

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale



Scuola Politecnica e delle Scienze di Base
Università degli Studi di Napoli Federico II

Tesi di laurea triennale in
Ingegneria per l'ambiente e il territorio

**L'utilizzo di materiali lapidei per la realizzazione del ballast ferroviario:
reperimento della risorsa, proprietà tecniche e requisiti richiesti**

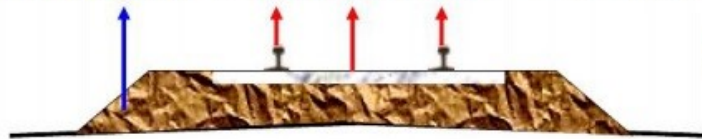
Relatore:
Prof. Paolo Budetta

Candidata:
Manuela Lisi
N49/140

Anno accademico 2016/2017

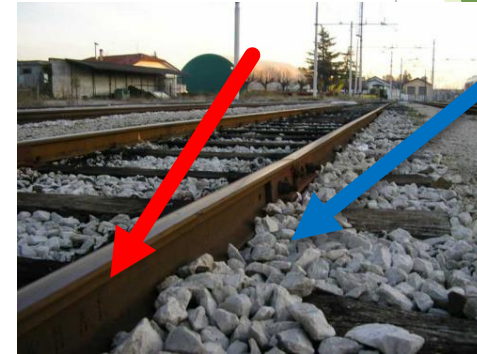
Il presente lavoro di tesi tratta delle **proprietà fisico-petrografiche** che i materiali naturali da costruzione devono possedere al fine di essere utilizzati come **ballast ferroviari** nonché le caratteristiche costruttive e tipologiche delle **massicciate**.

MASSICCIAIA + ARMAMENTO = SOVRASTRUTTURA FERROVIARIA



L'armamento (rotaie + traverse)

L'elemento caratteristico del sistema ferroviario è la **massicciata ferroviaria**, costituita essenzialmente dal "**ballast**". Il ballast costituisce lo strato di pietrisco sul quale poggiano le traversine e i binari.



Reti ferroviarie ad alta velocità



L'attuale sviluppo delle reti ferroviarie ad **alta velocità**, con convogli che raggiungono velocità anche superiori ai **300 Km/h**, richiede che il **pietrame** utilizzato abbia dei requisiti idonei e costanti. Infatti, i convogli ferroviari in transito esercitano elevate **sollecitazioni dinamiche** sull'**armamento**

E gli elementi lapidei delle **massicciate** debbano garantire il mantenimento di **proprietà fisico-meccaniche** che impediscano sviamenti e scuotimenti laterali eccessivi delle carrozze e cedimenti dei binari, fenomeni di ristagno delle acque meteoriche e formazione di polveri che possono andare ad occludere i pori della massicciata, riducendone la **permeabilità**.

Componenti della sagoma di una massicciata ferroviaria

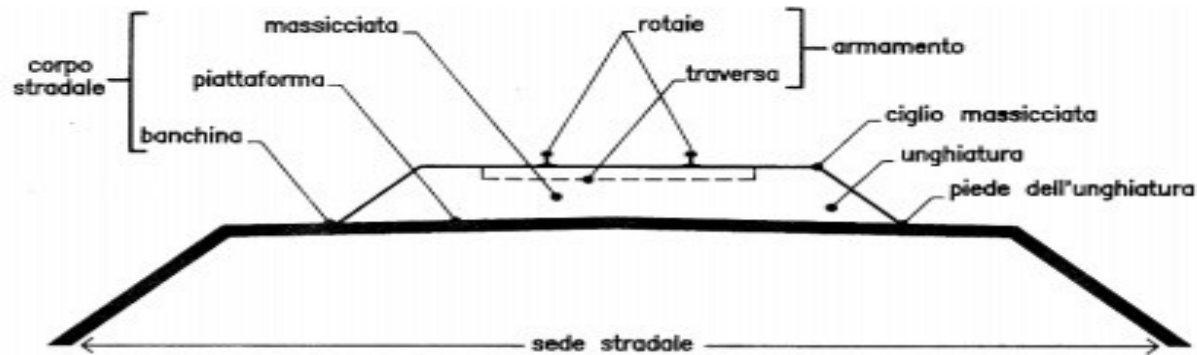
Strati di sub-ballast: costituiscono strati di fondazione

Piattaforma di posa: il terreno su cui poggia la sovrastruttura ferroviaria, al fine di sopportare i carichi trasmessi dalla massicciata e dai convogli.

Banchine: parti estreme della piattaforma di posa, destinate al transito pedonale di servizio.

Corpo stradale: il solido geometrico delimitato dalla piattaforma di posa, dalle scarpate dei rilevati o delle trincee (o da eventuali muri di sostegno), dalla superficie del terreno (sede stradale) e dalle sezioni trasversali terminali del tronco che si considera.

Scartamento: la distanza tra le due rotaie del binario misurata tra le facce interne delle rotaie.



La massicciata ha il compito di:

Distribuire i carichi verticali sul piano di regolamento del corpo ferroviario;

Garantire al binario le **condizioni geometriche di progetto**;

Gestire e assorbire gli **sforzi** dovuti alla circolazione dei treni e alle variazioni di temperatura;

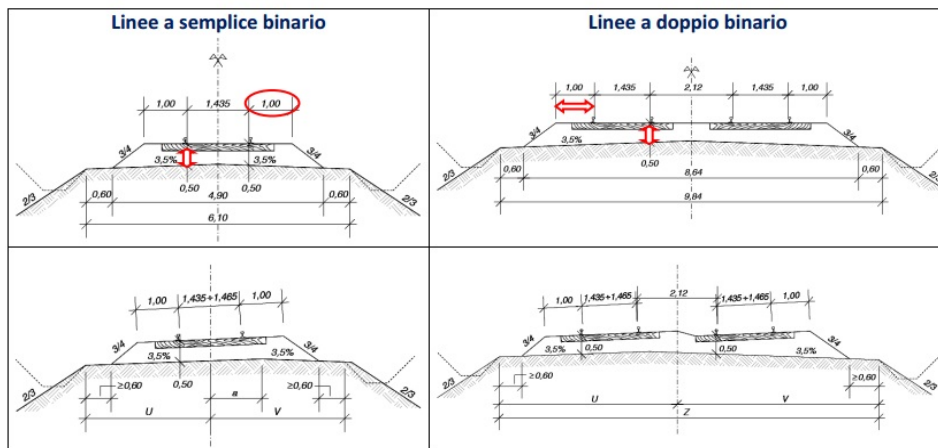
Garantire il **drenaggio delle acque meteoriche**;

Conferire al binario **elasticità**;

Realizzare un **filtro tra binario ed ambiente**, nei confronti dei fenomeni vibrazionali.

