

POLITECNICO DI TORINO

Ingegneria Civile

Laurea Magistrale – Specializzazione in Geotecnica



Politecnico di Torino

Gestione dei cumuli di fresato negli impianti di produzione

TESI DI LAUREA

Professori:

Prof. Davide Dalmazzo

Prof. Pierpaolo Riviera

Prof. Ezio Santagata

Prof.ssa Monica Barbero

Studente:

Gerardo Lando 242228

Anno Accademico 2022/2023

*Alla mia famiglia,
a Cristina,
ai miei amici,
a Rocco.*

Ringrazio:

Cristina, per il prezioso sostegno ed il grande supporto in tutti questi anni insieme, motivandomi a non mollare mai.

La mia famiglia ed i miei nonni, che con grande sacrificio mi hanno permesso di portare avanti gli studi universitari e di raggiungere i miei obiettivi, sostenendomi e spronandomi sempre, soprattutto nei momenti di difficoltà.

I miei amici, sia interni che esterni all'università, con i quali ho condiviso studi, sport, vacanze, esperienze, momenti difficili e gioie.

I miei titolari ed i miei colleghi/amici di lavoro, i quali mi hanno sostenuto, aiutato, incoraggiato e permesso di portare avanti le attività propedeutiche alla tesi.

I professori Riviera, Dalmazzo, Santagata e la professoressa Barbero, per la loro grande disponibilità ed il prezioso supporto con cui mi hanno seguito durante tutto il percorso di tesi.

Sommario

1.	OBIETTIVI DELLA TESI	3
2.	CONSIDERAZIONI GENERALI SUL RICICLAGGIO	4
2.1.	Introduzione	4
2.2.	Materiali adatti per essere trasformati in RAP	4
2.3.	Recupero ed elaborazione del RAP	4
2.4.	Test sul RAP	5
2.4.1.	Proprietà del legante del RAP	6
2.5.	Consegna e stoccaggio di RAP lavorato presso l'impianto di produzione	6
2.6.	Combinazione del RAP con la miscela di conglomerato bituminoso	7
2.7.	Mix Design di miscele di conglomerato bituminoso contenenti RAP	7
2.8.	Controllo del processo del RAP	9
3.	LE MIGLIORI PRATICHE PER LA GESTIONE DEL RAP	11
3.1.	Gestione del processo di bonifica	11
3.2.	Gestione dei cumuli ed elaborazione del RAP	14
3.3.	Opzioni di lavorazione consigliate per i cumuli di fresato	17
3.4.	Campionamento e Test del RAP	24
3.5.	Preoccupazioni per la produzione di miscele contenenti RAP	28
4.	SICUREZZA PER LO STOCCAGGIO DEL RAP	29
4.1.	Incidenti per i mezzi da cantiere nella formazione dei cumuli di materiale	29
4.2.	Tecniche di stoccaggio del materiale	29
4.3.	Caricamento in punta del materiale	31
4.4.	Instabilità dei pendii di un cumulo	32
4.5.	Macchine ed attrezzature negli impianti di produzione	34
4.5.1.	Dumper e camion per il trasporto del materiale	34
4.5.2.	Caricatori frontali.....	39
4.5.3.	Dozer o Apripista	42
4.5.4.	Scraper	44
4.5.5.	Spostamenti a piedi all'interno dell'impianto.....	45
5.	PROVE DI TAGLIO DIRETTO SUI PROVINI DI RAP.....	48
5.1.	Resistenza a taglio dei terreni	48
5.2.	Prova a taglio diretto	49
5.3.	Modalità d'esecuzione.....	50
5.4.	Interpretazione della prova di taglio diretto.....	51
5.5.	Prove di taglio diretto in laboratorio	52
5.5.1.	Test su ghiaia	54

5.5.2.	Test su fresato setacciato	59
5.5.3.	Test su fresato non setacciato	65
5.6.	Conclusioni sulle prove di taglio diretto	69
6.	MODELLAZIONE DEI CUMULI DI FRESATO DA UN PUNTO DI VISTA ANALITICO	71
6.1.	Modellazione dei cumuli di fresato col metodo degli elementi finiti	71
6.2.	Modellazione dei cumuli reali creati in laboratorio in piccola scala	78
7.	BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	83

1. OBIETTIVI DELLA TESI

Gli obiettivi del presente documento sono quelli di descrivere tutte le varie fasi che accompagnano la lavorazione del RAP all'interno degli impianti di produzione, partendo dalle considerazioni sulla fresatura, riciclaggio, trasporto, stoccaggio e formazione dei cumuli di fresato fino alla loro modellazione analitica, al calcolo ed alla definizione dei parametri quali la coesione "c" e l'angolo di resistenza al taglio " ϕ ", tipici di materiali granulari geotecnici che, in questo caso, si vogliono ricavare da prove di taglio diretto per il fresato, anch'esso granulare, materiale prodotto e utilizzato in ambito infrastrutturale.

Per tale motivo, lo scopo della tesi è quello di definire il fresato sia da un punto di vista teorico/analitico che pratico, descrivendo inizialmente come vengano formati e creati i cumuli di RAP all'interno degli impianti di lavorazione da un punto di vista macroscopico, passando poi al calcolo in laboratorio di parametri geotecnici con l'ausilio della macchina a taglio diretto per la determinazione del materiale in termini microscopici tramite campioni di RAP.

