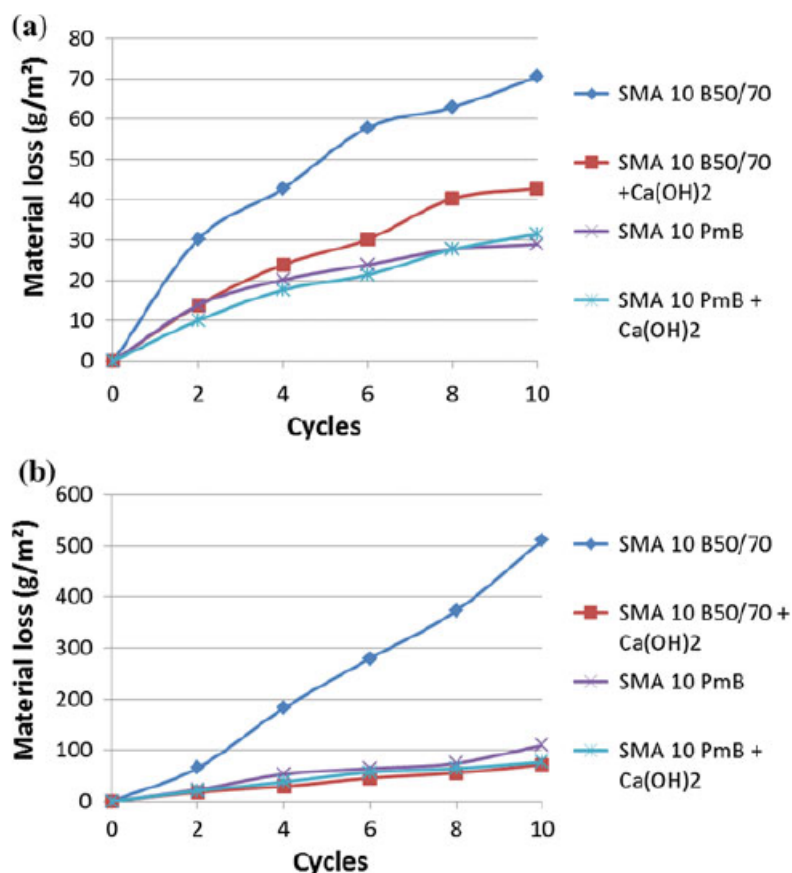


Figura 2.16. Risultati dei test su SMA 10 per mostrare l'effetto di bitumi differenti e della Ca(OH)2: (a) a 27 °C, (b) a 40 °C (Visscher and Vanelstraete, 2015)

Il BRRC ha testato anche degli SMA con differenti percentuali di Reclaimed Asphalt, (RA) e differenti tipologie di bitume ottenendo i seguenti risultati. Si è dedotto quindi che a parità di bitume nella miscela, l'incremento della percentuale RA influenza positivamente le sue caratteristiche in quanto si nota una diminuzione di materiale perso a 10 cicli. Poi si può anche notare come un bitume più duro (i.e. quello presente nella SMA 10 45/80-50) conferisce maggiore resistenza alla miscela diminuendo lo sgranamento.

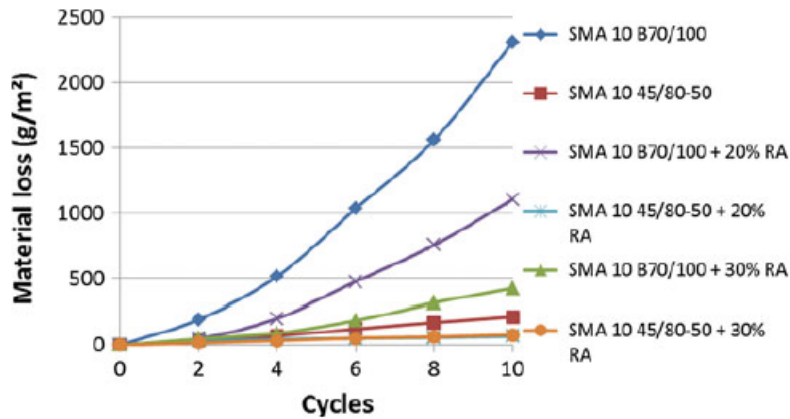


Figura 2.17. Risultati dei test su SMA 10 (con differenti tipologie di bitume e uso di RA), a 40 °C (Visscher and Vanelstraete, 2015)

Da questa sperimentazione si è concluso che il DSD è capace di differenziare la resistenza allo sgranamento dovuto al traffico sugli strati superficiali nel contesto belga sia di conglomerati porosi che di miscele chiuse di tipo SMA. Il BRRC è quindi riuscito a dedurre che la prova è in grado di distinguere differenti varianti di SMA, osservare come il tipo di bitume abbia un impatto maggiore alla temperatura di 40 °C rispetto a quelle di 25 °C e inoltre conferma che i risultati sono conformi alle aspettative generali e/o all'esperienza pratica e confermano quindi la pertinenza del presente metodo di prova (Visscher and Vanelstraete, 2015).

Sono state anche fatte altre sperimentazioni su piastre realizzate (G. D'Angelo et al., 2016) con SMA aventi un differente tenore di vuoti e sono stati ricavati i risultati nelle Fig. 2.18 – 2.19

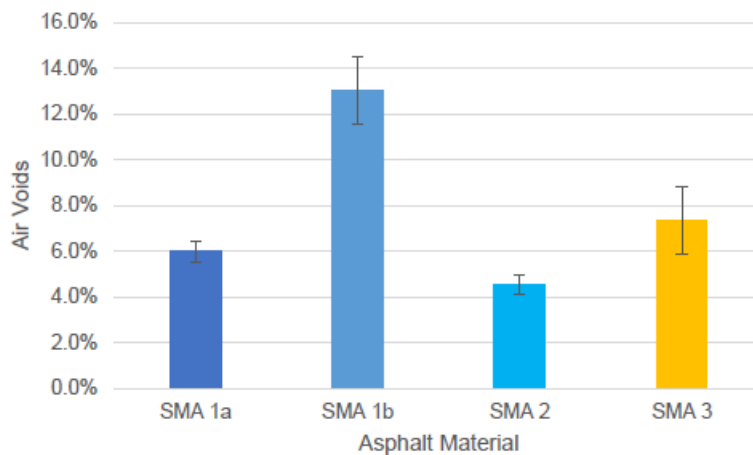


Figura 2.18. Contenuto di vuoti delle varie piastre (4 per ogni materiale)

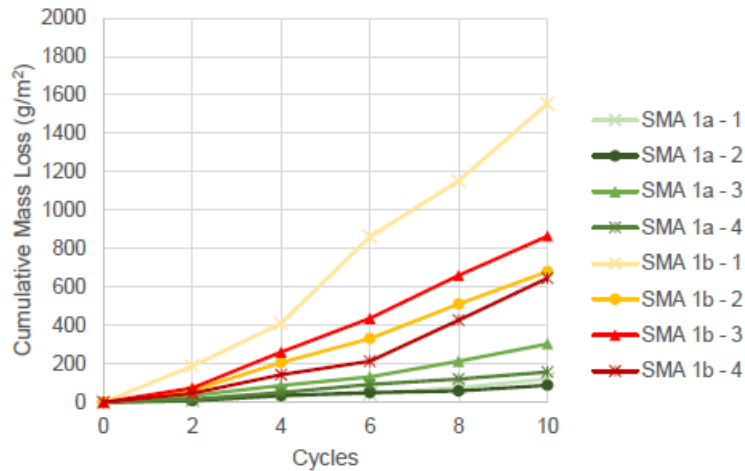


Figura 2.19. Cumulative mass loss su materiali con vuoti differenti

Ulteriori studi dimostrano che la differenza di perdita di materiale è dovuta anche al tenore dei vuoti, come mostrato in Fig. 2.20. Le miscele A e B sono state progettate con una percentuale di vuoti più elevata rispetto alle altre, ciò implica un valore di sgranamento superiore al riferimento per quel determinato tipo di miscela SMA.

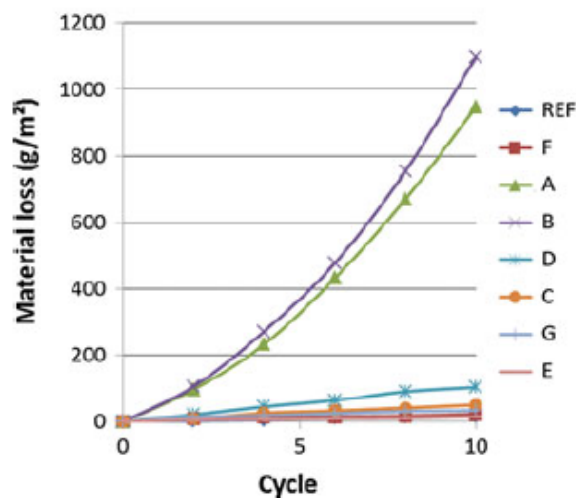


Figura 2.20. Andamento cumulativo della perdita di materiale di diverse miscele (Visscher and Vanelstraete, 2015)

Il DSD è stato sviluppato dall'Università di Darmstadt solamente per valutare la resistenza agli sforzi di taglio indotti dal traffico sulle miscele porose (V. Root, 2008). Si hanno alcuni risultati sugli studi di f. Beltzung et al., nel 2023 che mostrano i valori di sgranamento di miscele porose (PA), semi-dense graded asphalt (SDA) con diverse pezzature di aggregati e asphalt concrete (AC) con le caratteristiche presenti in Fig. 2.21.



Mixture	PA 8	SDA 4-20	SDA 4-16	SDA 8-16	AC MR 8
Binder content [mass-%]	5.7	5.9	6.2	5.6	5.9
Compaction [%]	99.1	95.9	100.6	98.5	100.4
Air voids [vol-%]	18.7	19.2	12.5	13.6	3.9

Figura 2.21. Materiali testati con il DSD (F: Beltzung et al., 2023)

Le miscele sopraelencate sono state testate con il DSD rispettivamente in due laboratori differenti: Darmstadt e Karlsruhe con i risultati di sgranamento dopo 10 cicli mostrati in Fig. 2.22. Le colonne rappresentano la media di tre prove fatte con lo stesso materiale con la barra di errore che rappresenta i valori max e min.

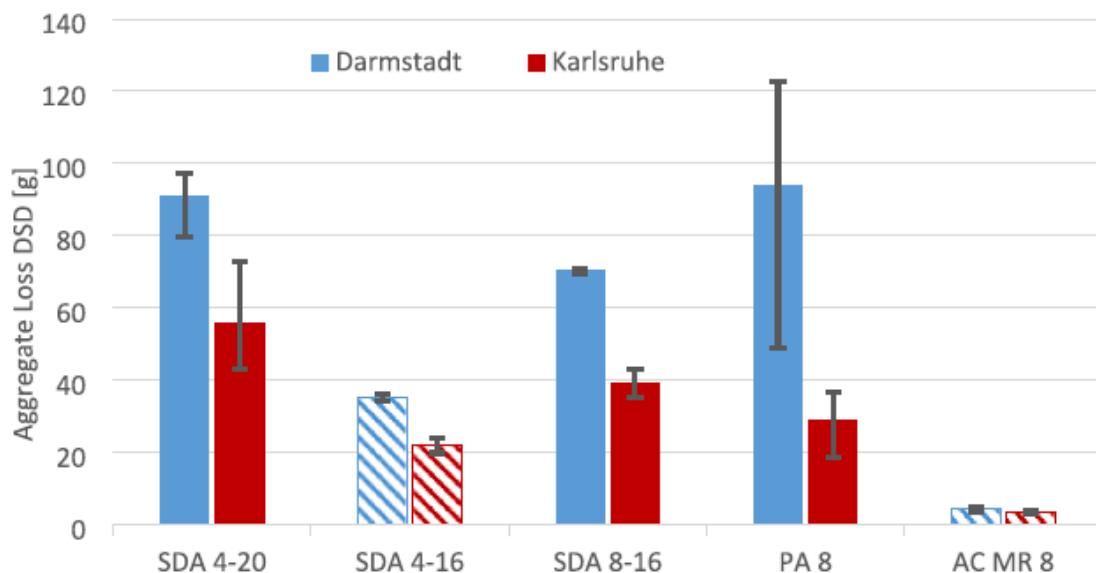


Figura 2.22. Materiale perso durante lo sgranamento dovuto al DSD (F. Beltzung et al., 2023)

Dalle varie sperimentazioni, nel progetto DRaT si sono individuati diversi fattori e dei corretti comportamenti che cercano di ridurre il ravelling.

- *Materiali*: aggregati con maggiore affinità al bitume, aggregati puliti quando si mescolano nel conglomerato, attivanti di adesione bitume-aggregato per ridurre lo sgranamento
- *Mix design*: il contenuto di legante deve essere il più elevato possibile al fine di minimizzare il ravelling evitando il verificarsi del bleeding (separazione delle fasi), utilizzo di leganti viscosi, evitare aggregati troppo grossolani
- *Posa in opera*: una scarsa compattazione comporta un numero di vuoti maggiore e quindi minore adesione tra i vari aggregati, giunti o fessure

eccessive possono iniziare uno sgranamento precoce, la segregazione comporta aree con un alto contenuto di vuoti, lo spessore dello strato non deve essere inferiore al doppio della dimensione massima dell'aggregato, conglomerato non sufficientemente caldo potrebbe portare ad un ravelling prematuro, conglomerato non va posato sul bagnato

- *In situ*: l'invecchiamento del bitume dovuto al surriscaldamento durante la miscelazione comporta ad un prematuro cedimento mentre quello dovuto agli agenti atmosferici influisce a lungo termine, danni da ravelling tendono ad essere più gravi durante il freddo, precipitazioni abbondanti e frequenti possono anche aggravare ravelling, forze di taglio o torsione elevate sono le cause dirette del ravelling; quindi, esso predominerà dove sono presenti frenata, accelerazione e curva

La CEDR nel progetto DRaT con la call del 2014 (Asset Management and Maintenance) ha raccolto dati dai diversi macchinari al fine di individuare la strategia per minimizzare il ravelling, ovvero riuscire a produrre e posare un materiale che superi le cause sopra elencate e che abbia una resistenza tale da resistere in zone altamente sollecitate a taglio.

Altri autori in letteratura hanno dedotto che non esiste una vera e consolidata tipologia per testare la resistenza allo sgranamento di differenti miscele. Dunque, ciò è di fondamentale importanza dato che il ravelling determina le prestazioni superficiali di una pavimentazione (Abouelsaad and White, 2021).

In altre sperimentazioni il DSD è stato comparato con la prova di Pull-off e sono stati individuati differenti aspetti. Si è dedotto però che il DSD permette di determinare solamente la massa totale di aggregati che sono stati rimossi al passaggio dello pneumatico e non il loro numero e la loro dimensione, senza quindi effettuare misure legate alle loro proprietà di adesione meccanica (F. Beltzung et al., 2023).

### 3. Materiali e metodi di prova

Al fine della realizzazione di un'analisi sperimentale della propensione allo sgranamento di conglomerati bituminosi porosi sono stati posti a confronto i risultati derivanti da due differenti macchinari di prova presenti nel laboratorio di Strade e Trasporti dell'Università Politecnica delle Marche (UnivPM), appartenenti al Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura, DICEA. Nello specifico, sono stati testati diversi materiali provenienti da impianti di produzione differenti di proprietà Amplia Infrastructures S.p.A. ovvero ex. Pavimental (società per azioni soggetta all'attività di direzione e coordinamento di Autostrade per l'Italia S.p.A.). Inoltre, sono state testate le prestazioni di miscele di conglomerato bituminoso composte da aggregati 100% vergini, successivamente paragonate a quelle con diverse percentuali di materiale fresato (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP).

Di seguito sono descritte le caratteristiche e gli strumenti utilizzati, per poi elencare le modalità operative per l'esecuzione delle prove previste dal programma sperimentale seguite dalle analisi effettuate sui vari risultati.

#### 3.1. Conglomerati bituminosi porosi

Di seguito vengono riportati i materiali arrivati in laboratorio, con cui sono stati prodotti i provini successivamente testati per ricavare le proprietà di sgranamento. Si elencano quindi, per ogni materiale, le schede tecniche con le loro caratteristiche principali fornite dagli impianti della società Amplia Infrastructures S.p.A..

I materiali vengono denominati con una specifica nomenclatura di riconoscimento composta da una lettera dell'alfabeto italiano seguita dal luogo dell'impianto di produzione.

##### 3.1.1. Materiale A\_Arezzo

Il materiale prodotto nell'impianto di Arezzo è stato poi impiegato per la costruzione di un tratto dell'autostrada A1 Milano – Napoli nella tratta Firenze Nord – Chiusi al km 376+600 nella corsia di sorpasso della carreggiata sud, dove è stato prelevato in data 08/02/2023. È una miscela utilizzata al fine della stesa dello strato di usura drenante strutturale e spedita nel Laboratorio di Strade e Trasporti dell'Università Politecnica delle Marche (UnivPM) in sacchi come visibile in Fig. 3.1.

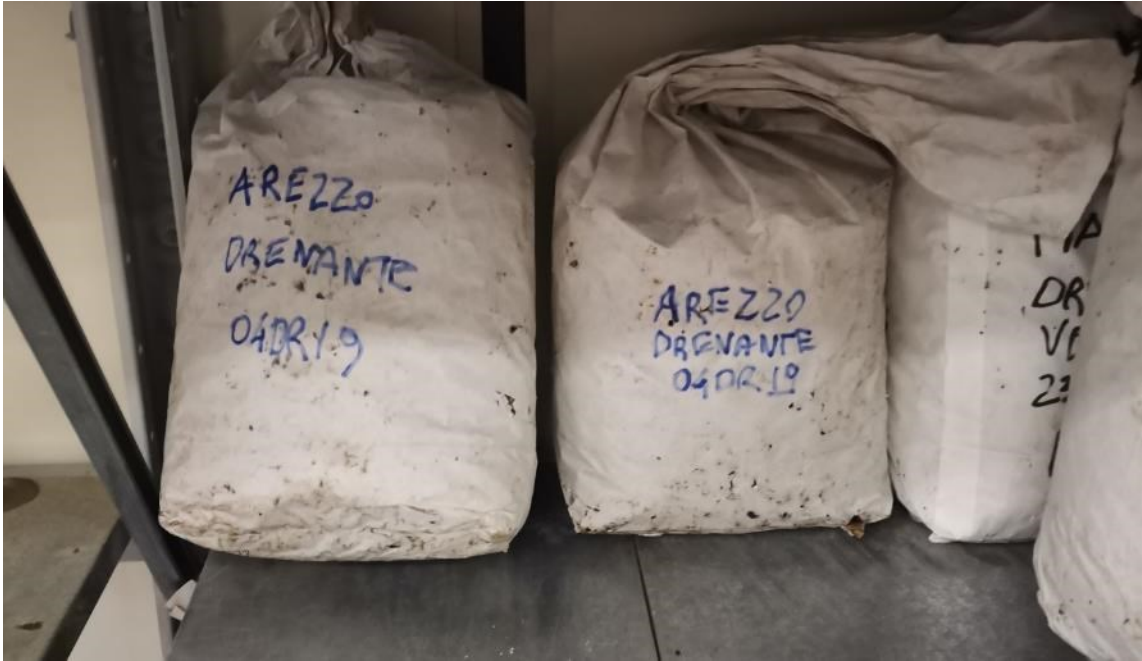


Figura 3.1. Materiale prelevato dal cantiere di produzione e spedito nel Laboratorio di Strade e Trasporti dell'UnivPM

La miscela è stata prodotta con bitume modificato con polimeri SBS dosati al 3,8 % rispetto al bitume vergine, e la mineralogia mostrata in Tab. 3.1.

AGGREGATI						
0/1	0/2	4/8	10/16	10/16	0/16	MVA
Filler Edilcalce	Basalti Orvieto		Basalto La Spicca		RAP	
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]
3	11	16	49	21	0	2.700

Tabella 3.1. Mineralogia miscela A\_Arezzo

Inoltre, l'impresa Amplia Infrastructures S.p.A. ha effettuato lo studio granulometrico di progetto in data 13/01/2022 presso il laboratorio centrale Magliano Sabina con i risultati riportati in Fig. 3.2.

Studio granulometrico										Data : 13/01/2022		
Inerte	Basalti Orvieto	Basalti Orvieto	Basalti Orvieto	Basalto La Spicca			Filler Edilcalce	Risultante granulometrica		Fuso		
	0/2	4/8	10/16	10/16			0/1	Trattenuti %	Passanti %	Passanti %		
Analisi granulometriche (UNI EN 933-1) Set. UNI - Trattenuti %												
	31,5								100,0	100	100	
	20								100,0	100	100	
	14			22,0	2,6				11,3	88,7	85	94
	10			56,3	72,4				42,8	45,9	38	53
	6,3		51,8	20,9	24,2				23,6	22,3	13	26
	2	12,8	46,3						8,8	13,5	8	18
	0,5	47,4	0,2						5,2	8,2	6	12
	0,25	11,9							1,3	6,9	6	10
	0,063	15,6							2,2	4,7	4	8
	Filler	12,3	1,7	0,8	0,8			17,0	2,2	4,7	4	8
% utilizzo	11	16	49	21			3					
Gse g/cm <sup>3</sup> (MVA inerti)	2,720	2,700	2,700	2,698			2,650		2,700	Gse mix		

Figura 3.2. Studio granulometrico della miscela A (scheda tecnica)

Si hanno noti, inoltre, le seguenti percentuali di bitume ed inerti fornite dall'impianto e riportate di seguito in Fig. 3.3 ricavate dalla scheda tecnica.

Bitume	
% Bitume Riferito Mix :	4,76
% Bitume Riferito Inerti :	5,00
Additivi / Fibre (Minerali o Miste)	
	0,3 % Rif. Inerti

Figura 3.3. Rispettive percentuali di bitume e additivi/fibre ricavate dalla scheda tecnica

Il contenuto dei vuoti, utili al fine della preparazione dei provini da testare, sono quelli ricavati da provini compattati con la pressa giratoria a taglio corrispondenti al numero di giri di progetto  $N_{des}$  (50 giri), come visibili in Fig. 3.4.

N° Rotazioni	Miscela di prova				Air voids %
	%Gmm	Air voids %	VMA %	VFA %	
10	71,8	28,2	-	-	≥ 25
50	79,4	20,6	29,9	31,1	≥ 20
130	82,4	17,6	-	-	≥ 16

Figura 3.4. Percentuale di vuoti da scheda tecnica

Si riportano, nella Tab. 3.2 mostrata nel seguito i valori utilizzati per il confezionamento dei campioni. Questi ultimi sono stati ottenuti dalle due estrazioni

eseguite in laboratorio sul materiale appena arrivato e confrontati poi con quelli forniti dalla scheda tecnica. Le modalità di esecuzione della metodologia utilizzata si descrivono nei capitoli successivi.

Miscela	Bitume (in peso riferito Mix.)	Bitume (in peso riferito aggregati)	Vuoti (n. 50)	Additivo/fibre (in peso riferito aggregati)	$\rho_{\max, \text{mix}}$
[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]
SCHEDA TECNICA	4.76	5.00	20.6	0.3	2.700
ESTRAZIONE	4.40	4.60		0.3	2.517

Tabella 3.2. Risultati estrazione miscela A\_Arezzo

Al fine di ottenere un'ulteriore verifica della composizione della miscela da dichiarata dalla scheda tecnica, è stata ricavata la curva granulometrica di laboratorio dell'aggregato derivante dalle estrazioni. È stato quindi verificato che la media delle due curve granulometriche ottenute sia il più possibile approssimabile a quella ottenuta dai laboratori di Amplia S.p.A. Tale confronto, ricavato dopo la setacciatura ampiamente descritta nei paragrafi successivi, è visibile in Fig. 3.5.

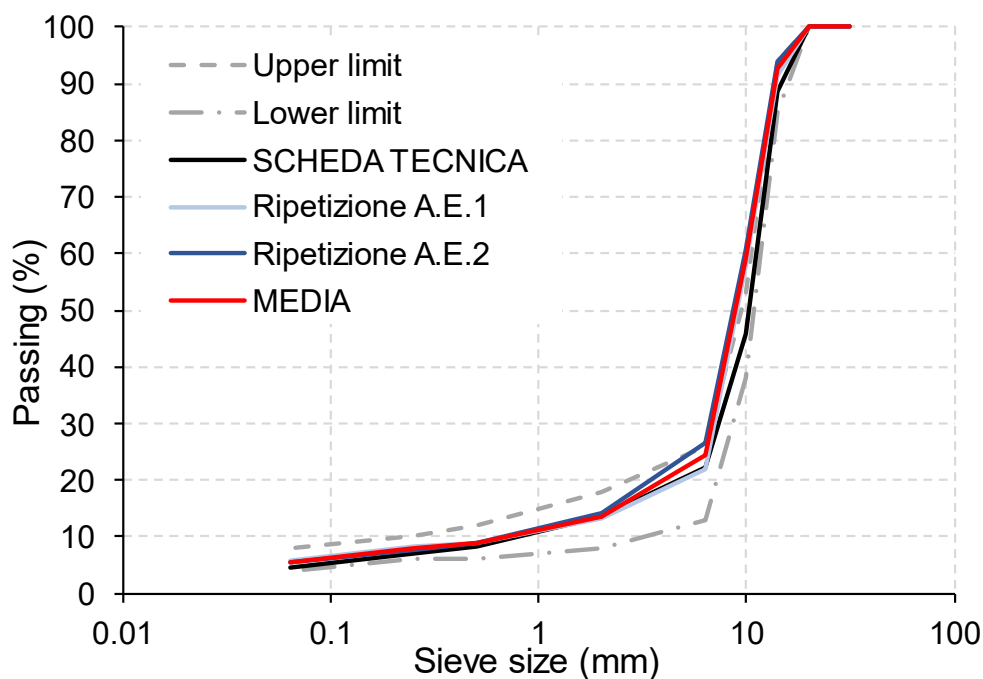


Figura 3.5. Curve granulometriche determinate in laboratorio

In tale caso si nota come il passante al setaccio di diametro pari a 10 mm sia maggiore del range individuato dai limiti (rispettivamente superiore ed inferiore). Questa non conformità con i valori della scheda tecnica è stata considerata trascurabile per le eventuali applicazioni future.

### 3.1.2. Materiale B\_Magliano Sabina

Il materiale è stato prelevato dall'impianto di Magliano Sabina che andrà successivamente steso nell'autostrada A1 Milano – Napoli tratta Chiusi – Tivoli al km 501+000, stoccato in sacchi e spedito nel Laboratorio di Strade e Trasporti dell'UnivPM come in Fig. 3.6.

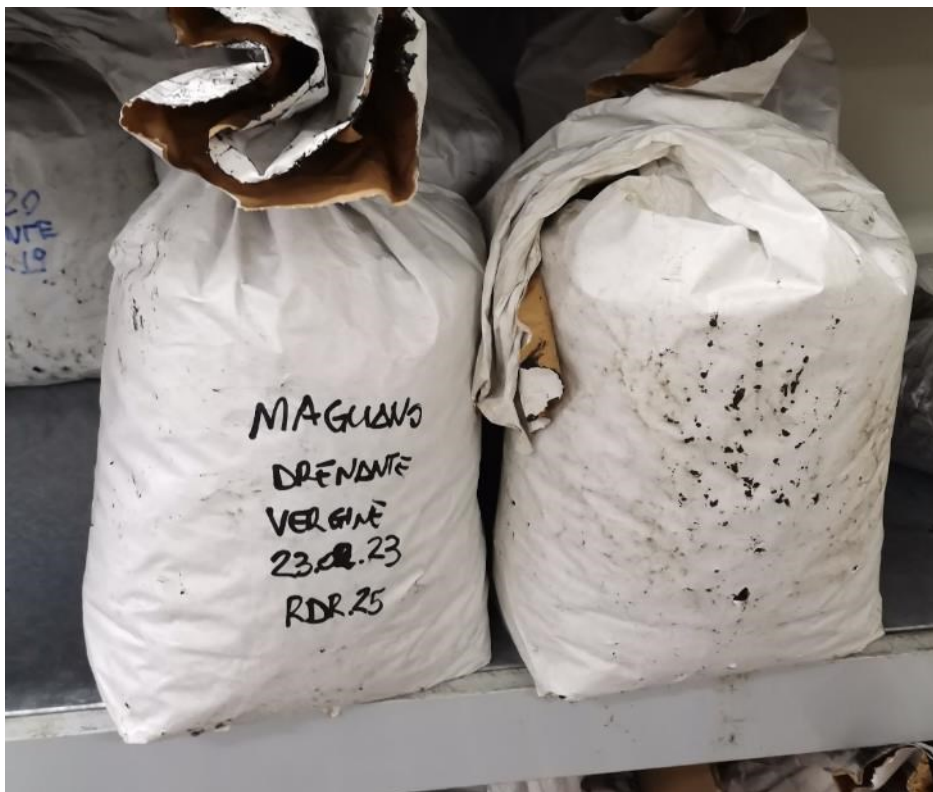


Figura 3.6. Materiale prelevato dal cantiere di produzione e spedito nel Laboratorio di Strade e Trasporti dell'UnivPM

La miscela è stata prodotta con bitume modificato con polimeri SBS dosati al 3,8 % rispetto al bitume vergine e la mineralogia mostrata in Tab. 3.3.

AGGREGATI						
0/1	0/2	4/8	10/16	10/16	0/16	MVA
Filler Edilcalce	Basalti Orvieto			Il Tufo Romano (Basalto)	RAP	
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]
3	11	16	50	20	0	2.709

Tabella 3.3. Mineralogia miscela B\_Magliano

Inoltre, l'impresa Amplia Infrastructures S.p.A. ha effettuato lo studio granulometrico presso i laboratori centrali di Magliano Sabina in data 22/03/2022 con i risultati riportati in Fig. 3.7.

Studio granulometrico										Data : 22/03/2022		
Inerte	Basalti Orvieto	Basalti Orvieto	Basalti Orvieto	Il Tufo Romano			Filler Edilcalce	Risultante granulometrica		Fuso		
	0/2	4/8	10/16	10/16			0/1	Trattenuti %	Passanti %	Passanti %		
Analisi granulometriche (UNI EN 933-1) Set. UNI - Trattenuti %												
									100,0	100	100	
	31,5								100,0	100	100	
	20								100,0	100	100	
	14			22,0	7,3				12,5	87,5	85	94
	10			56,3	61,1				40,4	47,2	38	53
	6,3		51,8	20,9	31,1				25,0	22,2	13	26
	2	12,8	46,3						8,8	13,4	8	18
	0,5	47,4	0,2						5,2	8,2	6	12
	0,25	11,9							1,3	6,8	6	10
0,063	15,6							2,2	4,6	4	8	
Filler	12,3	1,7	0,8	0,5			83,0	4,6				
% utilizzo	11	16	50	20			3					
Gse g/cm <sup>3</sup> (MVA inerti)	2.720	2.700	2.700	2.740			2.650		2.709	Gse mix		

Figura 3.7. Studio granulometrico della miscela B (scheda tecnica)

Si hanno noti, inoltre, le seguenti percentuali di bitume ed inerti forniteci dall'impianto e riportate di seguito in Fig. 3.8 ricavate dalla scheda tecnica.

Bitume	
% Bitume Riferito Mix :	4,76
% Bitume Riferito Inerti :	5,00
Additivi / Fibre (Minerali o Miste)	
	0,3 % Rif. Inerti

Figura 3.8. Rispettive percentuali di bitume e additivi/fibre ricavate dalla scheda tecnica



Il numero dei vuoti, utili al fine della preparazione dei provini da testare, sono quelli ricavati dalla pressa giratoria a 50 rotazioni come visibili in Fig. 3.9.

N° Rotazioni	Miscela di prova				Air voids %
	%Gmm	Air voids %	VMA %	VFA %	
10	72,1	27,9	-	-	≥ 25
50	79,6	20,4	29,7	31,4	≥ 20
130	82,3	17,7	-	-	≥ 16

Figura 3.9. Percentuale di vuoti da scheda tecnica

Si riportano, nella Tab. 3.4 mostrata nel seguito i valori utilizzati per il confezionamento dei campioni. Questi ultimi sono stati ottenuti dall'estrazione fatta in laboratorio sul materiale appena arrivato prima di testarlo e confrontati poi con quelli forniti dalla scheda tecnica. Le modalità di esecuzione della metodologia utilizzata si descrivono nei capitoli successivi.

Miscela	Bitume (in peso riferito Mix.)	Bitume (in peso riferito aggregati)	Vuoti (n. 50)	Additivo/fibre (in peso riferito aggregati)	$\rho_{\max, \text{mix}}$
[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]
SCHEDA TECNICA	4.76	5.00	20.4	0.3	2.709
ESTRAZIONE	4.10	4.30		0.3	2.536

Tabella 3.4. Risultati estrazione miscela B\_Magliano

Al fine di ottenere un ulteriore riscontro sulla miscela da testare è stata ricavata la curva granulometrica di laboratorio e verificato che la media delle estrazioni fatte sia il più possibile approssimabile a quella ottenuta dai laboratori di Amplia Infrastructures S.p.A. Questo confronto, ricavato dopo la setacciatura ampiamente descritta nei paragrafi successivi, è visibile in Fig. 3.10.

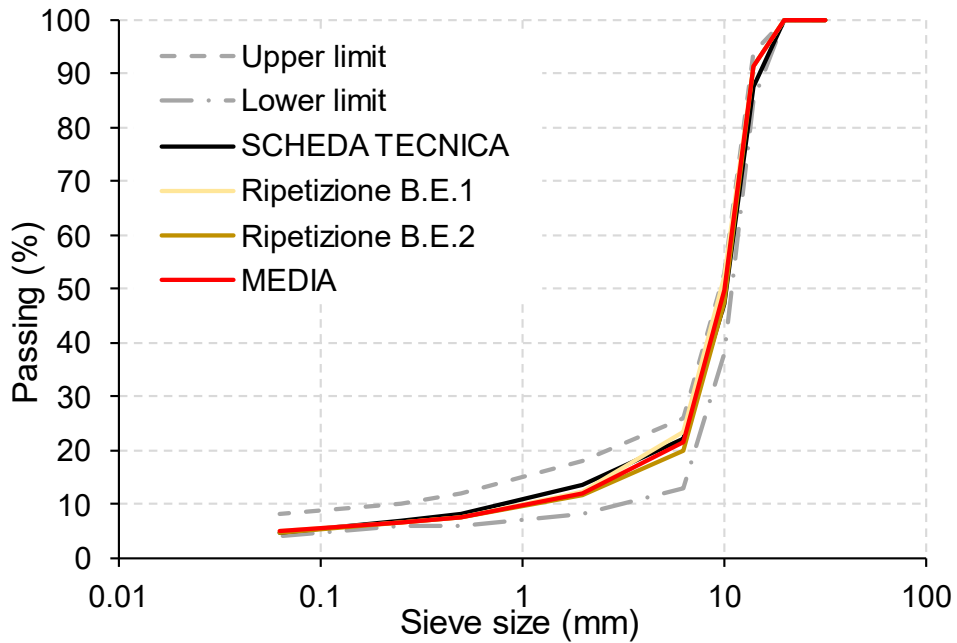


Figura 3.10. Curve granulometriche determinate in laboratorio

### 3.1.3. Materiale C\_Andria

Il materiale è stato prelevato dall'impianto di produzione di Andria che andrà successivamente steso nell'autostrada A14: Bologna – Bari – Taranto / A16: Napoli – Bari tratta A14: Poggio Imperiale – Taranto / A16: Candela – Canosa, confezionato in appositi sacchi e spedito nel Laboratorio di Strade e Trasporti dell'UnivPM come in Fig. 3.11.



Figura 3.11. Materiale prelevato dal cantiere di produzione e spedito nel Laboratorio di Strade e Trasporti dell'UnivPM

La miscela è stata prodotta con bitume modificato con polimeri SBS dosati al 3,8 % rispetto al bitume vergine e la mineralogia mostrata in Tab. 3.5.

AGGREGATI						
0/1	0/4	4/8	8/16	10/16	0/16	MVA
Le Cave (filler calcareo)	D'Oria (roccia calcareo)	De Pascalis (calcareo)	Tecno Beton (pietrisco basaltico)	De Pascalis (calcareo)	RAP	
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]
3	13	6	42	36	0	2.638

Tabella 3.5. Mineralogia miscela C\_Andria

Inoltre, l'impresa Amplia Infrastructures S.p.A. ha effettuato lo studio granulometrico presso i laboratori centrali di Magliano Sabina in data 01/04/2022 con i risultati riportati in Fig. 3.12 che poi verrà confrontato con lo studio fatto sulla miscela nel Laboratorio di Strade e Trasporti dell'UnivPM, al fine di individuare la curva granulometrica ricadente nei fusi di progetto.

Studio granulometrico										Data : 01/04/2022		
Inerte	D'Oria	De Pascalis	Tecno Beton	De Pascalis				Le Cave	Risultante granulometrica		Fuso	
	0/4	4/8	10/16	8/16			Filler	Trattenuti %	Passanti %	Passanti %		
Analisi granulometriche (UNI EN 933-1) Set. UNI - Trattenuti %												
	31,5								100,0	100	100	
	20								100,0	100	100	
	14			14,8	5,6				8,2	91,8	85	94
	10			65,5	40,0				41,9	49,9	38	53
	6,3		24,0	19,3	51,0				27,9	22,0	13	26
	2	22,3	74,1		2,7				8,3	13,6	8	18
	0,5	42,0	1,2						5,5	8,1	6	12
	0,25	14,0							1,8	6,3	6	10
	0,063	11,1						13,8	1,9	4,4	4	8
Filler	10,6	0,7	0,4	0,7				86,2	4,4			
% utilizzo	13	6	42	36			3					
Gse g/cm <sup>3</sup> (MVA inerti)	2,652	2,580	2,700	2,570			2,690		2,638	Gse mix		

Figura 3.12. Studio granulometrico della miscela C (scheda tecnica)

Si hanno noti, inoltre, le seguenti percentuali di bitume ed inerti forniteci dall'impianto e riportate di seguito in Fig. 3.13 ricavate dalla scheda tecnica.

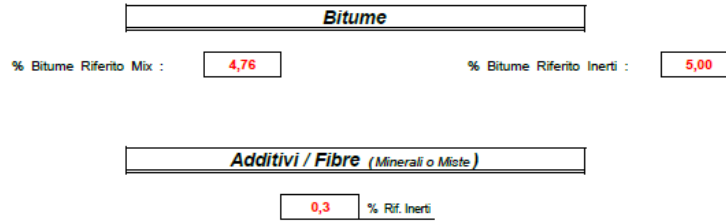


Figura 3.13. Rispettive percentuali di bitume e additivi/fibre ricavate dalla scheda tecnica

Il numero dei vuoti, utili al fine della preparazione dei provini da testare, sono quelli ricavati dalla pressa giratoria a 50 rotazioni come visibili in Fig. 3.14.