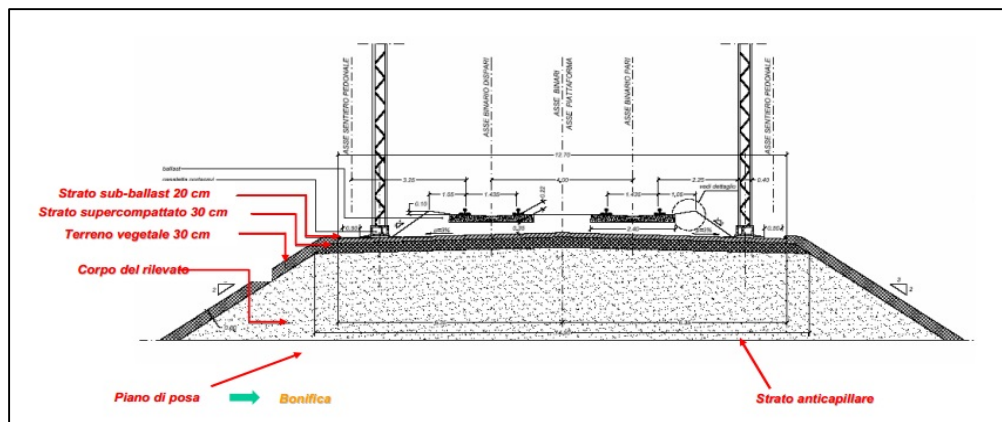
Piattaforma di posa e sottoballast

Dal punto di vista geometrico la **piattaforma** viene realizzata con due piani inclinati spioventi verso l'esterno per facilitare lo scolo delle acque. L'**inclinazione** delle falde è del **3,5%**.



Nelle linee percorse da convogli viaggianti ad **alta velocità** (> 200 km/h) la **larghezza** della piattaforma viene maggiorata per diminuire le notevoli **sovrapressioni** all'incrocio tra due convogli; anche le banchine laterali sono di larghezza maggiorata, a salvaguardia dell'incolumità del personale.

Le nuove linee **ad alta velocità** richiedono la realizzazione di uno strato intermedio tra la piattaforma di posa e la massicciata (**strato di sottoballast**) che aumentando la **rigidezza** dell'intera sovrastruttura, garantisce una **minore deformabilità** e in definitiva una maggiore durata.



Sezione di un **tronco di una linea ferroviaria**, costituito da:

ballast: spessore minimo = 35 cm;

sub-ballast: spessore 12 cm;

strato di rilevato "supercompattato": 25 cm

Principali caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali lapidei utilizzati per i ballast

Requisiti granulometrici

- Dimensione
- Curve granulometriche
- Contenuto di particelle fini

Requisiti geometrici

- Coefficiente di forma
- Coefficiente di appiattimento
- Lunghezza delle particelle

Requisiti meccanici

- Buona resistenza a compressione
- Buona resistenza alla frammentazione Los Angeles
- Durabilità

La **durabilità** si determina attraverso:

- Resistenza al gelo e disgelo
- Coefficiente di assorbimento d'acqua
- Massa volumetrica delle particelle



Le normative di riferimento

UNI EN 13450

- Questa norma dà indicazioni sulla valutazione di conformità e per l'apposizione della marcatura CE.

UNI EN 1097-1

- Descrive le procedure per determinare **la resistenza all'usura** degli aggregati grossolani e del ballast ferroviario.
- Attraverso questa prova si determina il **coefficiente Micro-Deval**.

UNI EN 1097-2

- Si occupa dei metodi per la determinazione della **resistenza alla frammentazione**
- **Prova Los Angeles**
- **Prova d'urto**

UNI EN 1367-3

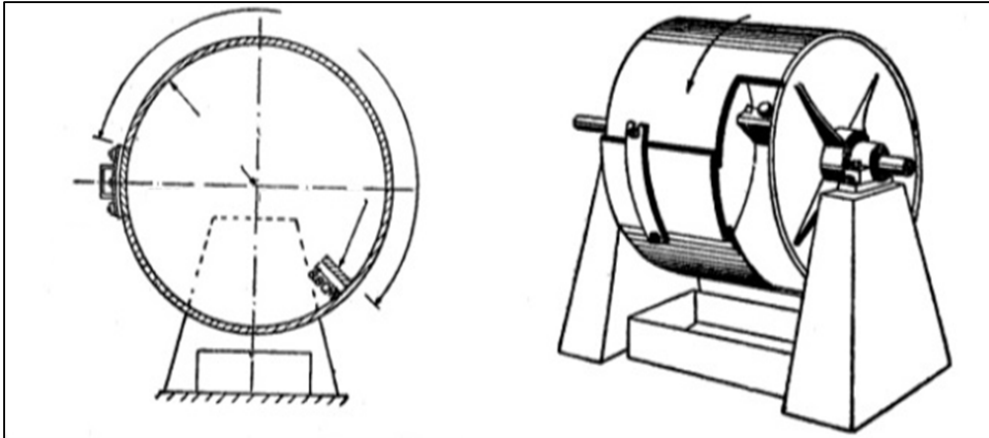
- Specifica come si determina la presenza di **Sonnenbrand** nel basalto e come l'aggregato si disintegra.
- Il **Sonnenbrand** è l'alterazione di una roccia dovuta alla formazione di punti grigio-biancastri a forma di stella che porta ad una **riduzione della resistenza della struttura minerale**.

UNI EN 1367-6

- Tratta i metodi per determinare **la massa volumetrica** e **l'assorbimento dell'acqua** di aggregati normali e leggeri
- **Metodo con picnometro**
- **Metodo con cestello a rete**

Prova Los Angeles

La Macchina di prova Los Angeles è costituita da **un cilindro cavo in lamiera d'acciaio**, chiuso da entrambi i lati. **La base** poggia su un pavimento piano di calcestruzzo o di pietra, il cilindro poggia su due assi fissati all'estremità, scorrevoli orizzontali, e ruota intorno ad un **asse orizzontale**. Lungo l'intera lunghezza del cilindro c'è un'**apertura** che consente l'inserimento e la rimozione del campione.



Si preparano **due frazioni granulometriche** separate (10 mm e 11,2 mm e 11,2 mm e 14 mm), si lava e si essicca ogni frazione, vengono fatte raffreddare a temperatura ambiente e poi miscelate. Il campione viene preparato secondo le dimensioni dettate dalla **EN 932-2**.