Inoltre, vengono eseguite delle simulazioni per la formazione dei cumuli di fresato tramite un software degli elementi finiti, ossia Rocscience Phase 2, cercando di studiarli da un punto di vista analitico e di modellazione, partendo dai cumuli di materiali granulari geotecnici noti per passare successivamente ai cumuli di fresato negli impianti di produzione per un loro confronto. Tale studio viene effettuato per capire se i parametri geotecnici ed i fattori di sicurezza per la creazione dei cumuli si possano applicare anche per quelli di RAP.

Ciò consente di capire o meno se il fresato possa essere trattato come un qualsiasi materiale granulare, studiando la formazione dei cumuli, descrivendone le loro caratteristiche fisiche e ricavando i dati e le variabili tipiche dei materiali geotecnici da campioni di RAP.

Pertanto, i punti salienti che verranno discussi sul fresato bituminoso in questa tesi saranno i seguenti:

- Considerazioni generali sul riciclaggio, definendo benefici e criticità nell'uso del RAP.
- Le migliori pratiche per la gestione del RAP in impianto.
- La sicurezza per lo stoccaggio del fresato all'interno degli impianti di produzione.
- Le prove di taglio diretto in laboratorio per la determinazione dei parametri geotecnici del fresato bituminoso.
- Modellazione dei cumuli di fresato da un punto di vista analitico, tramite un software degli elementi finiti, che consenta di verificare dati, proprietà e coefficienti di sicurezza per la formazione dei cumuli di fresato all'interno dei relativi impianti di produzione e lavorazione.

2. CONSIDERAZIONI GENERALI SUL RICICLAGGIO

2.1. Introduzione

La pavimentazione stradale è riciclabile al 100% ed è il materiale da costruzione più riutilizzato al mondo.

Il suo riutilizzo ridurrà la domanda di bitume importato e la necessità di aggregati di alta qualità appena frantumati. Il valore del RAP ("Reclaimed Asphalt Pavement", ossia "Pavimentazione in asfalto bonificato") viene massimizzato riutilizzandolo nelle pavimentazioni stradali in quanto sostituisce nuove e costose materie prime. Ove possibile, il RAP non dovrebbe essere sottoposto a "downcycling" (riciclaggio in cui il materiale riciclato è di qualità e funzionalità inferiori rispetto al materiale originale) ad applicazioni di valore inferiore.

Esiste una percezione ampiamente diffusa per cui le proprietà dei materiali nei cumuli di RAP varino molto e che l'uso di RAP, specialmente ad alte proporzioni, influirà negativamente sulla consistenza del prodotto di conglomerato bituminoso. Questa percezione è infondata. Infatti, a condizione che i cumuli di RAP siano gestiti correttamente, la classificazione dell'aggregato nel RAP sarà almeno altrettanto coerente di quella delle fonti vergini, ci si può aspettare che anche il contenuto del legante e le proprietà del legante del RAP siano coerenti. La conformità a questo piano di gestione garantirà un prodotto RAP omogeneo.

2.2. Materiali adatti per essere trasformati in RAP

I carichi in ingresso devono essere ispezionati per garantire che il materiale sia adatto per essere trasformato in RAP e privo di contaminanti. Questi ultimi, che possono essere riscontrati nel RAP, includono calcestruzzo, geo-tessuti e tessuti, plastica, mattoni, legno, base stradale, vegetazione, argilla, metallo e catrame di carbone.

Alcuni di questi contaminanti possono essere eliminati e successivamente il RAP può essere elaborato. In tutti gli altri casi, i materiali contaminati devono essere stoccati separatamente dal RAP che verrà utilizzato nelle miscele di conglomerato bituminoso. La parte contaminata non deve essere utilizzata assolutamente nella miscela che andrà a costituire la pavimentazione stradale.

Poiché il RAP elaborato dovrebbe essere privo di contaminanti e contenere solo profilati e resi di impianti di conglomerato bituminoso, è necessario prestare attenzione a non accettare inavvertitamente profilati da una fonte sconosciuta. Dettagli come l'origine dei profili in conglomerato, come ad esempio la strada e i resi degli impianti, devono essere correttamente registrati.

2.3. Recupero ed elaborazione del RAP

Il processo di fresatura della pavimentazione stradale rompe l'aggregato originario e si genera così un nuovo materiale con una propria gradazione. Idealmente, le fresature delle pavimentazioni vengono accumulate separatamente ed è necessario prestare attenzione durante la profilatura per garantire che il RAP non sia contaminato da roccia frantumata di base granulare. Ciò potrebbe richiedere che la vecchia superficie sia profilata in due passaggi per garantire un RAP uniforme di buona qualità per il suo riutilizzo. L'operazione di fresatura a due passate può anche essere economica quando il costo dei nuovi aggregati di attrito sia molto elevato e le specifiche del progetto consentano di utilizzare il RAP a strato superficiale in nuovi strati.

Le materie prime devono essere lavorate per consentire di ottenere un RAP omogeneo e scorrevole. Il trattamento deve includere:

- Miscela di materie prime.

- Frantumazione, consistente nel processo di passaggio di grandi lastre di materiale RAP attraverso un frantoio appropriato per creare un materiale RAP a classificazione continua.
- Schermare i profilati RAP su un grizzly per rimuovere il materiale sovradimensionato prima di frazionare il RAP in frazioni di dimensioni singole o multiple (ad esempio 0/20 mm, 0/10 mm, ecc.).
- Schiacciare il RAP sovradimensionato trattenuto sullo schermo in modo che possa essere frazionato in dimensioni più piccole.
- Cumuli finali.