N° Rotazioni	Miscela di prova				Air voids %
	%Gmm	Air voids %	VMA %	VFA %	
10	71,2	28,8	-	-	≥ 25
50	76,2	23,8	32,5	26,8	≥ 20
130	79,5	20,5	-	-	≥ 16

Figura 3.14. Percentuale di vuoti da scheda tecnica

Si riportano, nella Tab. 3.6 mostrata nel seguito i valori utilizzati per il confezionamento dei campioni. Questi ultimi sono stati ottenuti dall'estrazione fatta in laboratorio sul materiale appena arrivato prima di testarlo e confrontati poi con quelli forniti dalla scheda tecnica. Le modalità di esecuzione della metodologia utilizzata si descrivono nei capitoli successivi.

Miscela	Bitume (in peso riferito Mix.)	Bitume (in peso riferito aggregati)	Vuoti (n. 50)	Additivo/fibre (in peso riferito aggregati)	$\rho_{\max, \text{mix}}$
[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]
SCHEDA TECNICA	4.76	5.00	23.8	0.3	2.638
ESTRAZIONE	4.10	4.30		0.3	2.447

Tabella 3.6. Risultati estrazione miscela C\_Andria

Al fine di ottenere un ulteriore riscontro sulla miscela da testare è stata ricavata la curva granulometrica di laboratorio e verificato che la media delle estrazioni fatte sia il più possibile approssimabile a quella ottenuta dai laboratori di Amplia Infrastructures S.p.A. Questo confronto, ricavato dopo la setacciatura ampiamente descritta nei paragrafi successivi, è visibile in Fig. 3.15.

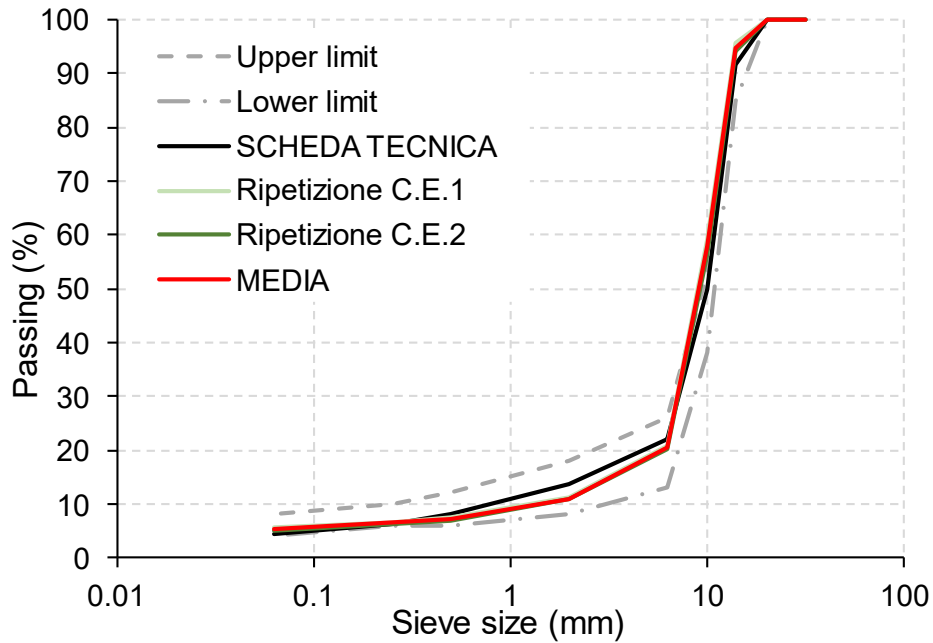


Figura 3.15. Curve granulometriche determinate in laboratorio

### 3.1.4. Materiale D\_Marcianise

Il materiale è stato prelevato dall'impianto di Marcianise che andrà successivamente steso nell'autostrada A1: Milano – Napoli / A30: Caserta – Salerno / A16: Napoli – Bari tratta A1: Ceprano – Napoli / A16: Napoli – Candela, confezionato in appositi sacchi e spedito nel Laboratorio di Strade e Trasporti dell'UnivPM come in Fig. 3.16.

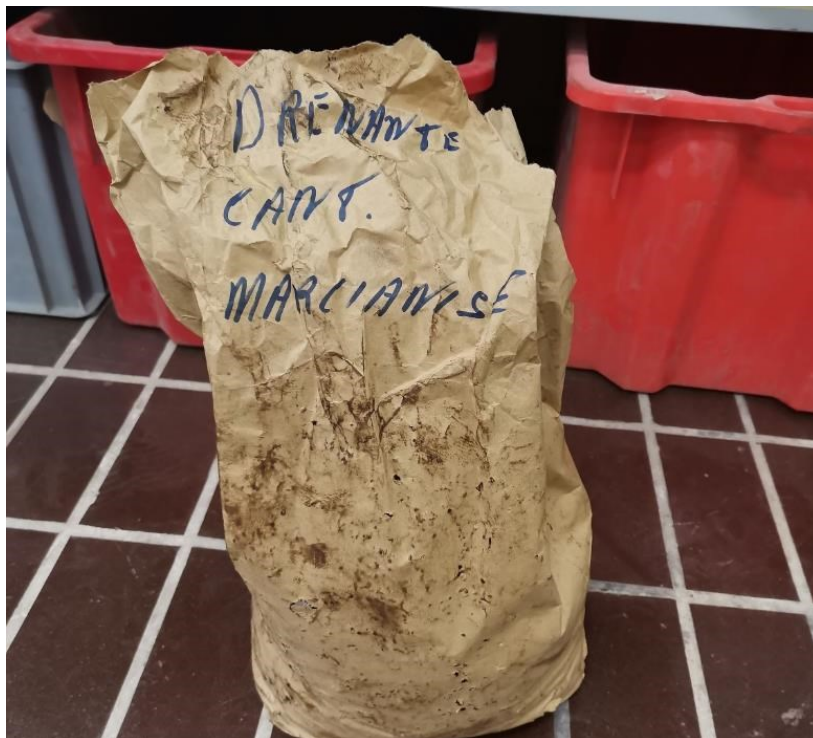


Figura 3.16. Materiale prelevato dal cantiere di produzione e spedito nel Laboratorio di Strade e Trasporti dell'UnivPM

La miscela è stata progettata con un quantitativo di bitume modificato SBS 3,8 % rispetto al bitume vergine e la mineralogia mostrata in Tab. 3.7.

AGGREGATI					
0/1	0/4	6.3/10	8/16	0/16	MVA
Filler Carbocal	Area Basalti			RAP	
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]
3	12	12	73	0	2.750

Tabella 3.7. Mineralogia miscela D\_Marcianise

Inoltre, l'impresa Amplia S.p.A. ha effettuato lo studio granulometrico presso i laboratori centrali di Magliano Sabina in data 01/04/2022 con i risultati riportati in Fig. 3.17 che poi verrà confrontato con lo studio fatto sulla miscela nel Laboratorio di Strade e Trasporti dell'UnivPM, al fine di individuare la curva granulometrica ricadente nei fusi di progetto.

Studio granulometrico										Data : 23/03/2022		
Inerte	Area Basalti	Area Basalti	Area Basalti					Filler Carbocal	Risultante granulometrica		Fuso	
	0/4	6,3/10	8/16					0/1	Trattenuti %	Passanti %	Passanti %	
Analisi granulometriche (UNI EN 933-1) Set. UNI - Trattenuti %												
										100,0	100	100
	31,5									100,0	100	100
	20									11,0	89,0	85
	14			15,1						48,0	41,0	38
	10		9,7	64,1						20,6	20,5	13
	6,3		58,8	18,5						6,9	13,6	8
	2	16,9	30,7	1,6						5,2	8,4	6
	0,5	43,2								1,3	6,9	6
	0,25	12,1							8,6	2,4	4,5	4
0,063	18,1							90,1	4,5		8	
Filler	9,7	0,8	0,7									
% utilizzo	12	12	73					3				
Gse g/cm <sup>3</sup> (MVA inerti)	2,730	2,790	2,750					2,690		2,750		Gse mix

Figura 3.17. Studio granulometrico della miscela D (scheda tecnica)

Si hanno noti, inoltre, le seguenti percentuali di bitume ed inerti forniteci dall'impianto e riportate di seguito in Fig. 3.18 ricavate dalla scheda tecnica.

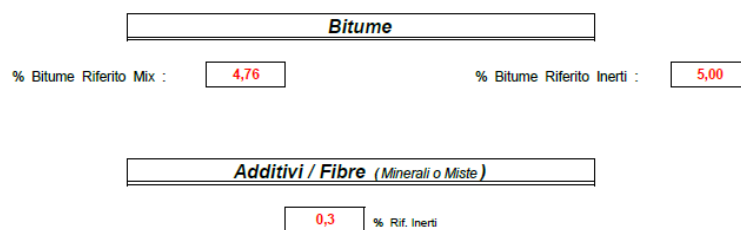


Figura 3.18. Rispettive percentuali di bitume e additivi/fibre ricavate dalla scheda tecnica

Il numero dei vuoti, utili al fine della preparazione dei provini da testare, sono quelli ricavati dalla pressa giratoria a 50 rotazioni come visibili in Fig. 3.19.

N° Rotazioni	Miscela di prova				Air voids %
	%Gmm	Air voids %	VMA %	VFA %	
10	71,9	28,1	-	-	≥ 25
50	79,5	20,5	29,9	31,5	≥ 20
130	82,6	17,4	-	-	≥ 16

Figura 3.19. Percentuale di vuoti da scheda tecnica

Si riportano, nella Tab. 3.8 mostrata nel seguito i valori utilizzati per il confezionamento dei campioni. Questi ultimi sono stati ottenuti dall'estrazione fatta in laboratorio sul materiale appena arrivato prima di testarlo e confrontati poi con quelli forniti dalla scheda tecnica. Le modalità di esecuzione della metodologia utilizzata si descrivono nei capitoli successivi.

Miscela	Bitume (in peso riferito Mix.)	Bitume (in peso riferito aggregati)	Vuoti (n. 50)	Additivo/fibre (in peso riferito aggregati)	$\rho_{\max, \text{mix}}$
[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]
SCHEDA TECNICA	4.76	5.00	20.5	0.3	2.750
ESTRAZIONE	4.30	4.50		0.3	2.562

Tabella 3.8. Risultati estrazione miscela D\_Marcianise

Al fine di ottenere un ulteriore riscontro sulla miscela da testare è stata ricavata la curva granulometrica di laboratorio e verificato che la media delle estrazioni fatte sia il più possibile approssimabile a quella ottenuta dai laboratori di Amplia Infrastructures S.p.A. Questo confronto, ricavato dopo la setacciatura ampiamente descritta nei paragrafi successivi, è visibile in Fig. 3.20.

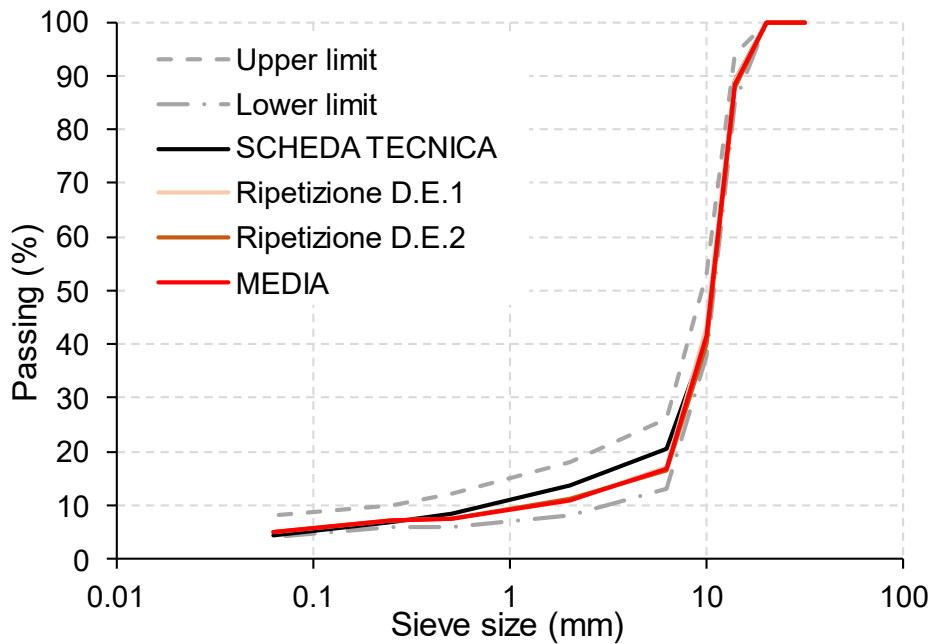


Figura 3.20. Curve granulometriche determinate in laboratorio

### 3.1.5. Materiale E\_Loreto

Il materiale è stato prelevato dall'impianto di Loreto il 18/05/2023 ed utilizzato nell'autostrada A14: Bologna – Bari – Taranto nella tratta Cattolica – S. Benedetto per la carreggiata Nord della corsia di marcia, confezionato in appositi sacchi e spedito nel Laboratorio di Strade e Trasporti dell'UnivPM come in Fig. 3.21.



Figura 3.21. Materiale prelevato dal cantiere di produzione e spedito nel Laboratorio di Strade e Trasporti dell'UnivPM



La miscela è stata progettata con un quantitativo di bitume modificato SBS 3,8 % rispetto al bitume vergine e la mineralogia mostrata in Tab. 3.9.

AGGREGATI					
0/1	0/4	6/10	8/16	0/16	MVA
Filler Edilcalce	Area Basalti			RAP	
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]
4	10	13	73	0	2.747

Tabella 3.9. Mineralogia miscela E\_Loreto

Inoltre, la società Amplia Infrastructures S.p.A. ha effettuato lo studio granulometrico presso l'impianto di produzione di Loreto in data 21/02/2023 con i risultati riportati in Fig. 3.22 che poi verrà confrontato con lo studio fatto sulla miscela nel Laboratorio di Strade e Trasporti dell'UnivPM, al fine di individuare la curva granulometrica ricadente nei fusi di progetto.

Studio granulometrico										Data : 21/02/2023											
Aggregato d/D	Area Basalti 0/4	Area Basalti 6/10	Area Basalti 8/16				Filler Edilcalce 0/1	Risultante granulometrica peso		Risultante granulometrica volume		Fuso									
								Trattenuti %	Passanti %	Trattenuti %	Passanti %	Passanti in volume %									
								peso		volume											
									100,0		100,0	100	100								
									100,0		100,0	100	100								
			15,1					11,0	89,0	11,0	89,0	85	94								
		6,8	60,2					44,8	44,1	44,6	44,4	38	53								
		58,6	22,3					23,9	20,3	23,9	20,5	13	26								
	13,6	32,4	1,6					6,7	13,5	6,8	13,7	8	18								
	40,5	1,1						4,2	9,3	4,2	9,5	6	12								
	14,9							1,5	7,8	1,5	8,0	6	10								
	23,1						17,0	3,0	4,8	3,0	5,0	4	8								
Filler	7,9	1,1	0,8				83,0	4,8		5,0											
% utilizzo										10	13	73				4	100	Quota materiale di recupero (%)		-	
Gse gr/cm <sup>3</sup> (MVA aggr.)										2,730	2,720	2,760				2,650		2,747	Gse mix		

Figura 3.22. Studio granulometrico della miscela E (scheda tecnica)

Si hanno noti, inoltre, le seguenti percentuali di bitume ed inerti forniteci dall'impianto e riportate di seguito in Fig. 3.23 ricavate dalla scheda tecnica.

<b>Bitume Modificato Hard</b>			
			Limiti C.S.
Bitume TOTALE riferito agli aggregati (%)	5,00	5,0%	6,0%
Bitume TOTALE riferito alla miscela (%)	4,76		
Bitume VERGINE riferito agli aggregati (%)			
<b>Additivi chimici per tiepido (ACT)</b>			
Additivo riferito al Bitume TOTALE (%)	-		
<b>Fibre (cellulosa/miste)</b>			
Fibre riferite agli aggregati (%)	0,3		

Figura 3.23. Rispettive percentuali di bitume e additivi/fibre ricavate dalla scheda tecnica

Il numero dei vuoti, utili al fine della preparazione dei provini da testare, sono quelli ricavati dalla pressa giratoria a 50 rotazioni come visibili in Fig. 3.24.

Livello compat.	N° Rotazioni	Miscela di prova				Requisiti C.S.
		% Gmm	% Vuoti	VMA %	VFA %	Vuoti %
<b>N1</b>	<b>10</b>	72,0	28,0	-	-	≥ 25
<b>N2</b>	<b>50</b>	79,4	20,6	30,0	31,4	≥ 20
<b>N3</b>	<b>130</b>	82,5	17,5	-	-	≥ 16

Figura 3.24. Percentuale di vuoti da scheda tecnica

Si riportano, nella Tab. 3.10 mostrata nel seguito i valori utilizzati per il confezionamento dei campioni. Questi ultimi sono stati ottenuti dall'estrazione fatta in laboratorio sul materiale appena arrivato prima di testarlo e confrontati poi con quelli forniti dalla scheda tecnica. Le modalità di esecuzione della metodologia utilizzata si descrivono nei capitoli successivi.

Miscela	Bitume (in peso riferito Mix.)	Bitume (in peso riferito aggregati)	Vuoti (n. 50)	Additivo/fibre (in peso riferito aggregati)	$\rho_{\max, \text{mix}}$
[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]
SCHEDA TECNICA	4.76	5.00	20.6	0.3	2.747
ESTRAZIONE	4.20	4.40		0.3	2.564

Tabella 3.10. Risultati estrazione miscela E\_Loreto

Al fine di ottenere un ulteriore riscontro sulla miscela da testare è stata ricavata la curva granulometrica di laboratorio e verificato che la media delle estrazioni fatte sia il più possibile approssimabile a quella ottenuta dai laboratori di Amplia Infrastructures S.p.A. Questo confronto, ricavato dopo la setacciatura ampiamente descritta nei paragrafi successivi, è visibile in Fig. 3.25.

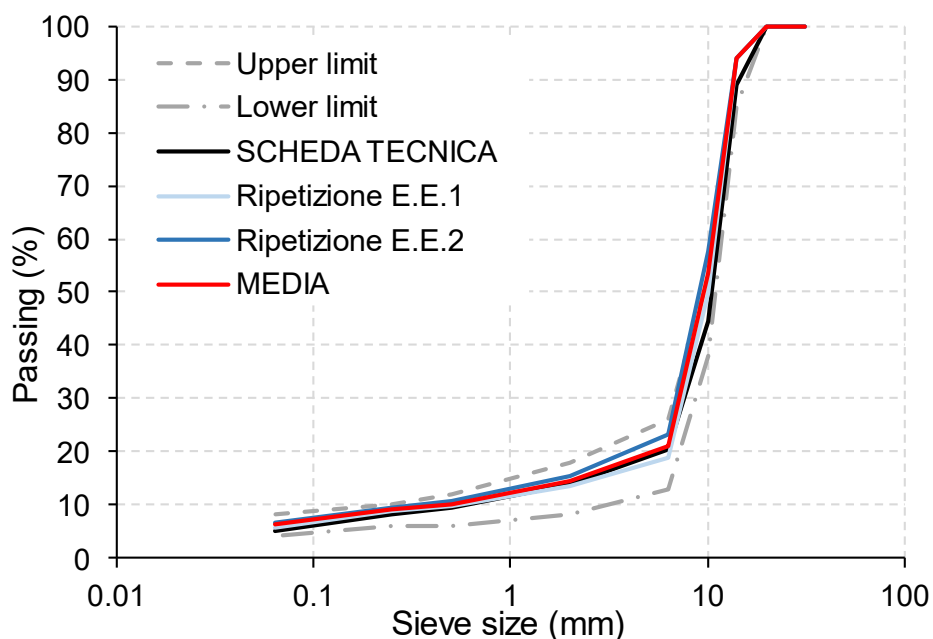


Figura 3.25. Curve granulometriche determinate in laboratorio

### 3.1.6. Materiale F\_Magliano RA

Il materiale è stato prelevato dall'impianto di Amplia a Magliano Sabina il 21/02/2023 e steso nell'autostrada A1: Milano – Napoli nella tratta Chiusi – Tivoli per la carreggiata Nord della corsia di marcia, confezionato in appositi sacchi e spedito nel Laboratorio di Strade e Trasporti dell'UnivPM come in Fig. 3.26. Tale miscela contiene il 15% di Reclaimed Asphalt (RA) la cui frazione granulometrica è 0/14, che fa di essa

un conglomerato sostenibile dal punto di vista ecologico. Il RA è composto da aggregati ricoperti di bitume invecchiato i quali derivano dalla scarifica di pavimentazioni ammalorate. Questo materiale miscelato con gli aggregati e bitume vergini comporta un notevole risparmio in termini di materiali riducendo così anche l'utilizzo delle fonti non rinnovabili ma anche un cambiamento delle prestazioni della miscela. Questo aspetto è importante poiché il fono contiene più bitume invecchiato e ciò influisce sul dosaggio dell'additivo se il conglomerato bituminoso fosse tiepido. In tal caso, questo materiale è stato confezionato a temperature minori rispetto agli altri essendo un conglomerato classificato come "tiepido". L'abbassamento delle temperature di produzione e compattazione è stato reso possibile grazie all'aggiunta di un additivo di tipo chimico con un dosaggio dello 0,5% sul bitume totale. Ciò comporta una notevole riduzione degli impatti ambientali per quanto riguarda le procedure di produzione, stesa e compattazione salvaguardando anche la salute degli operatori.



Figura 3.26. Materiale prelevato dal cantiere di produzione e spedito nel Laboratorio di Strade e Trasporti dell'UnivPM

La miscela è stata progettata con un quantitativo di bitume modificato SBS 3,8 % rispetto al bitume vergine e la mineralogia mostrata in Tab. 3.11.

AGGREGATI						
0/1	0/2	4/8	10/16	10/16	0/14	MVA
Filler Edilcalce	Area Basalti			Tufo	RAP	
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]
4	8	14	39	20	15	2.707

Tabella 3.11. Mineralogia miscela F\_Magliano RA

Successivamente, l'impresa Amplia Infrastructures S.p.A. ha effettuato lo studio granulometrico presso l'impianto di produzione di Magliano Sabina in data 21/02/2023 con i risultati riportati in Fig. 3.27 che poi verrà confrontato con lo studio fatto sulla miscela nel Laboratorio di Strade e Trasporti dell'UnivPM, al fine di individuare la curva granulometrica ricadente nei fusi di progetto.

Aggregato d/D	Basalti Orvieto	Basalti Orvieto	Basalti Orvieto	Il Tufo Romano		Aggregato RA Drenante	Filler Edilcalce	Risultante granulometrica peso		Risultante granulometrica volume		Fuso	
	0/2	4/8	10/16	10/16		0/14	0/1	Trattenuti %	Passanti %	Trattenuti %	Passanti %	Passanti in volume %	
								peso		volume			
									100,0		100,0	100	100
									100,0		100,0	100	100
			22,8	7,3				11,8	88,2	11,8	88,2	85	94
			57,0	61,1				41,4	46,8	41,4	46,8	38	53
		55,1	19,7	31,1				25,7	21,0	25,7	21,1	13	26
	12,8	44,5						7,8	13,2	7,8	13,3	8	18
	44,4							4,1	9,2	4,1	9,2	6	12
	13,9							1,3	7,8	1,3	7,9	6	10
	16,6							2,8	5,4	2,4	5,5	4	8
Filler	12,3	0,4	0,5	0,5			5,0	83,0	5,4		5,5		
% utilizzo	8	14	39	20			15	4	100	Quota materiale di recupero (%)		35	
Gse gr/cm <sup>3</sup> (MVA aggr.)	2,720	2,700	2,700	2,740			2,700	2,650		2,707	Gse mix		

Figura 3.27. Studio granulometrico della miscela F (scheda tecnica)

Si hanno noti, inoltre, le seguenti percentuali di bitume ed inerti fornite dall'impianto e riportate di seguito in Fig. 3.28 ricavate dalla scheda tecnica.

<b>Bitume Modificato Hard</b>			
			Limiti C.S.
Bitume TOTALE riferito agli aggregati	(%)	5,30	5,3%    6,3%
Bitume TOTALE riferito alla miscela	(%)	5,03	
Bitume VERGINE riferito agli aggregati	(%)	4,70	

<b>Additivi chimici per tiepido (ACT)</b>	
Additivo riferito al Bitume TOTALE	(%) 0,5

<b>Fibre (cellulosa/miste)</b>	
Fibre riferite agli aggregati	(%) 0,3

Figura 3.28. Rispettive percentuali di bitume e additivi/fibre ricavate dalla scheda tecnica

Il numero dei vuoti, utili al fine della preparazione dei provini da testare, sono quelli ricavati dalla pressa giratoria a 50 rotazioni come visibili in Fig. 3.29.

Livello compat.	N° Rotazioni	Miscela di prova				Requisiti C.S.
		% Gmm	% Vuoti	VMA %	VFA %	Vuoti %
<b>N1</b>	<b>10</b>	73,1	26,9	-	-	≥ 25
<b>N2</b>	<b>50</b>	78,9	21,1	30,8	31,6	≥ 20
<b>N3</b>	<b>130</b>	82,2	17,8	-	-	≥ 16

Figura 3.29. Percentuale di vuoti da scheda tecnica

Si riportano, nella Tab. 3.12 mostrata nel seguito i valori utilizzati per il confezionamento dei campioni. Questi ultimi sono stati ottenuti dall'estrazione fatta in laboratorio sul materiale appena arrivato prima di testarlo e confrontati poi con quelli forniti dalla scheda tecnica. Le modalità di esecuzione della metodologia utilizzata si descrivono nei capitoli successivi.

Miscela	Bitume (in peso riferito Mix.)	Bitume (in peso riferito aggregati)	Vuoti (n. 50)	Additivo/fibre (in peso riferito bit./agg.)	$\rho_{\max, \text{mix}}$
[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]
SCHEDA TECNICA	5.03	5.30	21.1	0.5/0.3	2.707
ESTRAZIONE	4.70	5.00		0.5/0.3	2.510

Tabella 3.12. Risultati estrazione miscela F\_Magliano RA

Al fine di ottenere un ulteriore riscontro sulla miscela da testare è stata ricavata la curva granulometrica di laboratorio e verificato che la media delle estrazioni fatte sia il più possibile approssimabile a quella ottenuta dai laboratori di Ampplia Infrastructures S.p.A. Questo confronto, ricavato dopo la setacciatura ampiamente descritta nei paragrafi successivi, è visibile in Fig. 3.30.

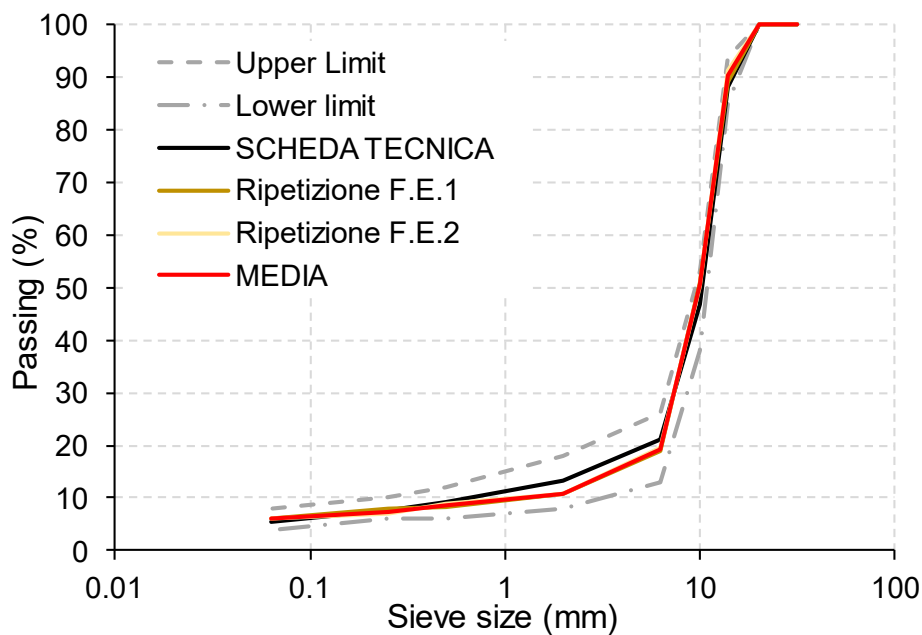


Figura 3.30. Curve granulometriche determinate in laboratorio

### 3.1.7. Materiale G\_Marcianise RA

Il materiale è stato prelevato dall'impianto di Marcianise e steso successivamente nell'autostrada A1: MI – NA, A30: CE – SA, A16: NA – BA nella tratta A1: Ceprano – Napoli / A16: Napoli – Candela, confezionato in appositi sacchi e spedito nel Laboratorio di Strade e Trasporti dell'UnivPM come in Fig. 3.31. Anche in questo

conglomerato bituminoso, come nel precedente, è presente una quantità di RA pari al 15% ed avente una pezzatura 8/16.



Figura 3.31. Materiale prelevato dal cantiere di produzione e spedito nel Laboratorio di Strade e Trasporti dell'UnivPM

La miscela è stata progettata con un quantitativo di bitume modificato SBS 3,8 % rispetto al bitume vergine e la mineralogia mostrata in Tab. 3.13.

AGGREGATI					
0/1	0/4	6.3/10	8/16	8/16	MVA
Filler Carbocal	Area Basalti			RAP	
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]
3	10	8	64	15	2.746

Tabella 3.13. Mineralogia miscela F\_Magliano RA

Inoltre, l'impresa Amplia Infrastructures S.p.A. ha effettuato lo studio granulometrico presso l'impianto di produzione di Magliano Sabina in data 23/03/2022 con i risultati riportati in Fig. 3.32 che poi verrà confrontato con lo studio fatto sulla miscela nel Laboratorio di Strade e Trasporti dell'UnivPM, al fine di individuare la curva granulometrica ricadente nei fusi di progetto.



Inerte	Area Basalti	Area Basalti	Area Basalti	Granulato cb dren.	filler Carbocal	Risultante granulometrica		Fuso		
	0/4	6,3/10	8/16			8/16	0/1	Trattenuti %	Passanti %	Passanti %
Analisi granulometriche (UNI EN 933-1) Set. UNI - Trattenuti %	31,5							100,0	100	100
	20							100,0	100	100
	14			15,1	3,0		10,1	89,9	85	94
	10		9,7	64,1	41,7		48,1	41,8	38	53
	6,3		58,8	18,5	37,0		22,1	19,7	13	26
	2	16,9	30,7	1,6	5,0		5,9	13,8	8	18
	0,5	43,2			3,1		4,8	9,0	6	12
	0,25	12,1			1,4	1,3	1,5	7,6	6	10
	0,063	18,1			2,4	8,6	2,4	5,1	4	8
	Filler	9,7	0,8	0,7	6,4	90,1	5,1			
	% utilizzo	10	8	64	15	3				

Gse g/cm <sup>3</sup> (MVA inerti)	2,730	2,790	2,750		2,725		2,690		2,746	Gse mix
---------------------------------------	-------	-------	-------	--	-------	--	-------	--	-------	---------

Figura 3.32. Studio granulometrico della miscela G (scheda tecnica)

Si hanno noti, inoltre, le seguenti percentuali di bitume riferito alla miscela e agli inerti fornite dall'impianto e riportate di seguito in Fig. 3.33 ricavate dalla scheda tecnica.

<b>Bitume</b>	
% Bitume Totale Riferito Mix :	4,90
% Bitume Totale Riferito Inerti :	5,15
% Bitume Vergine Riferito Inerti :	4,55
<b>Additivi / Fibre (Minerali o Miste)</b>	
% Rif. Inerti	0,3

Figura 3.33. Rispettive percentuali di bitume e additivi/fibre ricavate dalla scheda tecnica

Il numero dei vuoti, utili al fine della preparazione dei provini da testare, sono quelli ricavati dalla pressa giratoria a 50 rotazioni come visibili in Fig. 3.34.

N° Rotazioni	Miscela di prova				Air voids %
	%Gmm	Air voids %	VMA %	VFA %	
10	71,3	28,7	-	-	≥ 25
50	77,6	22,4	31,8	29,7	≥ 20
130	81,0	19,0	-	-	≥ 16

Figura 3.34. Percentuale di vuoti da scheda tecnica

Si riportano, nella Tab. 3.14 mostrata nel seguito i valori utilizzati per il confezionamento dei campioni. Questi ultimi sono stati ottenuti dall'estrazione fatta in laboratorio sul materiale appena arrivato prima di testarlo e confrontati poi con quelli forniti dalla scheda tecnica. Le modalità di esecuzione della metodologia utilizzata si descrivono nei capitoli successivi.

Miscela	Bitume (in peso riferito Mix.)	Bitume (in peso riferito aggregati)	Vuoti (n. 50)	Additivo/fibre (in peso riferito bit./agg.)	$\rho_{\max, \text{mix}}$
[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]
SCHEDA TECNICA	4.90	5.15	22.4	0.3	2.746
ESTRAZIONE	4.80	5.10		0.3	2.538

Tabella 3.14 Risultati estrazione miscela G\_Marcianise

Al fine di ottenere un ulteriore riscontro sulla miscela da testare è stata ricavata la curva granulometrica di laboratorio e verificato che la media delle estrazioni fatte sia il più possibile approssimabile a quella ottenuta dai laboratori di Amplia Infrastructures S.p.A. Questo confronto, ricavato dopo la setacciatura ampiamente descritta nei paragrafi successivi, è visibile in Fig. 3.35.

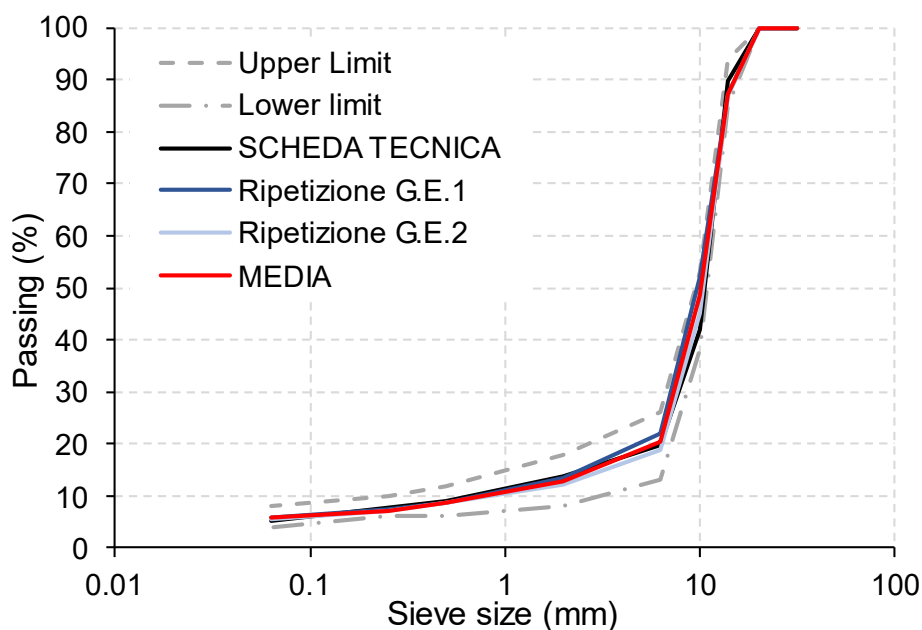


Figura 3.35. Curve granulometriche determinate in laboratorio

### 3.1.8. Materiale H\_Rimini

Il materiale è stato prelevato dall'impianto di produzione del conglomerato bituminoso sito in Località Pianetta di Pietracuta, San Leo (RN) confezionato in appositi sacchi e spedito nel Laboratorio di Strade e Trasporti dell'UnivPM come in Fig. 3.36.

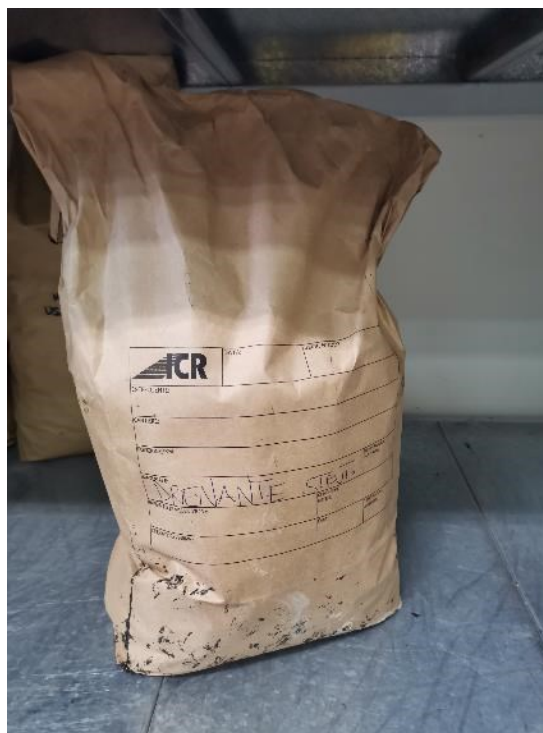


Figura 3.36 Materiale prelevato dal cantiere di produzione e spedito nei laboratori UNIVPM del dipartimento DICEA

La miscela è stata progettata con un quantitativo di bitume modificato SBS 3,8 % rispetto al bitume vergine e la mineralogia mostrata in Tab. 3.15.

AGGREGATI					
0/1	0/4	5/11	10/16	0/16	MVA
Filler Concetti	Area Basalti			RAP	
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]
2.7	11	11	78	0	2.728

Tabella 3.15. Mineralogia miscela H\_Rimini

Inoltre, l'impresa ha effettuato lo studio granulometrico presso l'impianto di produzione a Rimini in data 18/06/2020 con i risultati riportati in Fig. 3.37 che poi

verrà confrontato con lo studio fatto sulla miscela nel Laboratorio di Strade e Trasporti dell'UnivPM, al fine di individuare la curva granulometrica ricadente nei fusi di progetto. Il numero dei vuoti, utili al fine della preparazione dei provini da testare, sono quelli ricavati dalla pressa giratoria a 50 rotazioni come visibili di seguito. Si hanno noti, inoltre, le seguenti percentuali di bitume riferito alla miscela e agli inerti fornite dall'impianto e riportate sempre in Fig. 3.37 ricavate dalla scheda tecnica.