Si procede introducendo nella macchina prima le sfere e poi il campione di prova. Si aziona la macchina (500 giri a velocità costante). A fine rotazione si calcola la quantità di materiale trattenuto su un setaccio di **1,6 mm**. Esso si essicca a temperatura di 110 ± 5 °C fino a massa costante.

La **resistenza alla frammentazione** sarà data da:

$$LA = \frac{5000 - m}{50}$$

dove: **m** è la massa trattenuta sul setaccio da 1,6 mm, espressa in grammi.

Metodo di prova d'urto

La determinazione della **resistenza alla frammentazione**, mediante il **Metodo di prova d'urto**, consiste nel mettere il provino in un cilindro d'acciaio e sottoporlo a 10 colpi di un martello del peso di 50 kg. Si passa il materiale frantumato attraverso 5 setacci e se ne misura la granulometria.

Il valore d'urto è dato da:

$$SZ = \frac{M}{50}$$

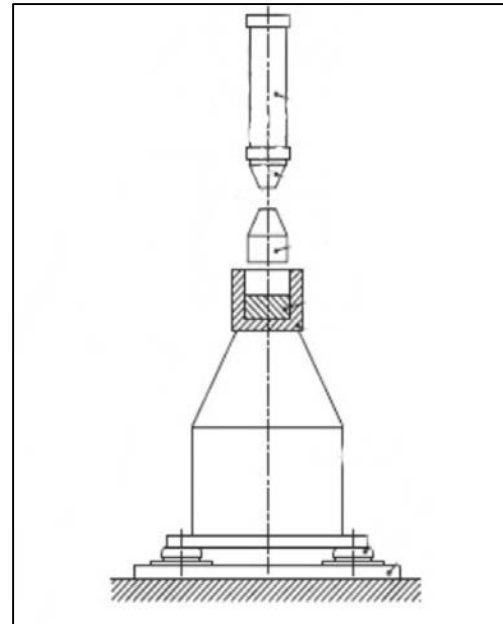
dove:

SZ è il valore d'urto espresso in percentuale;

M è la somma delle masse passanti attraverso i cinque setacci.

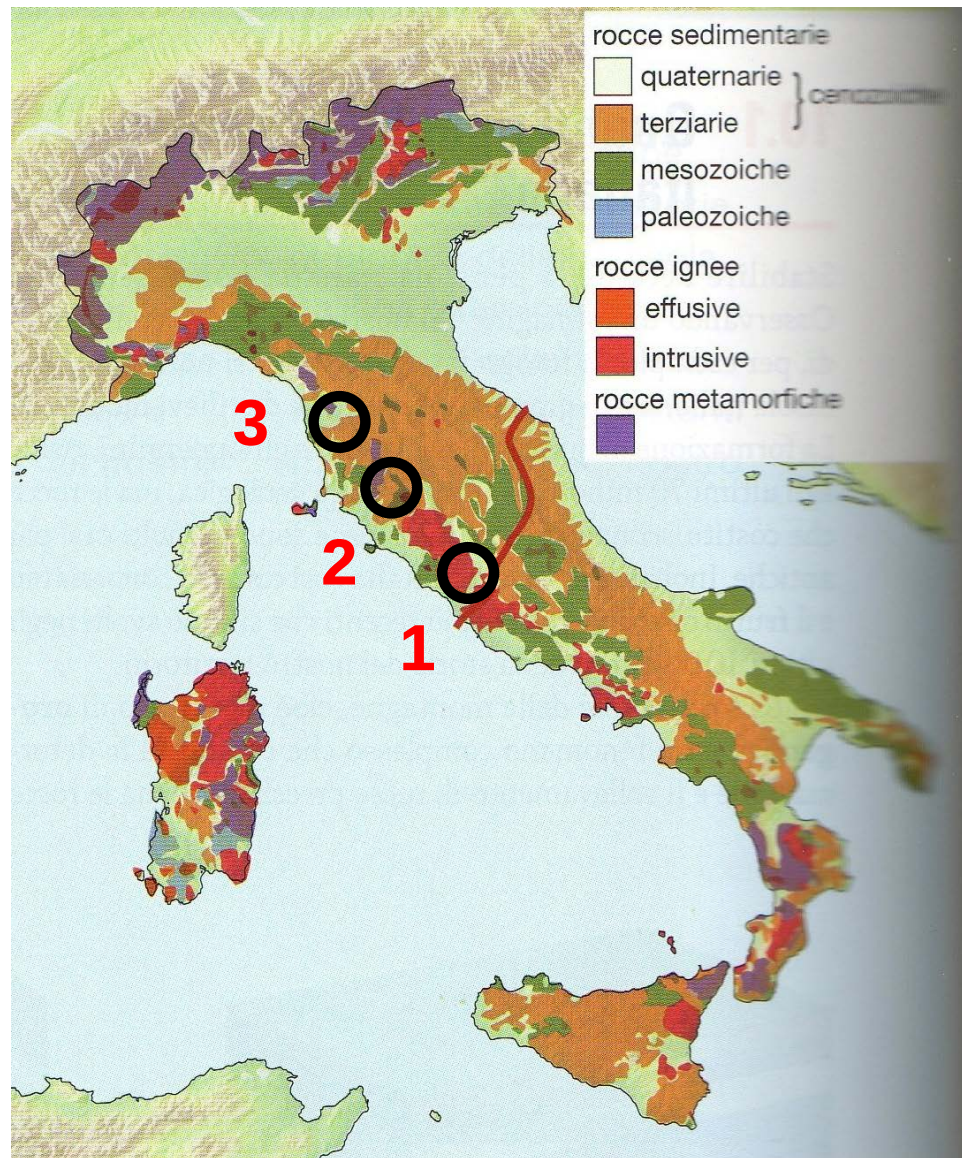
Il dispositivo per la misurazione degli urti è composto da quattro elementi strutturali:

- **Dispositivo di sollevamento;**
- **Portacampione;**
- **Incudine;**
- **Base ed ammortizzatori.**



Materiali studiati

Dati ricavati dalle Certificazioni fornite dalle Ditte interessate



1: Cave di Nepi (Tefriti)

2: Cava di Montalto di Castro (Basalto)

3: Cava di Venturina (Calcare)