La miscelazione della materia prima del RAP è necessaria per garantire la formazione di un cumulo omogeneo per la produzione di conglomerato bituminoso. È necessario utilizzare un bulldozer, un escavatore o un'attrezzatura simile per miscelare materiali provenienti da posizioni diverse nei cumuli di RAP a più fonti mentre vengono immessi nell'operazione di vagliatura e frantumazione. La miscelazione è necessaria a causa delle molteplici combinazioni di diversi profili del sito, scarti e resi dell'impianto. Un'attenta miscelazione della materia prima è una parte fondamentale dell'operazione di riciclaggio per ottenere coerenza nel RAP per quanto riguarda la distribuzione delle dimensioni delle particelle ed il contenuto di legante.

È anche importante elaborare solo RAP sufficiente per soddisfare la domanda dell'impianto per limitare l'altezza dei cumuli, in modo che non si consolidi sotto il proprio peso e con temperature ambiente elevate.

Il RAP elaborato viene immagazzinato separatamente, lontano dalle fresature di pavimentazioni stradali in entrata, dai rifiuti vegetali e dal conglomerato restituito.

Qualsiasi RAP elaborato che è stato lasciato inutilizzato per troppo tempo in modo che si sia indurito in grumi deve essere rielaborato.

I cumuli di RAP trasformati devono essere murati e coperti per ridurre l'impatto dell'umidità durante la miscelazione nel mulino o nel tamburo di miscelazione con aggregati caldi. Qualora ciò non possa essere eseguito, allora si ha che:

- La riserva deve essere formata su un piano inclinato in modo che l'acqua defluisca dall'estremità di carico.
- I cumuli devono essere sagomati in modo che l'acqua defluisca dai lati e l'angolo dei lati non sia troppo ripido per ridurre il potenziale di segregazione.
- L'altezza dei cumuli deve essere controllata per prevenire il consolidamento del RAP.
- Debba esserci un'adeguata separazione per eliminare il potenziale di contaminazione con altri aggregati.
- Debba essere presente una segnaletica appropriata come numero di lotto, descrizione del prodotto, approvazione per il rilascio, ecc.

Se si verifica la segregazione o il consolidamento, è possibile utilizzare un caricatore frontale per rimescolare i cumuli. Laddove il consolidamento si traduca in grumi di grandi dimensioni, potrebbe essere necessario un ulteriore schiacciamento ed una frantumazione del materiale.

I lotti dei vari cumuli vengono testati per il contenuto di legante, il contenuto di umidità e la distribuzione delle dimensioni delle particelle prima di essere rilasciati per l'uso. Può anche essere richiesto il test di caratterizzazione sul legante di RAP.

2.4. Test sul RAP

Devono essere prelevati campioni da ciascun cumulo per consentire la caratterizzazione del materiale RAP e per verificare l'omogeneità dello stesso cumulo. I campioni di RAP rappresentativi devono essere prelevati in conformità con le normative vigenti da una persona competente. Si devono prelevare almeno tre campioni utilizzando questa procedura da ciascun cumulo.

Sono disponibili vari metodi per determinare la densità dell'aggregato nel RAP. Ciascun metodo presenta vantaggi e svantaggi noti. Il recupero degli aggregati attraverso il forno di accensione può

causare danni agli aggregati. L'accuratezza del calcolo a ritroso dell'aggregato dalla densità massima del RAP, sottraendo il legante, dipende fortemente dalla quantità presunta di legante assorbito. È anche possibile determinare la densità dell'aggregato dopo l'estrazione del legante con solvente; tuttavia, questo metodo non è spesso utilizzato a causa del grande campione aggregato richiesto per il test di densità.

Per stimare la densità dell'aggregato combinato nel RAP ($\rho_{a(RAP)}$), bisogna:

- Determinare la densità massima ($\rho_{max(RAP)}$) del RAP.
- Calcolare la densità apparente dell'aggregato del RAP ($\rho_{ae(RAP)}$) dall'equazione 1, dove P_b è la percentuale di legante nel RAP e ρ_b è la densità presunta di quel legante:

$$\rho_{ae(RAP)} = \frac{100 - P_{b(RAP)}}{\left(\frac{100}{\rho_{max(RAP)}}\right) - \left(\frac{P_{b(RAP)}}{\rho_b}\right)} \quad (1).$$

- Calcolare $\rho_{a(RAP)}$ dall'equazione 2, dove P_{ba} è l'assorbimento del legante assunto:

$$\rho_{a(RAP)} = \frac{\rho_{ae(RAP)}}{\left(\frac{P_{ba} \cdot \rho_{ae(RAP)}}{100 \cdot \rho_b} + 1\right)} \quad (2).$$

2.4.1. Proprietà del legante del RAP

Se non diversamente specificato, le proprietà del legante nel RAP devono essere caratterizzate quando più del 15% di RAP in massa della miscela totale è aggiunto alle miscele di conglomerato bituminoso. La caratterizzazione del legante deve essere eseguita su un minimo di tre campioni di ciascun cumulo. Esistono numerosi metodi adatti in uso sia per il recupero del legante che per la misurazione della viscosità del legante o di proprietà reologiche simili.