Risultati del Test			
Contenuto di Bitume riferito alla miscela (%)	4,81		
Contenuto di Bitume riferito agli inerti (%)	5,05		
Granulometria (passante)	%	Fuso % (ASPI ord.serv.2020 DT7)	
40,0 mm	100,0	100	100
31,5 mm	100,0	100	100
20 mm	100,0	100	100
14 mm	90,6	85	94
10 mm	40,1	38	53
6,3 mm	20,5	13	26
4 mm	16,2		
2 mm	13,4	8	18
0,5 mm	8,1	6	12
0,25 mm	6,8	6	10
0,063 mm	4,8	4	8
	50 @nDes	Min (n Des)	Max (n max)
Contenuto di vuoti per provini compattati (GIRATORIA)	22,3	20	
Contenuto di vuoti per provini compattati (MARSHALL)			
VFB	35,1		
VMA	27,8		

Figura 3.37 Studio granulometrico della miscela H (scheda tecnica)

La determinazione delle masse volumiche è stata ricavata dallo studio fatto in impianto e riportata in Fig. 3.38.

percentuale di aggregati nella miscela	$p_a$	m/m	95,2
massa volumica apparente degli aggregati	$\rho_a$	(kg/m <sup>3</sup> )	2728
percentuale di legante nella miscela	$p_b$	m/m	4,81
massa volumica del legante a 25 °C	$\rho_b$	(kg/m <sup>3</sup> )	1020
$p_a + p_b = 100,0\%(m/m)$			100,0
massa volumica massima della miscela bituminosa $\rho_{mc} = \frac{100}{(p_a/\rho_a) + (p_b/\rho_b)}$	$\rho_{mh}$	(kg/m <sup>3</sup> )	2524,8

Figura 3.38 Determinazione delle masse volumiche della miscela

Si riportano, nella Tab. 3.16 mostrata nel seguito, i valori utilizzati per il confezionamento dei campioni. Questi ultimi sono stati ottenuti dall'estrazione fatta in laboratorio sul materiale appena arrivato prima di testarlo e confrontati poi con quelli forniti dalla scheda tecnica. Le modalità di esecuzione della metodologia utilizzata si descrivono nei capitoli successivi.

Miscela	Bitume (in peso riferito Mix.)	Bitume (in peso riferito aggregati)	Vuot i (n. 50)	Additivo/fibre (in peso riferito aggregati)	$\rho_{\max, \text{mix}}$
[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]
SCHEDA TECNICA	4.81	5.05	22.3	-	2.728
ESTRAZIONE	4.40	4.60		-	2.564

Tabella 3.16 Risultati estrazione miscela H\_Rimini

Al fine di ottenere un ulteriore riscontro sulla miscela da testare è stata ricavata la curva granulometrica di laboratorio e verificato che la media delle estrazioni fatte sia il più possibile approssimabile a quella ottenuta dai laboratori ICR. Questo confronto, ricavato dopo la setacciatura ampiamente descritta nei paragrafi successivi, è visibile in Fig. 3.39.

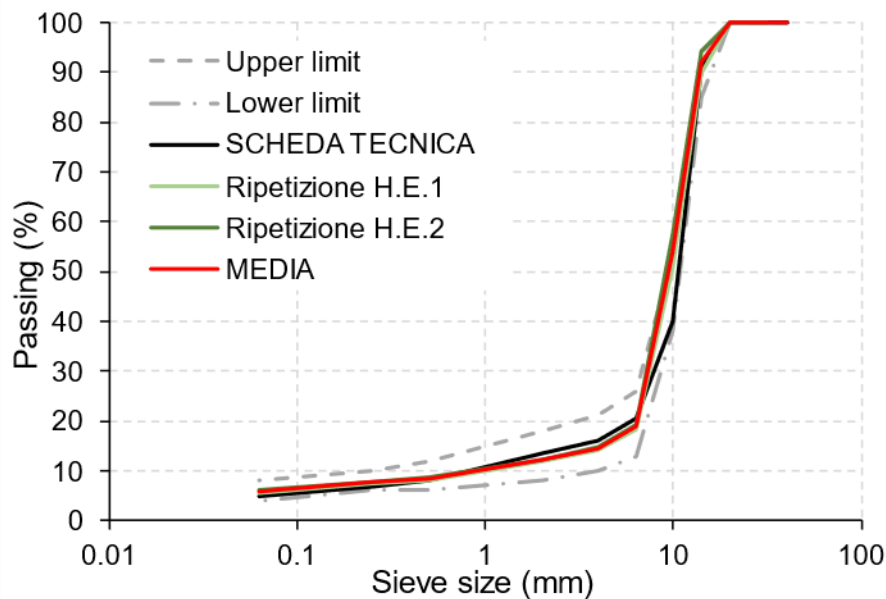


Figura 3.39 Curve granulometriche determinate in laboratorio

## 3.2. Strumenti e macchinari utilizzati

A seguire si mostrano gli strumenti e i macchinari utilizzati, con le relative elaborazioni dei dati. Un ulteriore approfondimento sull'analisi dei risultati, finalizzato al confronto tra le prestazioni nei confronti dello sgranamento, è riportato al Capitolo 4.

### 3.2.1. Estrattore

L'estrattore rappresentato in *Fig. X* è stato fabbricato dall'azienda infraTest con sede in Brackenheim-Botenheim (Germania, Company - infraTest).

Questo macchinario permette la separazione del bitume dagli aggregati. Ciò è reso possibile da vari cicli di lavaggio del conglomerato bituminoso poroso con solvente (percloro etilene) che insieme a degli ultrasuoni lava l'inerte dal bitume. Il solvente sporco di bitume viene ripulito in vasca di decantazione, e poi rimandato in circolo passando per il sistema di raffreddamento (elemento a sinistra in Fig. 3.40). A fine estrazione si ha l'aggregato pulito; il bitume presente nel conglomerato si ricava per differenza di pesate.



Figura 3.40. Estrattore infraTest

Questo dispositivo è gestibile da un pannello di controllo fornito di un display e dei pulsanti che indicano i vari comandi per poter far partire l'estrazione o arrestarla in caso di malfunzionamenti. Sono anche presenti delle spie che indicano dei problemi di malfunzionamento e altre che indicano che la possibilità di operare nel macchinario in sicurezza (come aprire i vari alloggi a fine estrazione).

Nella parte bassa del macchinario sopradescritto sono visibili due misuratori di livello (Fig. 3.40) dove quello di sinistra indica il livello del solvente pulito che deve essere

maggiore di un minimo (14 litri), mentre a destra indica il solvente sporco che deve essere nullo o quasi ad inizio prova. Nel corso dell'estrazione il solvente pulito andrà in circolo lavando il materiale, il che comporta un abbassamento del livello del solvente pulito (livello a sinistra) poiché diluisce il bitume. Il solvente sporco va quindi decantato e pulito in vasca di decantazione, causando così l'innalzamento del livello di destra. A fine estrazione i livelli dei solventi devono ritornare all'incirca quelli iniziali: il solvente di destra si innalza lievemente poiché dopo ogni estrazione rimane del residuo, che va cambiato raggiunta una certa soglia.

Il conglomerato bituminoso, con peso misurato di circa 1 kg, va immesso e sigillato nel cosiddetto cestello, ovvero un cilindro formato da una maglia metallica di 63 micron. Il cestello chiuso si alloggia nell'apposito spazio in posizione orizzontale. Il cestello a fine estrazione contiene l'aggregato privato del filler. Si pesa quindi l'aggregato nel cestello. Il cestello va ripulito con aria compressa facendo attenzione a non danneggiare la maglia. Il materiale fine, passante alla maglia del cestello, è quindi raccolto nella capsula al cui interno va disposto della carta filtro. Finita l'estrazione la capsula va rimossa, e il filler all'interno va pesato. Anche quest'ultima va ripulita con l'aria compressa.

Di seguito si riportano le varie pesate e il calcolo per risalire al quantitativo di bitume utilizzato nella miscela.

#### *Pre-Estrazione:*

Peso 1: TARA CESTELLO= Cestello + Tappo

Peso 2: PESO LORDO CESTELLO= Cestello + Tappo + Conglomerato bituminoso (c.b.)

Peso 3: TARA CAPSULA= Capsula + Carta Filtro

#### *Post-Estrazione:*

Peso 4: TARA CESTELLO + INERTE PULITO

Peso 5: TARA CAPSULA + FILLER

*Successivamente si effettua il calcolo della quantità di bitume:*

Quantità c.b. = (Peso 2) – (Peso 1)

Inerti cestello = (Peso 4) – (Peso 1)

Filler capsula = (Peso 5) – (Peso 3)

Totale aggregato = Inerti cestello + Filler capsula

Bitume = Quantità c.b. + Totale aggregato

### 3.2.2. Vibrovaglio

Il vibrovaglio è utilizzato al fine dell'esecuzione di una corretta vagliatura del materiale analizzato per costruire la curva granulometrica. Il suo funzionamento consiste nell'imporre delle oscillazioni (rispettivamente a destra e a sinistra di un ipotetico asse verticale nel piano individuabile dalle barre metalliche presenti in Fig. 3.41) tramite un

dispositivo elettronico situato all'interno della parte bassa dello strumento. Prima di far partire l'agitatore va disposta nello spazio centrale la pila di setacci con il materiale da analizzare, e per evitare la sua fuoriuscita si fissa una zavorra sopra il coperchio come visibile in Fig. 3.41. Per una vagliatura completa il setacciatore va lasciato in funzione per circa 10 minuti e poi va estratta la pila dove sarà presente il materiale vagliato.



Figura 3.41. Setacciatore automatico con pila di setacci

*Setacci per l'analisi granulometria normati ASTM* (Fig. 3.42):

è un apparecchio detto anche vaglio in base alla forma delle maglie (rispettivamente quadrata o circolare) della rete metallica contenuta al loro interno che serve a separare elementi di diverse dimensioni facenti parte di un aggregato di sostanze incoerenti in pezzi o in polvere. I setacci normati sono accompagnati da un certificato di conformità che attesta che le reti, i materiali, le dimensioni e le metodologie di costruzione sono conformi e riconosciute degli istituti di normalizzazione di riferimento. Utili per la setacciatura (o stacciatura), operazione mediante la quale si separa la parte più fine da quella più grossa di una sostanza polverulenta, facendola passare attraverso uno o più setacci (detti anche pila o serie) in base alle dimensioni granulometriche ricercate (Santagata et al., STRADE, VOL.2, 2016).





Figura 3.42. Setacci normati ASTM

Nella presente analisi sperimentale si è utilizzata una pila di setacci conforme a quella utilizzata dall'impresa Amplia Infrastructures S.p.A. al fine di redigere la curva granulometrica. Una volta composta la pila di setacci va messa nel setacciatore automatico come in Fig. 3.41.

### 3.2.3. Forni di laboratorio

Si tratta di appositi forni (Fig. 3.43) molto capienti, funzionanti a convezione naturale ad alta tecnologia adatta a tutte le applicazioni termostatiche dove è necessaria una particolare precisione, utili per l'essiccamento del provino umido fino al raggiungimento e mantenimento della temperatura di prova. Il range di temperatura è compreso tra +5 °C sopra ambiente a +280 °C ([www.colaver.it](http://www.colaver.it)).

I forni sono stati utilizzati per l'essiccazione di provini e per il loro condizionamento DRY alla temperatura di prova di 40 °C.



Figura 3.43. Forno presente nel Laboratorio di Stadi e Trasporti dell'UnivPM

### 3.2.4. Bagno termostatico

Il bagno termostatico è un modello *ARGOLab* con una pompa integrata per il ricircolo dell'acqua. È un contenitore con dell'acqua (Fig. 3.44) avente la possibilità di regolare la temperatura in un campo di lavoro da + 5°C sopra la temperatura ambiente a 85°C tramite apposite resistenze presenti nel fondo dello strumento. Ha una capacità di 22 litri e un regolatore elettronico di temperatura con controllo PID integrato. Inoltre, è presente un tubo di svuotamento del serbatoio e valvola ad innesto rapido per il cambio periodico del liquido ([www.argo-lab.com](http://www.argo-lab.com)).

Quest'ultimo è utile ai fini del condizionamento per diversi giorni in modalità WET dei provini da testare.



Figura 3.44. Bagno termostatico

### 3.2.5. Roller Sector Compactor

La preparazione di piastre in conglomerato bituminoso avviene tramite il Roller Sector Compactor. Tale macchinario visibile in Fig. 3.45 è stato sviluppato dall'azienda tedesca infraTest che lo ha messo in circolazione in accordo con le caratteristiche di compattazione descritte dalla normativa EN 12697/33.



Figura 3.45. Roller sector compactor

Questo strumento permette di compattare miscele bituminose, (ad eccezione di quelle con additivi di gomma e/o componenti simili, che tendono ad attaccarsi sulle componenti della macchina una volta riscaldati) tramite un apposito rullo metallico.

Il compattatore applica una forza massima di 30 kN, con una velocità di compattazione massima pari a 45 passaggi/min, al fine di ottenere una piastra di dimensioni 400 mm x 300 mm con altezza variabile nell'intervallo 36 - 116 mm.

Sopra il cassero fisso, si posiziona un collare, in dotazione con lo strumento, e si fissa con apposite maniglie. Tale collare, di altezza pari a 12 cm, permette la facile rimozione della piastra una volta ultimata la compattazione. Una volta disposti i due elementi sopra descritti si va ad inserire al loro interno una piastra metallica di altezza pari a 4 mm ricoperta con la carta filtro come visibile in Fig. 3.46.



Figura 3.46, Preparazione macchina per la compattazione

Dopo aver disposto tutti gli elementi in modo corretto e chiusa la porta vetrata di sicurezza, tramite il display presente in Fig. 3.47 si seleziona la sequenza pre-impostata dall'operatore sull'altezza finale della piastra. Il rullo e il piano mobile del cassero in basso vengono preventivamente riscaldati ad una temperatura intorno a 80°C, essendo entrambi dotati di auto-riscaldamento, affinché il materiale laterale non si raffreddi (con conseguente riduzione della compattabilità).



Figura 3.47. Home del display del Roller Compactor

A questo punto il macchinario compirà delle manovre in automatico necessarie a raggiungere la “Home position”, che consiste nel disporre le due frecce rosse, visibili nella Fig. 3.48, in modo allineato e il rullo posizionato in alto a sinistra. Ora è possibile

riaprire lo sportello ed inserire il conglomerato bituminoso, riscaldato per 3 ore alla temperatura di compattazione, all'interno del cassero, ridistribuendo uniformemente il materiale con una spatola in modo da ottimizzare la compattazione, come si può notare in Fig. 3.48.



Figura 3.48. Disposizione del materiale nell'apposito cassero

Poi, al di sopra del conglomerato bituminoso, si posizionano altri due fogli di carta filtro per evitare che il materiale si attacchi al rullo compattatore. Successivamente si richiude la porta, e con il comando visualizzabile in Fig. 3.49 si avvia la compattazione.

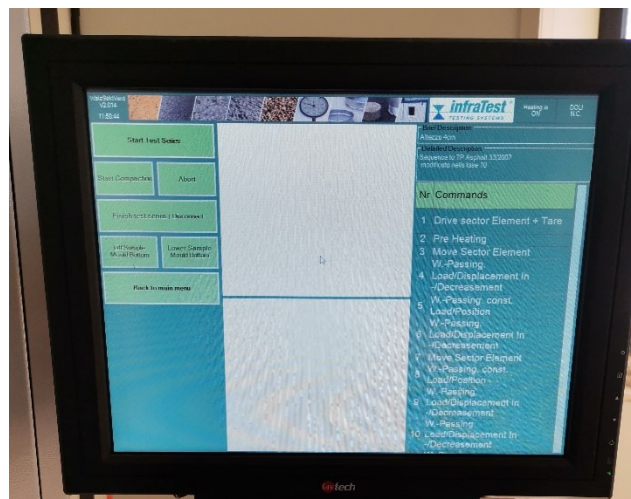


Figura 3.49. Display di inizio procedura di compattazione

Una volta partita la compattazione, sul display compariranno dei grafici come in Fig. 3.50 che mostrano l'andamento dell'altezza (mm) e del carico applicato (kN) in

funzione del numero di passaggi eseguiti. Ciò consente un monitoraggio in tempo reale della compattazione che si ultimerà una volta raggiunta l'altezza prefissata in partenza.

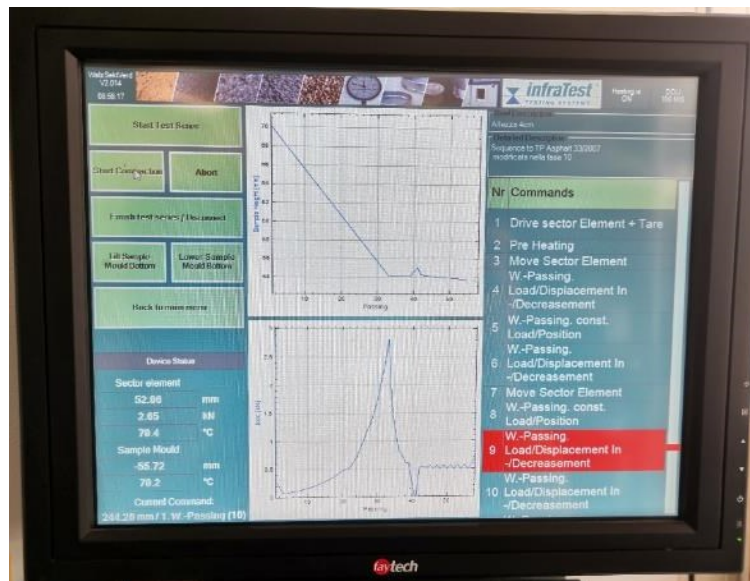


Figura 3.50. Display di compattazione in corso

Finita la procedura il rullo ritorna nella “Home position” e tramite un apposito comando è possibile sollevare la piastra al fondo in modo da riuscire a sfilare il collare con la piastra compattata. Prima di estrarre il collare si controlla, per differenza di altezze, che il macchinario abbia compattato la piastra con le caratteristiche geometriche volute e si lascia raffreddare per circa 30 minuti affinché non si verifichino spancamenti laterali. Passato questo breve lasso di tempo si rimuove il collare, la piastra metallica sottostante e si tracciano delle linee guide (visibili in Fig. 3.51) che serviranno all’operatore addetto al taglio.

Finita la procedura di compattazione si puliscono tutti gli strumenti utilizzati solamente raschiando eventuale materiale rimasto attaccato e si ripongono al posto giusto per una compattazione successiva.



Figura 3.51. Output del Roller Sector Compactor

Il taglio di ogni piastra viene effettuato dal tecnico di laboratorio con una sega raffreddata ad acqua di precisione (Fig. 3.52) per l'ottenimento della piastra con dimensioni 260 mm x 260 mm da testare (Fig. 3.53).



*Figura 3.52. Esecuzione taglio con sega raffreddata ad acqua*



*Figura 3.53. Piastra tagliata di dimensioni prescritta dalla prova*

### Calcolo del materiale per ogni piastra

Nella presente analisi sono stati calcolati i quantitativi da inserire nel cassero per il raggiungimento del numero di vuoti di progetto ( $N_{des}$ ) a 50 rotazioni della pressa giratoria e in funzione dell'altezza voluta pari a 40 mm. Nella Tab. 3.17 si riportano i vari quantitativi calcolati per ogni miscela.

Al fine di individuare il quantitativo di materiale da inserire si devono effettuare vari calcoli. Per prima cosa si individua il volume della piastra compattata in funzione dell'altezza finale. Successivamente, il volume verrà moltiplicato per il  $G_{max}$  derivante dall'estrazione, e moltiplicato per il complementare della percentuale di vuoti obiettivo.

Impianto	L1	L2	H	V	vuoti (N2)	Gmax	massa	nr.	q.tà TOT
[-]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm <sup>3</sup> ]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g]	[-]	[g]
A_Arezzo	30	40	4	4800	20.6	2.517	9592.8	4	38371.2
B_Magliano	30	40	4	4800	20.4	2.536	9689.5	4	38758.2
C_Andria	30	40	4	4800	23.8	2.477	9059.9	4	36239.5
D_Marcianise	30	40	4	4800	20.5	2.562	9776.6	4	39106.4
E_Loreto	30	40	4	4800	20.6	2.564	9771.9	4	39087.7
F_Magliano RA	30	40	4	4800	21.1	2.510	9505.9	6	57035.2
G_Marcianise RA	30	40	4	4800	22.4	2.538	9453.5	6	56721.3
H_Rimini	30	40	4	4800	22.3	2.541	9476.9	6	56861.5

Tabella 3.17. Quantitativi utilizzati per la compattazione della piastra

### 3.2.6. Compattatore Marshall

Tale macchinario consente la compattazione di provini tramite l'impatto di un maglio battente sul conglomerato bituminoso caldo presente all'interno di apposite fustelle. Questa procedura è normata dalla UNI EN 12967/30 e si avvale del macchinario visualizzabile in Fig. 3.54 con lo scopo di formare provini cilindrici di dimensioni geometriche note visibili sempre in Fig. 3.54.



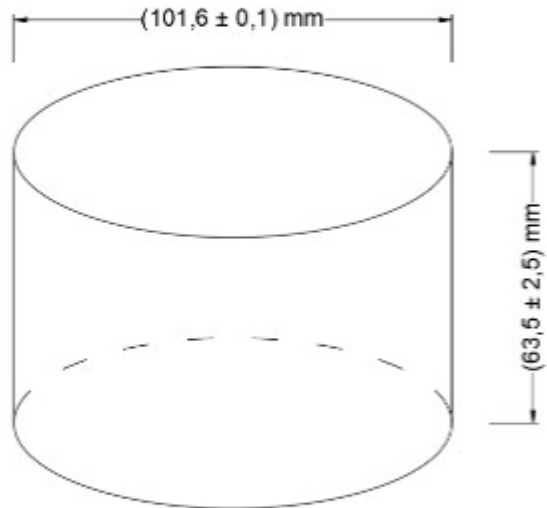


Figura 3.54. Compattatore ad impatto e dimensione provino di output finale

*Cassero cilindrico per il confezionamento dei provini:*

Andando ad assemblare rispettivamente la base, la fustella e il collo si compone un “cassero” come in Fig. 3.55 all’interno del quale versare il materiale caldo da compattare.



Figura 3.55. Composizione fustella per compattatore Marshall

*Estrattore manuale per provini cilindrici:*

questo strumento (Fig. 3.56) permette di estrarre dalle fustelle i provini di conglomerato bituminoso da testare tramite delle operazioni manuali. Il provino compattato si estrae posizionando la fustella raffreddata sopra il piatto che si trova nella parte centrale dello strumento. Si infila il bastone metallico, utilizzato come leva, nell'apposito martinetto che applica una spinta idraulica al pistone che fa fuoriuscire il materiale dalla fustella facendolo passare per il foro praticato nella sommità dello strumento. Quest'ultima parte che da contrasto al contenitore cilindrico.



Figura 3.56. Estrattore manuale per provini di forma cilindrica

La procedura di utilizzo consiste nell'inserire all'incirca un chilogrammo di materiale caldo in apposite fustelle di metallo cilindriche opportunamente assemblate con il collare ed una base al fine di formare il cassero come visibili nelle Fig. 3.57.



Figura 3.57. Cassero per la compattazione di provini con il macchinario Marshall

Una volta composta, nella fustella va inserito un cerchio di carta per evitare che il materiale si attacchi alla base, poi viene messo il conglomerato bituminoso, riscaldato per 3 ore in forno alla temperatura di compattazione, ricoperto da un ulteriore cerchio di carta con l'identificativo del provino, e successivamente soggetto alla compattazione. Il tutto viene disposto nella parte centrale dello strumento e successivamente il tecnico aziona il maglio, avente peso di  $(4550 \pm 20)$  g, che batterà 50 colpi per ogni faccia.

Finita la procedura di compattazione ad impatto, si tolgono rispettivamente il collare e la base per far freddare la fustella che, appena la temperatura lo consentirà si andrà ad estrarre il provino cilindrico tramite l'estrattore descritto ampiamente nei paragrafi precedenti. Una volta estratto, sul provino (Fig. 3.58) si misurano quattro valori di altezze e due diametri per vedere se mediamente rientra nei limiti normativi, viene pesato e poi messo a condizionare prima di essere testato.

#### *Calcolo del materiale per ogni provino*

Vengono di seguito riportati in Tab. 3.18 i quantitativi di materiale da inserire nel cassero per la compattazione, partendo dal numero di vuoti  $N_{des}$  e dall'altezza fissata normata del provino Marshall.

Impianto	H	D1	V	vuoti (N2)	Gmax	massa	nr.	q.tà TOT
[-]	[cm]	[cm]	[cm <sup>3</sup> ]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g]	[-]	[g]
A_Arezzo	6.35	10.16	514.8	20.6	2.517	1028.9	11	11317.4
B_Magliano	6.35	10.16	514.8	20.4	2.536	1039.2	11	11431.6
C_Andria	6.35	10.16	514.8	23.8	2.477	971.7	11	10688.7
D_Marcianise	6.35	10.16	514.8	20.5	2.562	1048.6	11	11534.3
E_Loreto	6.35	10.16	514.8	20.6	2.564	1048.1	11	11528.8
F_Magliano RA	6.35	10.16	514.8	21.1	2.510	1019.5	11	11214.9
G_Marcianise RA	6.35	10.16	514.8	22.4	2.538	1013.9	11	11153.1
H_Rimini	6.35	10.16	514.8	22.3	2.541	1016.4	11	11180.7

Tabella 3.18. Calcolo quantitativi per compattatore ad impatto

Dunque, il quantitativo finale da inserire nel cassero per poi procedere alla compattazione viene calcolato andando a fissare la percentuale di vuoti da scheda tecnica, l'altezza del provino e il suo diametro. Noto così il  $G_{max}$  si riesce a calcolare la massa andando a moltiplicarlo per il volume.



Figura 3.58. Output della compattazione Marshall

Una volta ottenuto il provino definitivo si verifica che la compattazione sia stata effettuata nel migliore dei modi andando a misurare le quattro altezze misurate in corrispondenza degli estremi dei due diametri tracciabili sulla testa del provino. Successivamente con sempre con il calibro si vanno a misurare i due diametri e si pesa il provino prima del condizionamento registrando la massa. Tali dati sono utili a calcolare il numero di vuoti. Si determina per prima cosa il  $\rho$  geometrico (massa/volume) che verrà poi utilizzato insieme al  $\rho_{max}$  (fornito dalla scheda tecnica) nella formulazione che permetterà di determinare il numero dei vuoti. I dati ottenuti verranno segnati nella Tab. 3.19.

COMPATTAZIONE MARSHALL												
nr. Provino	mass	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>	h <sub>3</sub>	h <sub>4</sub>	h <sub>media</sub>	d	ρ app. geom	ρ max	vm	vm_average	Dev. Std.
[-]	[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]	[%]	[%]
1	1012.0	64.0	63.0	63.0	63.0	63.3	101.6	1.974	2.541	22.3	22.4	0.4
2	1015.6	64.0	64.5	63.5	63.5	63.9	101.6	1.961	2.541	22.8	22.4	0.4
3	1020.5	63.5	63.5	64.0	64.0	63.8	101.6	1.974	2.541	22.3	22.4	0.4
4	1016.5	63.5	63.5	63.0	63.0	63.3	101.6	1.982	2.541	22.0	22.4	0.4
5	1020.5	63.5	63.5	63.0	64.0	63.5	101.6	1.982	2.541	22.0	22.4	0.4
6	1017.0	64.0	64.5	63.5	64.0	64.0	101.6	1.960	2.541	22.9	22.4	0.4
7	1016.7	63.5	63.5	63.5	63.5	63.5	101.6	1.975	2.541	22.3	22.1	0.7
8	1016.6	63.5	63.5	64.0	63.5	63.6	101.6	1.971	2.541	22.4	22.1	0.7
9	1016.4	64.0	64.0	64.0	64.5	64.1	101.6	1.955	2.541	23.1	22.1	0.7
10	1014.6	63.0	62.5	63.0	62.5	62.8	101.6	1.994	2.541	21.5	22.1	0.7
11	1015.6	62.5	63.0	62.5	63.0	62.8	101.6	1.996	2.541	21.4	22.1	0.7

Tabella 3.19. Individuazione vuoti del provino compattato

Il valore dei vuoti residui del provino verrà calcolato come mostrato nell'Equazione (1) sotto forma di percentuale:

$$vm (\%) = \frac{\rho_{max} - \rho_{geom}}{\rho_{max}} \times 100 \quad (1)$$

### 3.2.7. Darmstadt Scuffing Device

Il Darmstadt Scuffing Device (DSD) (Fig. 3.59), prodotto anch'esso dalla proprietà tedesca infraTest, è utilizzato al fine di valutare la resistenza allo sgranamento (scuffing) di miscele di conglomerato bituminoso, prevalentemente drenanti, che sono utilizzate negli strati superficiali della pavimentazione stradale o aeroportuale.

La prova è normata dalla UNI CEN/TS 12697-50 e consiste nell'applicazione di sforzi tangenziali e verticali ad una piastra tramite l'utilizzo di uno pneumatico di dimensioni standard. Tali sforzi si verificano nella zona di contatto tra lo pneumatico e la superficie della pavimentazione e possono essere causati da curvature del veicolo comportando perdita di materiale. Quest'ultima è valutata aspirando con l'apposita apparecchiatura di aspirazione a vuoto i granuli residui dall'azione di sgranamento dello pneumatico che vengono successivamente pesati.

Lo standard di riferimento è la perdita di materiale per area coperta, detta anche Mass Loss per Area (MLpA). Questo parametro è valutato in Kg/m<sup>2</sup> dopo ogni due o tre doppi.

Si calcola con l'Equazione (2) riportata di seguito.

$$MLpA = \frac{M_0 - M_1}{WL} \quad (2)$$

Dove:

M<sub>0</sub> = massa della lastra prima l'esecuzione della prova

M<sub>1</sub> = massa della lastra dopo l'esecuzione della prova

W = larghezza della piastra

L = lunghezza della piastra



Figura 3.59. Darmstadt Scuffing Device

*Protocollo di prova:*

Tale modalità di prova prevede l'applicazione di un carico verticale di  $(1000 \pm 10)$  N con uno pneumatico senza battistrada la cui pressione risulta pari a  $(300 \pm 10)$  kPa. I provini da testare sono delle piastre, compattate e tagliate come descritto in precedenza, di dimensioni 260 mm x 260 mm ed altezza 40 mm disposte su un supporto con viti regolabili visibile in Fig. 3.60. La piastra di questo supporto è dotata di riscaldamento automatico in modo che il provino, durante la prova, possa mantenere la temperatura che la norma impone di  $(40 \pm 1)$  °C. Ciò è anche garantito dal fatto che ogni provino, indipendentemente dalla tipologia di condizionamento, prima di essere testato va condizionato in forno per circa tre ore alla temperatura di 40 °C. Un termometro ad infrarossi monitora la temperatura superficiale del provino.



*Figura 3.60. prova in esecuzione con piastra posizionata sul supporto*

Per far partire la prova, è presente un display di controllo (Fig. 3.61) che permette di variare manualmente i seguenti parametri:

- il numero di cicli (Number of Cycles);
- il numero dei due movimenti rotativi di  $180^\circ$  (Double thrust cycles per passage, DTC);
- la velocità angolare di rotazione [rpm] (Speed Sample Fixture) che va mantenuta pari a 5 giri al minuto;
- la temperatura della piastra di riscaldamento [ $^\circ\text{C}$ ] (Temperature Heating Plate);
- la temperatura di prova che si vuole ottenere [ $^\circ\text{C}$ ] (Target Sample Temperature), ovvero  $40^\circ\text{C}$ ;
- il carico verticale [N] (vertical load) fissato pari a 1000 N
- altri parametri riguardanti le caratteristiche geometriche ed identificative della piastra da testare

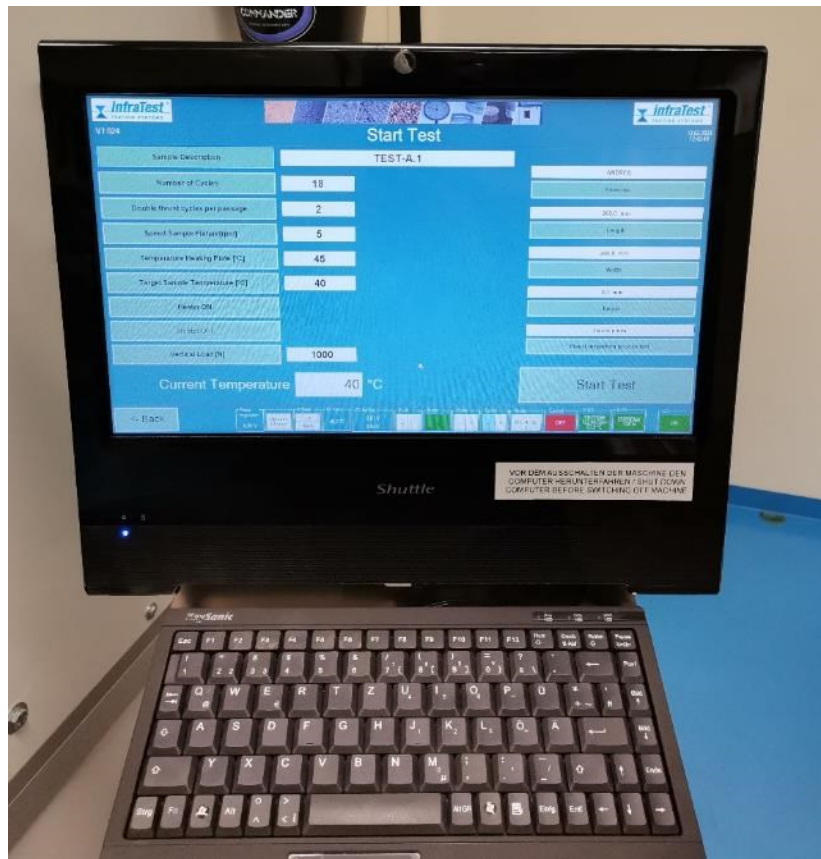


Figura 3.61. Display di controllo del macchinario

Successivamente, si avvia la prova e nel caso in analisi si arriva ad un massimo di 40 DTC con misurazioni fatte ogni 3 DTC fino a 12, e poi ogni 2 DTC fino alla fine.

#### *Analisi dei risultati della prova:*

L'analisi dei risultati tramite il monitoraggio dell'MLpA viene corredata da un'analisi visiva delle piastre, per la quale si fotografa, la piastra prima e dopo la prova, come mostrato in Fig. 3.62.

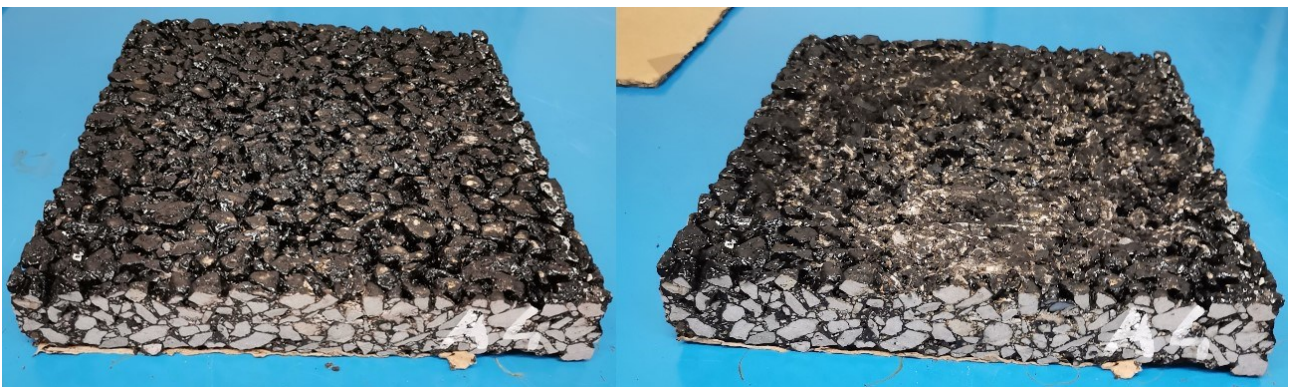


Figura 3.62. Analisi visiva dei risultati tramite l'osservazione della piastra pre e post prova

Dal DSD si riescono ad ottenere due curve andando ad individuare l'andamento dello sgranamento di una piastra. Segnando in un'apposita tabella (Tab. 3.20) il materiale sgranato raccolto nell'apposito cestello con l'aspiratore e pesato dopo ogni doppio



ciclo (*Particle loss* che è differente da quello descritto successivamente nell'Equazione (2)) e la temperatura si riesce ad individuare l'andamento cumulativo della perdita di materiale, e successivamente dell'MLpA (Equazione (2)) con lo scopo di costruire il suo andamento, plottato in grafici tipo visibili in Fig. 3.63.