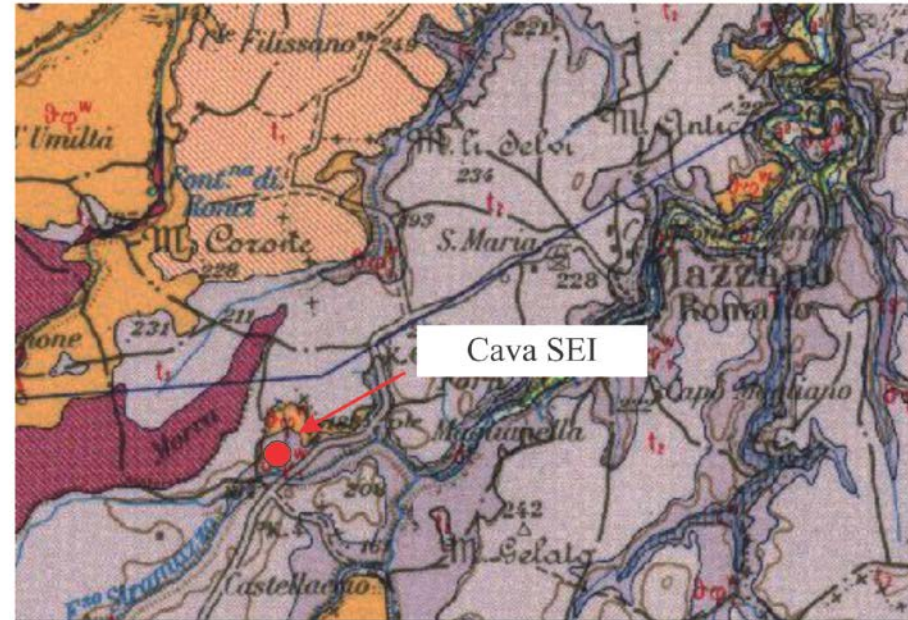
Cave di Nepi (Mazzano Romano)

Il materiale estratto è costituito da **tefriti leucitiche**. Si sono analizzati i dati di 3 campioni.



Foto aerea della cava

CARTA GEOLOGICA



Leucititi (tefrite) a struttura porfirica olocristallina, con plagioclasti, biotite e nefelina, compatta in banchi.

Estratto da Carta Geologica d'Italia scala 1/100.000, Foglio n. 143 «Bracciano»

Assetto litologico

Cave di Nepi (Mazzano Romano)

Granulometria del materiale frantumato

Campione 1

Massa del campione di prova (g)	40030,1
Apertura nominale stacci UNI (mm)	Passante progressivo (%)
100	100,0
90	100,0
80	100,0
63	100,0
50	89,3
40	46,8
31,5	9,5
22,4	0,5
20	0,4
16	0,2
14	0,2
12,5	0,2
11,2	0,1
10	0,1
8	0,1
6,3	0,1
5,6	0,1
4	0,1
2	0,1
1	0,1
0,5	0,1
0,25	0,0
0,125	0,0
0,063	0,0

Campione 2

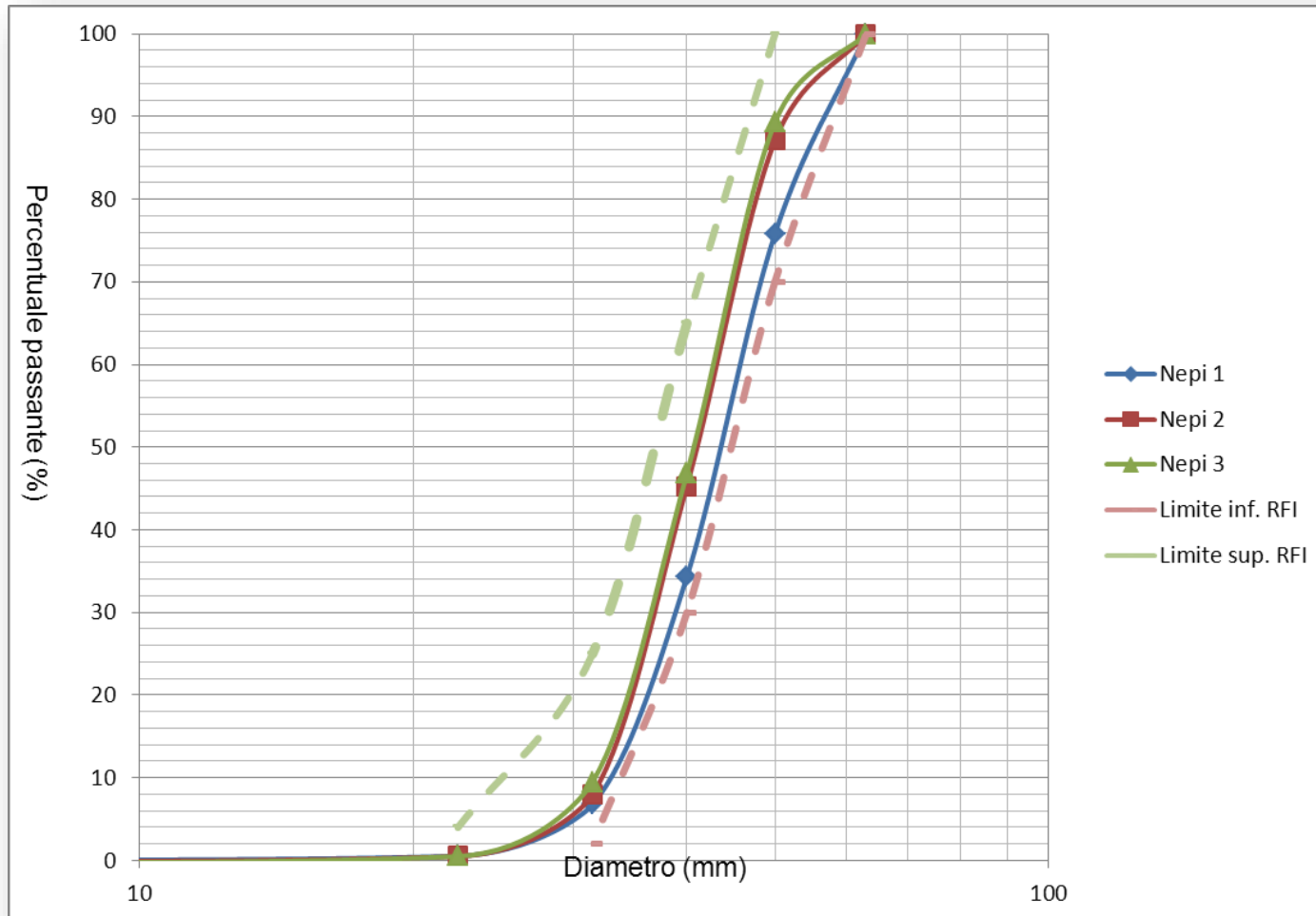
Diametro dei vagli	Massa del trattenuto (RI) g	Percentuale del trattenuto (RI/M1) x 100	Percentuali cumulative dei passanti 100- (RI/M1x100)
63		0,00	100,00
50	16575	24,18	75,82
40	28451	41,51	34,31
31,5	18890	27,56	6,75
22,4	4259	6,21	0,54
0,5	67	0,10	0,44
0,063	53	0,08	0,36

Campione 3

Diametro dei vagli	Massa del trattenuto (RI) g	Percentuale del trattenuto (RI/M1) x 100	Percentuali cumulative dei passanti 100- (RI/M1x100)
63		0,00	100,00
50	8562	12,91	87,09
40	27753	41,83	45,26
31,5	24762	37,32	7,94
22,4	4938	7,44	0,50
0,5	109	0,16	0,33
0,063	75	0,11	0,2

Curve granulometriche e limiti di tolleranza RFI

I campioni analizzati rientrano nei requisiti granulometrici richiesti dalle Norme delle Ferrovie italiane.