Il legante può essere caratterizzato utilizzando uno dei seguenti metodi:

- Viscosità a 60 °C misurata mediante reometro a taglio dinamico (DSR), che permette di misurare le proprietà reologiche di un fluido, in questo caso il legante.
- Viscosità dinamica a 60 °C.

È anche possibile caratterizzare le proprietà del legante con i metodi seguenti:

- Viscosità piastra scorrevole a 45 °C.
- Combinazione del punto di penetrazione e rammollimento secondo le normative vigenti.

Tuttavia, questi non sono compatibili con gli intervalli target di viscosità presenti nel mix design di miscele di conglomerato bituminoso contenente RAP e, pertanto, dovrebbe essere stabilito un metodo alternativo idoneo per controllare la miscela del legante.

2.5. Consegna e stoccaggio di RAP lavorato presso l'impianto di produzione

Il lotto di RAP elaborato viene consegnato al sito dell'impianto di produzione in modo tale che non vi sia segregazione o contaminazione del materiale RAP lavorato. Le consegne di RAP trasformato dovrebbero essere ribaltate per garantire che la distribuzione dell'aggregato nei cumuli sia visivamente omogenea.

Potrebbe essere necessario modificare le proporzioni dei componenti ed il tipo di legante (o la quantità di ringiovanente, se aggiunto) nel sistema di controllo dell'impianto di produzione del conglomerato per qualsiasi cambiamento nel contenuto di legante, nelle sue proprietà, nella gradazione dell'aggregato e nel contenuto di umidità prima dell'uso di qualsiasi nuovo lotto di lavorazione del RAP.

Tutti i RAP elaborati da ciascun contenitore devono essere utilizzati per prevenire la formazione di grumi e per garantire che il RAP elaborato rimanga libero di fluire. Un cannone ad aria o un motore vibrante oscillante può essere installato sulla tramoggia del RAP per prevenire un suo accumulo.

Se si verificasse un evento di pioggia di intensità sufficiente da influire sul contenuto di umidità tra il momento in cui il cumulo di RAP è stato testato e quello in cui lo stesso deve essere utilizzato, il contenuto di umidità deve essere nuovamente testato.

2.6. Combinazione del RAP con la miscela di conglomerato bituminoso

Nell'impianto di produzione del conglomerato bituminoso, il RAP trasformato deve essere immagazzinato in depositi o contenitori di stoccaggio di aggregati freddi che sono coperti con un tetto permanente e protetti lateralmente da muri permanenti.

Gli aggregati vengono riscaldati a sufficienza per garantire che il legante nel RAP trattato sia sufficientemente attivato da consentire al RAP stesso di essere completamente incorporato nel conglomerato. Il processo di riscaldamento non dovrebbe comportare l'esposizione del RAP a una fiamma diretta. Bisogna fare attenzione a non riscaldare l'aggregato ad una temperatura eccessiva che danneggerebbe il legante vergine e quello del RAP. La differenza di temperatura tra il legante e l'aggregato (compreso il RAP) deve essere mantenuta in modo che non superi i 30 °C.

Il RAP elaborato viene accuratamente miscelato in modo che non vi sia alcuna apparente segregazione fisica o di temperatura nella miscela o una maggiore variabilità nei risultati dei test di produzione del conglomerato risultanti.

2.7. Mix Design di miscele di conglomerato bituminoso contenenti RAP

Le miscele di conglomerato bituminoso che contengono RAP dovrebbero essere progettate per soddisfare gli stessi criteri di prestazione delle medesime miscele senza RAP.

Il contenuto del legante di RAP nella miscela deve essere determinato come da normativa. Tutto il legante nel RAP contribuisce al contenuto di legante della miscela del conglomerato finale. Il contenuto totale di legante del Mix Design è quindi uguale alla somma del contenuto di legante di RAP più il legante vergine aggiunto alla miscela.

La dimensione nominale massima del RAP non deve essere maggiore della dimensione aggregata nominale massima della miscela di conglomerato bituminoso in cui verrà utilizzato il RAP.

Il processo di sviluppo di una classificazione target per una miscela di conglomerato contenente RAP è simile a quello per una miscela senza RAP. La classificazione dell'aggregato nel RAP deve essere determinata secondo le procedure definite da normativa. L'aggregato del RAP è considerato come una frazione aggregata nel foglio di progettazione della miscela. La densità aggregata può essere determinata utilizzando uno dei metodi appropriati descritti precedentemente nel paragrafo 2.4.

Per calcolare le proprietà volumetriche del legante ed i vuoti nell'aggregato minerale, può essere utilizzata la densità apparente dell'aggregato RAP, determinata in conformità alle proprietà descritte anch'esse precedentemente nel paragrafo 2.4.1, a condizione che siano comprese le limitazioni note dei metodi.

L'inclusione di RAP nelle miscele di bitume ha un effetto di irrigidimento sul legante, poiché il legante di RAP ha una viscosità superiore rispetto al bitume vergine. Questo effetto può essere trasformato in un vantaggio se si intende creare una miscela con un modulo più elevato rispetto a quello che si otterrebbe utilizzando solo leganti vergini. Nell'attuale quadro delle specifiche, l'obiettivo del Mix

Design del conglomerato bituminoso contenente RAP sarà quello di creare una miscela che abbia proprietà equivalenti a quelle di una miscela contenente solo legante vergine.