SCUFFING		H1_W			
nr.applicazioni	nr. Double thr	particle loss	cumulative particle loss	MLpA	temperature
[-]	[-]	[g]	[g]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[°C]
1	3	13.1	13.1	0.2	38.9
2	6	16.7	29.8	0.4	39.0
3	9	22.9	52.7	0.8	38.9
4	12	33.3	86.0	1.3	39.1
5	14	52.6	138.7	2.1	39.2
6	16	51.0	189.7	2.8	38.9
7	18	45.1	234.7	3.5	39.2
8	20	53.6	288.4	4.3	39.7
9	22	42.3	330.7	4.9	39.8
10	24	65.3	396.0	5.9	40.0
11	26	66.8	462.8	6.9	40.1
12	28	51.3	514.1	7.7	40.2
13	30	85.1	599.2	8.9	40.0
14	32	83.3	682.5	10.2	40.1
15	34	48.7	731.1	10.9	39.8
16	36	78.7	809.8	12.1	40.0
17	38	101.8	911.6	13.6	40.5
18	40	72.7	984.3	14.7	41.0
		984.3			

Tabella 3.20. Tabella standard inserimento dati

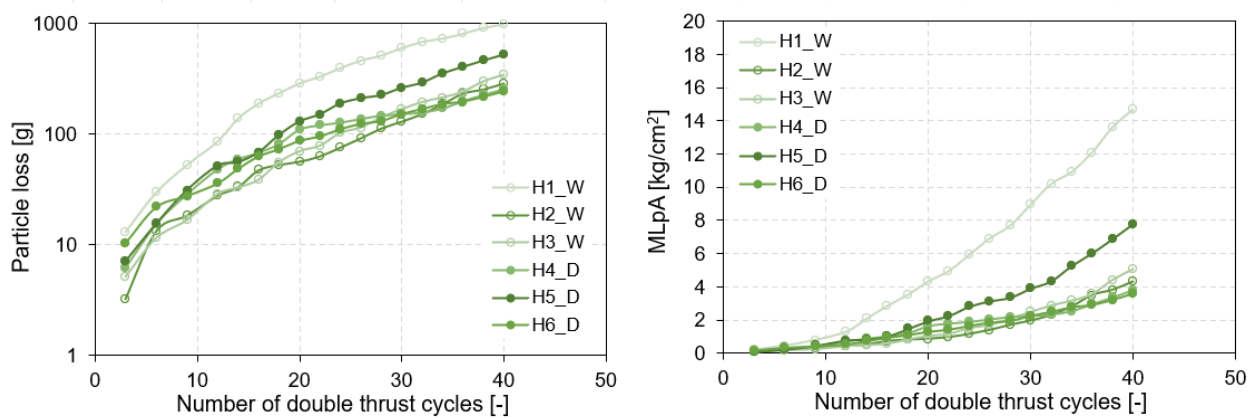


Figura 3.63. Grafici di output degli andamenti cumulativi

### 3.2.8. Prova Cantabro

La prova si effettua nel tamburo Los Angeles privato delle palle metalliche, al fine di individuare la perdita di materiale di un provino cilindrico. La norma che regola tale prova empirica è la UNI EN 12697-17. Quest'ultima prevede immissione del provino compattato Marshall con la modalità sopra descritta all'interno del tamburo rotante visibile in Fig. 3.64.

All'interno del tamburo è saldato un setto di 89 mm che solleva il provino e lo lascia cadere in maniera consecutiva applicando una sollecitazione aggressiva al campione.



Figura 3.64. Macchinario Los Angeles per le prove Cantabro

Nel caso in analisi, inizialmente si pesa il provino dopo averlo condizionato nella modalità scelta. Successivamente lo si inserisce nel macchinario richiudendo attentamente il coperchio con le apposite viti, e con un apposito pannello di controllo si avvia la prova.

#### *Protocollo di prova:*

La normativa prevede che il cilindro, condizionato alla temperatura di 25 °C, ruoti con una velocità pari a circa 30 giri/min fino ad un numero di giri pari a 300 (durata complessiva di circa 10 minuti). Una volta finiti i giri imposti il tamburo rotante si ferma in automatico e quindi si può riaprire il coperchio rimuovendo il provino che avrà perso del materiale. Infine, si pulisce bene il cilindro per togliere tutto il materiale rimanente al suo interno e si pesa il provino.

Le due pesate, dello stesso provino pre e post prova (visibile in Fig. 3.65), permettono di individuare il particle loss (PL) calcolabile con l'Equazione (2), cioè la perdita di massa utile per la successiva elaborazione dei risultati.

$$PL (\%) = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100 \quad (2)$$

Con:

- $W_1$  = massa del campione prima della prova
- $W_2$  = massa del campione dopo della prova

*Analisi dei risultati della prova:*

Dopo aver estratto il provino dal tamburo rotante si valuta visivamente come in Fig. 3.65 la perdita di materiale che poi verrà individuata per differenza di pesate come scritto in precedenza.



Figura 3.65. Analisi visiva del provino dopo l'esecuzione della prova Cantabro

I dati ricavati dalle pesate e dalle misurazioni effettuate sul provino vengono raccolti in apposite tabelle come la Tab. 3.21 e successivamente utilizzati per redigere grafici come in Fig. 3.66.

CANTABRO							
nr. provino	mod.	weight_PRE	weight_POST	loss	PL	Average PL	Dev. Std.
[-]	[-]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]	[%]
1	WET	1072.2	795.8	276.4	25.8	21.6	5.5
2		1069.2	885.7	183.5	17.2	21.6	5.5
3		1074.5	769.5	305.0	28.4	21.6	5.5
4		1070.8	883.0	187.8	17.5	21.6	5.5
5		1070.3	799.1	271.2	25.3	21.6	5.5
6		1071.3	904.6	166.7	15.6	21.6	5.5
7	DRY	1045.7	960.5	85.2	8.1	11.1	3.4
8		1044.4	886.5	157.9	15.1	11.1	3.4
9		1047.1	965.5	81.6	7.8	11.1	3.4
10		1048.5	899.5	149.0	14.2	11.1	3.4
11		1048.9	941.1	107.8	10.3	11.1	3.4

Tabella 3.21. Individuazione PL [%]

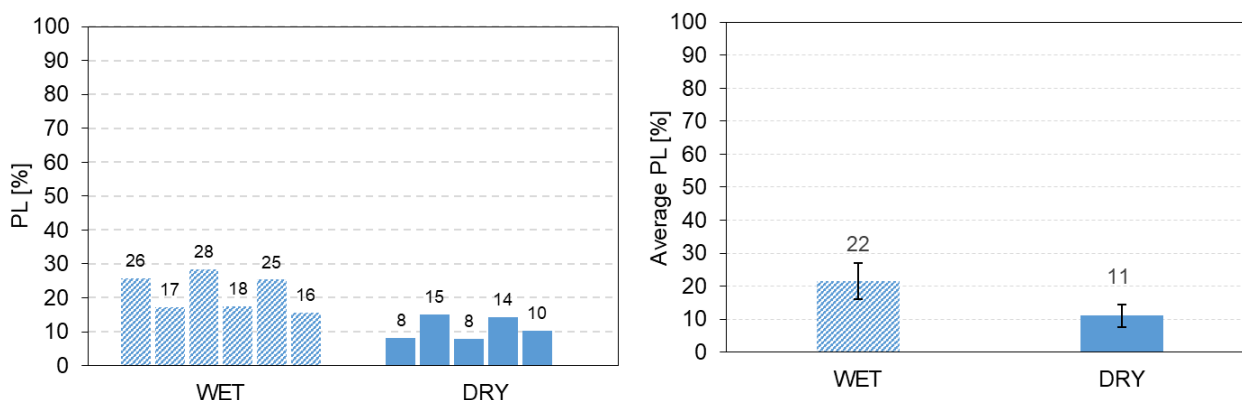


Figura 3.66. Redazione grafici PL [%]

### 3.3. Programma sperimentale

Il programma sperimentale si basa sull'esecuzione di prove in laboratorio, digitalizzazione dei risultati sperimentali con conseguente elaborazione statistica dei dati e successivo confronto. Si riassume il tutto nella Tab. 3.22.

COMPATTAZIONE	PROVINI	VUOTI TARGET	CONDIZIONAMENTO	PROVA	TEMP.	N° PROVE
Roller Sector Compactor (30 x 40 x 4) cm <sup>3</sup>	Piastre (26 x 26 x 4) cm <sup>3</sup>	@N <sub>des</sub> (da scheda tecnica)	WET	DSD	40 °C	2 + 6
			DRY			2 + 6
Compattatore Marshall (50 + 50 colpi)	Cilindrici (h = 63,5 mm D = 101,6 mm)		WET	Cantabro	25 °C	6
			DRY			5

Tabella 3.22. Programma sperimentale

#### COMPATTAZIONE

##### *Piastre:*

Si prendono i kg di materiale assegnato per la compattazione della piastra con quella determinata miscela in funzione del nr. di vuoti, si scaldano in forno alla temperatura di produzione e si inseriscono all'interno del cassero del Roller Sector Compactor. Si avvia il macchinario che procede simulando la compattazione che avviene in sito con il rullo. Finita la procedura si sfilava il cassero dal macchinario, si lascia asciugare la piastra all'aria e poi si rimuove il cassero ottenendo la piastra da tagliare.

##### *Provinci cilindrici:*

Si prendono i kg di materiale assegnato per la compattazione del provino in funzione dell'altezza e del nr. di vuoti, si inseriscono nel cassero successivamente disposto nel macchinario sopradescritto. Si procede successivamente con la compattazione applicando 50 colpi per faccia e dopo aver lasciato per alcune ore i provini nei casseri si rimuovono le fustelle ottenendo il provino da condizionare

## CONDIZIONAMENTI

### *Piastre:*

Le piastre, successivamente al taglio e prima di essere sottoposti alla prova, sono state sottoposte rispettivamente a:

- Condizionamento dry: 3 gg in camera climatica @20 °C + 4 h in forno @40 °C
- Condizionamento wet: 3 gg in bagno termostatico @40 °C + 4 h in forno @40 °C

### *Provini cilindrici:*

I provini, successivamente alla compattazione e prima di essere sottoposti alla prova, sono stati sottoposti rispettivamente a:

- Condizionamento dry: 3 gg in camera climatica @20 °C + 4 h @25 °C
- Condizionamento wet: 3 gg in bagno termostatico @40 °C + 4 h @25 °C

## CONDIZIONI DI PROVA

### *Piastre:*

Sottoposte al DSD che applica 40 doppi cicli di taglio (double thrust cycles) cercando di mantenere la temperatura della piastra @40 °C in almeno 2 ÷ 3 ripetizioni per ogni tipo di condizionamento.

### *Provini cilindrici:*

Sottoposti alla prova CANTABRO che applica delle sollecitazioni al provino inserendolo all'interno di un tamburo rotante con un setto. Si effettuano 300 rotazioni alla temperatura di circa 25 °C come da NTC.

## 3.4. Analisi statistica dei dati

Nella regressione lineare ordinaria secondo Charles Zaiontz ([www.real-statistics.com](http://www.real-statistics.com)), l'obiettivo è trovare la retta  $y = ax + b$  che fitta dati da  $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ . Si individua così la  $\hat{y}_i = bx_i + a$  del modello utile a minimizzare la distanza lungo la  $y$  del punto con la retta individuata con l'equazione (3).

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3)$$

Come si nota in Fig. 3.67 si va a minimizzare la somma delle distanze al quadrato (i.e.  $e^2$ ) lungo una sola direzione (la  $y$  in questo caso).

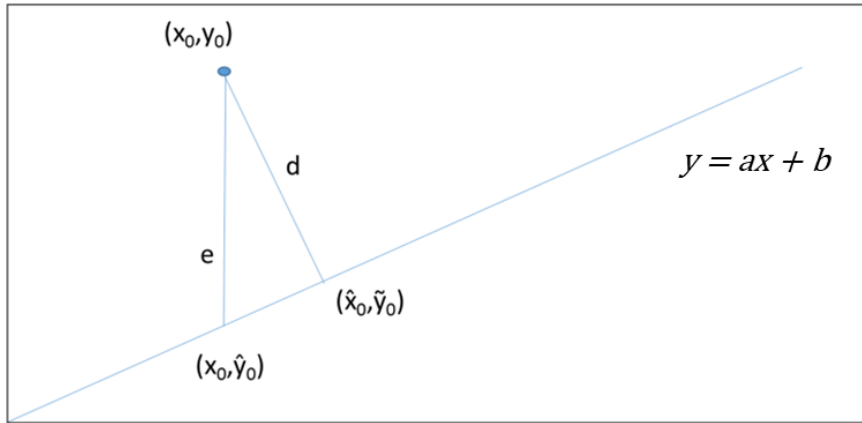


Figura 3.67. Distanza tra un punto e una linea ([www.real-statistics.com](http://www.real-statistics.com))

La distanza effettiva però è più breve e mostrata in Fig. 3.68 con la lettera d e dunque il punto  $(\hat{x}_0, \hat{y}_0)$  appartenente alla retta  $y = ax + b$  è il più vicino al punto  $(x_0, y_0)$ . Nella *total least squares regression* (detta anche *orthogonal linear regression*) si cerca il valore di  $a$  e  $b$  che minimizzano la somma delle distanze euclidee quadrate dai punti alla linea di regressione (i.e.  $d^2$ ) Ciò equivale a minimizzare quanto scritto nell'Equazione (4):

$$\sum_{i=1}^n d_i^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{a^2 + 1} \quad (4)$$

Il valore di  $a$  che minimizza l'espressione è dato da:

$$a = \frac{w \pm \sqrt{w^2 + r^2}}{r}$$

Dove:

$$w = v - u \quad ; \quad u = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad ; \quad v = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad ; \quad r = 2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

E  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  sono rispettivamente la media dei valori  $x_i$  e  $y_i$ . L'intercetta può ora essere espressa come:

$$b = \bar{y} - a\bar{x}$$

## 4. Risultati e discussione

Vengono riportati di seguito i risultati relativi alle varie prove di laboratorio effettuate con i macchinari (descritti in sezione 3.2) sui vari materiali. Inizialmente si analizzano le caratteristiche di sgranamento dei vari materiali ottenute da prove con i due macchinari utilizzati. Successivamente si mettono a confronto i dati al fine di individuare le eventuali correlazioni tra il contenuto dei vuoti residui dei provini e le corrispondenti perdite di materiale, tra le differenti tipologie di miscele e tra i risultati di sgranamento da prove Cantabro e DSD.

### 4.1. Dati sperimentali delle miscele analizzate

Si riportano i grafici ricavati dall'analisi di ogni miscela utilizzando i dati trascritti alla fine di ogni prova. Si riporta un esempio in sezione 4.1.1. e 4.1.2. dei vuoti residui dei provini, al fine di avere un riscontro sull'efficienza della compattazione, e dei valori sperimentali di sgranamento, ricavati dall'elaborazione dei dati di ogni singola miscela. I restanti grafici relativi alle altre miscele si trovano nell'Appendice A.

#### 4.1.1. Prove Cantabro

Sperimentalmente si sono misurati i contenuti dei vuoti residui (Equazione (1)) dei vari provini compattati Marshall, e successivamente sottoposti a prova Cantabro. Tali risultati sono riportati in Fig. 4.1 tramite la rappresentazione con Box-Plot.

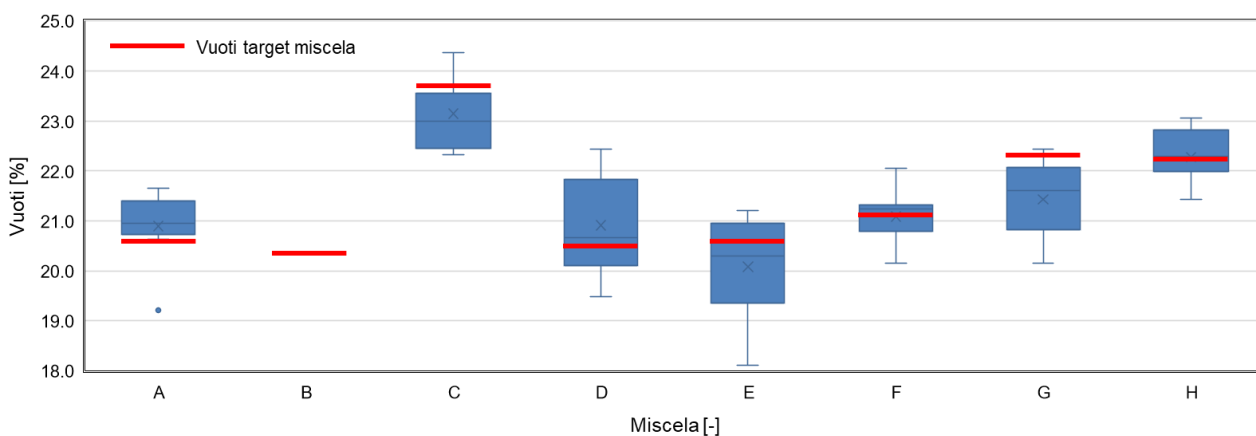


Figura 4.1. Box-Plot vuoti delle varie miscele misurati sui provini cilindrici

Nella Fig. 4.1 si analizzano i vuoti dei vari provini dopo la compattazione ad esclusione della miscela B\_Magliano Sabina per la quale non è stato possibile ricavare provini per mancanza di sufficiente materiale. La rappresentazione con box-plot permette di individuare:

- Limite inferiore: fine del baffo inferiore che identifica il valore non anomalo più piccolo dei dati;

- Primo quartile: il lato inferiore del rettangolo indica il valore al di sotto del quale risiede il 25% della distribuzione;
- Secondo quartile o Mediana: la linea orizzontale interna al rettangolo rappresenta il valore centrale della distribuzione statistica ossia quel valor che la spezza in due parti uguali;
- Terzo quartile: è il lato superiore del rettangolo e indica il valore al di sotto del quale cade il 75% dei dati;
- Limite superiore: fine del baffo superiore che indica il valore non anomalo massimo presente tra i dati;
- La “x”: si trova sempre all’interno del rettangolo ed indica la media aritmetica della distribuzione dei dati;
- L’altezza del rettangolo, detto anche scatola è chiamata differenza interquartile e racchiude il 50% dei valori della distribuzione.

Dalla Fig. 4.1 si deduce che la percentuale di vuoti calcolata sui vari provini è confrontabile con quella target derivante dalla scheda tecnica, confermando che la compattazione è avvenuta in modo corretto.

Successivamente si analizzano i risultati derivanti dalla prova Cantabro eseguita sui provini cilindrici. Si riporta in Fig. 4.2 l’esempio di un’elaborazione dei valori della prova Cantabro, nello specifico del Particle Loss (Equazione (2)) calcolato per la miscela H\_Rimini. I risultati delle altre miscele sono mostrati in Appendice A.

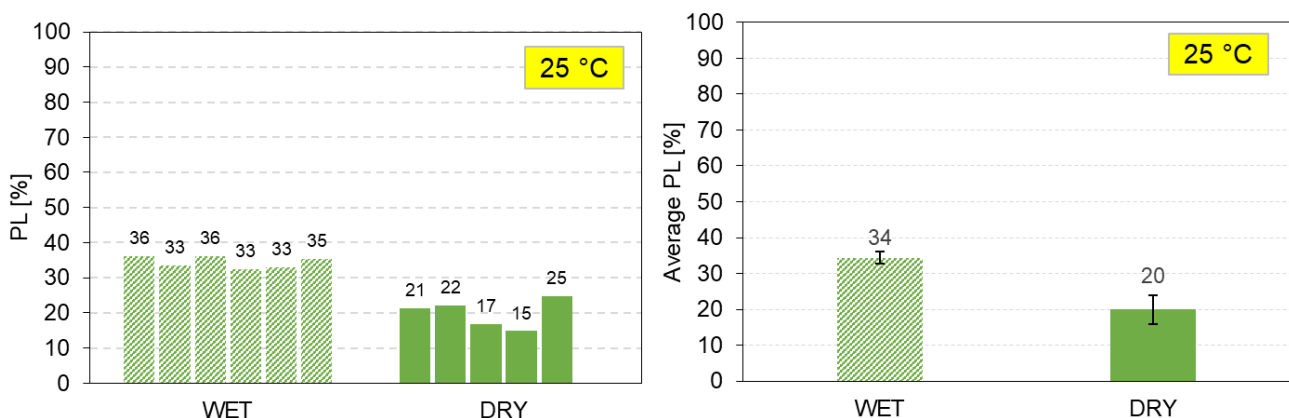


Figura 4.2. Rappresentazione PL [%] per ogni provino e in funzione del tipo di condizionamento

Nel grafico di sinistra della Fig. 4.2 è rappresentata la perdita percentuale delle particelle di ogni provino suddivisa per il tipo di condizionamento al quale è soggetto prima di essere testato. Nel grafico di destra della Fig. 4.2 invece, è mostrata la media delle varie ripetizioni con annessa la deviazione standard. Quest’ultima, anche detta scarto quadratico medio (Equazione (5)), rappresenta un indice di dispersione statistico e sta ad indicare la dispersione dei dati intorno ad un indice di posizione che nel caso in analisi è la media aritmetica.



$$DEV.STD. = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{(n - 1)}} \quad (5)$$

Dove:

$x$  = singolo valore

$\bar{x}$  = media dei valori considerati

$n$  = numeri dei valori considerati

#### 4.1.2. Prove con Darmstadt Scuffing Device (DSD)

Come per i provini cilindrici, anche per le piastre, prima di essere testate va calcolata la percentuale di vuoti (Equazione (1)) al fine di individuare se la compattazione è stata eseguita correttamente. Si mostrano i valori del contenuto di vuoti in Fig. 4.3.

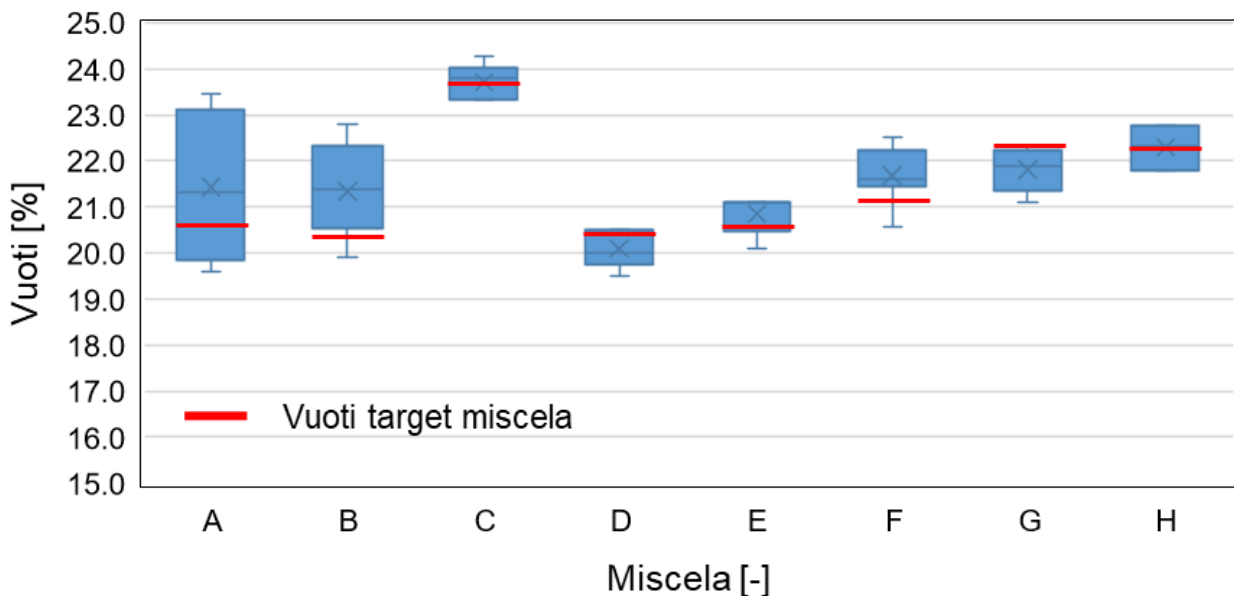


Figura 4.3. Analisi vuoti delle piastre

La Fig. 4.3 dimostra che le piastre sono state compattate in maniera corretta perché i vuoti calcolati sul provino stesso sono confrontabili con quelli presenti nella scheda tecnica.

Si mostrano ora i risultati sperimentali relativi alle prove eseguite con il DSD sulle varie miscele. Si riporta un esempio relativo alla miscela H\_Rimini; per visualizzare i risultati relativi alle altre miscele si fa riferimento all'Appendice A.

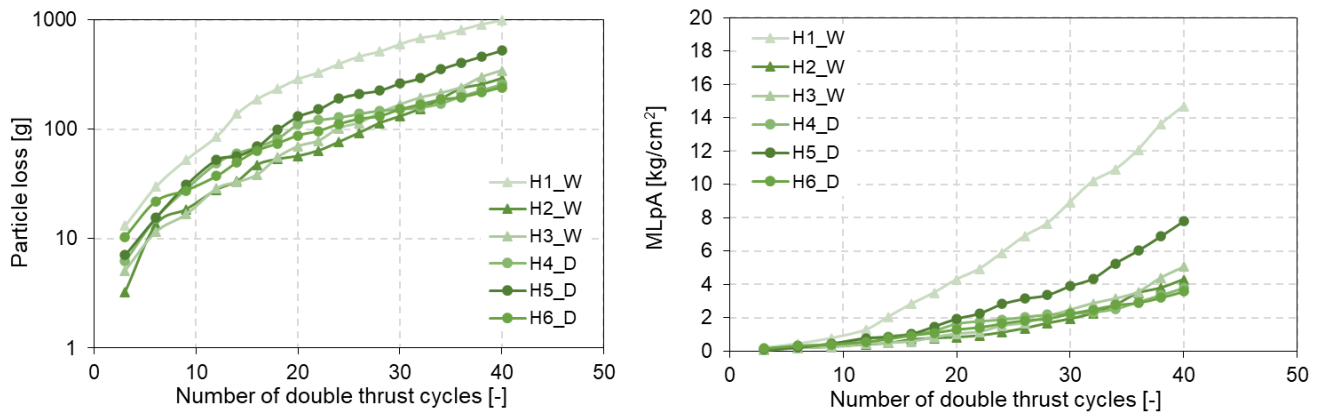


Figura 4.4. Andamento cumulativo del Particle loss e dell'MLpA in funzione del nr. cicli

In Fig. 4.4, il grafico di sinistra mostra l'andamento cumulativo del Particle loss (g) (citato in sezione 3.2.7.) della piastra compattata con la miscela H\_Rimini in scala logaritmica in funzione del numero di cicli. Si deduce che all'aumentare del "Number of double thrust cycles" si ha un incremento del particle loss. Nel grafico di sinistra in Fig. 4.4 invece, è mostrato l'andamento cumulativo del MLpA (Equazione (2)) con l'aumentare del numero dei cicli.

## 4.2. Confronto valori di sgranamento delle varie miscele

### 4.2.1. Prove Cantabro

Nella Fig. 4.5 si mostrano le medie del Particle Loss con le loro rispettive deviazioni standard dei vari provini sottoposti a prova Cantabro, suddivisi per tipologia di miscela e di condizionamento.

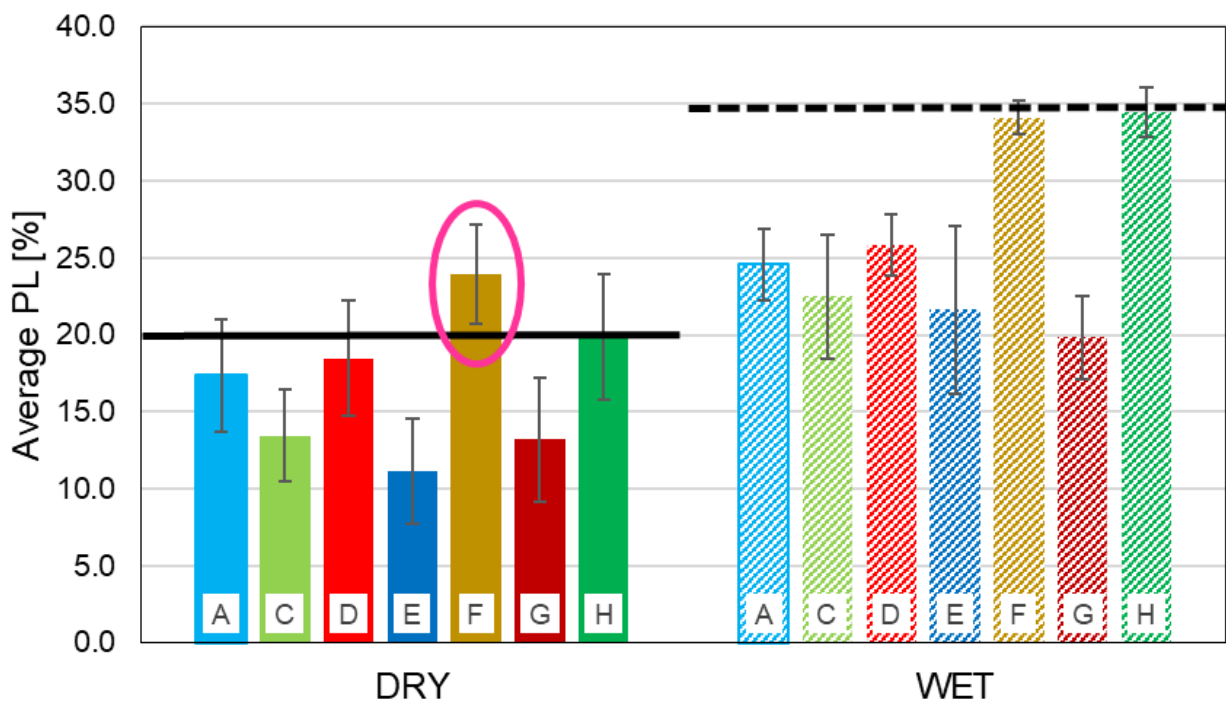


Figura 4.5. Average PL [%] per le varie miscele

Dalla Fig. 4.5 si deduce che il condizionamento influenza notevolmente i risultati della prova, ovvero lo sgranamento di una miscela. Sul medesimo grafico si possono individuare due limiti: il primo è quello che corrisponde alle NTC del 2022 per quanto riguarda la perdita in peso delle miscele di conglomerato bituminoso poroso che deve essere al di sotto del 20 %, mentre il secondo (indicato con la linea tratteggiata) sta ad indicare il vecchio limite presente nelle precedenti NTC per quanto riguarda le miscele condizionate in modalità WET. Questo limite nelle nuove norme non è stato riproposto. Da tale grafico si nota che non è presente la miscela B\_Magliano in quanto i provini sono stati sottoposti alla prova alla temperatura di 40 °C invece che 25 °C come prevede la norma. Si vede inoltre, che la miscela F\_Marcianise non rispetta il limite da NTC22, una delle possibili cause è il fatto che sia una miscela WMA (Warm Mix Asphalt) ed eventualmente la presenza di RA (Reclaimed Asphalt). Andando ad analizzare le deviazioni standard si vede che non si hanno grandi discostamenti dal valore medio e dunque ciò sta ad indicare che c'è poca variabilità tra i dati. Si nota inoltre che confrontando il valore medio di sgranamento di ogni singola miscela, in modalità DRY si hanno valori inferiori rispetto a quelli ricavati dai provini condizionati in modalità WET. Visualizzando i valori di sgranamento si può quindi dedurre che tutte le miscele hanno una loro suscettibilità all'acqua.

#### 4.2.2. Prove con Darmstadt Scuffing Device (DSD)

Nelle Fig. 4.6 – 4.7 si riportano le curve sperimentali medie dell'MLpA derivanti dall'esecuzione della prova con il DSD sia in modalità WET che DRY, su grafici in scala lineare.

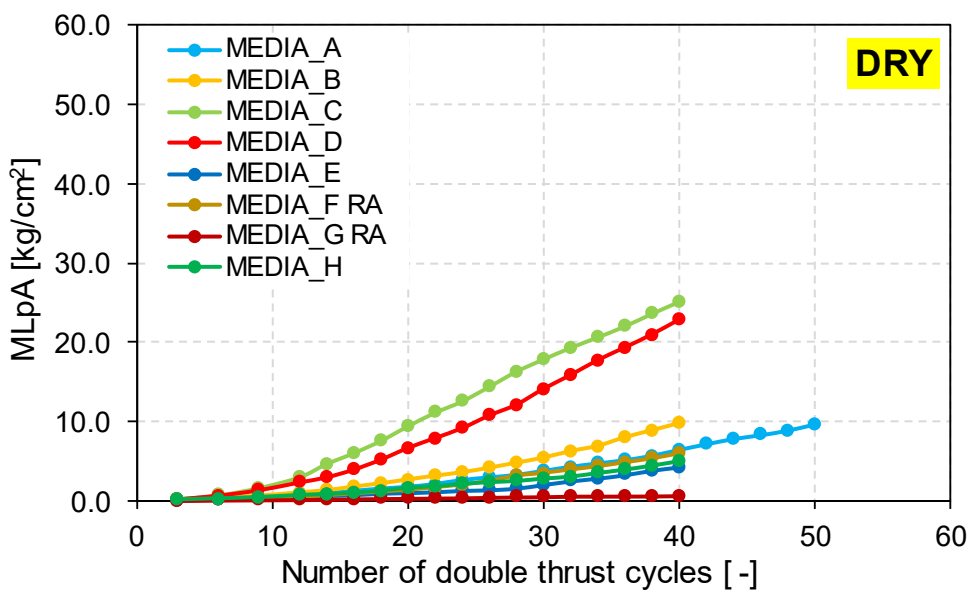


Figura 4.6. MLpA vs nr. cycles (DRY)

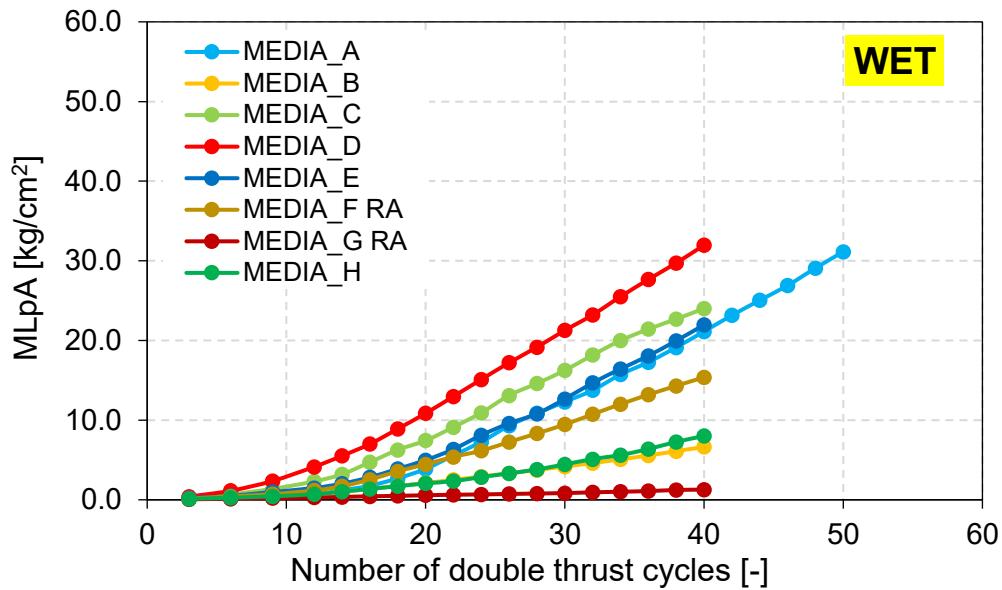


Figura 4.7. *MLpA vs nr. cycles (WET)*

Dalle Fig. 4.6 – 4.7 si deduce che in gran parte delle miscele il condizionamento incide sullo sgranamento come è stato riscontrato nella prova Cantabro. Si nota infatti che osservando il grafico ad un numero fissato di cicli (i.e. 40 double thrust cycles) i valori di sgranamento delle piastre condizionate in modalità WET è maggiore di quelle DRY. Ciò non si verifica nella miscela B e non è visibile nella miscela C. Nonostante ciò si dimostra quindi che la presenza dell'acqua comporta una maggiore suscettibilità allo sgranamento in gran parte delle miscele di conglomerato bituminoso poroso qualora lo pneumatico applicasse sforzi di taglio nel compiere manovre di sterzata. Tale fenomeno è dovuto al fatto che l'acqua che si accumula sopra la pavimentazione e a passare dello pneumatico viene spinta all'interno delle porosità dello strato generando sovrappressioni che causano il distacco degli aggregati presenti.

Per visualizzare meglio invece, quale tra le piastre fosse la più scadente (ovvero quella con i valori più elevati di sgranamento) e quale invece, fosse la più resistente (bassi valori di sgranamento), sono stati plottati i dati in scala bi-logaritmica in modo da visualizzare delle curve linearizzabili per ogni miscela, come mostrato in Fig. 4.8 – 4.9.

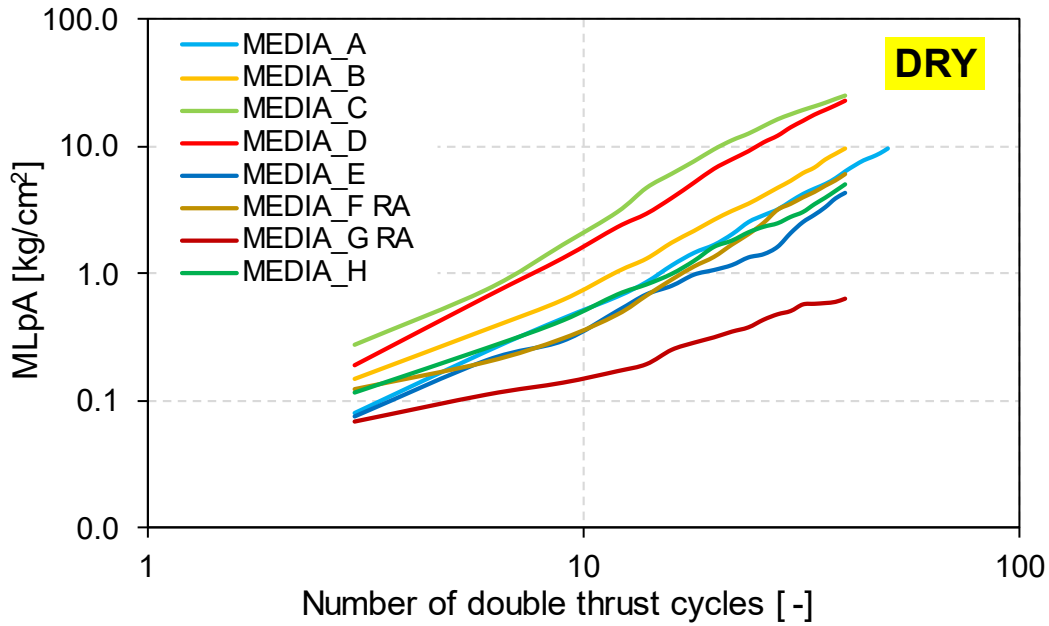


Figura 4.8. MLpA vs nr. cycles (DRY)

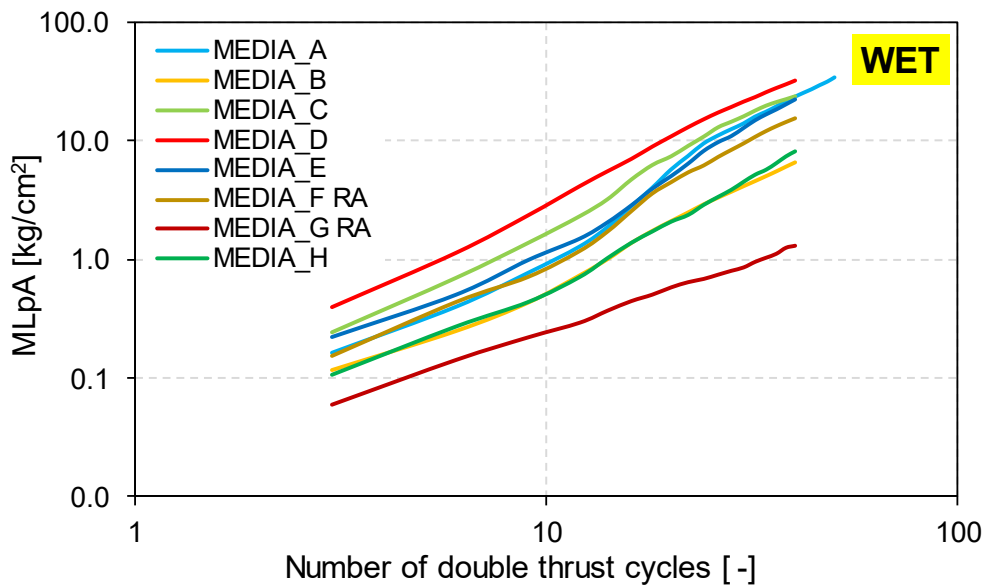


Figura 4.9. MLpA vs nr. cycles (WET)

Dalle Fig. 4.8 – 4.9 si può notare che ci sono piastre come la D e la C che sgranano di più rispetto alle altre sia in modalità DRY che in modalità WET mentre altre come la G che sgrana molto meno in entrambi le modalità di condizionamento. Si deduce quindi che alcune piastre hanno una scarsa resistenza allo sgranamento rispetto ad altre che sono abbastanza prestazionali. Ciò è anche dimostrato, soprattutto in modalità DRY, dal ranking nella sezione seguente.