Il pietrisco deve possedere:

- una granulometria compresa tra i 50 e i 31,5 mm;
- una ridotta percentuale di particelle fini;
- una forma spigolosa (frammenti a spigoli vivi).

Cave di Nepi (Campagnano di Roma)

Di questa cava si hanno a disposizione i dati relativi a **tefriti leucitiche**.



Foto aerea della cava

Cave di Nepi (Campagnano di Roma)

Valori ottenuti

Prova eseguita	Normativa di riferimento	Requisiti di accettazione	Valori ottenuti	Unità di misura
Esame petrografico sezione sottile	-	Analisi	mineralogico-allegata*	petrografica
Coefficiente Los Angeles	UNI EN 1097-2 dal 11/1999	15-20-25	15	%
Sensibilità al gelo (G)	UNI EN 1367-1 del 07/2001	≤ 20	13	%
Indice ΔLA(LAg-LA)	UNI EN 1367-1 del 07/2002	≤ 4	0	%
Massa volumica apparente	UNI EN 1097-6 del 02/2002	= =	2,68	g/cm ³
Assorbimento d'acqua	UNI EN 1097-6 del 02/2002	= =	1,2	%
Indice di forma	UNI EN 933-4 del 04/2001	≤ 20	10,1	%
Contenuto in aggregato fine (< 0,5 mm)	UNI EN 933-1 del 04/1999	≤ 0,6	0,21	%
Contenuto in particelle fini o polveri (<0,063 mm)	UNI EN 933-1 del 04/2000	≤ 0,5	0,13	%
% in peso di elementi lunghi (≥ 100 mm)	UNI EN 13450 del 11/2003	≤ 4	0,0	%
Resistenza a compressione	UNI EN 1926 / 2000	= =	= =	Mpa

In tabella sono elencate le prove a cui è sottoposto il materiale (con le relative Norme UNI).

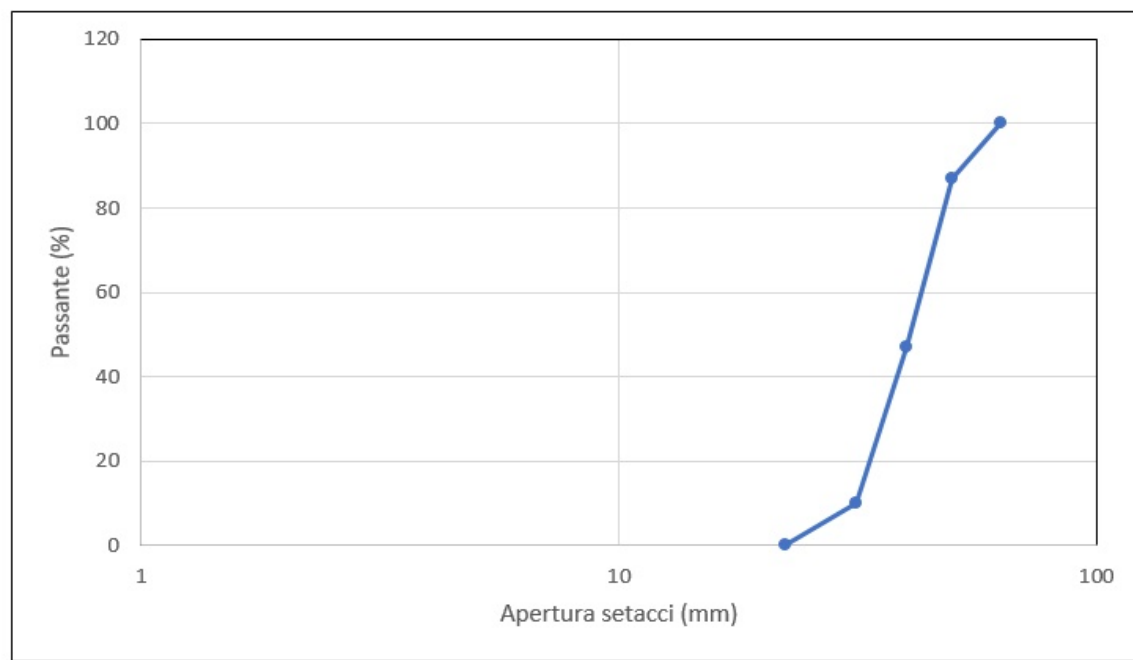
Sono riportati i valori ottenuti e messi a confronto con quelli di accettazione.

Da essi si evince che i parametri ottenuti sono sempre ricompresi nei limiti di tolleranza.

Cave di Nepi (Campagnano di Roma)