Per miscele contenenti fino al 15% in massa di RAP della miscela totale, non è necessario alcun intervento per correggere l'influenza di irrigidimento del legante di RAP.

L'inclusione di RAP superiore al 15%, invece, produrrà un bitume che fornisca prestazioni equivalenti a miscele senza RAP, a condizione che vengano prese misure per correggere l'effetto d'irrigidimento del legante di RAP sulla viscosità della miscela di legante totale. Con un contenuto di RAP compreso tra il 15% ed il 30%, sarà generalmente sufficiente utilizzare un legante di classe vergine più morbido per correggere la viscosità. Per percentuali di RAP superiori al 30%, potrebbe essere necessario introdurre un ringiovanente per controllare la viscosità del legante complessivo nella miscela.

La caratterizzazione del legante di RAP o altri mezzi di valutazione delle prestazioni devono essere intrapresi per valutare la necessità di utilizzare un legante a viscosità inferiore o un ringiovanente per ottenere il legante risultante desiderato, che favorisca una maggiore lavorabilità ed una minore rigidità della miscela finale.

La seguente procedura può essere utilizzata per progettare una miscela di legante con un valore di viscosità specificato (facendo riferimento agli accorgimenti descritti in precedenza nel paragrafo 2.4):

- Raccogliere un campione rappresentativo del RAP.
- Determinare il contenuto del legante del RAP.
- Estrarre un campione rappresentativo di legante di RAP utilizzando uno dei metodi elencati precedentemente.
- Determinare la viscosità del legante di RAP estratto, del legante vergine e/o del ringiovanente (se applicabile), utilizzando uno dei metodi di prova elencati precedentemente.
- Calcolare la proporzione di legante di RAP, legante vergine e/o ringiovanente in massa rispetto al legante totale. Si noti che questo è un processo iterativo, potrebbe essere necessario assumere la proporzione di legante vergine/ringiovanente richiesta per produrre una miscela conforme. Si noti, inoltre, che la proporzione di legante di RAP nella miscela legante generalmente differisce dalla percentuale di RAP in massa della miscela totale.
- Prevedere la viscosità della miscela legante dall'equazione 3 di seguito riportata.
- Se la viscosità prevista è al di fuori dell'intervallo desiderato per il progetto, regolare la proporzione dei componenti della miscela di legante in modo iterativo, fino al raggiungimento del risultato atteso.

$$VBI_i = \frac{3 + \log \vartheta_i}{6 + \log \vartheta_i},$$

$$VBI_\beta = \sum_{i=1}^n x_i \cdot VBI_i \quad (3),$$

$$\mu = 10^{\left(\frac{3VBI_\beta}{1 - VBI_\beta} - 3 \right)},$$

dove:

- ϑ_i è la viscosità dell'i-esimo componente (unità di misura in Pa·s, unità di misura della viscosità dinamica nel Sistema Internazionale in Pascal per secondo).
- VBI_i è l'indice di miscelazione della viscosità del i-esimo componente.
- VBI_β rappresenta invece l'indice di miscelazione della viscosità della miscela totale.
- X_i è la frazione di volume dell'i-esimo componente.
- μ , infine, è la viscosità finale dell'intera miscela (calcolata anch'essa in Pa·s).

A titolo di riferimento, si riportano di seguito valori della viscosità dinamica in funzione della tipologia di bitume a una temperatura di 160°C:

- $0,02 \leq \text{Viscosità} \leq 0,10 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ per bitumi tal quale.
- $0,10 \leq \text{Viscosità} \leq 0,35 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ per bitumi modificati soft.
- $0,35 \leq \text{Viscosità} \leq 0,45 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ per bitumi modificati hard.

Relativamente al ritorno elastico, per bitumi tal quali non si registrano valori significativi, mentre per i bitumi modificati si ottengono dati percentuali nettamente elevati (ritorno elastico superiore al 50% per bitumi "soft" e superiore al 70% per bitumi "hard").

Affinché la miscela di conglomerato risultante non risenta eccessivamente della presenza di RAP irrigidendosi a sua volta e palesando un'eccessiva fragilità, occorre adottare accorgimenti che permettano di compensare l'incremento di rigidità conferito dal materiale riciclato. A tal fine, si può agire selezionando un bitume vergine di aggiunta più "soffice" in modo da bilanciare la rigidità del bitume invecchiato proveniente dal fresato. Proprio per tale ragione, le norme tecniche di Capitolato Anas prescrivono l'impiego di bitume "soft" piuttosto che "hard" laddove si considerino percentuali di fresato elevate, come riportato nella seguente tabella:

Tabella 2.7.1 - Tipologie di bitume da impiegare per miscele riciclate a caldo in funzione della percentuale di fresato inclusa (bitumi TQ = tal quali, bitumi modificati "hard" = HD e "soft" = SF) (<https://www.stradeanas.it/>).

Tipologia di Bitume	Usura A			Usura B			Binder			Basebinder			Base		
	TQ	SF	HD	TQ	SF	HD	TQ	SF	HD	TQ	SF	HD	TQ	SF	HD
Percentuale di fresato [%]	≤ 10	≤ 15	≤ 15	≤ 10	≤ 15	≤ 15	≤ 15	≤ 25	≤ 20	≤ 15	≤ 25	≤ 20	≤ 15	≤ 30	≤ 25

2.8. Controllo del processo del RAP

Un robusto sistema di controllo del processo deve essere implementato per garantire che un bitume finale uniforme sia prodotto dall'aggiunta di RAP elaborato. Il sistema deve includere un piano di ispezione e test per documentare chiaramente tutti i criteri di test e accettazione pertinenti, inclusi i seguenti:

- Contenuto del raccoglitore.
- Classificazione degli aggregati.
- Contenuto di umidità.
- Proprietà leganti (per miscele che includono più del 15% di RAP).