### Ranking

Si analizza ora lo sgranamento di ogni miscela in termini di MLpA ai vari cicli e si individua un ranking delle varie miscele, ovvero una classifica delle miscele che va da 1 a n dove n = nr. miscele. Con il valore 1 si indica la miscela con valori di MLpA più elevati al ciclo corrispondente. Con tale modalità si individua quale tra le miscele

risulta la più resistente, e se tale classifica prestazione è confermata per tutti i cicli indagati o meno. I risultati del ranking sono riportati in Fig. 4.10.

DRY	MLpA 9	MLpA 12	MLpA 14	MLpA 18	MLpA 22	MLpA 24	MLpA 26	MLpA 30	MLpA 34	MLpA 38
A	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6
B	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
C	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
D	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
E	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
F	7	7	5	5	5	5	5	5	5	5
G	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
H	6	5	7	7	7	7	7	7	7	7
WET	MLpA 9	MLpA 12	MLpA 14	MLpA 18	MLpA 22	MLpA 24	MLpA 26	MLpA 30	MLpA 34	MLpA 38
A	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2
B	5	5	5	5	6	6	6	6	6	6
C	2	2	2	2	3	3	3	4	4	4
D	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
E	3	3	3	3	4	4	4	3	3	3
F	6	6	6	6	5	5	5	5	5	5
G	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
H	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7

Figura 4.10. Ranking miscele in modalità DRY e WET

Si nota quindi, come dedotto anche dalla Fig. 4.8 – 4.9, che in Fig. 10 le miscele meno resistenti (con valori di MLpA più elevati) sono la C e la D e viceversa le più resistenti sono la H e la G. Ciò è dimostrato sia in modalità DRY che in modalità WET.

Si osserva inoltre, come il ranking rimane pressoché costante soprattutto in modalità DRY. Questo sta ad indicare che, qualora si dovessero confrontare dei valori di sgranamento, non ha importanza il numero di cicli al quale essi vengono osservati.

### Ripetibilità

Al fine di individuare una stima della ripetibilità della prova, si sono analizzate le deviazioni standard ( $\sigma_r$ ) in funzione dell'MLpA come mostrato a titolo di esempio per il valore di sgranamento a 9 cicli sia DRY che WET in Fig. 4.11, anche se i dati non sono sufficienti a determinare un valore preciso. Si riporta inoltre anche il valore del coefficiente di correlazione  $r_{\text{Pearson}}$ . Quest'ultimo, oltre alla visualizzazione della retta che correla bene l'andamento dei punti rappresentati, indica il grado di correlazione in modo statistico. Stabilisce se c'è o meno correlazione tra due proprietà. Esso assume valori compresi tra -1 e +1 che stanno ad indicare le massime ottime correlazioni rispettivamente negativa e positiva. Qualora  $r_{\text{Pearson}}$  assumesse valori uguali o prossimi allo zero si dice che la correlazione è nulla o debole. Tale coefficiente, determinabile tramite una funzione in Excel, si calcola con l'equazione (6):

$$r_{\text{Pearson}} = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

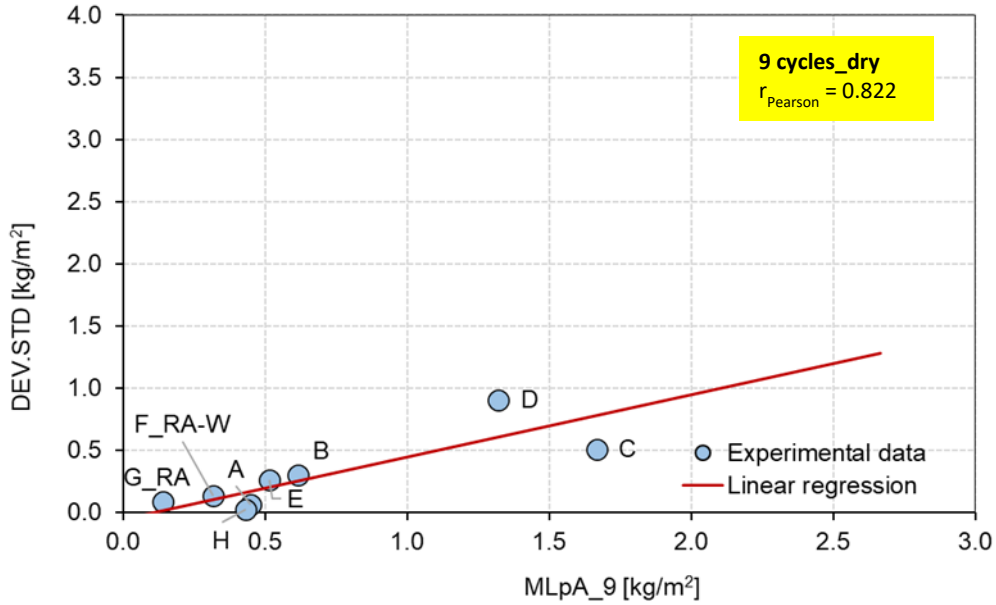


Figura 4.11. Correlazione MLpA\_9 vs DEV.STD (DRY)

$$\sigma_r = 0,50 \cdot \text{MLpA}_9 - 0,18$$

In Fig. 4.11 si nota che c'è relazione proporzionale ( $r_{\text{Pearson}} > 0,5$ ) tra la deviazione standard e l'MLpA in quanto all'aumentare dell'uno cresce anche l'altro. Nella Fig. 4.12 invece, si analizzano i valori rilevati in modalità WET e si nota che anche con questa modalità di condizionamento c'è una buona correlazione soprattutto ai primi cicli che però diventa più debole alle alte ripetizioni (riferimenti in Appendice B).

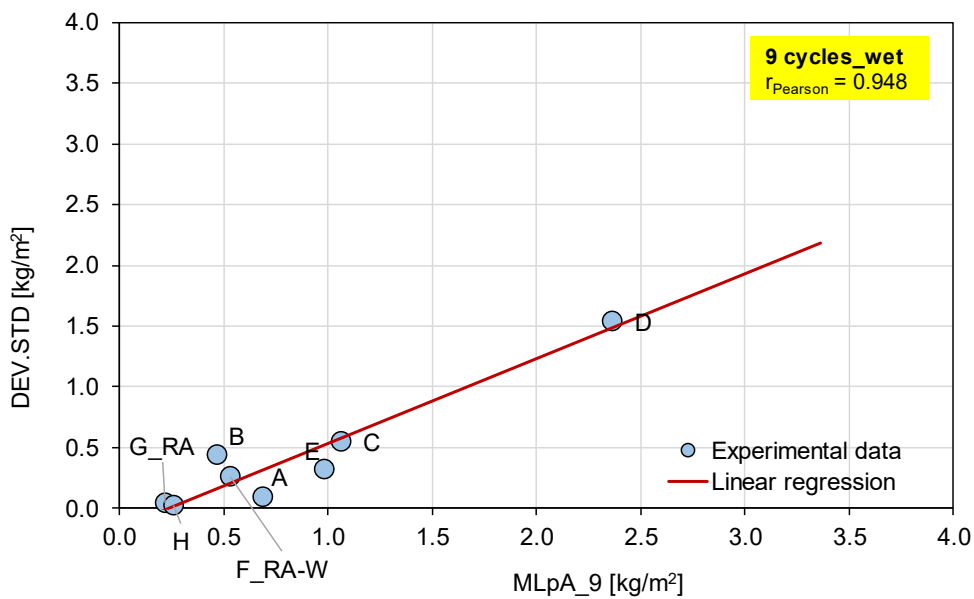


Figura 4.12. Correlazione MLpA\_9 vs DEV.STD (DRY)

$$\sigma_r = 3,28 \cdot \text{MLpA}_9 - 1,64$$

Si individua inoltre, così per ogni ciclo l'equazione (posta sotto ogni grafico) per il calcolo di  $\sigma_r$  detto anche coefficiente di ripetibilità che consiste nel moltiplicare la deviazione standard per 2,77. Si ottiene dunque un'equazione in funzione dell'MLpA ad un determinato ciclo. Il valore ottenuto sta ad indicare che la differenza tra due misure deve essere nel 95% dei casi minore di quel numero altrimenti una delle due misurazioni non è stata fatta in condizioni di ripetibilità. Queste ultime, secondo la UNI EN 932-6-2001 sono: condizioni in cui i risultati di prova sono ottenuti con lo stesso metodo di prova su porzioni di prova dell'aggregato identiche, nello stesso laboratorio, dallo stesso operatore, utilizzando la stessa apparecchiatura ed entro brevi intervalli di tempo.

### 4.3. Correlazioni tra i valori di sgranamento e il contenuto di vuoti

Si analizzano ora i valori di sgranamento ricavati dalla prova Cantabro e quelli ricavati dal DSD in relazione al contenuto di vuoti calcolati dei rispettivi provini.

#### 4.3.1. Prove Cantabro

In Fig. 4.13 – 4.14 si riporta l'andamento del Particle Loss (PL) in funzione dei Vuoti con sotto riportata l'equazione della retta di regressione totale (Equazione (4)) e il valore dell' $r_{\text{Pearson}}$  che indica la presenza o meno di una buona correlazione. Le prove sono state eseguite a 25 °C come prescritto dalla normativa, e anche alla temperatura di 40 °C per delle miscele.

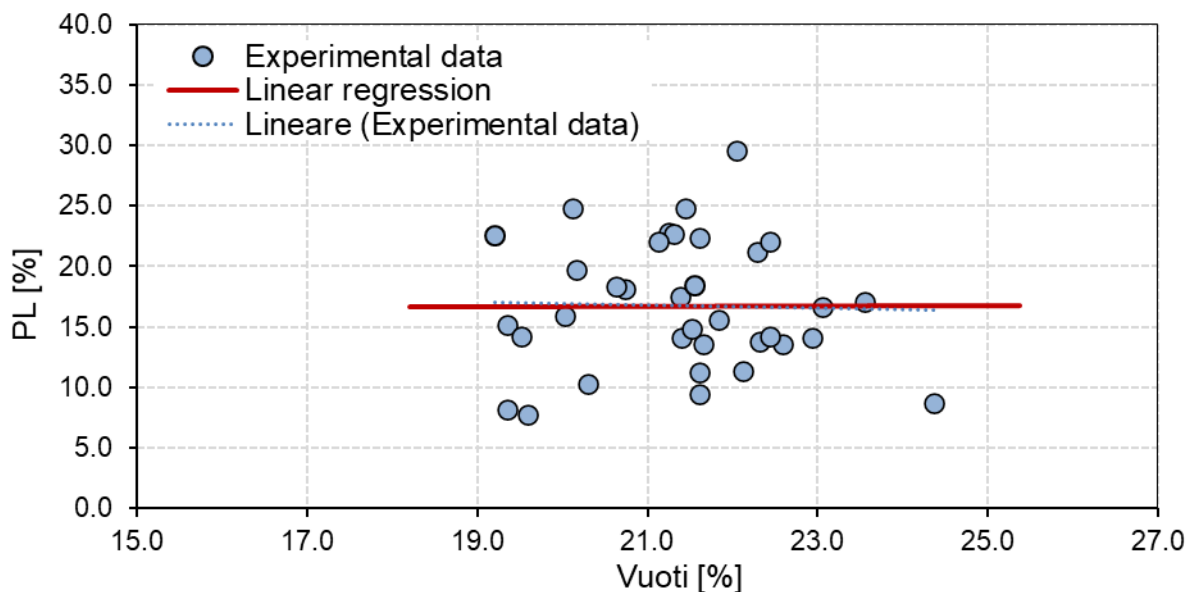


Figura 4.13 Correlazione PL [%] vs Vuoti (DRY)

$$PL = 0.0072 \cdot V_m + 16.61 ; r_{\text{Pearson}} = -0.03$$



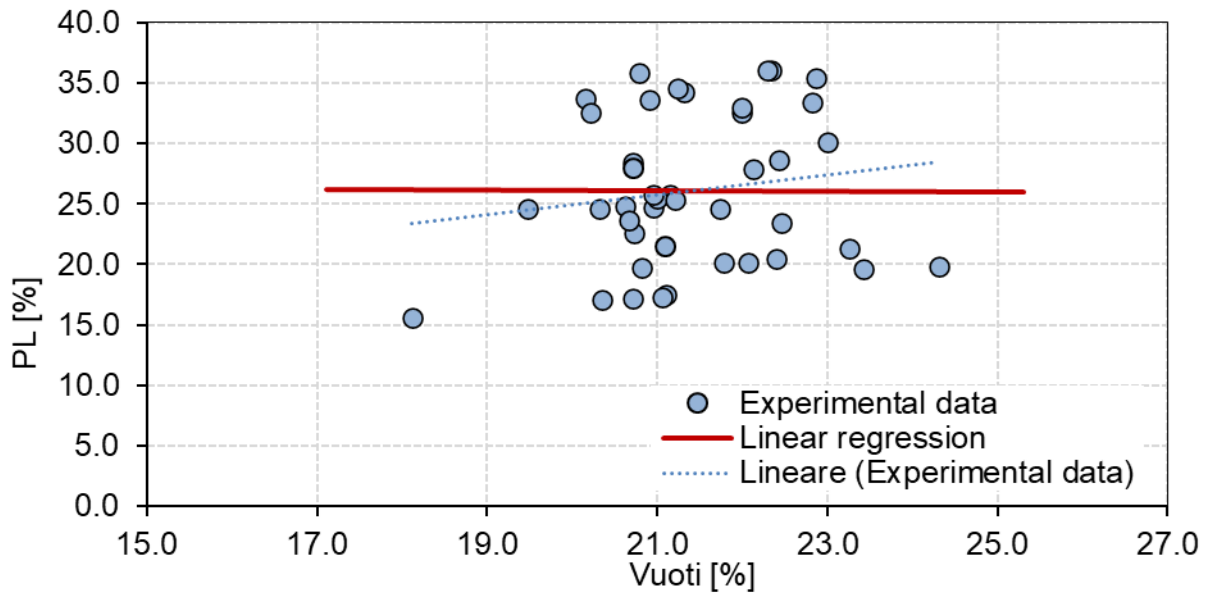


Figura 4.14. Correlazione PL [%] vs Vuoti (WET)

$$PL = - 0.0211 \cdot V_m + 26.57 ; r_{\text{Pearson}} = 0.15$$

Nelle Fig. 4.13 – 4.14 si vede che la retta di regressione totale è orizzontale, il che indica che non c'è la correlazione tra vuoti e Particle Loss. Ciò è anche confermato dal valore dell' $r_{\text{Pearson}}$  che è prossimo allo zero. Viceversa, in Fig. 4.15 – 4.16, alla temperatura di 40 °C si vede che la retta di regressione totale linearizza abbastanza bene l'andamento dei dati, infatti, si nota una correlazione ( $r_{\text{Pearson}} > 0,50$ ). Questo sta ad indicare che i vuoti sembrano essere influenti solamente alle alte temperature di prova, ovvero all'aumentare della percentuale di vuoti aumenta la perdita di materiale.

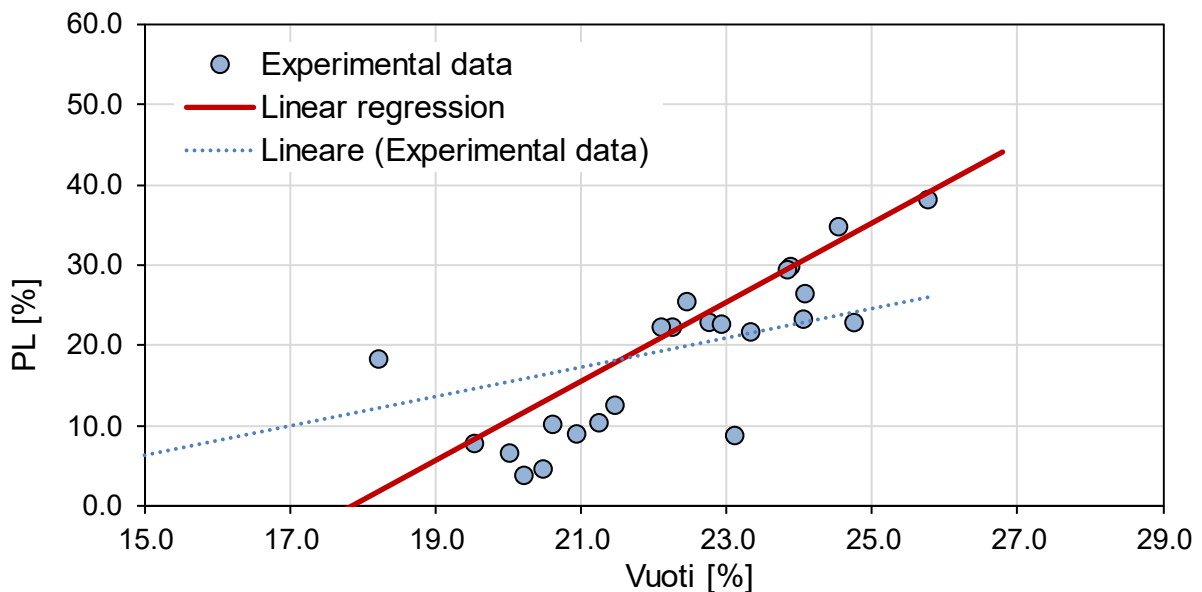


Figura 4.15. Correlazione PL [%] vs Vuoti (DRY)

$$PL = 4.9935 \cdot Vm - 88.14 ; r_{\text{Pearson}} = 0.59$$

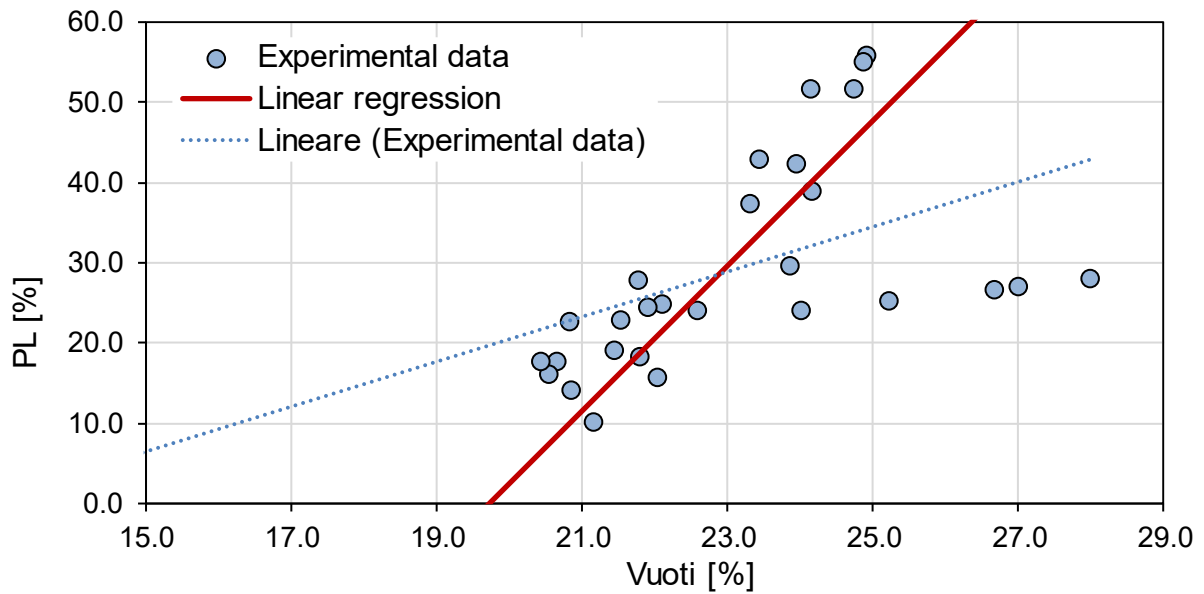


Figura 4.16. Correlazione PL [%] vs Vuoti (WET)

$$PL = 9.0732 \cdot Vm - 179.0 ; r_{\text{Pearson}} = 0.54$$

Nelle Fig. 4.17 – 4.18 è rappresentato l'andamento del PL [%] in funzione dei Vuoti [%] andando a dividere i valori per ogni rispettiva miscela e modalità di condizionamento. Inoltre, come rappresentate le barre di errore rappresentano la deviazione standard (descritta in sezione 4.1.1.) in modo da fornire un'idea della variabilità dei due valori per ogni miscela.

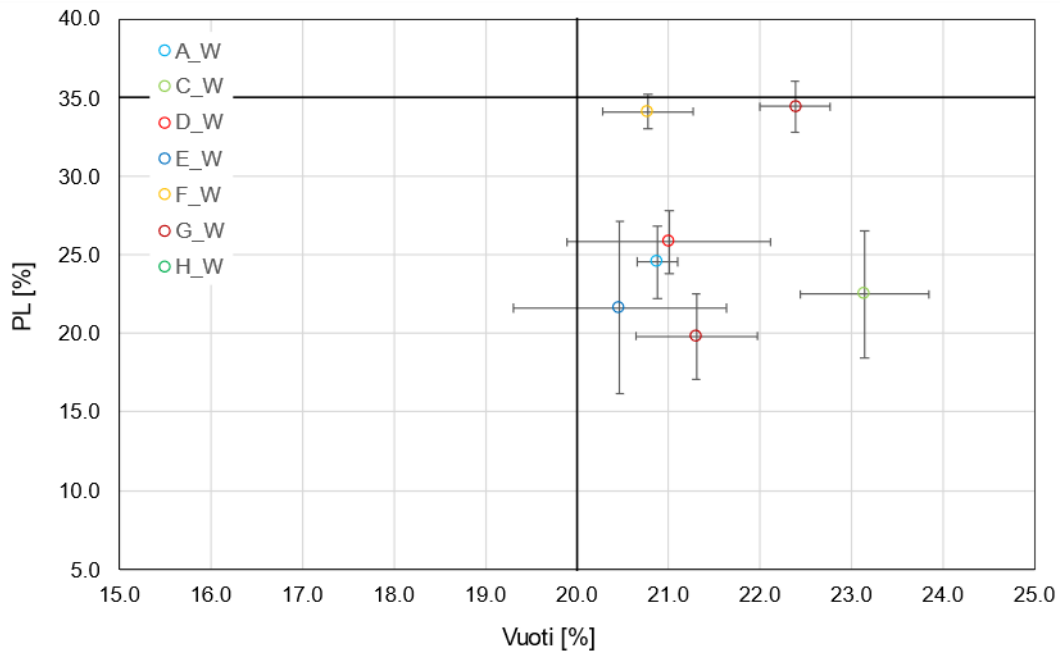


Figura 4.17. Correlazione Vuoti vs PL modalità WET

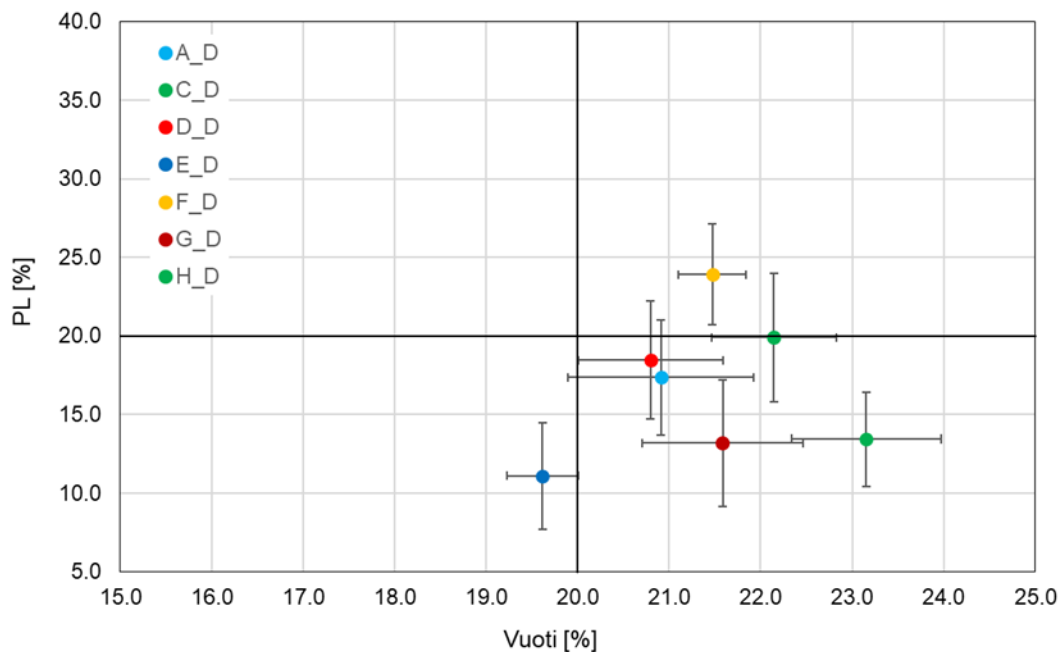


Figura 4.18. Correlazione Vuoti vs PL modalità DRY

Dunque, nelle Fig. 4.17 – 4.18, è confermato quanto mostrato in Fig. 4.13 – 4.14 ovvero la mancata correlazione tra PL [%] tra e Vuoti dei provini sottoposti a prova Cantabro. In entrambi i grafici si mettono in evidenza i due limiti riguardanti rispettivamente la perdita in peso percentuale normata e descritta in sezione 4.2.1. e il limite minimo indicante il numero di vuoti di un provino di conglomerato bituminoso poroso presente sulle varie schede tecniche. hanno un andamento casuale senza mostrare una netta correlazione.

### 4.3.2. Prove con Darmstadt Scuffing Device

Si riportano nelle Fig. 4.19 – 4.20 – 4.21 i risultati dell'analisi dei vuoti delle piastre sottoposte a DSD correlati con i valori di sgranamento ricavati per tre cicli identificativi di MLpA rispettivamente 9, 22 e 38 sia in modalità WET che DRY (per gli altri cicli si fa riferimento all'Appendice C).

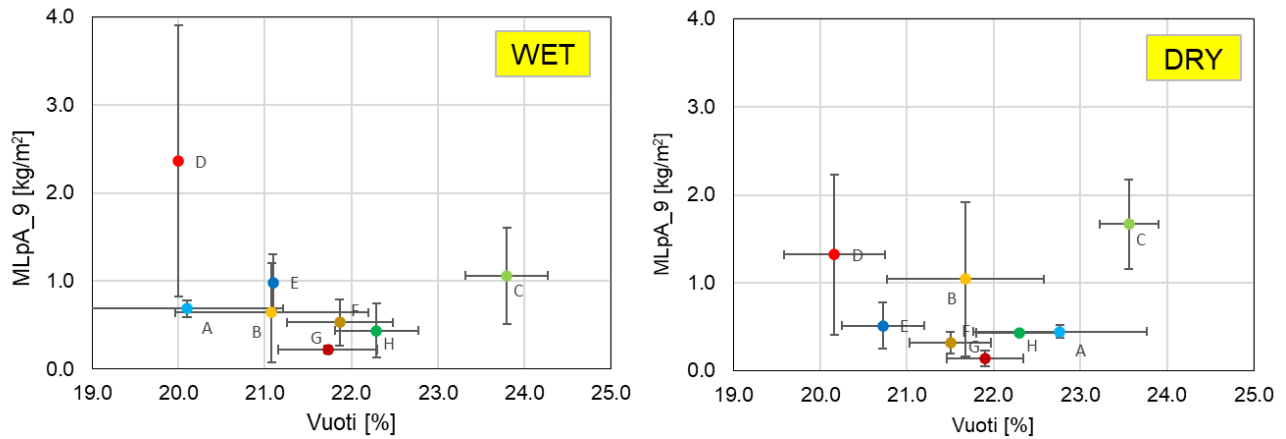


Figura 4.19 Correlazione Vuoti vs MLpA<sub>9</sub>

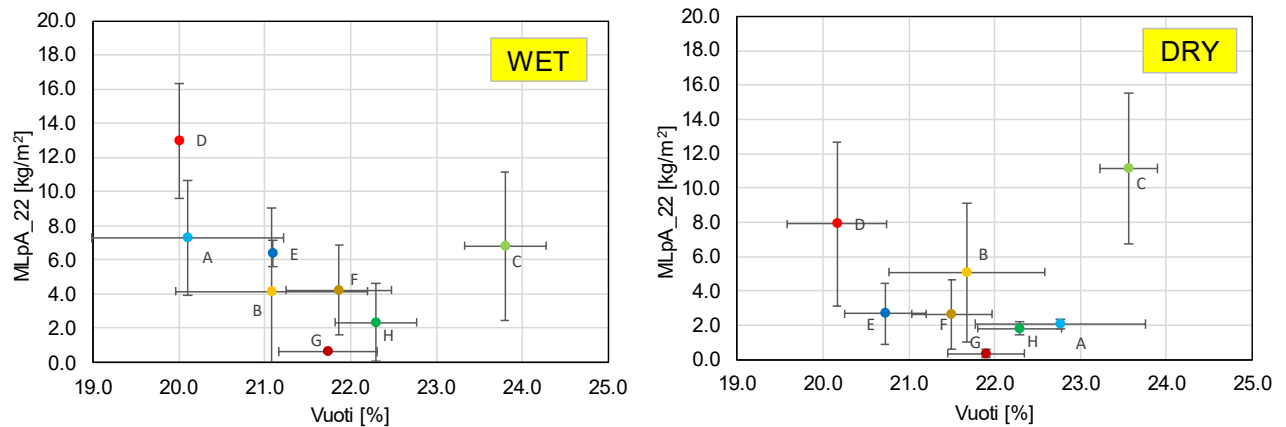


Figura 4.20. Correlazione Vuoti vs MLpA<sub>22</sub>

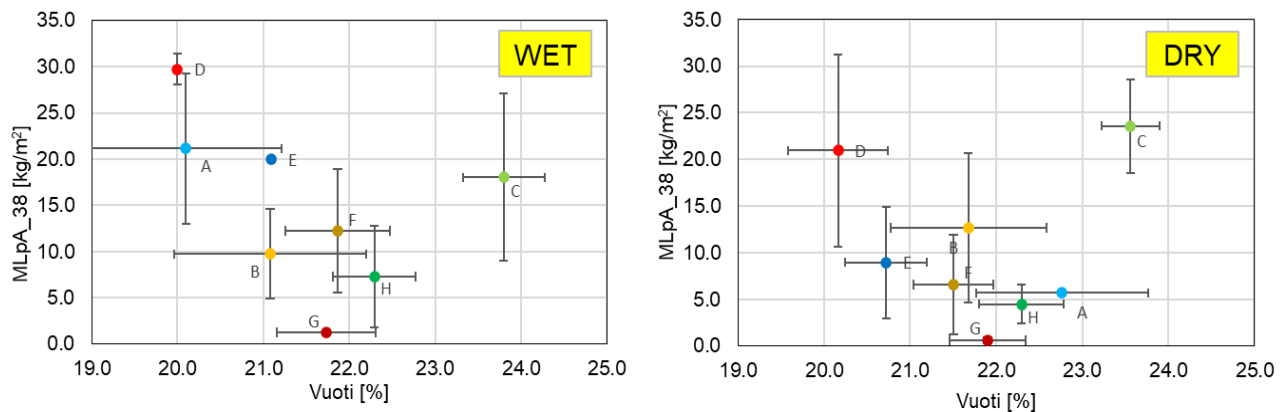


Figura 4.21. Correlazione Vuoti vs MLpA<sub>38</sub>

Nelle Fig. 4.19 – 4.20 – 4.21 si correla dunque, l'MLpA con il valore dei vuoti residui e si nota che in tutti i grafici, indipendentemente dalla modalità di condizionamento, non c'è una correlazione evidente tra i due dati. Inoltre, sono rappresentate delle barre di errore per ogni punto rappresentato. La presenza di queste barre consente di individuare a colpo d'occhio i margini di errori esprimendo, nel caso in analisi, le deviazioni standard calcolata con l'Equazione (5) che rappresentano la variabilità in ogni miscela dei due valori correlati.

#### 4.4. Confronto risultati Cantabro – DSD

Si riportano ora le correlazioni che sono state effettuate tra i valori di Particle Loss [%] derivanti dalle prove Cantabro e il MLpA [kg/m<sup>2</sup>] derivante dalle prove DSD rispettivamente per 9, 22 e 38 cicli nelle due modalità di condizionamento WET e DRY. Nei grafici, riportati dalla Fig. 4.22 alla Fig. 4.27, si individuano i dati sperimentali di PL [%] e MLpA [kg/m<sup>2</sup>] divisi per miscela, interpolati dalla retta di regressione totale e il valore dell' $r_{\text{Pearson}}$  indicante la presenza o meno di una buona correlazione.

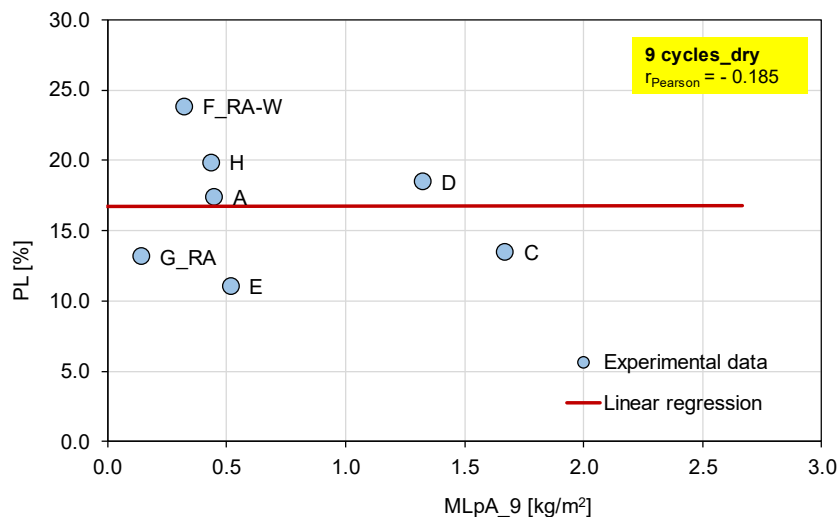


Figura 4.22. Correlazione PL medio vs MLpA\_9

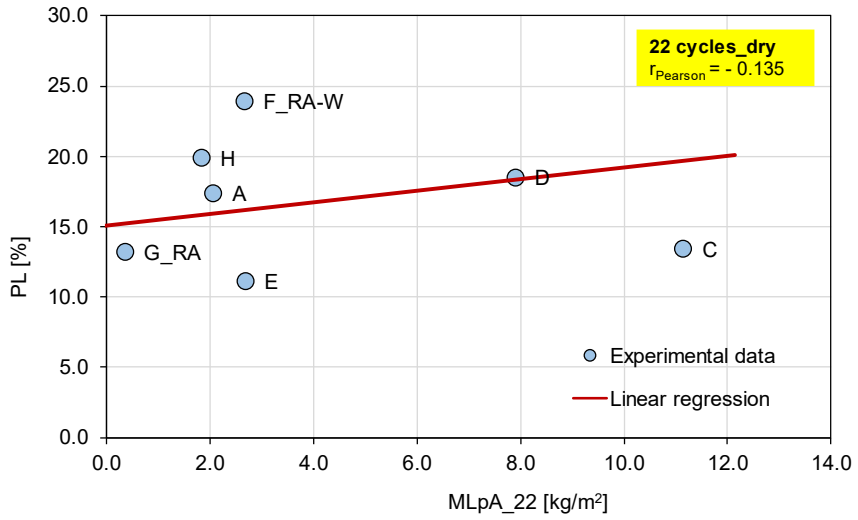


Figura 4.23. Correlazione PL medio vs MLpA\_22

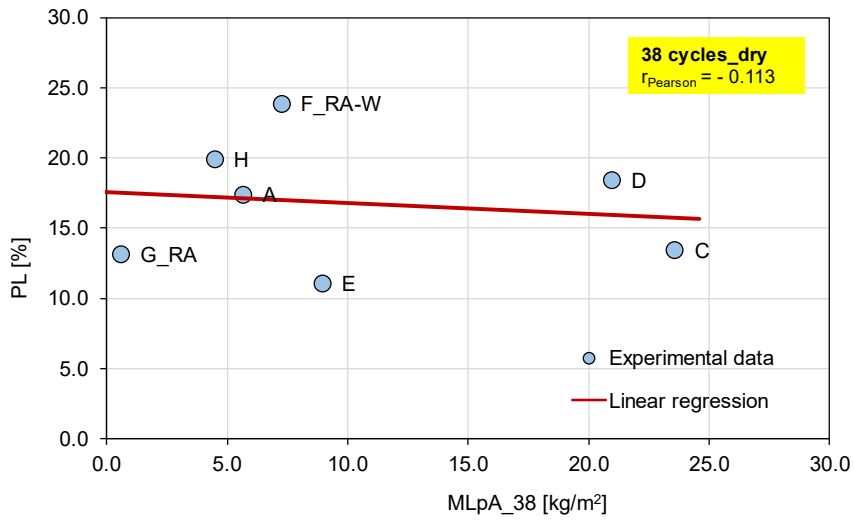


Figura 4.24. Correlazione PL medio vs MLpA\_38

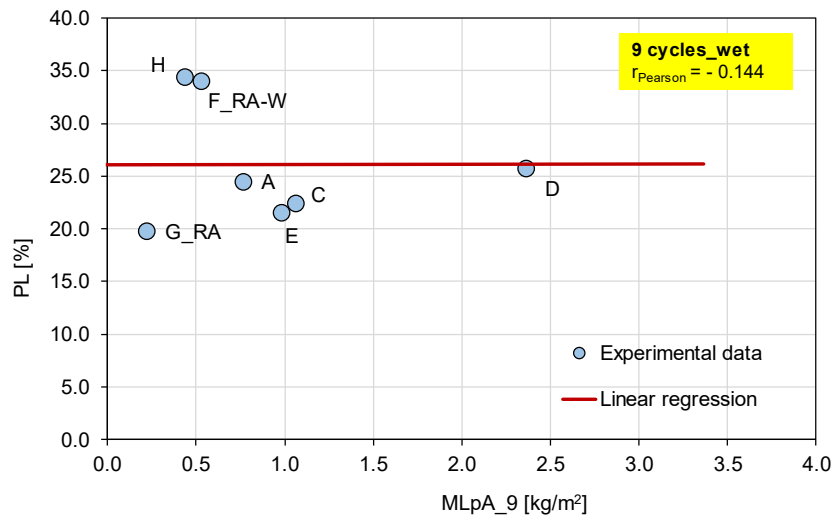


Figura 4.25. Correlazione PL medio vs MLpA\_9

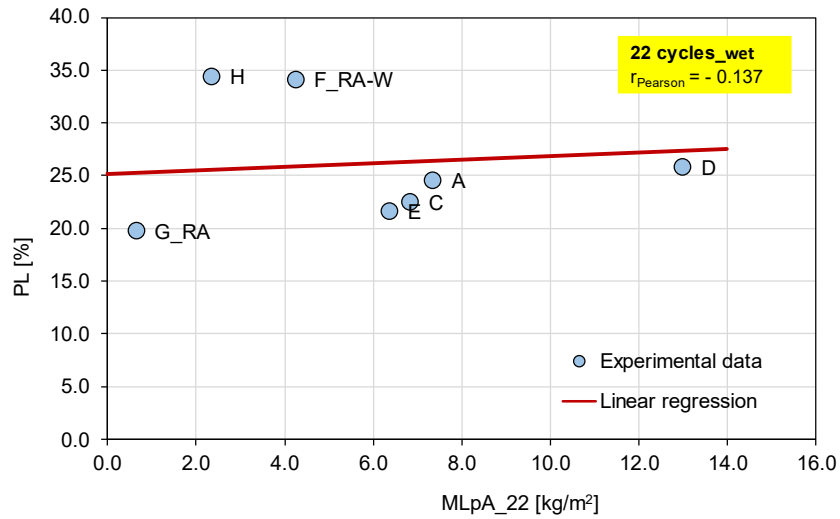


Figura 4.26. Correlazione PL medio vs MLpA\_22

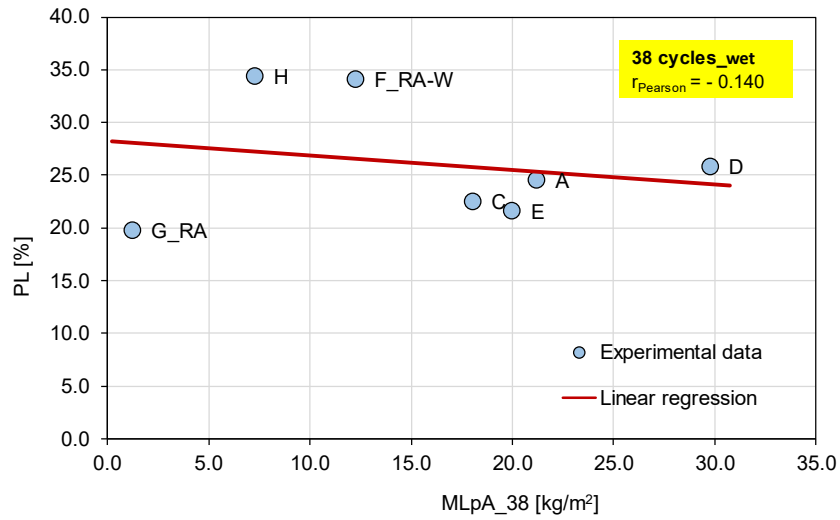


Figura 4.27. Correlazione PL medio vs MLpA\_38

Dalla Fig. 4.22 alla Fig. 4.27 si può notare che non c'è correlazione tra i risultati Cantabro e DSD al variare del numero di cicli. Ciò è dimostrato dal fatto che la retta di regressione è piatta e dell' $r_{\text{Pearson}}$  prossimo allo zero. Gli altri grafici che confermano ciò per altri numeri di cicli sono presenti in Appendice D.