Dati granulometrici del pietrisco

Apertura stacci mm	63	50	40	31,5	22,4	< 22,4
Passante %	100	87	47	10	0	0



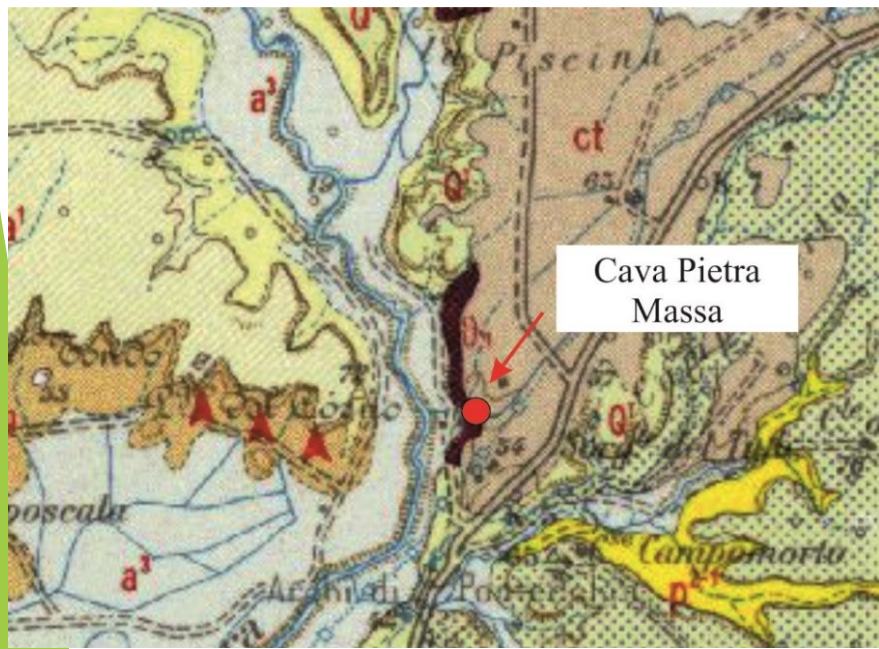
Cava di Montalto di Castro



Foto aerea della cava



Pietrisco basaltico



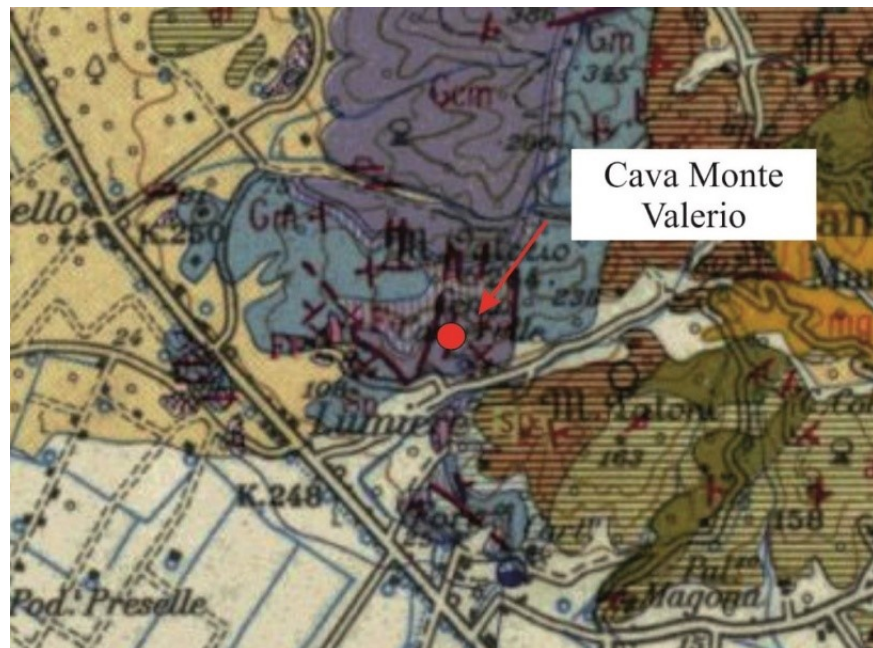
Assetto litologico

Il materiale estratto è **basalto** formato da plagioclasti e pirosseni con fenocristalli immersi in una pasta di fondo di plagioclasio e ortopirosseni.

Contenuto di solfati SO_3	0,0021%
Contenuto di carbonati (% CO_2)	28,6%
Contenuto di cloruri CL^-	0,0016%
Zolfo totale	0,0068%

Cava di Venturina (LI)

Si estrae pietrisco calcareo (calcare micritico, selcifero, di colore dal grigio chiaro al nocciola avana).



Assetto litologico

Foto aerea della cava

Pietrisco calcareo



Contenuto in solfati SO_3	0,017%
Contenuto in carbonati ($\%\text{CO}_2$)	41,09%
Contenuto in cloruri CL^-	0,0017%
Zolfo totale	0,012%

Cava di Venturina (LI)

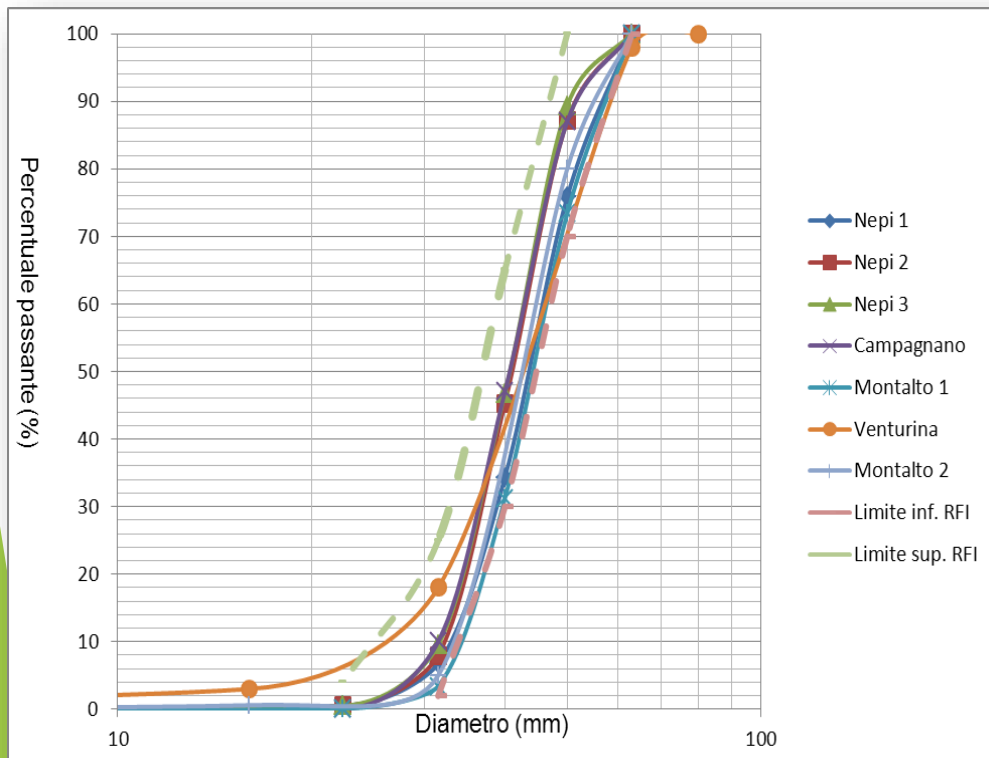
Valori ottenuti dalle analisi

Classificazione (ex CNR UNI 10006/63)	A1a
Contenuto in fini	< 1 % (passante al setaccio 0,063 mm)
Percentuale di superfici frantumate	100%
Massa volumica in mucchio	1,32 Mg/m ³
Massa volumica apparente dei granuli	2,77 Mg/m ³
Massa volumica dei granuli pre-essicati	2,69 Mg/m ³
Assorbimento	0,49%
Resistenza alla frammentazione (prova Los Angeles)	21,9%
Resistenza allo shock termico	1,8 %
Resistenza all'usura Micro Deval (M _{DE})	22%
Resistenza alla levigabilità dell'aggregato grosso (VL)	38
Contenuto in sostanze organiche	Non presenti