L'appaltatore nominerà il valore massimo accettabile per il contenuto di umidità appropriato per l'impianto di bitume. La documentazione di controllo del processo deve includere un procedimento dettagliato che descriva la gestione delle fluttuazioni del contenuto di umidità nel RAP nel processo di produzione del conglomerato bituminoso. La variazione del contenuto di umidità del RAP deve essere monitorata sulla base dei campioni prelevati dai cumuli.

Se si verificasse un evento di pioggia di intensità sufficiente da influire sul contenuto di umidità del RAP tra il momento in cui quest'ultimo sia stato testato e quando lo stesso debba essere utilizzato, il contenuto di umidità dovrà essere nuovamente ridefinito. Qualsiasi cambiamento nel contenuto di umidità del lotto, dove avrà un impatto sul prodotto finale del conglomerato, deve essere inserito nel sistema di controllo dell'impianto. Un aumento del contenuto di umidità limiterà la quantità di RAP che può essere utilizzata, poiché influenzerà il funzionamento del sistema di estrazione e quello sicuro dell'impianto.

Per le miscele contenenti più del 15% di RAP, il risultato della sua viscosità in ciascuna riserva dei cumuli deve essere utilizzato per verificare che la viscosità calcolata per la miscela di legante rientri nell'intervallo target per il legante indicato nel progetto della miscela (come riportato alla fine del paragrafo precedente).

In alternativa, le proprietà della miscela legante possono essere monitorate utilizzando la viscosità della piastra scorrevole o la combinazione di penetrazione e punto di rammollimento.

Se il RAP o la miscela di leganti di RAP non è conforme ai requisiti, deve essere effettuata una valutazione dell'impatto delle proprietà risultanti sul conglomerato bituminoso. Potrebbe essere necessario modificare le proporzioni relative di RAP e del prodotto vergine nella miscela, entro i limiti della specifica del materiale di bitume pertinente. Il contenuto di RAP totale della miscela modificata non deve superare il contenuto di quello presente sul certificato di progettazione della miscela. La decisione di utilizzare o rifiutare il RAP costituirà la disposizione per questa non conformità.

3. LE MIGLIORI PRATICHE PER LA GESTIONE DEL RAP

3.1. Gestione del processo di bonifica

Il RAP può essere ottenuto da diverse fonti. Il metodo più comune è attraverso le operazioni di fresatura della pavimentazione, note anche come piattatura a freddo. Altre due fonti comuni di RAP sono la demolizione a tutta profondità della pavimentazione e la miscela di conglomerato di scarto. La fresatura è una parte benefica della riabilitazione della pavimentazione. I suoi vantaggi includono quanto segue:

- Permette la rimozione degli strati di pavimentazione deteriorati, mantenendo spazi sufficientemente liberi intorno alla stessa pavimentazione fresata.
- Evita il riempimento dei cordoli e la formazione di cumuli ripidi negli ambienti urbani.
- Riduce la necessità della costosa aggiunta di materiale di banchina lungo il bordo dei marciapiedi sulle strade rurali.
- Ripristina le pendenze della pavimentazione, quelle trasversali ed i profili, importanti per la levigatezza.
- Lascia una tessitura ruvida sulla superficie rimanente e ciò crea un ottimo legame con il rivestimento.
- Rappresenta un processo di rimozione efficiente che può essere eseguito con una breve chiusura della corsia interessata per permettere le operazioni di ripavimentazione.



Figura 3.1.1 - La fresatrice rimuove gli strati della pavimentazione come parte del suo ripristino (<https://www.vaasphalt.org/>).

La selezione della profondità di fresatura è una decisione critica durante la pianificazione della riabilitazione di una pavimentazione. La profondità di fresatura dovrebbe essere basata sull'esame visivo dei nuclei per determinare la profondità delle crepe superficiali e/o la posizione di strati o interfacce deboli. La rimozione di questi strati danneggiati o deboli aiuta ad ottenere prestazioni a lungo termine della copertura.

È importante controllare la sezione trasversale degli strati di pavimentazione attraverso le corsie, poiché le strade sono state spesso ampliate in passato con un accumulo diverso sulla larghezza della

carreggiata aggiunta. Nei casi in cui la fresatura venga utilizzata anche per migliorare il profilo della carreggiata (levigatezza) e/o la pendenza trasversale, è necessario rendersi conto che la profondità di fresatura varierà. L'attenta considerazione deve basarsi su come lo spessore variabile può influenzare l'integrità strutturale della pavimentazione rimanente così come l'uniformità del materiale fresato.