Nella Fig. 4.28 – 4.29 viene mostrato l'andamento dell' $r_{\text{Pearson}}$  in funzione dei vari cicli in entrambe le modalità di condizionamento.

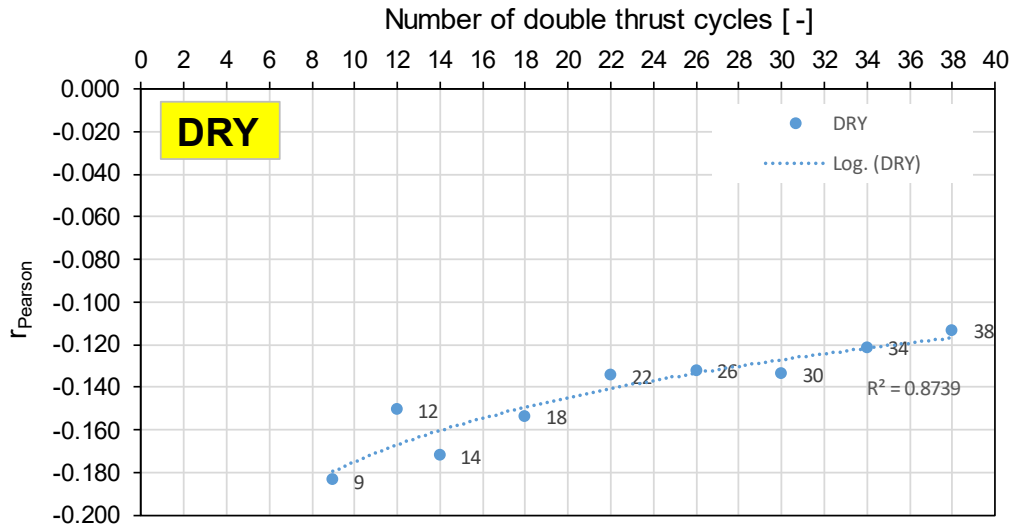


Figura 4.28. Andamento  $r_{\text{Pearson}}$  in funzione del nr. cicli

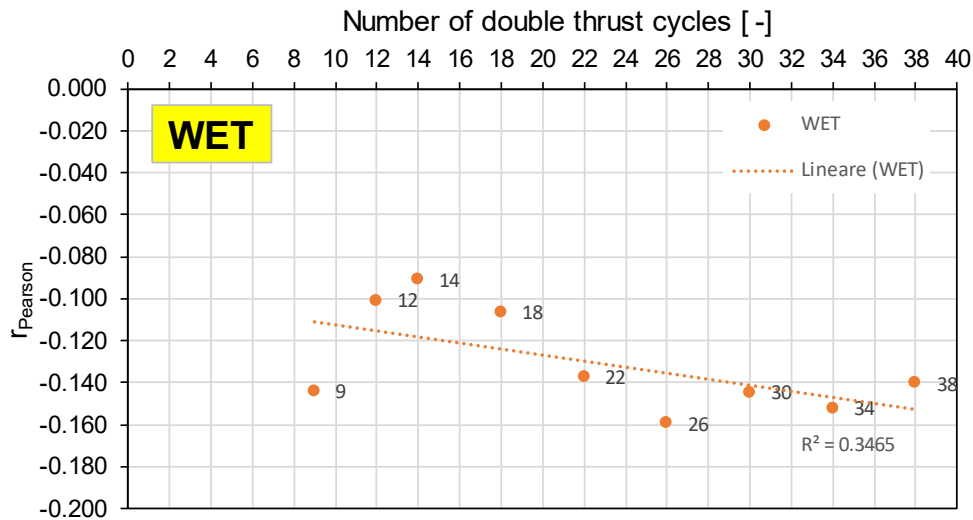


Figura 4.29. Andamento  $r_{\text{Pearson}}$  in funzione del nr. cicli

Nelle Fig. 4.28 – 4.29 si nota come l' $r_{\text{Pearson}}$  rimane sempre compreso in un intervallo di valori prossimi allo zero il che conferma il fatto che non ci sia correlazione. D'altronde, nelle prove eseguite con modalità dry, si può notare un andamento crescente negativo dell'indice di Pearson, correlato con una curva di regressione di tipo esponenziale caratterizzata da un  $R^2$  maggiore di 0.85.

È quindi necessario trovare un limite di MLpA che corrisponda al valore imposto dalla normativa per la prova Cantabro. La ricerca sta avanzando da questo punto di vista andando a risolvere le incognite riguardanti: il numero di cicli al quale impostare il limite da confrontare sul PL e quante ripetizioni fare della stessa miscela per dimostrare che una prova sia affidabile, ovvero individuare un valore certo di ripetibilità.



## 5. Conclusione

I risultati ricavati dall'esecuzione delle prove di laboratorio compongono l'indagine sulla resistenza allo sgranamento delle miscele di conglomerato bituminoso poroso fornite dalla società Amplia Infrastructures S.p.A. Dunque, tali valori sono fondamentali per capire qual è il conglomerato più prestazionale e per verificare l'efficienza del nuovo macchinario (Darmstadt Scuffing Device, DSD) sulla misurazione dello sgranamento.

La sperimentazione prevista si è basata sulla compattazione a vuoti imposti ( $N_{des}$ ) di provini (piastre e cilindrici) tramite rispettivamente il Roller Sector Compactor e il compattatore ad impatto Marshall. Dopo tale fase, prima di procedere sono stati calcolati i vuoti dei rispettivi provini in modo da avere un riscontro sulla corretta esecuzione della compattazione. Successivamente si procede con il condizionamento che prevede il mantenimento del campione in modalità *DRY* (camera climatica) e in modalità *WET* (bagno termostatico) per diversi giorni, simulando così le condizioni realistiche rispettivamente di strada asciutta e bagnata, come prescritto da normativa. Finito tale periodo, si fa raggiungere la temperatura di prova al provino che è stato poi testato con i macchinari e secondo le procedure standardizzate dalla normativa europea. Si è dunque ripetuta tale procedura per almeno quattro piastre (due *DRY* e due *WET*) e dieci provini (cinque *DRY* e cinque *WET*) per ogni miscela.

Al termine di questa sperimentazione sono stati rielaborati i dati raccolti e si è individuato un *Ranking* tra le miscele che mostra una classifica che va dalla meno resistente allo sgranamento alla più prestazionale e ciò è più o meno omogeneo in quanto si verifica ad ogni ripetizione. È stato inoltre dedotto che il condizionamento ha un'influenza notevole sui risultati delle prove. Ciò è dimostrato sia dai risultati ricavati con la prova Cantabro che da quelli ricavati con il Darmstadt Scuffing Device (DSD) in quanto tutti i provini condizionati in modalità *WET* e poi testati forniscono valori di sgranamento più elevati rispetto a quelli *DRY* individuando così una suscettibilità all'acqua da parte di tutte le miscele.

Successivamente al fine di standardizzare il nuovo macchinario sono state fatte delle correlazioni per vedere l'influenza dei vuoti nelle due prove e a temperature differenti. Si è notato che i vuoti a 40 °C per il DSD e a 25 °C per la prova Cantabro non hanno particolare influenza nello sgranamento delle miscele testate sia in modalità *DRY* che *WET*. Si è notato invece che per la prova Cantabro, alla temperatura di 40 °C c'è una correlazione tra la percentuale dei vuoti e i valori di sgranamento.

Per quanto riguarda il confronto dei risultati di sgranamento ricavati dai due macchinari si è dedotto che non c'è una netta correlazione tra il DSD e la Cantabro, in quanto le modalità di sollecitazione del provino sono totalmente differenti. La prima simula in modo molto realistico ciò che si verifica nella pavimentazione al passare dello pneumatico mentre nel secondo dispositivo la rotazione del tamburo e la presenza del setto applicano delle sollecitazioni "distruttive" portando allo sgretolamento dello stesso.

Infine, è stata fornita una stima della ripetibilità del Darmstadt Scuffing Device (DSD) per i vari cicli di carico. Ovvero si sono rapportate in appositi grafici le deviazioni standard in funzione delle medie dell'MLpA (Mass Loss per Area, che sarebbe la misura dello sgranamento derivante dal DSD) di ogni miscela fissando il numero di ripetizioni. Si è così stimato tale parametro che però non va presa come riferimento in quanto i dati sui quali è stata ricavata non sono sufficienti per fornire un valore certo. Lo studio andrebbe approfondito con ulteriori valori di sgranamento da aggiungere a quelli finora ottenuti al fine di individuare un dato preciso di ripetibilità da inserire in normativa.

# 6. Appendice

## Appendice A

- Miscela A\_Arezzo

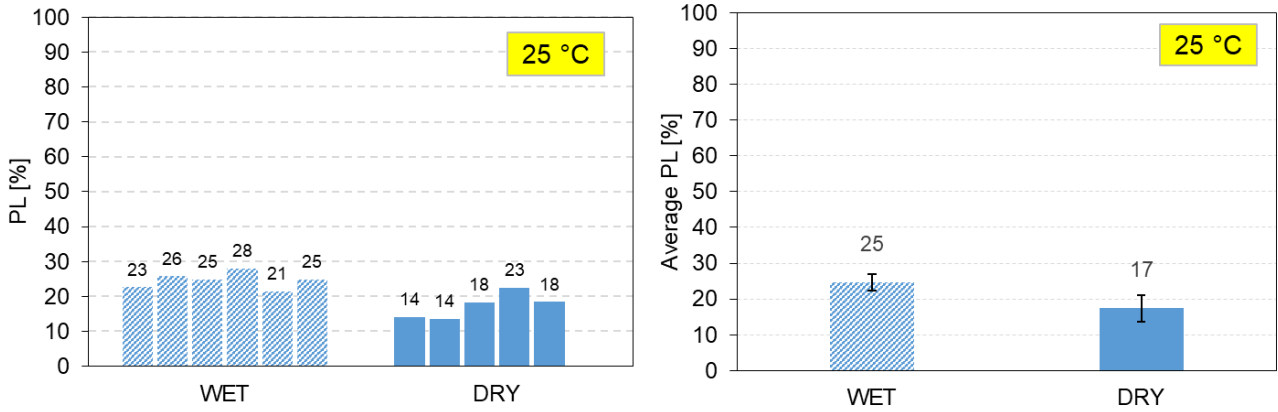


Figura 6.1. Valori sgranamento Cantabro

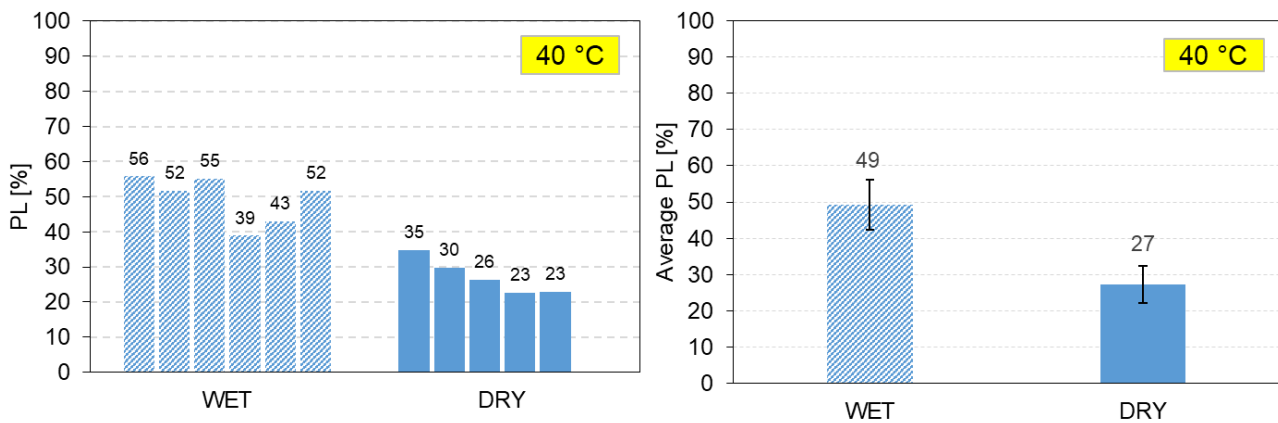


Figura 6.2. Valori sgranamento Cantabro

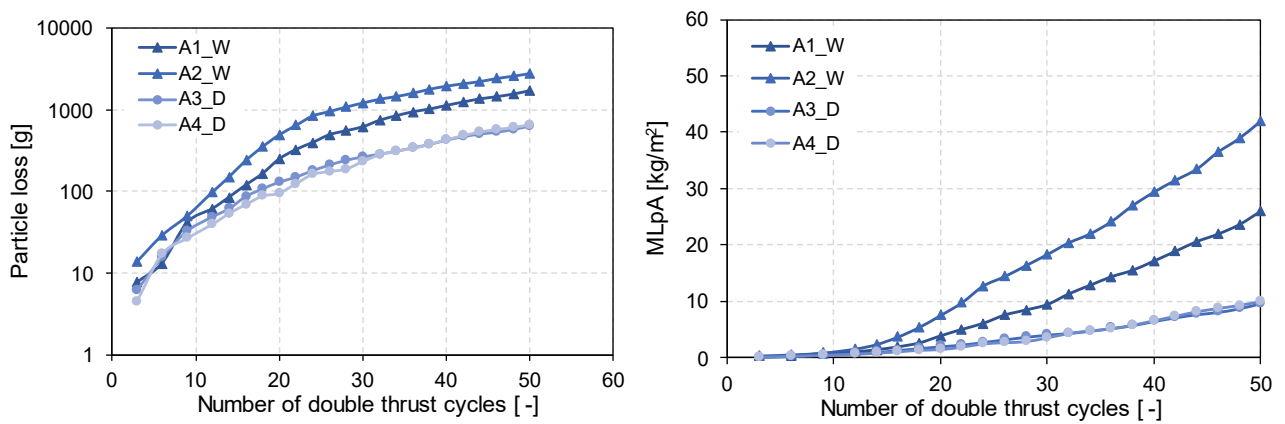


Figura 6.3. Valori di sgranamento DSD

- Miscela B\_Magliano Sabina

I valori di sgranamento Cantabro a 25 °C non sono presenti in quanto il materiale è stato sottoposto a prova solamente a temperatura di 40 °C come descritto nei capitoli precedenti.

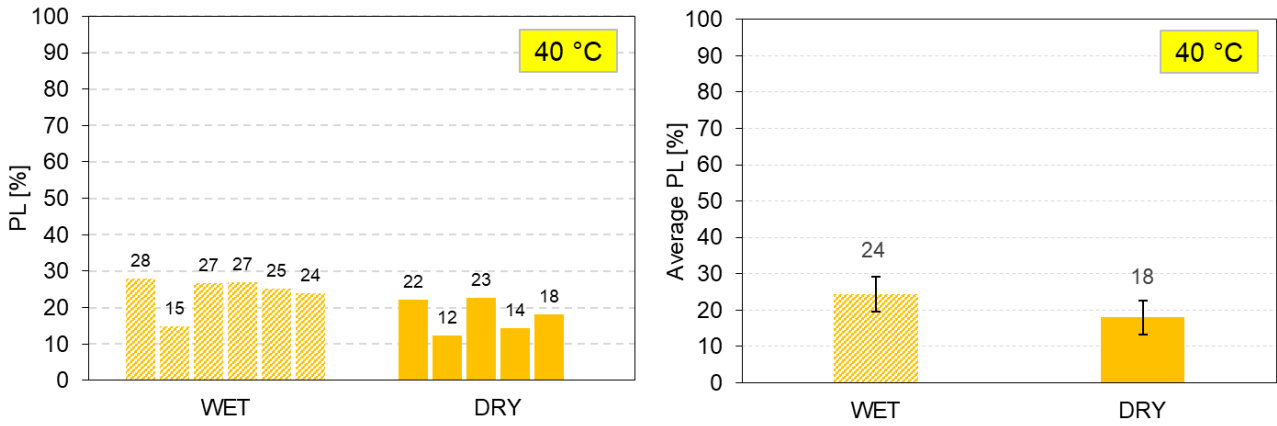


Figura 6.4. Valori sgranamento Cantabro

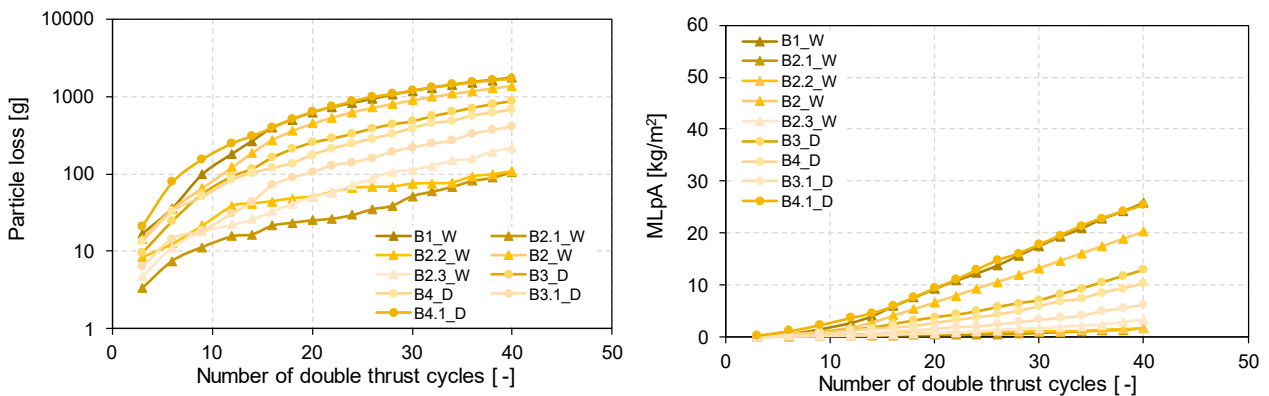


Figura 6.5. Valori di sgranamento DSD

• Miscela C\_Andria

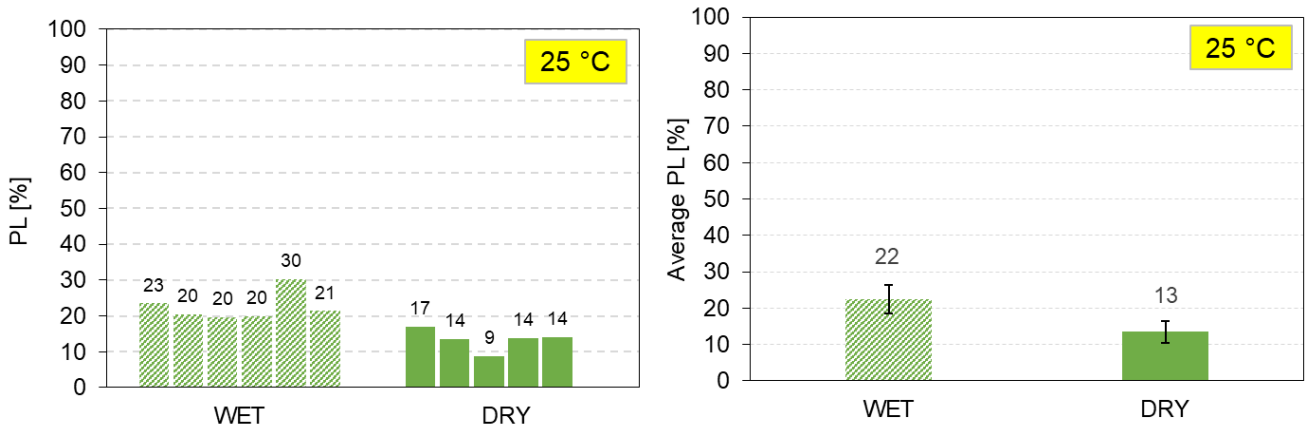


Figura 6.6. Valori sgranamento Cantabro

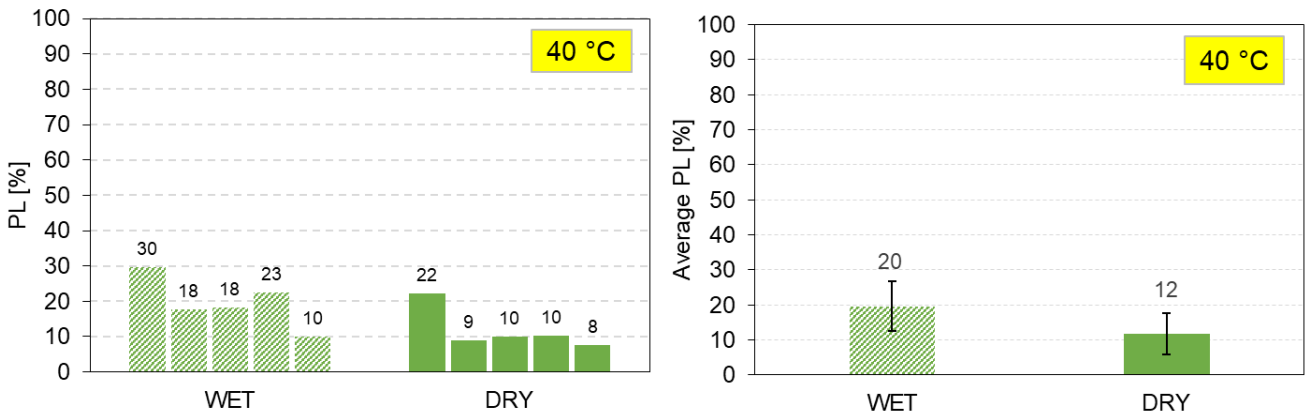


Figura 6.7. Valori sgranamento Cantabro

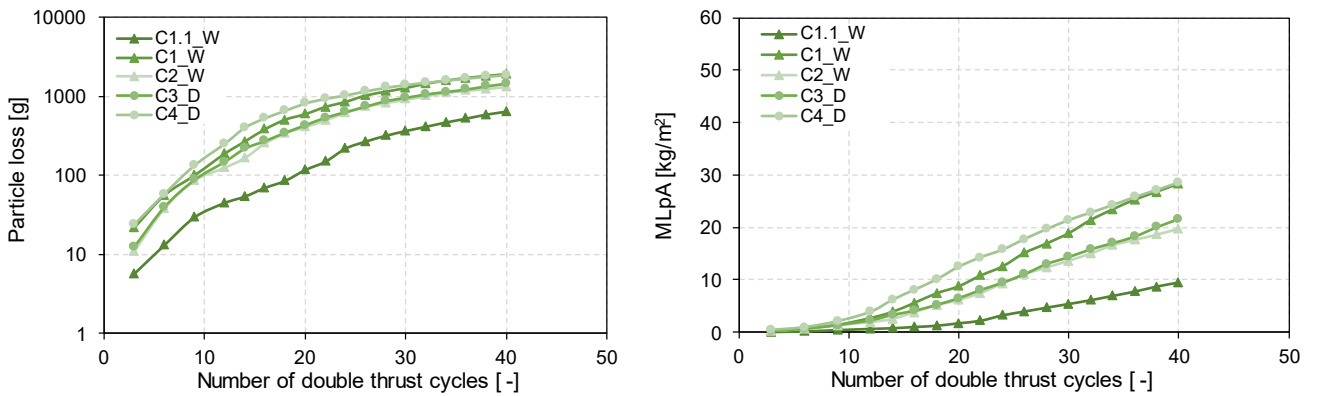


Figura 6.8. Valori di sgranamento DSD

- Miscela D\_Marcianise

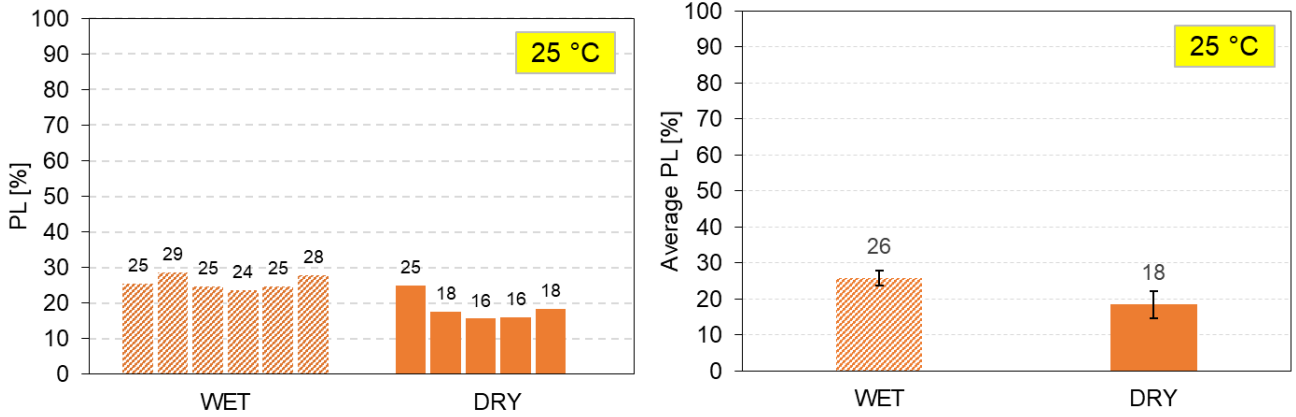


Figura 6.9. Valori sgranamento Cantabro

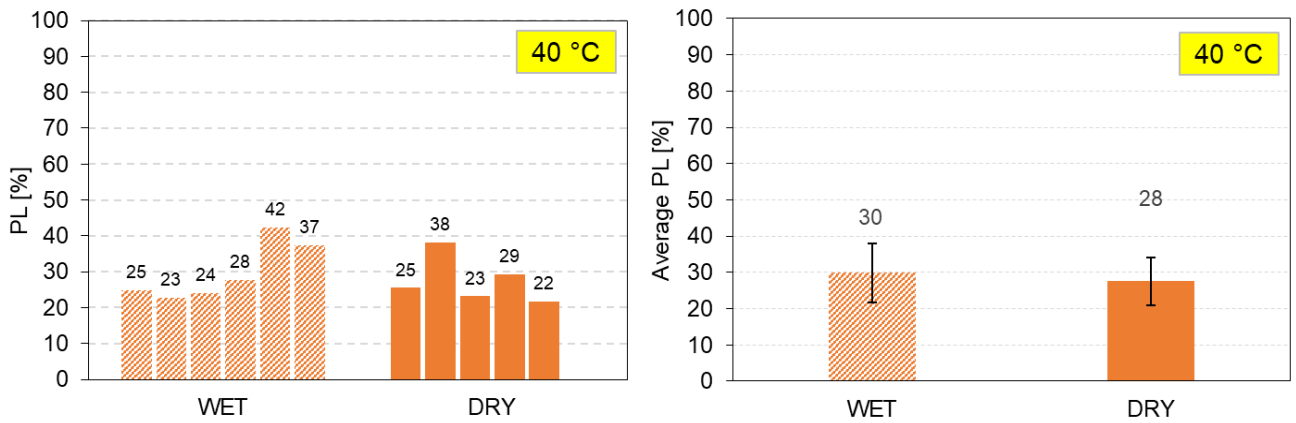


Figura 6.10. Valori sgranamento Cantabro

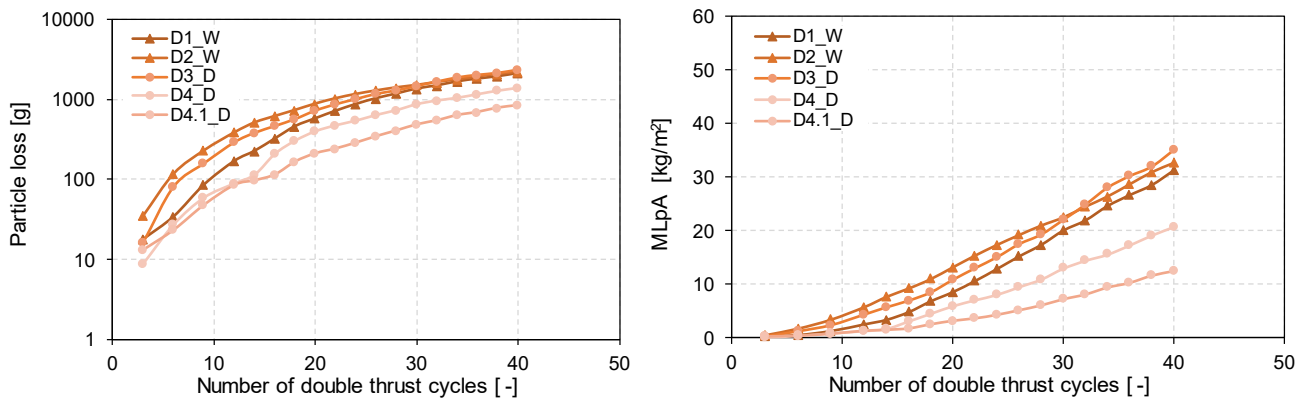


Figura 6.11. Valori di sgranamento DSD

- Miscela E\_Loreto

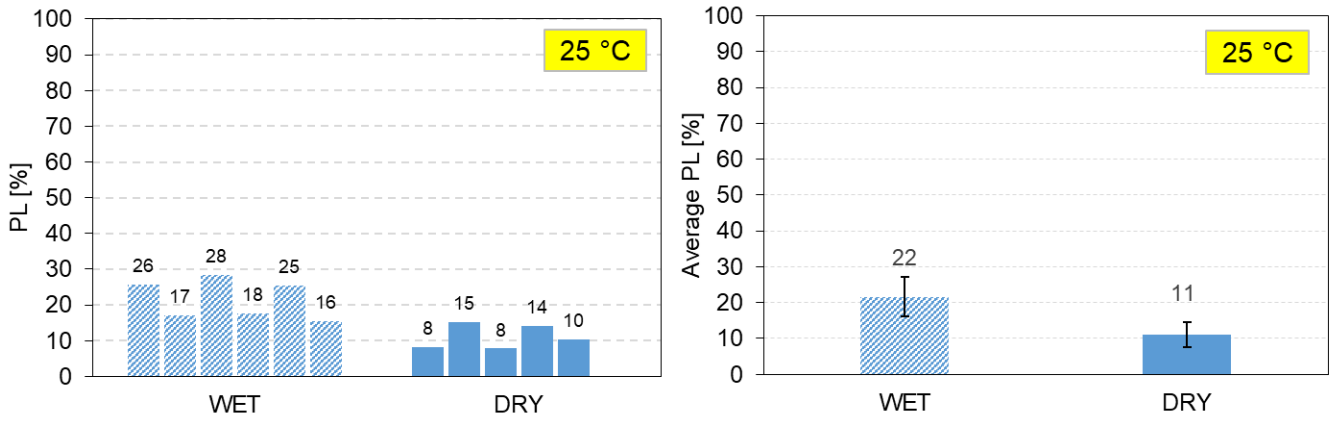


Figura 6.12. Valori sgranamento Cantabro

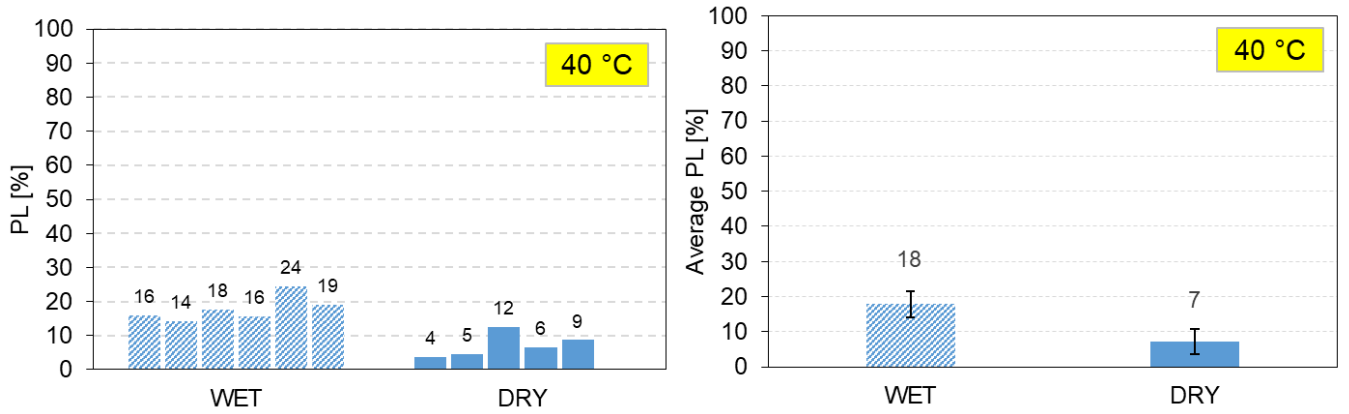


Figura 6.13. Valori sgranamento Cantabro

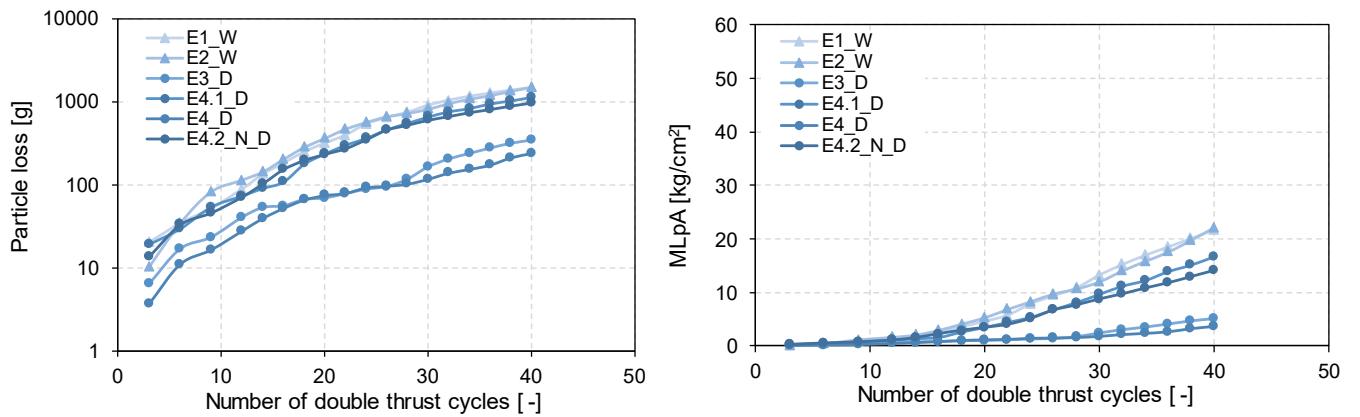


Figura 6.14. Valori di sgranamento DSD

- Miscela F\_Magliano RA

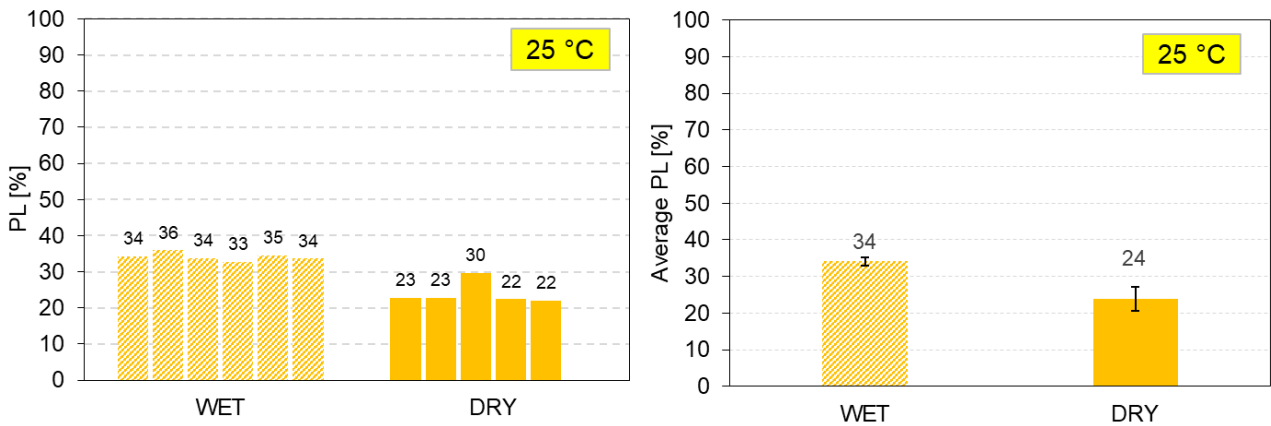


Figura 6.15. Valori sgranamento Cantabro

I valori di sgranamento Cantabro non sono stati rilevati a 40 °C in quanto la normativa non lo prevede e si è deciso di conservare il materiale per eventuali errori.