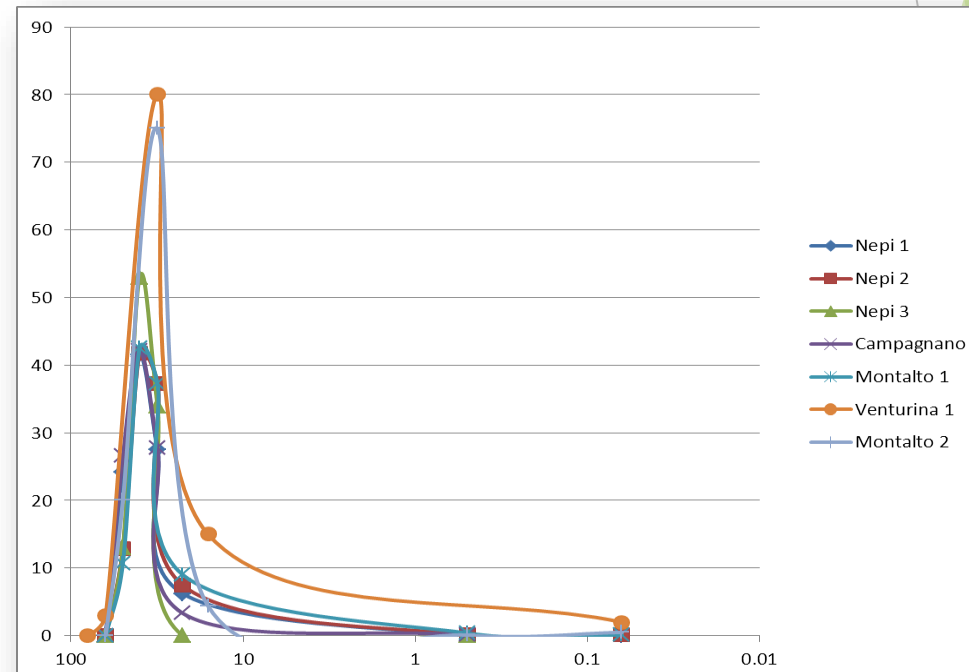
Elaborazione dei dati raccolti

Tutti i dati raccolti sono stati opportunamente elaborati e i risultati messi a confronto per poter dedurre informazioni sintetiche circa **la variabilità delle loro proprietà fisico-meccaniche e l'influenza di alcuni parametri fisici sulla resistenza all'usura ed alla frammentazione** degli aggregati.

Relativamente alla **granulometria** si evince che tutte le curve granulometriche rientrano nei limiti di tolleranza ammessi dalle norme RFI



La **distribuzione di frequenza** delle classi granulometriche consente di affermare che i pietrischi rientrano nei limiti delle **classi 40-50 mm** con massimi, nel caso di **Nepi 3**, **Montalto 1** e **Venturina**, fino a 80 mm.

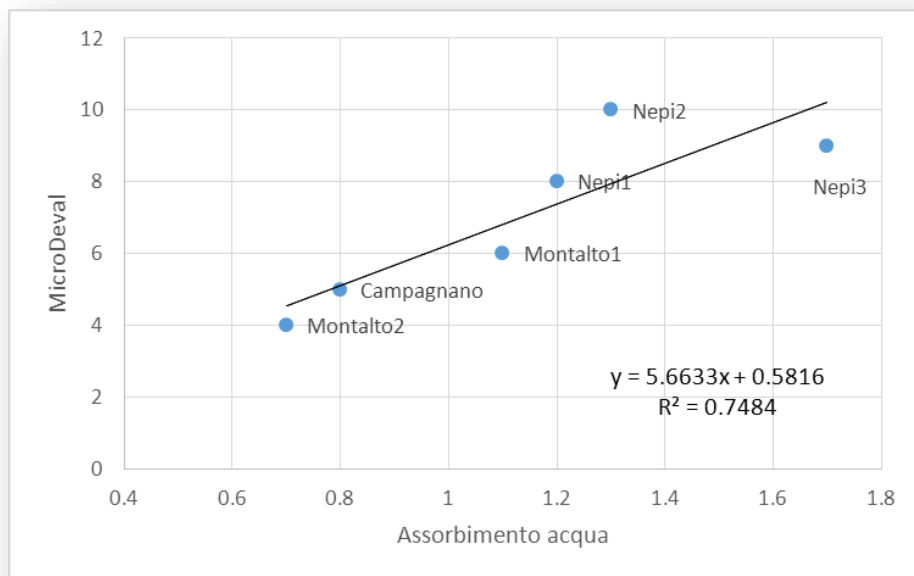


Quadro riassuntivo delle principali proprietà fisico-meccaniche e correlazioni

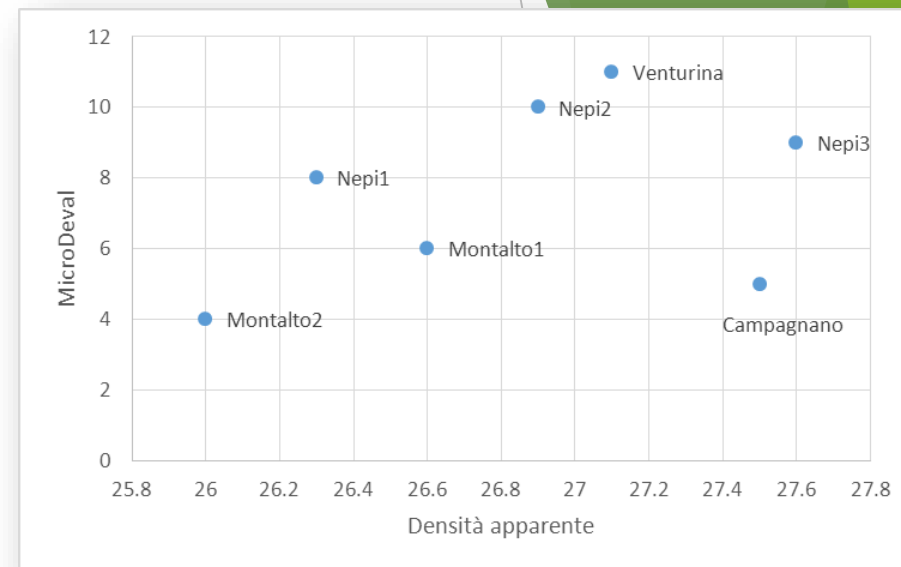
Campione	Densità apparente	Massa volumetrica	Assorbimento d'acqua	Porosità	Indice forma	Lunghezza part.	LAA	F-T Loss	σ_c	M _{DE}	P	Roccia
	ρ_a (KN/m ³)	ρ_b (KN/m ³)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(MPa)	(%)	(%)	
Nepi 1	26.3		1.2		10.1	5	13.0	13.0	235.0	8	0.13	Tefrite leucitica
Nepi 2	26.9		1.3		13	6	10.1	10.3	240.2	10	0.09	tefrite
Nepi 3	27.6		1.7		18	4	7.6			9	0.50	leucite
Campagnano	27.5		0.8		17	4	15.0	0.3	262.0	5	0.20	basalto
Montalto 1	26.6	13.2	1.1	49.0	12	3	12.1	12.1	259.4	6	0.15	basalto
Montalto 2	26.0		0.7		18	6	16.0	13.3		4	0.50	basalto
Venturina	27.1	12.9	0.5	50.2	16	5	21.9	18.0	85.3	11	0.52	calcare