I processi di fresatura devono essere esaminati attentamente per assicurarsi che il materiale fresato non sia contaminato da suolo, materiale di base, geotessili per pavimentazione o altri detriti. Ciò è particolarmente importante per fresature profonde o su banchine o carreggiate allargate. I materiali fresati che vengono contaminati devono essere utilizzati solo come materiale di spalla e devono essere stoccati separatamente dal RAP che verrà usato nella miscela di conglomerato bituminoso. Un limite massimo raccomandato dell'1% di materiale dannoso dovrebbe essere utilizzato per valutare la contaminazione del RAP. Questo limite è coerente con i requisiti per gli aggregati vergini. La superficie fresata deve anche essere ispezionata per verificare la presenza di "croste" dove vengono lasciati strati sottili e debolmente legati. La Figura 3.1.2 di seguito, mostra un esempio di pavimentazione fresata con croste. Come si può notare, la profondità di fresatura deve essere regolata per rimuovere lo strato di crosta. Se si lascia che un tale strato debolmente legato rimanga in posizione, le prestazioni del rivestimento diminuiranno notevolmente.

Infine, la superficie fresata dovrebbe essere ispezionata per una consistenza uniforme: se così non fosse, a causa di punte usurate o rotte sul tamburo di fresatura, ciò potrebbe provocare problemi con la compattazione di strati sottili. Può anche causare una superficie non sicura per i motocicli se la superficie fresata fosse aperta al traffico. Alcune imprese richiedono un semplice controllo della trama e hanno un limite di 1/2 pollici di picco (1,27 cm circa) a valle sulla superficie fresata.



Figura 3.1.2 - Superficie della pavimentazione fresata con uno strato sottile di crosta che potrebbe provocare un cedimento prematuro del rivestimento (<https://www.asphaltpavement.org/>).

Le fresatrici consumano molta energia nella rimozione degli strati di pavimentazione, colpendola con denti di fresatura montati su un tamburo rotante a circa 200 giri/min. Gli impatti rompono la pavimentazione lacerando il mastice e le particelle di aggregato.

Lo schiacciamento delle particelle inerti fa sì che la gradazione delle fresature sia molto più fine della gradazione degli strati di pavimentazione in atto.

In alcuni casi, può essere vantaggioso utilizzare speciali operazioni di fresatura per rimuovere strati di pavimentazione specifici. Un'operazione di fresatura speciale può anche essere vantaggiosa quando è desiderabile fresare lo strato superficiale in una passata e gli strati sottostanti in una seconda passata, perché quello superficiale contiene un aggregato con maggiore attrito, un aggregato di peso specifico molto elevato e/o un legante modificato. Alcuni appaltatori hanno riscontrato che l'operazione di fresatura a due passaggi sia economica quando il costo dei nuovi aggregati di attrito è elevato e le specifiche del progetto consentano di utilizzare il RAP per nuovi strati superficiali.

Altre situazioni che possano giustificare la fresatura dello strato superficiale separatamente dagli strati sottostanti, includono progetti con strati superficiali contenenti scorie di acciaio o legante bitume-gomma. Le scorie di acciaio ad alto peso specifico possono introdurre variazioni significative nei cumuli di RAP. Allo stesso modo, può essere difficile riciclare il fresato con un alto contenuto di gomma. Quindi, tenere quest'ultima separato dal RAP può essere una considerazione importante per la corretta estrazione e gestione del materiale fresato.

Il RAP può anche essere ottenuto da tagli di una carreggiata, rimozione di aree isolate per riparazioni o demolizione completa di una pavimentazione esistente utilizzando un bulldozer o un escavatore. La Figura 3.1.3 sottostante, mostra un esempio di macerie di pavimentazione risultanti dalla demolizione di una carreggiata. Questo processo è tipicamente limitato a piccole aree di pavimentazione.

Questo metodo di rimozione è lento e si traduce in grandi pezzi di macerie da pavimentazione che possono essere più difficili da trasformare in un materiale riciclato utilizzabile.

È importante che la qualità di questo tipo di materiale sia attentamente monitorata durante lo scarico, per evitare contaminazioni e materiali dannosi, in particolare quando viene ricevuto da un altro appaltatore.

Quando le macerie della pavimentazione sono contaminate da strati sottostanti e da terra, è meglio che questo materiale venga frantumato e utilizzato come spalla o materiale di base piuttosto che come parte della miscela finale del conglomerato bituminoso.



Figura 3.1.3 - Macerie di una pavimentazione da demolizione completa di una carreggiata (<https://www.asphaltpavement.org/>).

Inoltre, è molto importante che i cumuli di RAP siano tenuti puliti da contaminanti fin dall'inizio. È facile capire come si possano formare cattive percezioni del RAP quando c'è sporcizia, sterpaglie o vegetazione nei cumuli o quando dei contaminanti vengono trovati nella miscela che si presenta in cantiere o fuoriescono dalla superficie pochi giorni dopo la realizzazione della nuova pavimentazione.

I conducenti dei mezzi che trasportano materiali riciclabili nello stabilimento devono essere chiaramente istruiti su dove scaricare carichi di RAP o macerie da pavimentazione in modo che i detriti di costruzione indesiderati non finiscano nei cumuli di RAP. Inoltre, essi devono essere istruiti a pulire i pianali dei camion prima di trasportare fresature utilizzabili. In aggiunta, il personale addetto al controllo qualità dell'impianto e l'operatore del caricatore dovrebbero ispezionare regolarmente i cumuli di RAP non trasformati e lavorati, per assicurarsi che non contengano materiali dannosi. Se venissero rilevati contaminanti, bisognerebbe controllarli immediatamente in modo che non vengano coperti con altri fresati trasportati all'interno dello stabilimento.



Figura 3.1.4 - Cumulo di RAP proveniente da più fonti con presenza di contaminanti (<https://www.asphaltpavement.org/>).