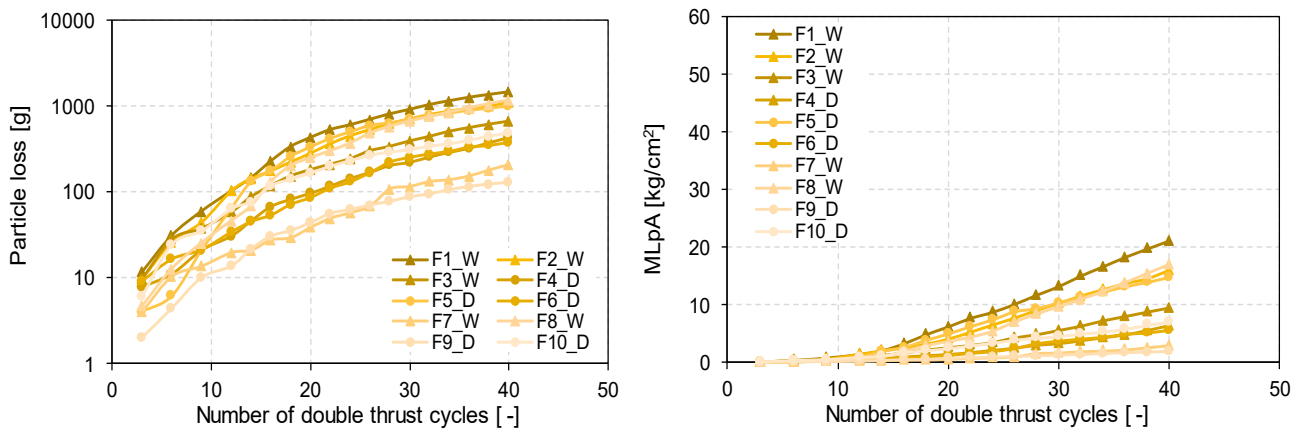


Figura 6.16. Valori di sgranamento DSD



- Miscela G\_Marcianise RA

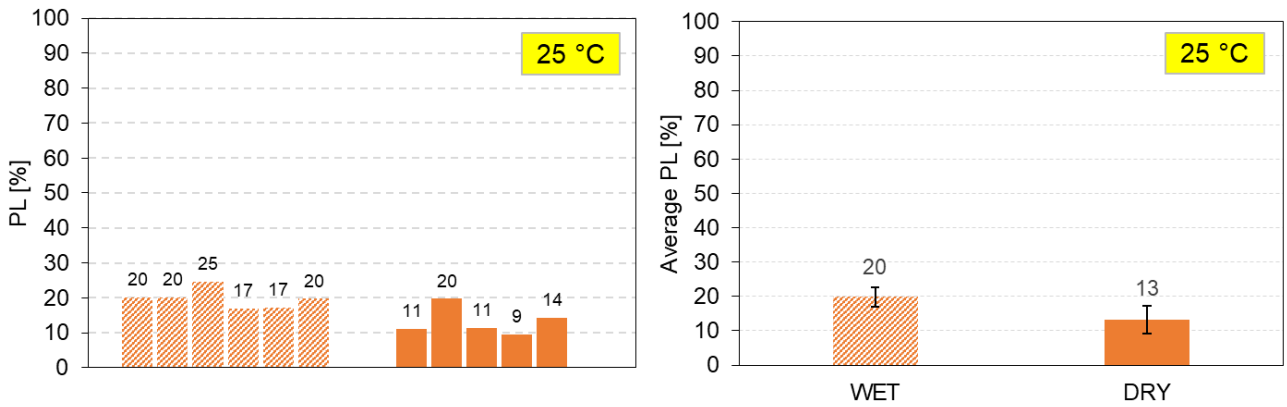


Figura 6.17. Valori sgranamento Cantabro

I valori di sgranamento Cantabro non sono stati rilevati a 40 °C in quanto la normativa non lo prevede e si è deciso di conservare il materiale per eventuali errori.

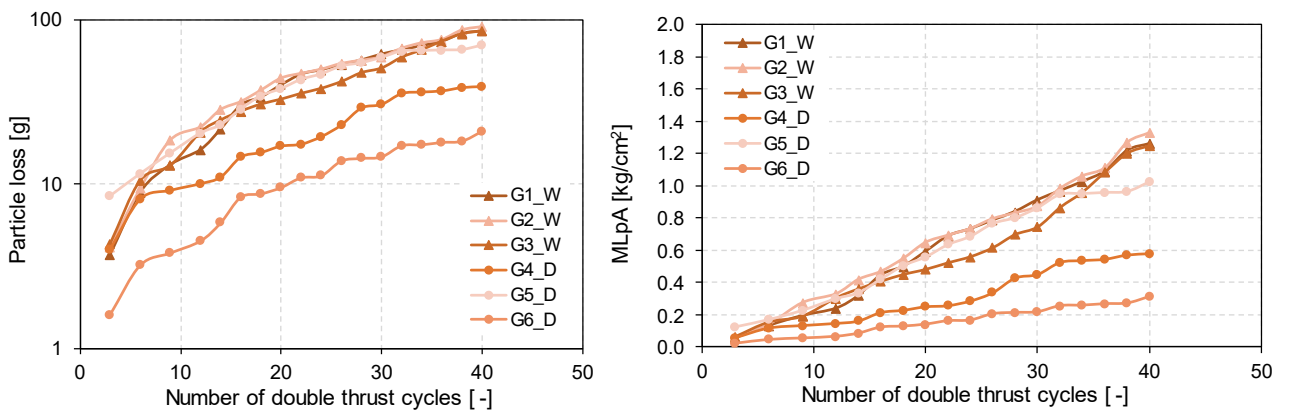


Figura 6.18. Valori di sgranamento DSD

## Appendice B

- Analisi varianze DRY

N.B. Scale variabili nei seguenti grafici !

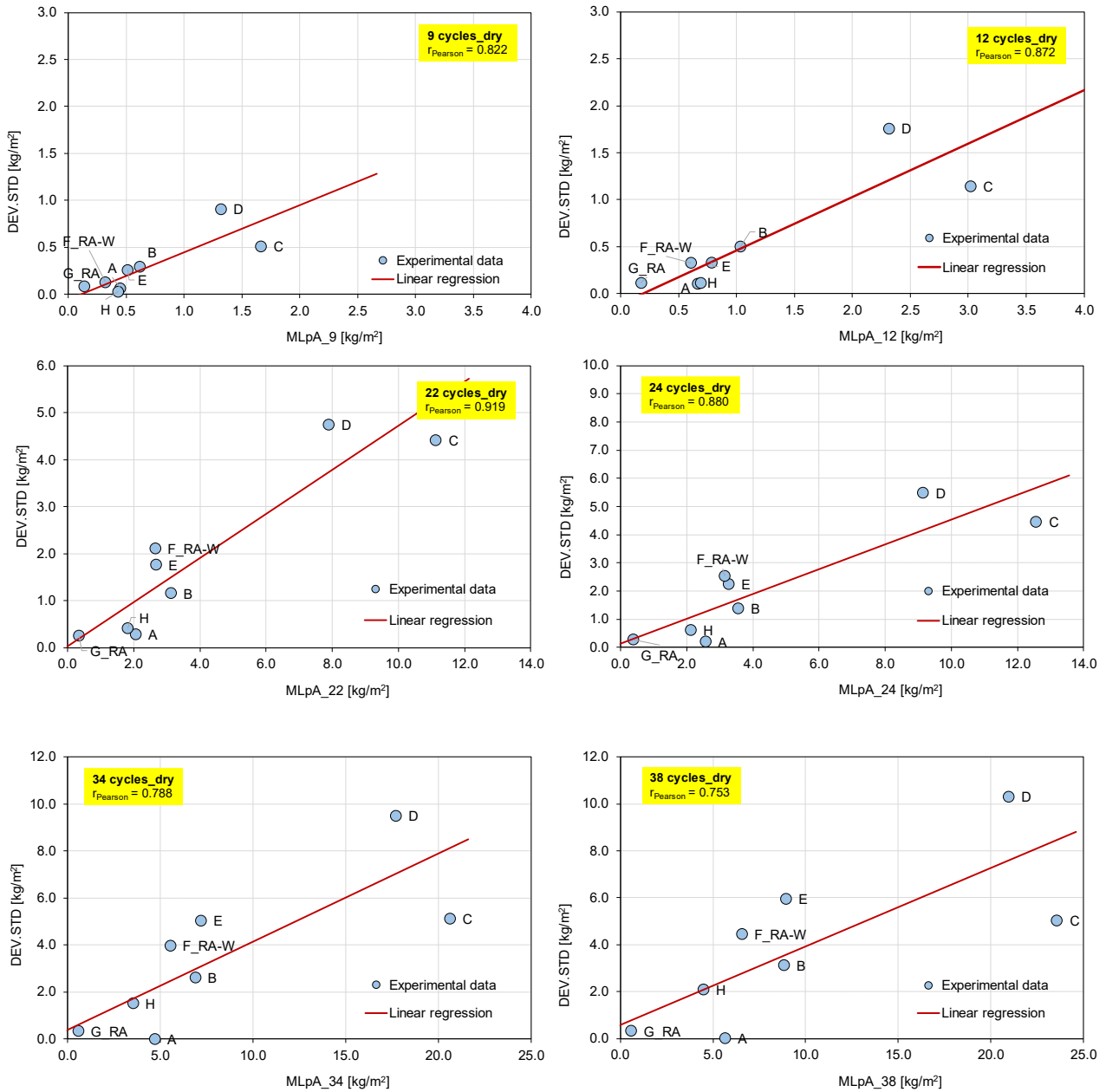


Figura 6.19. Correlazioni MLpA vs DEV.STD (DRY)

- Analisi varianze WET

N.B. Scale variabili nei seguenti grafici !

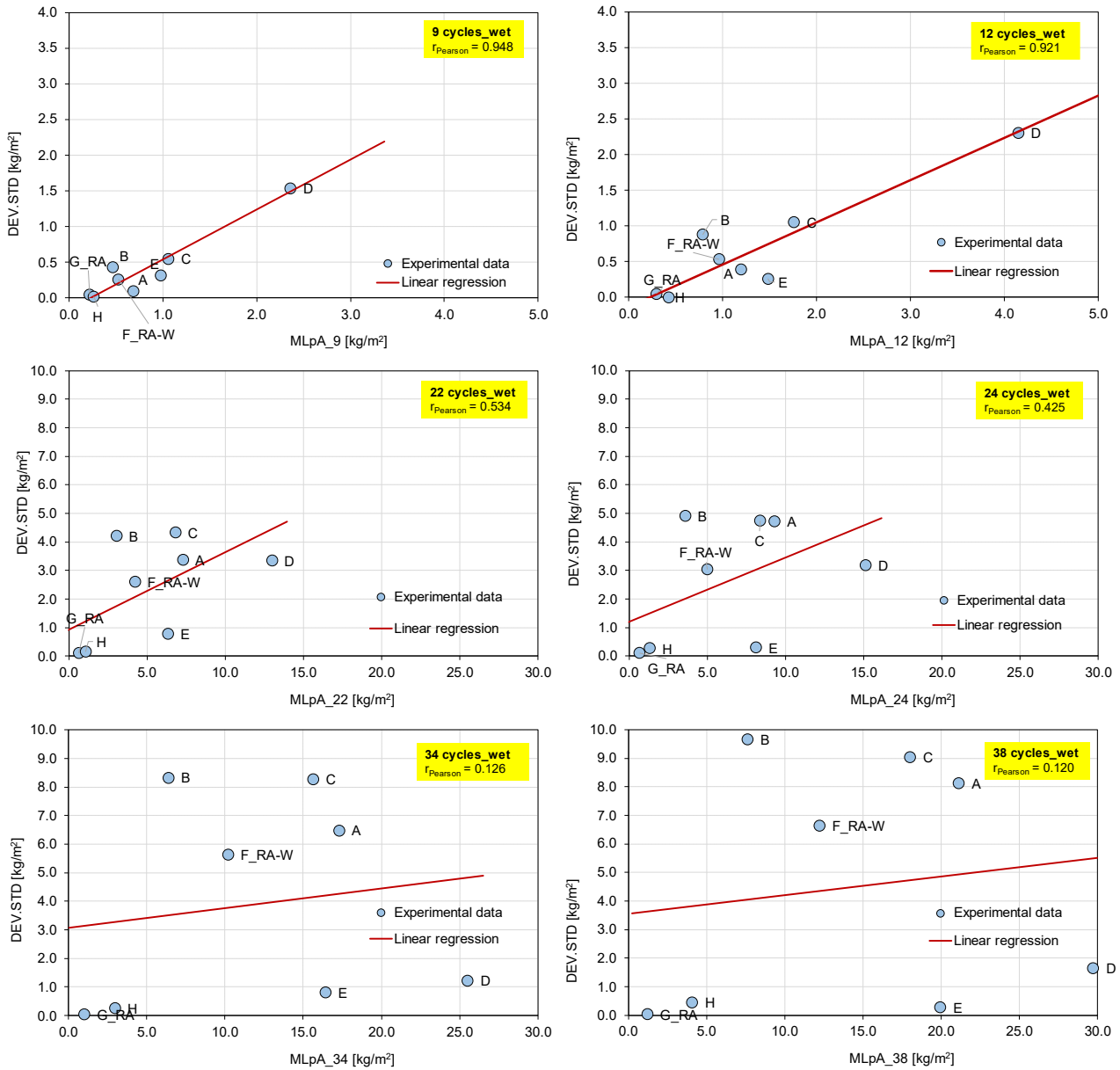


Figura 6.20. Correlazioni MLpA vs DEV.STD (WET)

## Appendice C

- Correlazione MLpA vs Vuoti (TOTALE)

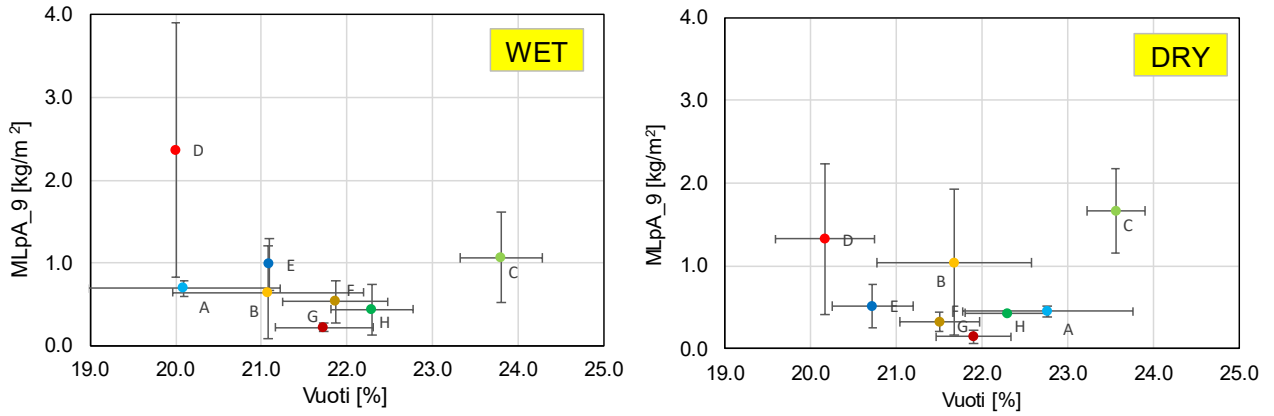


Figura 6.21. Correlazione MLpA\_9 vs Vuoti

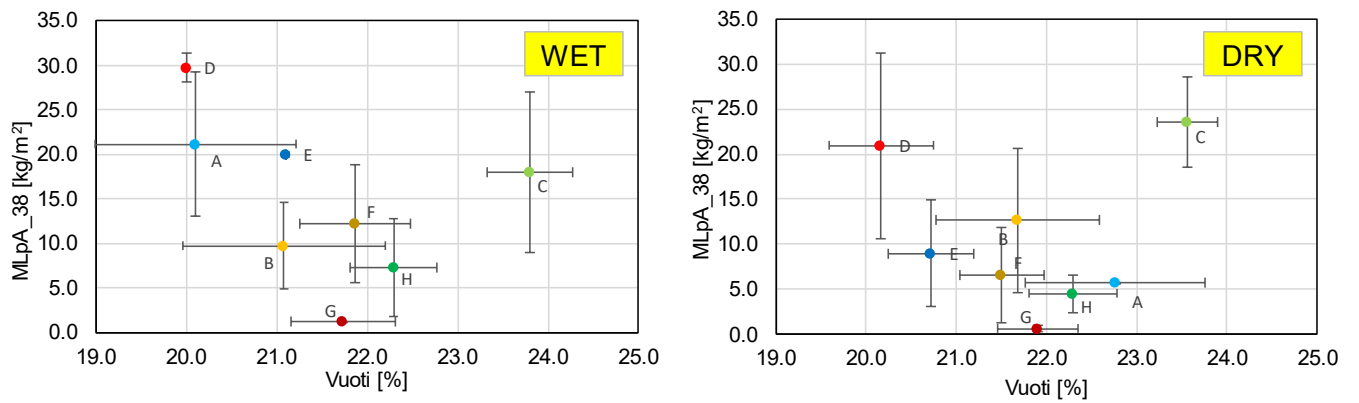


Figura 6.22. Correlazione MLpA\_38 vs Vuoti

- Correlazioni MLpA – Vuoti con tutti i punti in evidenza e la retta di tendenza

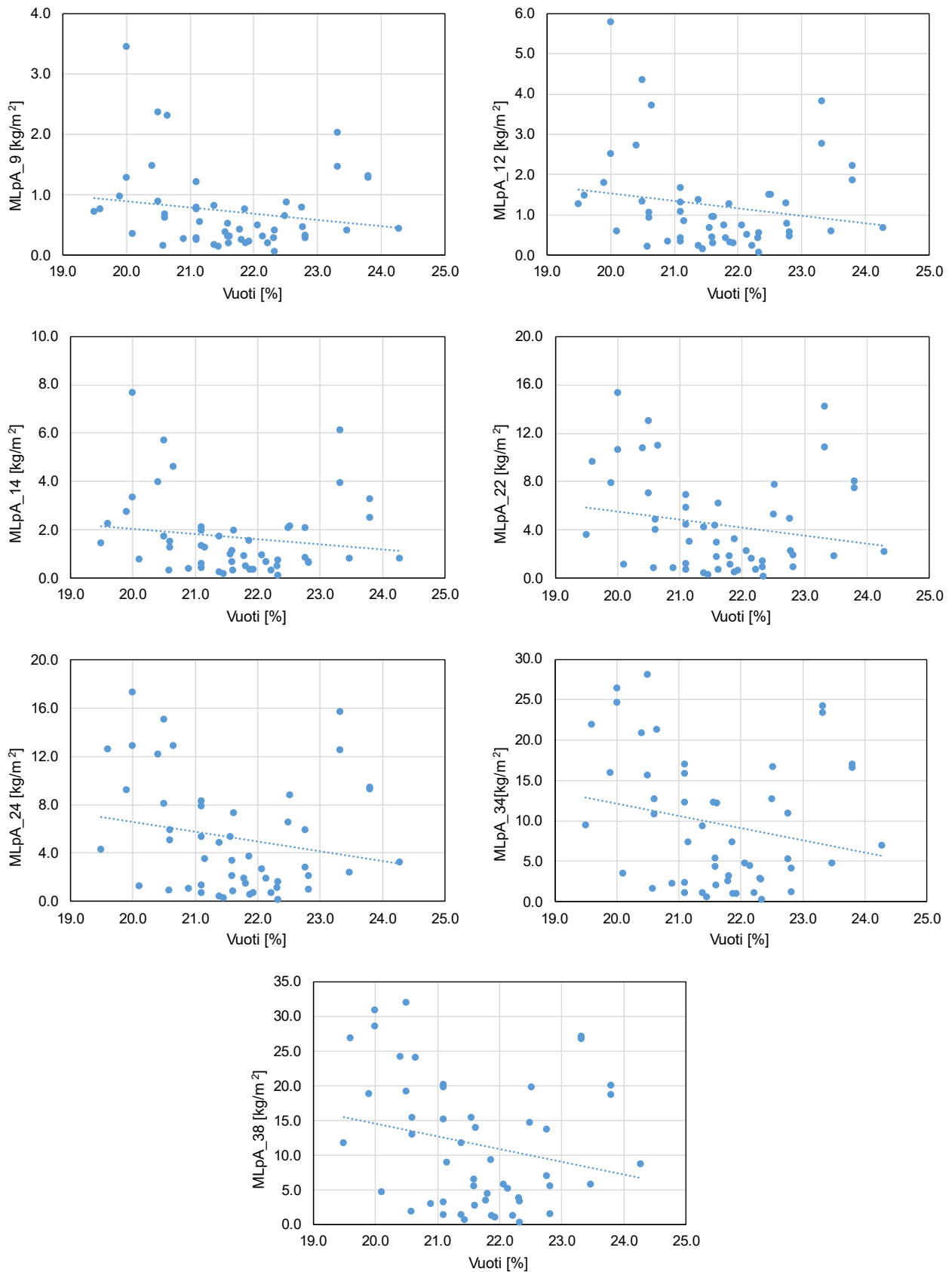


Figura 6.23. Correlazioni MLpA - Vuoti a varie ripetizioni

- Correlazione MLpA vs Vuoti (miscela A\_Arezzo)

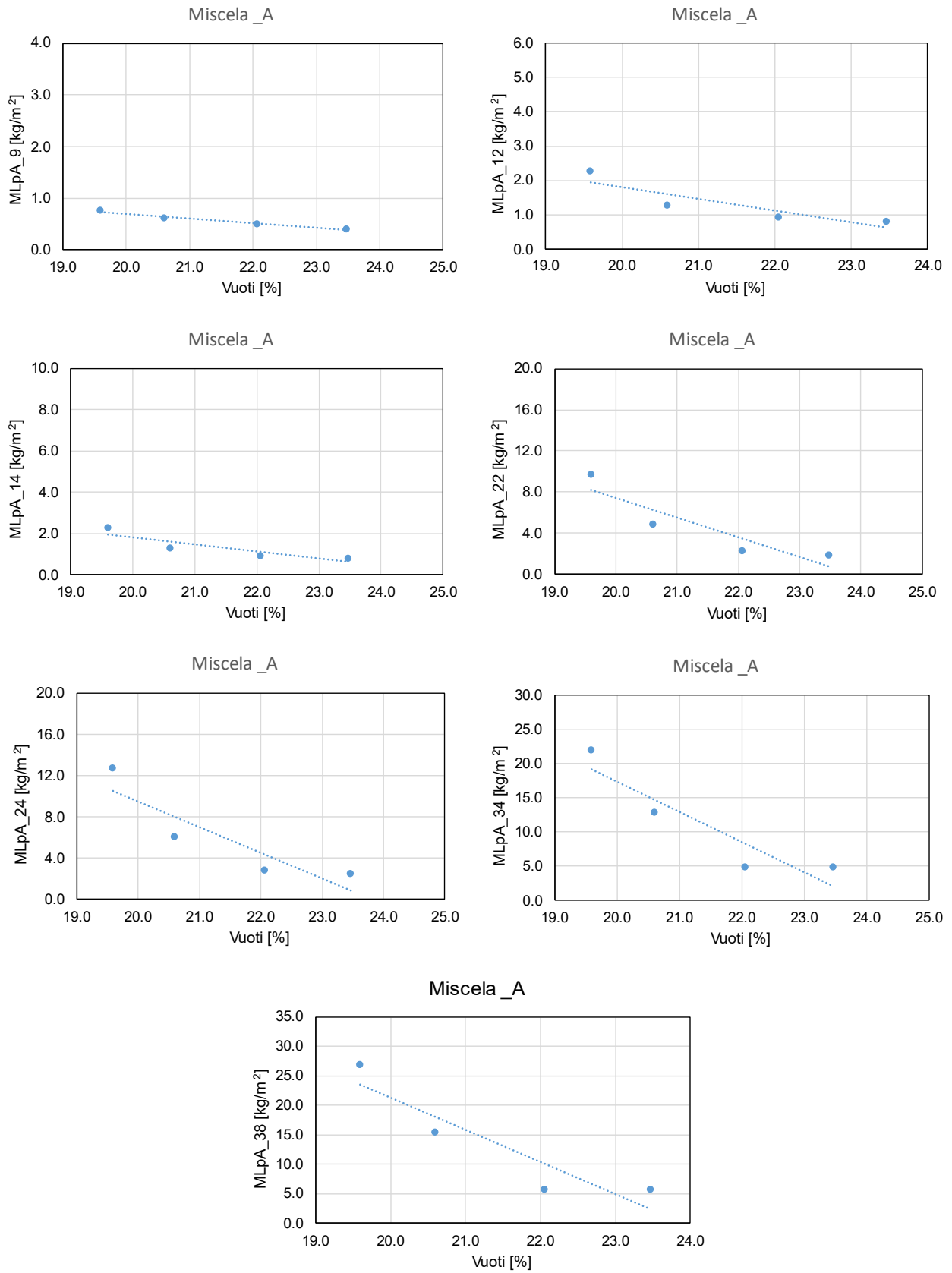


Figura 6.24. Correlazioni MLpA - Vuoti a varie ripetizioni

- Correlazione MLpA vs Vuoti (miscela B\_Magliano Sabina)

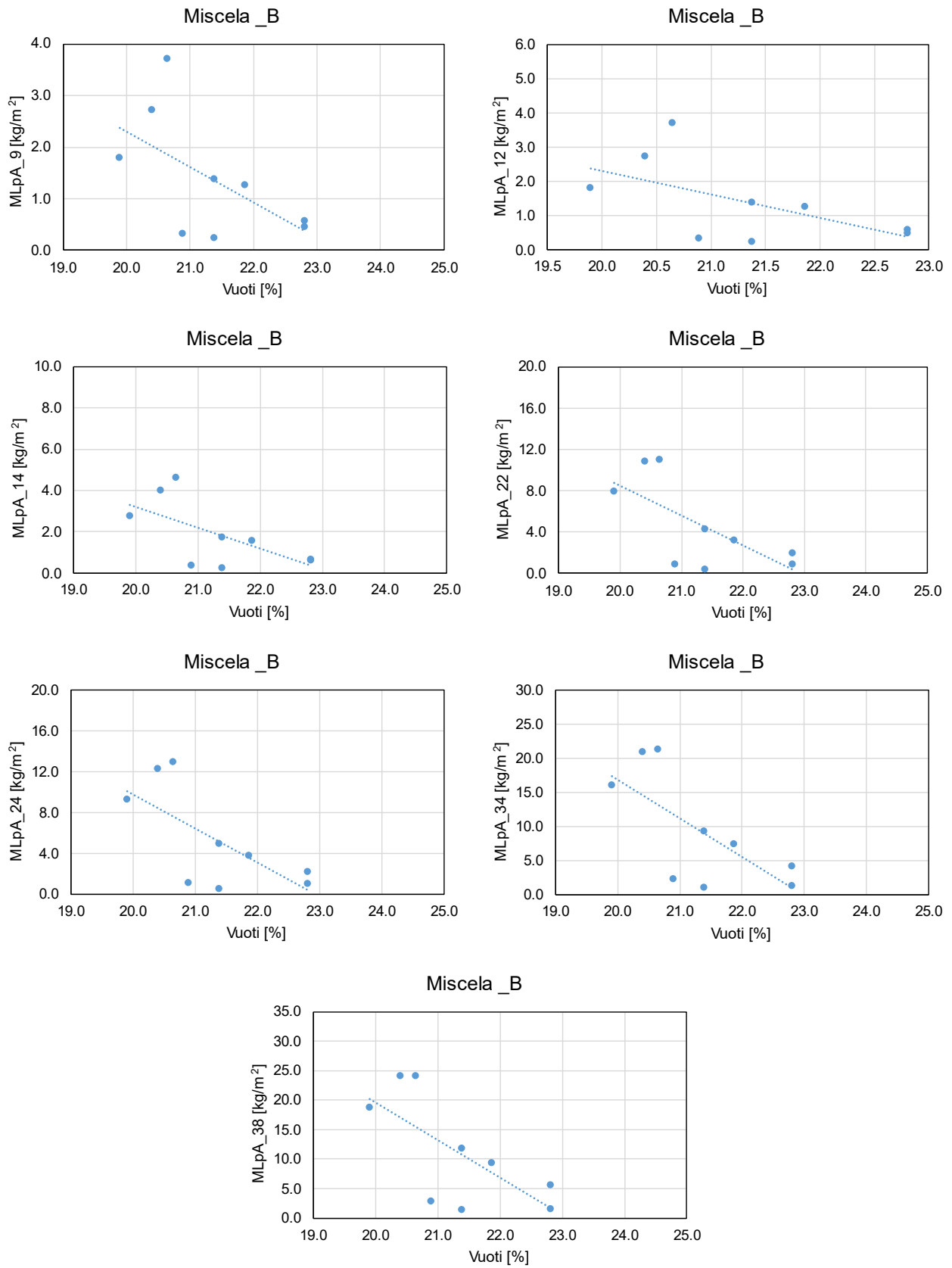


Figura 6.25. Correlazioni MLpA - Vuoti a varie ripetizioni

- Correlazione MLpA vs Vuoti (miscela C\_Andria)

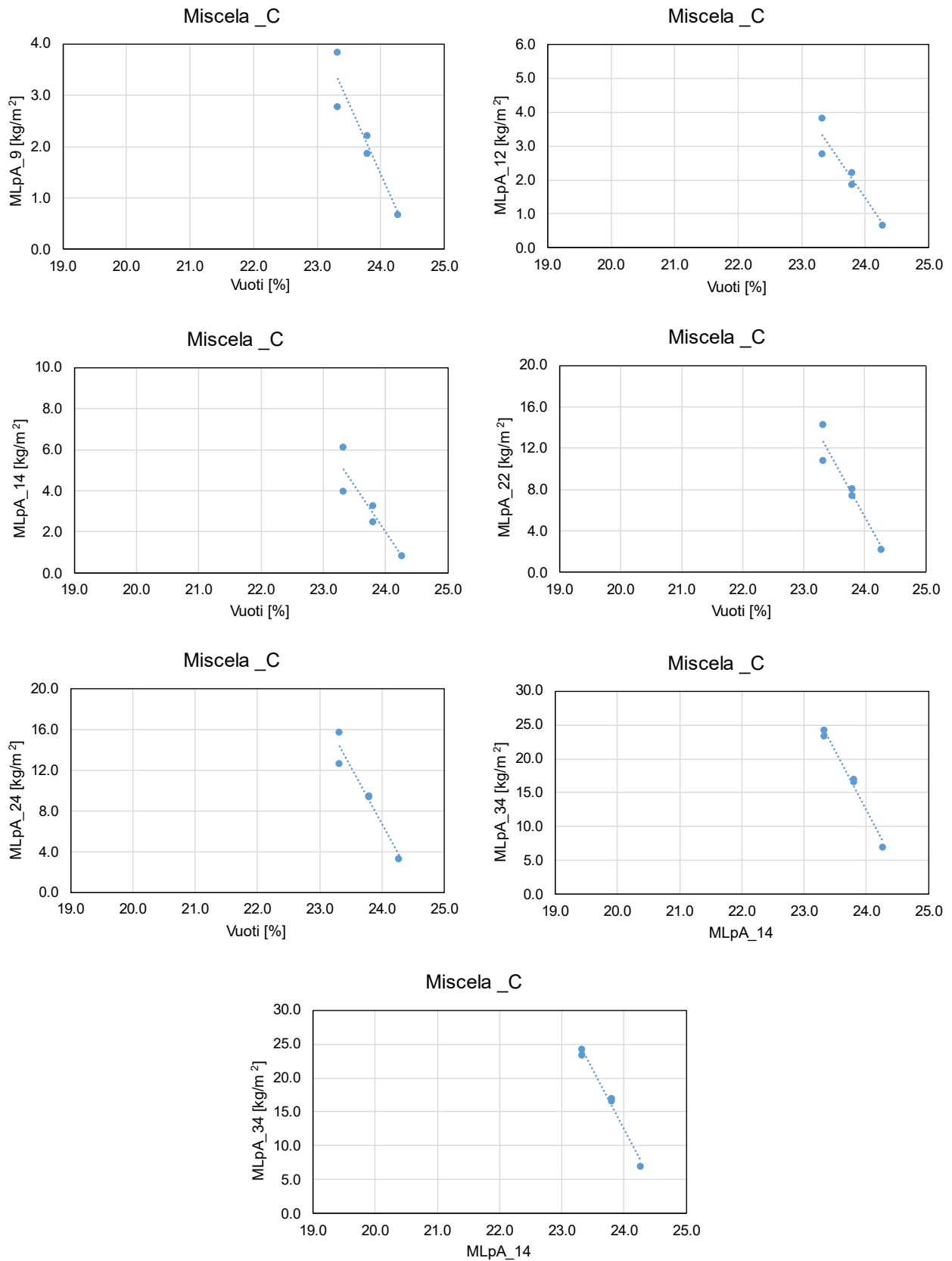


Figura 6.26. Correlazioni MLpA - Vuoti a varie ripetizioni



- Correlazione MLpA vs Vuoti (miscela D\_Marcianise)

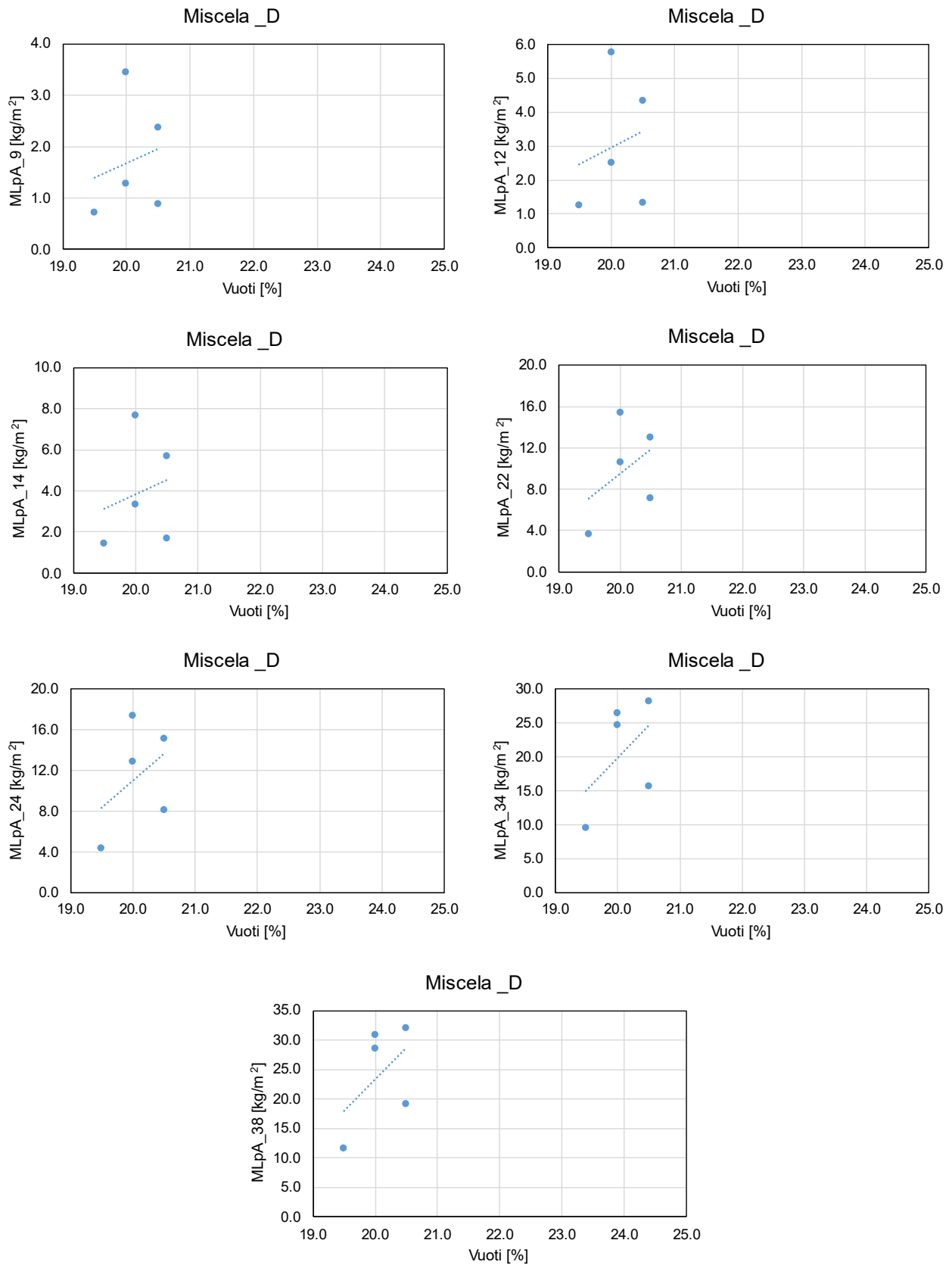


Figura 6.27. Correlazioni MLpA - Vuoti a varie ripetizioni

- Correlazione MLpA vs Vuoti (miscela E\_Loreto)