- La **porosità** interparticellare è calcolata nota la massa volumetrica delle particelle essiccate.
- L'**indice di forma** si riferisce alla percentuale di frammenti di forma allungata.
- La **lunghezza delle particelle** si riferisce alla percentuale in peso degli elementi con lunghezza maggiore o uguale a 100 mm (non deve eccedere il valore del 6%).
- **Los Angeles Abrasion Hardness (LAA)** è la percentuale di perdita in peso per urto nella macchina Los Angeles dopo 1000 giri.
- **F-T Loss** è la perdita percentuale di resistenza dopo 20 cicli di gelo-disgelo ("Freezing-Thawing").
- I valori di **resistenza a compressione uniassiale (σ_c)** classificano quasi tutti i campioni come altamente resistenti.
- Il **coefficiente micro-Deval (MDE)** è calcolato in condizioni umide. Misura la resistenza all'usura prodotta sull'aggregato dalla frizione tra particelle e la carica abrasiva data dalle sfere inserite nel tamburo rotante. Minore è il valore del coefficiente migliore è la resistenza all'usura.
- La **percentuale di particelle fini (P)** è il passante al setaccio 0.063 mm. Secondo Normativa RFI la percentuale massima in peso di passante al setaccio 0,063 mm non deve superare lo 0,5%.

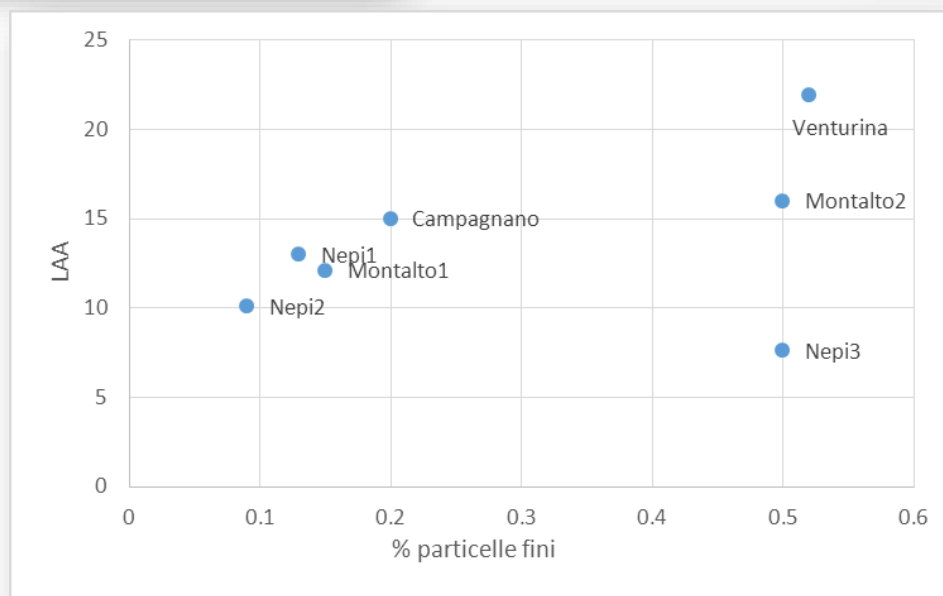
Principali correlazioni tra grandezze



MicroDeval - Assorbimento acqua



MicroDeval - Densità apparente



Los Angeles Abrasion Hardness- % particelle fini

Principali risultati

- Vi è una buona correlazione lineare tra **resistenza all'usura** ed il **contenuto d'acqua** ($R^2 = 0.75$). Al diminuire del contenuto d'acqua si osserva un aumento della resistenza all'usura rappresentata da una percentuale più bassa del **coefficiente micro-Deval**. **I basalti**, a più basso contenuto d'acqua, presentano maggiore resistenza all'usura.
- Non vi è nessuna correlazione tra **resistenza all'usura** e **densità apparente** (distribuzione random dei dati). Occorre però ricordare che il *range* di variazione della densità apparente dei materiali analizzati è molto ristretto ed è probabile che, solo la maggiore o minore durezza di alcuni minerali nella roccia abbia un'influenza significativa sulla resistenza all'usura del materiale.
- La **resistenza alla frammentazione** del materiale (misurata mediante la **prova Los Angeles-LAA**) aumenta al diminuire della **frazione di particelle sottili** presenti negli aggregati anche se non c'è una buona correlazione tra i dati analizzati.

Conclusioni

- ▶ Sebbene i dati a disposizione sono limitati (manca quindi una valida correlabilità statistica dei risultati), i risultati sembrano confermare l'ipotesi che **l'assorbimento d'acqua** negli elementi del pietrisco **influisca** sulle loro **caratteristiche di resistenza all'usura** e anche sulla **resistenza all'azione del gelo-disgelo**. Passando più volte l'acqua dallo stato liquido a quello solido e viceversa, essa esercita un'azione di riduzione delle resistenze del materiale. Ciò è molto probabilmente dovuto all'acqua che si infiltra all'interno delle microfessure presenti nelle rocce e che, variando di volume per effetto del cambio di stato, disgrega nel tempo il materiale.
- ▶ Sulla **resistenza all'usura** **influiscono** la forma degli elementi (**indice di forma** in %), **la rugosità delle superfici dei frammenti** e **l'ammontare di particelle fini** presenti. La **resistenza all'usura** **cresce** (valori minori del coefficiente micro-Deval) **all'aumentare** dell'**indice di forma** (frammenti di forma più allungata tendono a resistere meglio all'usura).
- ▶ Non sembra invece esserci una correlazione tra resistenza all'usura e la densità apparente dei materiali.

Grazie per l'attenzione