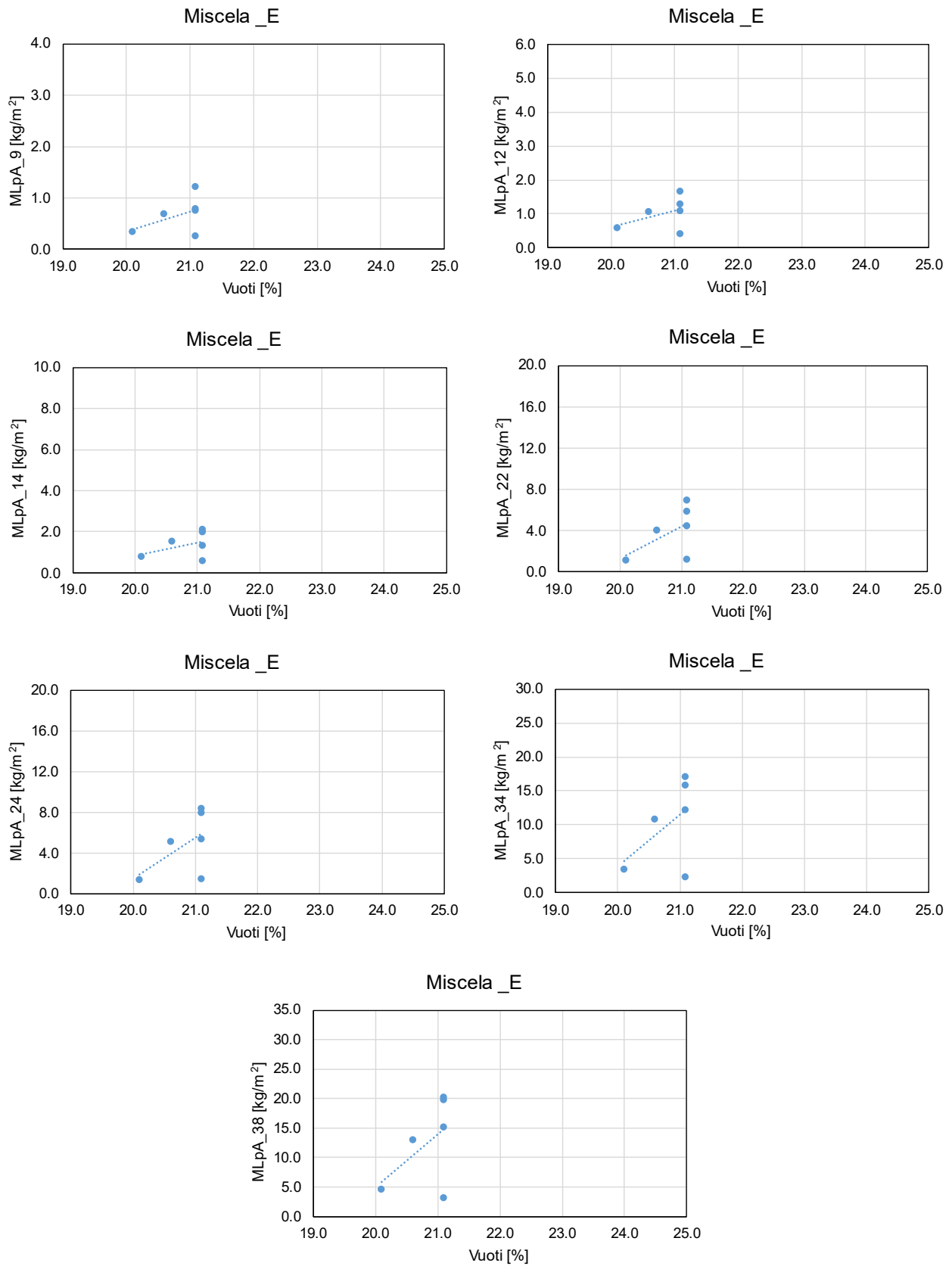


Figura 6.28. Correlazioni MLpA - Vuoti a varie ripetizioni

- Correlazione MLpA vs Vuoti (miscela F\_Magiano RA)

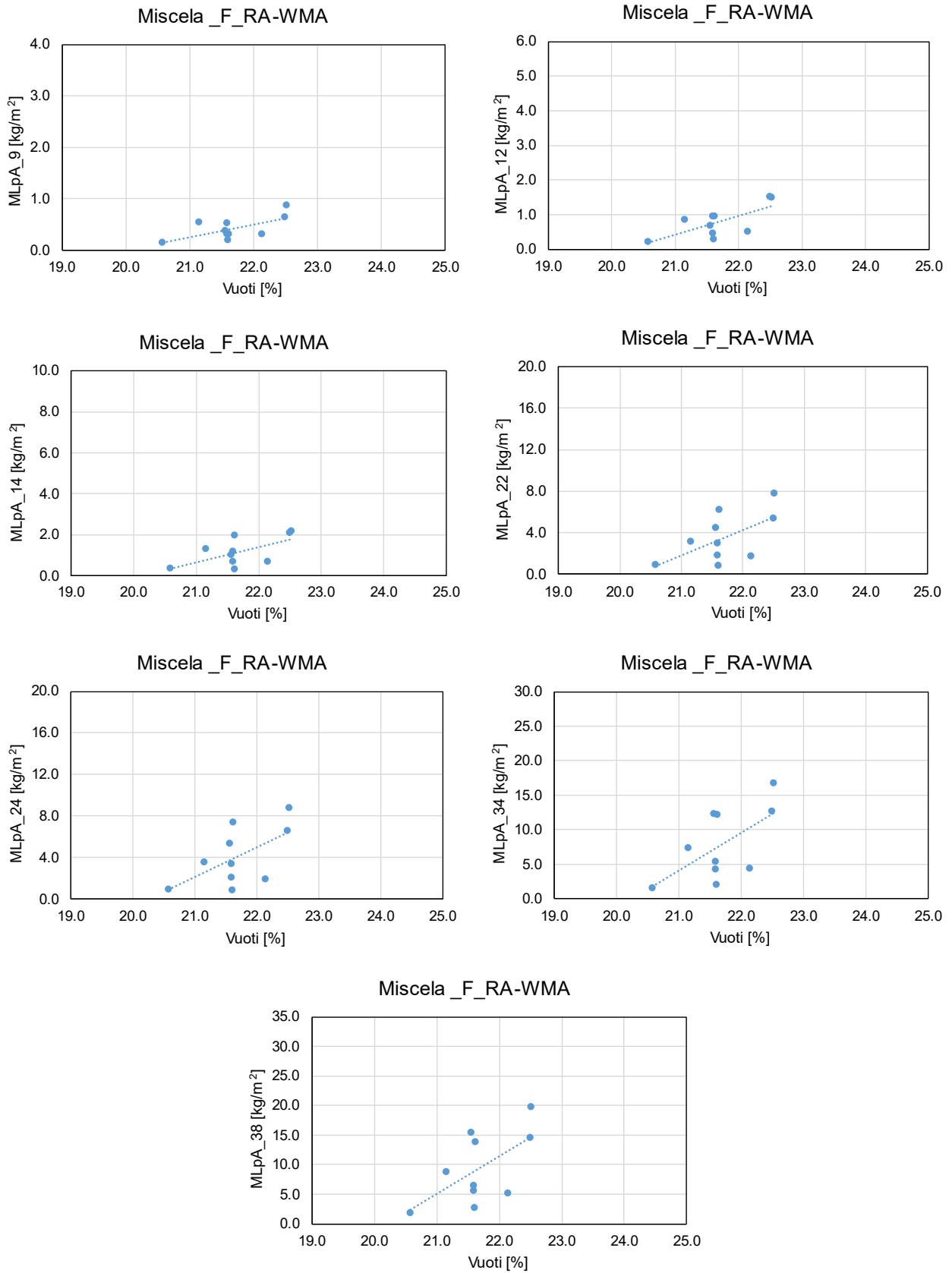


Figura 6.29. Correlazioni MLpA - Vuoti a varie ripetizioni

- Correlazione MLpA vs Vuoti (miscela G\_Marcianise RA)

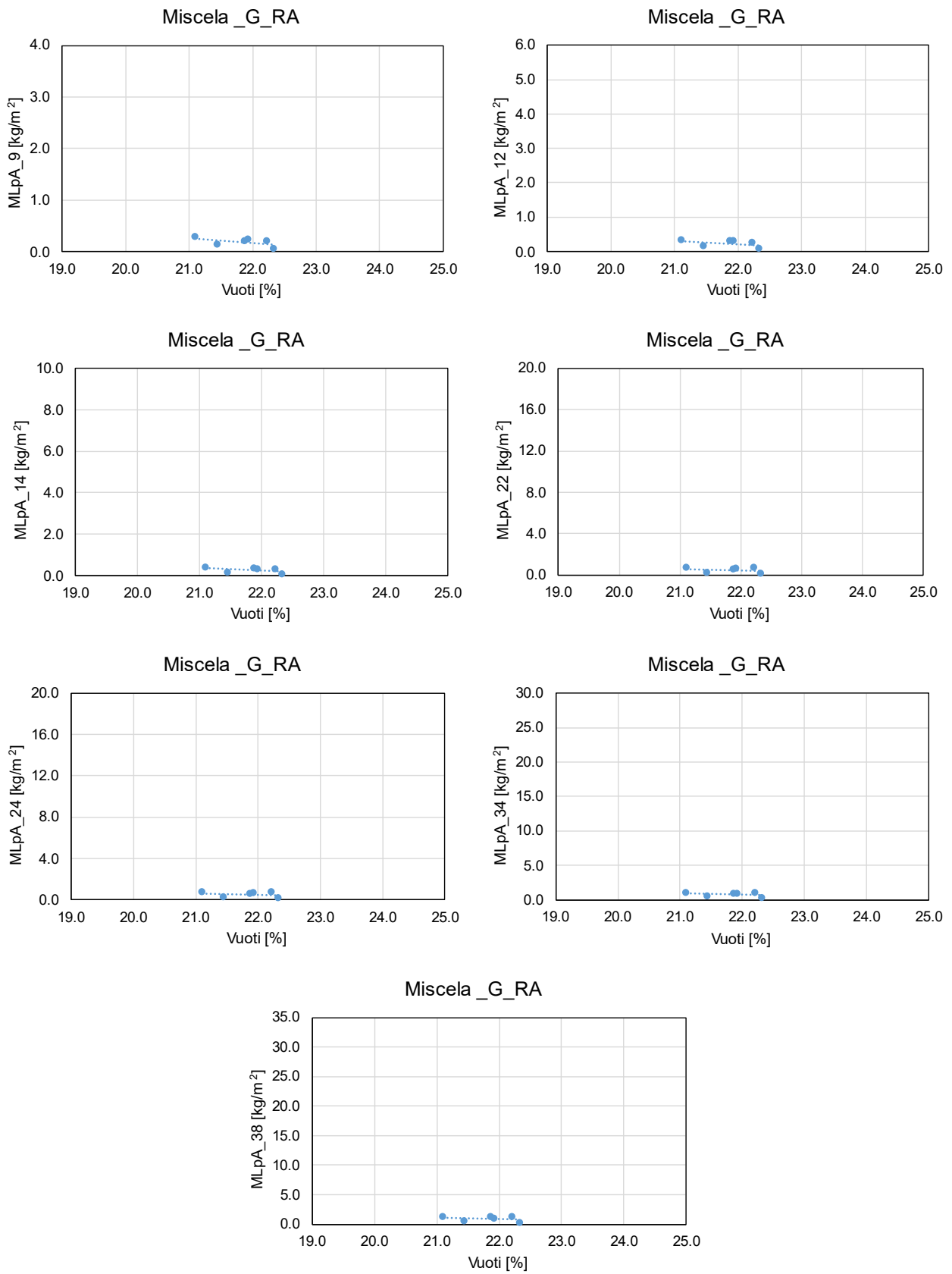


Figura 6.30. Correlazioni MLpA - Vuoti a varie ripetizioni

- Correlazione MLpA vs Vuoti (miscela H\_Rimini)

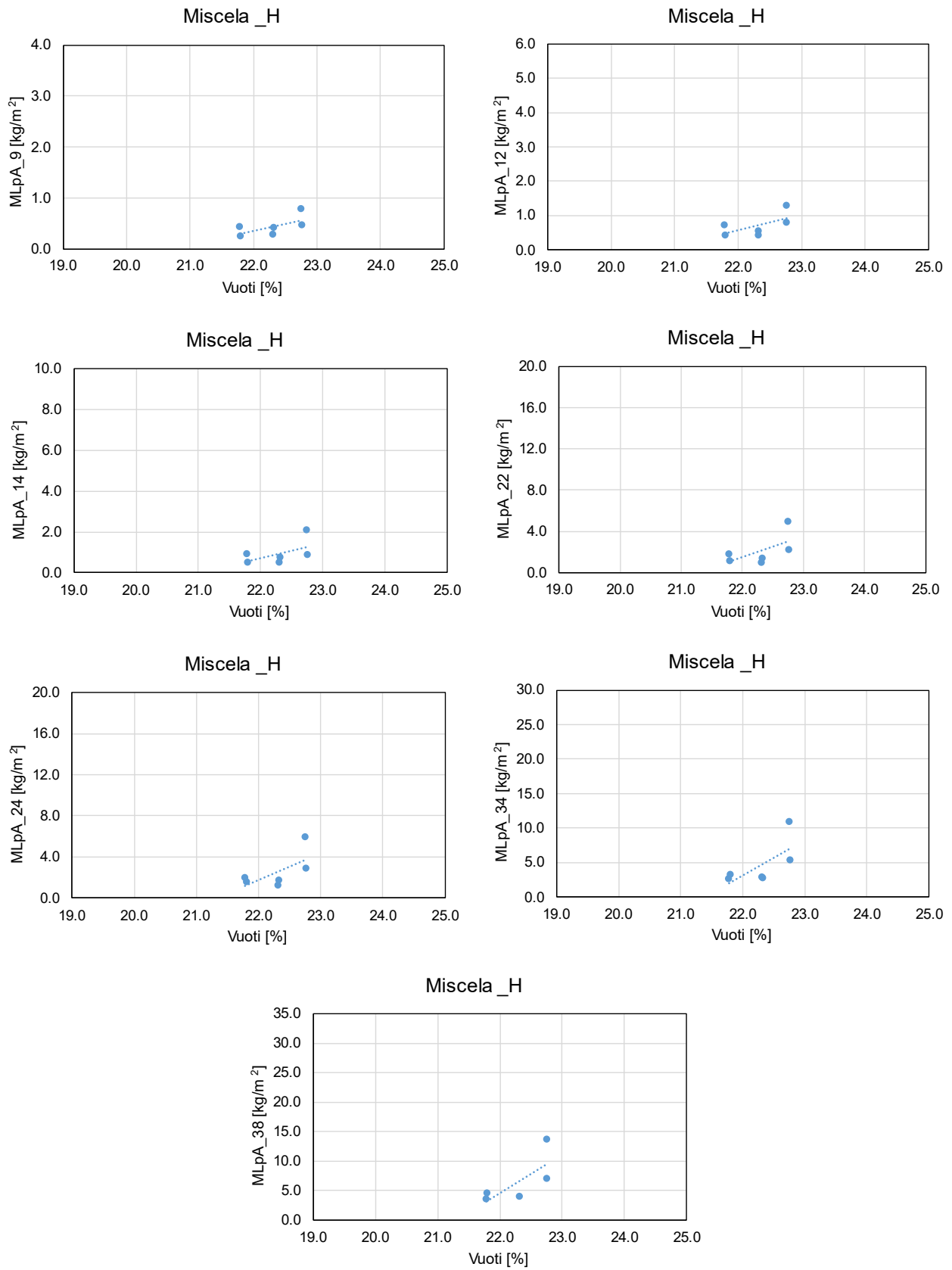
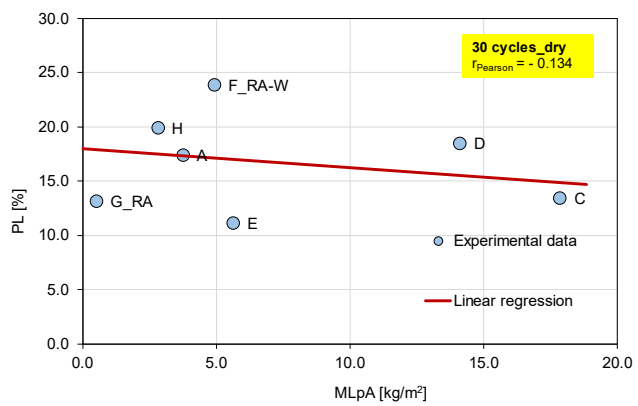
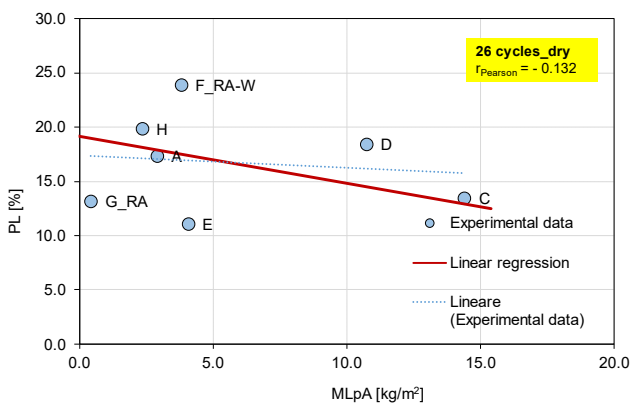
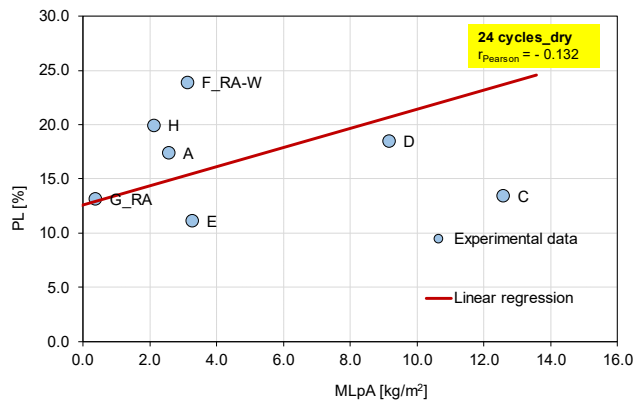
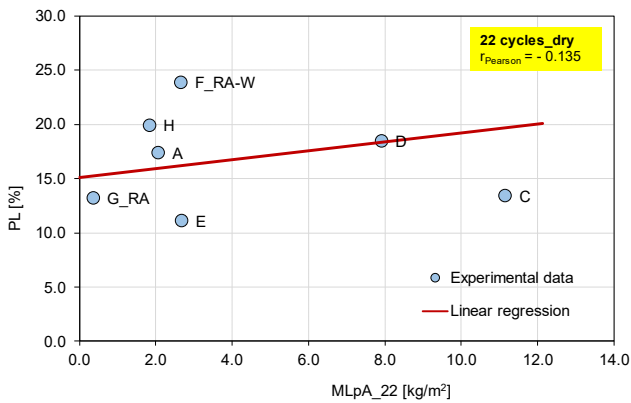
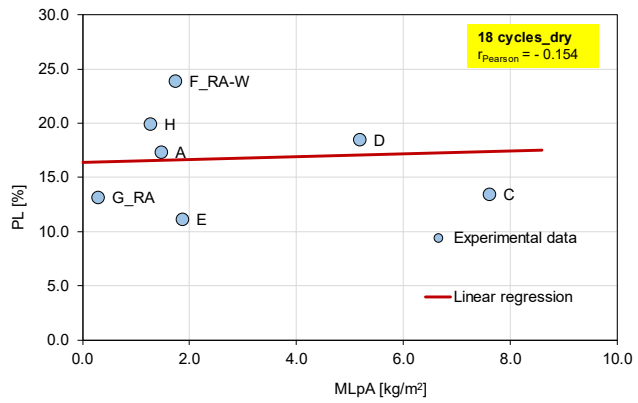
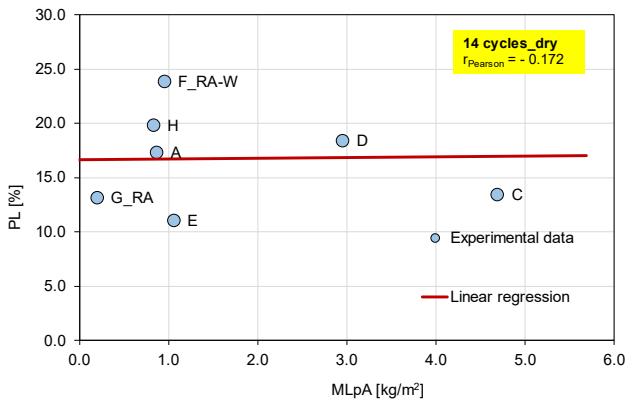
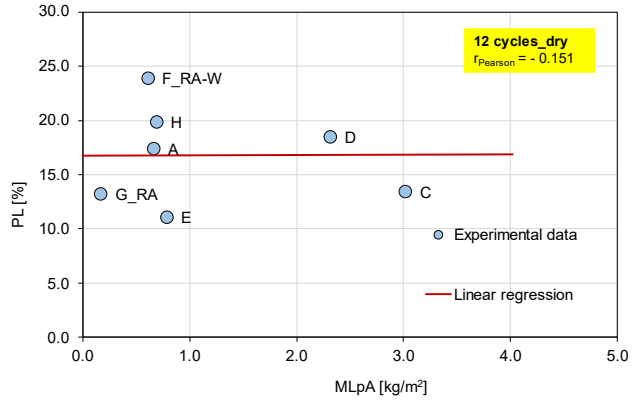
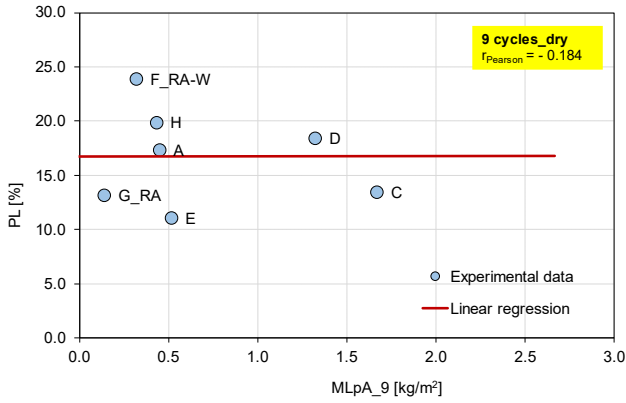


Figura 6.31. Correlazioni MLpA - Vuoti a varie ripetizioni

# Appendice D

## • Correllazione PL – MlpA (DRY)



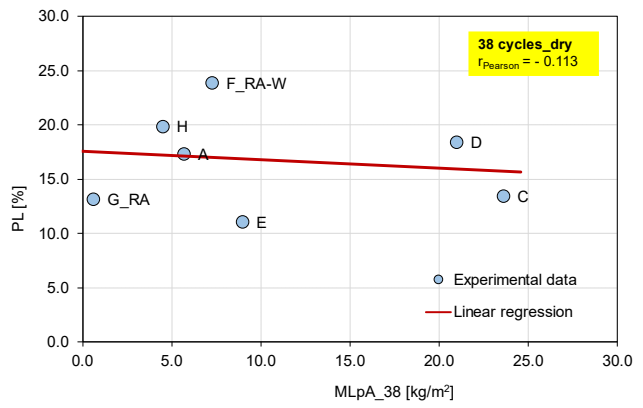
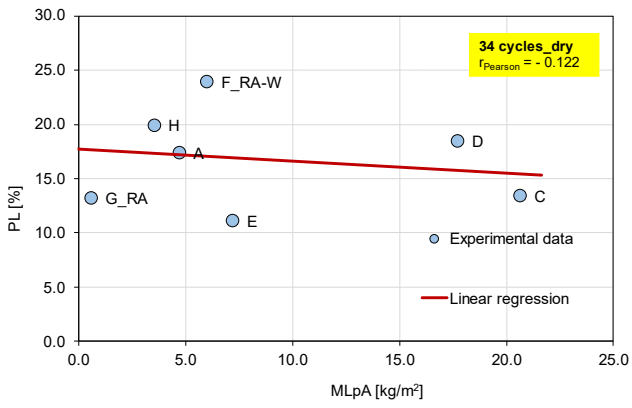
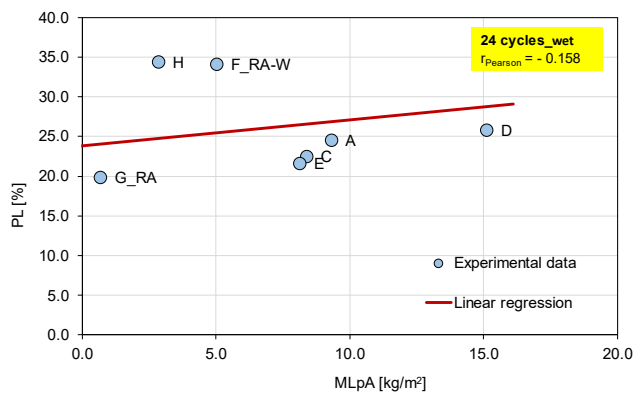
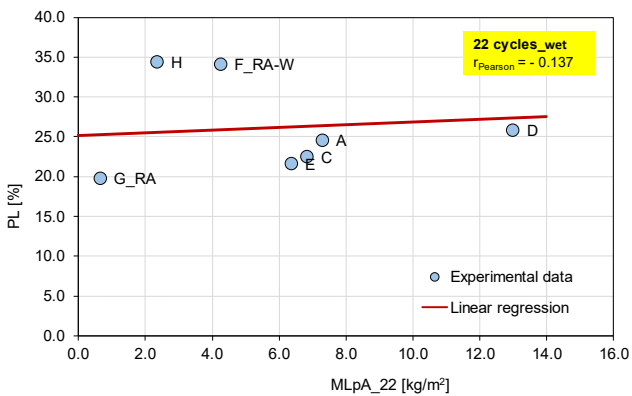
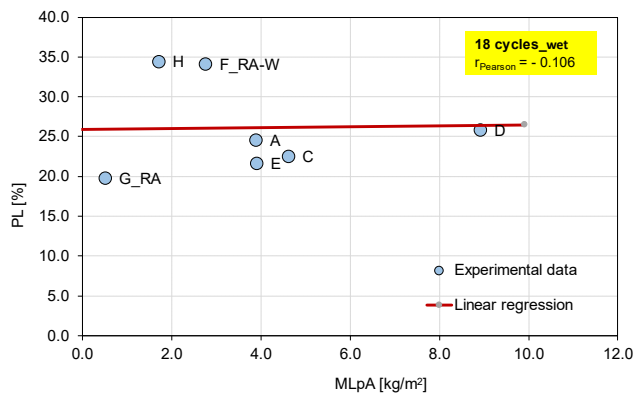
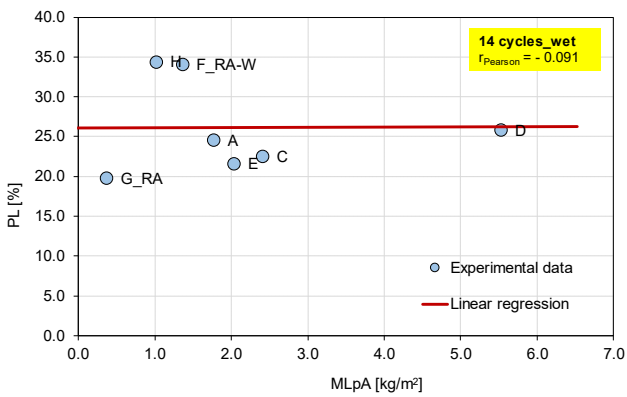
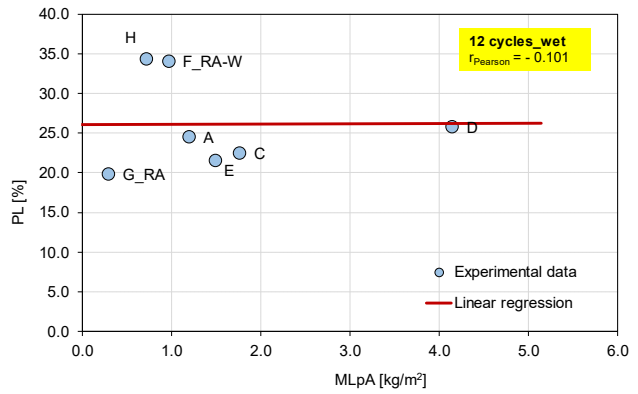
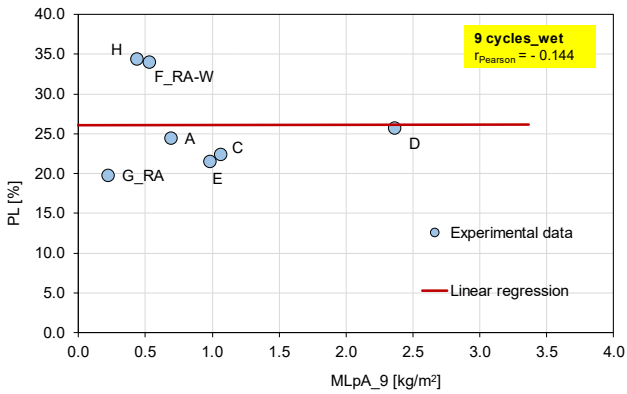


Figura 6.32. Correlazione PL - MLpA (DRY)

● Correllazione PL – MlpA (WET)



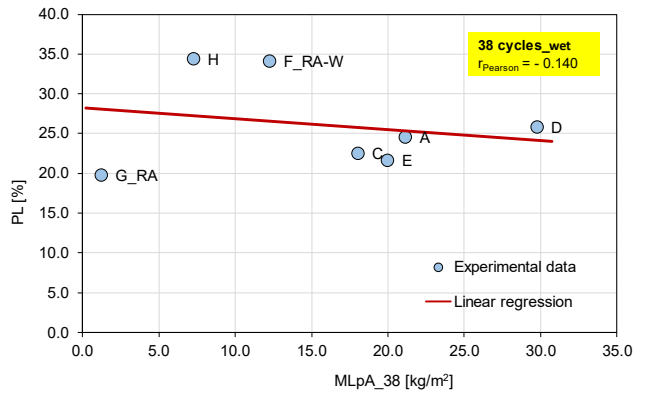
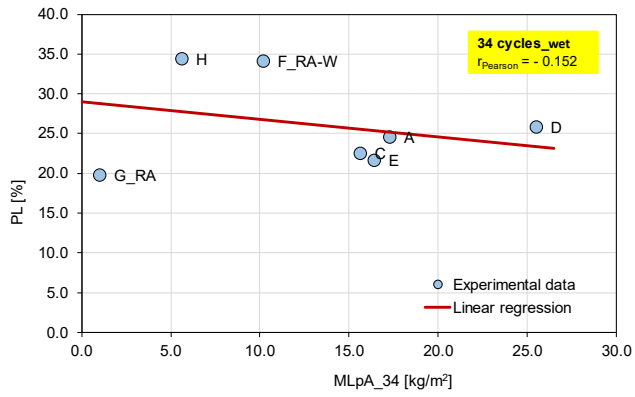
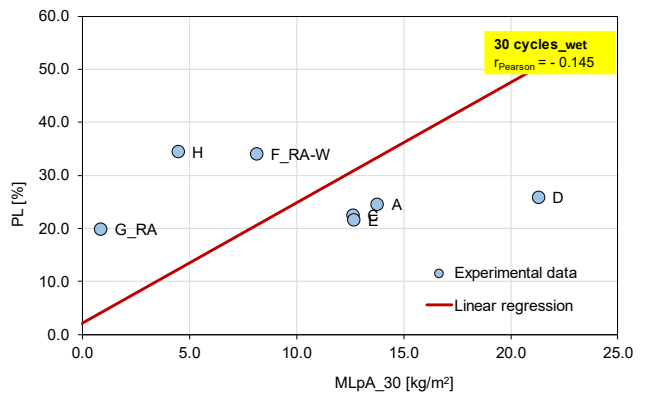
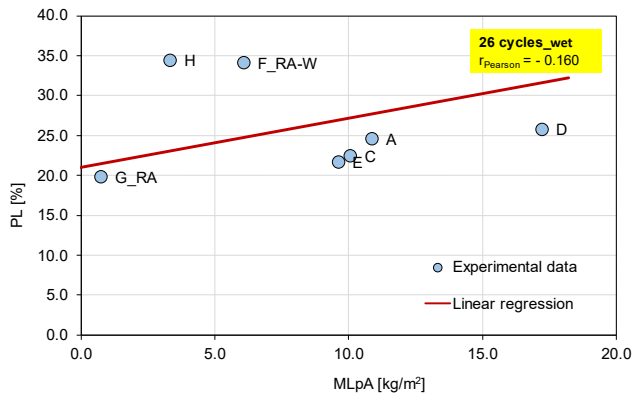


Figura 6.33. Correlazione PL - MLpA (WET)



## Bibliografia

- ABOUELSAAD A. e WHITE G. (2021) Review of Asphalt Mixture Ravelling Mechanisms, Causes and Testing. *International Journal of Pavement Research and Technology* 15:1448–1462
- ANAS (Febbraio 2019) QUADERNO TECNICO nr.17. *I QUADERNI TECNICI per la salvaguardia delle infrastrutture*, Volume V.
- BELTZUNG F., CHRISTIANE R., MANFRED N. P. (2023) Evaluating raveling susceptibility of asphalt by Pull-off tests, *Construction and Building Materials* 364, 129939
- BEN C. COX, BRADEN T. S., ISAAC L. H. et al. (2017) State of Knowledge for Cantabro Testing of Dense Graded Asphalt, *Journal of Materials in Civil Engineering ASCE*, ISSN 0899-1561
- CANESTRARI F. e INGRASSIA L.P. (2020) A review of top-down cracking in asphalt pavements: Causes, models, experimental tools and future challenges, *Journal of traffic and transportation engineering*; 7 (5): 541-572
- CEDR Call 2014: Asset Management and Maintenance (DRaT, Development of the Ravelling Test), *Review of parameters influencing the propensity of asphalt to ravel*, 2015
- DE VISSCHER J. e VANELSTRAETE A. (2017) Ravelling by traffic: Performance testing and field validation, *International Journal of Pavement Research and Technology* 10: 54–61
- DOMENICHINI L., P. DI MASCIO, P. GIANNATTASIO et al. (1993) Modello di catalogo delle pavimentazioni stradali, *Fondazione Politecnica Per Il Mezzogiorno D'Italia*
- DONALD E. W. L., A. COOLEY JR., K. A. MOORE et al. (2004) Laboratory Performance Testing of Open-Graded Friction Course Mixtures, *Journal of the Transportation Research Board*; pp. 40–47
- DU SHAOWEN e LI SHANSHAN (2011) The Raveling Characteristic Of Porous Asphalt Mixture, *Third International Conference on Transportation Engineering*
- FRIGIO F., FERROTTI G., CANESTRARI F. et al. (2013) Improved durability of recycled porous asphalt, *Construction and Building Materials* 48 (2013) 755–763
- GUBLER R., PARTL M. N., CANESTRARI F. et al. (2005) Influence of water and temperature on mechanical properties of selected asphalt pavements, *Materials and Structures* 38 523-532

NICHOLLS JC, SCHOEN E., D. V. VLIET et al. (2021) Development of a Ravelling Test for Asphalt, *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference: Bituminous Mixtures and Pavements, Jun 2019*

ROOT V. (2008) Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Beurteilung des Widerstandes von Asphaltdeckschichten gegen Schubbeanspruchungenb and der Oberfläche, Dissertation, *Schriftenreihe des Instituts für Verkehrs, Technische Universität Darmstadt*

SANTAGATA F. et al., STRADE, VOL.2, 2016

SMIT A. e JORGE A. PROZZI, (2013) Quantification of the Reduction of Wet Weather Accidents Using Porous Friction Courses (PFC), *13th COTA International Conference of Transportation Professionals (CICTP)*

WU H., YU A J., SONG W. et al. (2020) A critical state-of-the-art review of durability and functionality of open-graded friction course mixtures, *Construction and Building Materials 237*

## Norme

UNI EN 12697-12: 2018. *Miscele bituminose - Metodi di prova - Parte 12: Determinazione della sensibilità all'acqua dei provini bituminosi.*

UNI EN 12697-17: 2017. *Miscele bituminose - Metodi di prova - Parte 17: Perdita di particelle del provino di asfalto poroso*

UNI EN 12697-30: 2012. *Miscele bituminose - Metodi di prova per conglomerati bituminosi a caldo - Parte 30: Preparazione del provino mediante compattatore ad impatto*

UNI EN 12697-33: 2022. *Miscele bituminose - Metodo di prova - Parte 33: Provino preparato con compattatore a rullo*

UNI CEN/TS 12697-50: 2022. *Miscele bituminose - Metodo di prova - Parte 50: Resistenza allo sgranamento (scuffing)*

UNI EN 932-6: 2001. *Metodi di prova per determinare le proprietà generali degli aggregati – Parte 6: Definizioni di ripetibilità e riproducibilità*

## Sitografia

[www.geass.com](http://www.geass.com)

[www.treccani.it](http://www.treccani.it)

[www.stanley.com](http://www.stanley.com)

[www.colaver.it](http://www.colaver.it)

[www.argo-lab.com](http://www.argo-lab.com)

[www.italchimici.it](http://www.italchimici.it)

[www.treeffeservice.it](http://www.treeffeservice.it)

[www.shopsicurezza.shop](http://www.shopsicurezza.shop)

[Company - infraTest](#)

[web.tiscali.it](http://web.tiscali.it)

[www.vaasphalt.org](http://www.vaasphalt.org)

[www.real-statistics.com](http://www.real-statistics.com)