3.2. Gestione dei cumuli ed elaborazione del RAP

La cattiva gestione dei cumuli di RAP è comunemente citata come motivo per cui le agenzie siano riluttanti ad aumentare i contenuti di RAP consentiti nelle miscele di conglomerato bituminoso.

In questo paragrafo ci si focalizzerà sulla gestione del fresato e le opzioni per lo stoccaggio, la frantumazione e lo screening. Le buone pratiche di gestione dei materiali dovrebbero sempre essere una parte del programma di controllo della qualità per qualsiasi operazione di produzione di conglomerato bituminoso. Per la produzione di miscele di qualità, con un alto contenuto di RAP, sono pratiche essenziali ed eccellenti per la gestione dei materiali.

La sua gestione dovrebbe iniziare con un'analisi di base dell'inventario dei RAP disponibili e della produzione mista. Questa analisi è importante per stabilire obiettivi realistici per quanto fresato possa essere utilizzato in un particolare impianto di produzione.

L'analisi comprende quattro semplici passaggi:

- Un inventario dei RAP disponibili e di quelli generati all'anno.
- Un riepilogo delle miscele prodotte ogni anno dai tipi di miscele e dai clienti.

- Determinazione della quantità massima di RAP che può essere utilizzata.
- Un confronto tra la quantità di RAP disponibile e quella necessaria.

Nella maggior parte dei casi, quando un appaltatore ha una fornitura limitata di RAP, è logico provare ad utilizzare una quantità relativamente consistente di RAP in tutte le miscele piuttosto che utilizzarne quantità eccessive in alcune miscele e meno in altre. Ad esempio, se un appaltatore dispone di 40.000 tonnellate di RAP e produce 200.000 tonnellate di conglomerato bituminoso all'anno, è meglio eseguire $40.000 \div 200.000 = 20\%$ in tutte le miscele. Se il 40% di RAP viene utilizzato in alcune miscele, l'appaltatore dovrà utilizzare meno del 20% in altre per mantenere la fornitura di RAP in equilibrio con quello totale utilizzato.

L'esecuzione di contenuti di RAP più elevati potrebbe essere più competitiva su determinati lavori, ma potrebbero esserci costi aggiuntivi associati a contenuti maggiori di RAP, come test aggiuntivi sui materiali, costi di elaborazione di RAP più elevati, modifiche dell'impianto e aumento dei costi di manutenzione dello stesso impianto. È probabile che l'utilizzo di una percentuale consistente di RAP risulti più facile per l'impianto, per il personale addetto alla progettazione della miscela, per il controllo qualità e per le squadre di operai che lavorano alla realizzazione della pavimentazione.

Una delle prime decisioni nella gestione dell'inventario del RAP dovrebbe essere quella di accumulare o meno tutti i materiali di fresato in entrata in una singola pila o creare cumuli separati ottenuti da fonti diverse. La decisione dipenderà probabilmente dai seguenti fattori:

- Componenti nel RAP, come classi speciali di inerti, scorie di acciaio o gomma d'asfalto, che garantiscano la manipolazione del materiale separatamente da altre fonti.
- Se l'impianto di produzione locale accetti il RAP da altre fonti di miscele di conglomerato prodotte con specifiche appropriate.
- Indipendentemente dal fatto che un'altra impresa locale richieda o meno cumuli in cattività o consenta il rifornimento continuo dei cumuli.
- Lo spazio disponibile nel sito dell'impianto per la lavorazione e lo stoccaggio del RAP.
- Le percentuali di RAP target nelle miscele di conglomerato da produrre.
- Quanto RAP proviene da un singolo progetto.

Le specifiche di alcune imprese consentono di utilizzare solo i fresati dei loro progetti nelle loro miscele. I RAP dei progetti delle imprese sono spesso indicati come "RAP classificati", poiché l'origine dei materiali è nota. Questa limitazione viene utilizzata per garantire che l'aggregato ed il legante nel RAP siano di qualità soddisfacente nella pavimentazione originale.

La maggior parte delle imprese consente l'uso di RAP da più fonti, tra cui "RAP non classificato", che è stato combinato ed elaborato in un unico stock di RAP uniforme.

Queste, in genere, consentono tale pratica a patto che:

- La miscela combinata di RAP ed aggregati vergini soddisfi i requisiti di aggregazione appropriati.
- Le proprietà volumetriche del design della miscela riciclata soddisfino tutte le specifiche standard della miscela di conglomerato bituminoso.

Quando viene utilizzato questo approccio, sono necessarie buone pratiche di elaborazione del materiale fresato di origine multipla per creare un materiale uniforme.

Poiché una quantità sostanziale del RAP possa provenire da fonti non classificate, questo approccio consente di utilizzare al meglio il RAP da fonti diverse in un'ampia gamma di mix design e richiede il minor numero di test e lavoro di progettazione della miscela.

In altre parole, l'utilizzo di un solo cumulo di fresato in molti progetti di miscele differenti è efficiente dal punto di vista dei test. Le specifiche che vietino l'uso di RAP elaborati da più fonti possono essere inutilmente restrittive. In molti casi, non è conveniente svolgere tutti i test necessari ed eseguire progetti di miscelazione per piccole quantità di fresato bituminoso.

Un altro requisito che alcune agenzie impongono ai cumuli di fresato è che nessun materiale debba essere aggiunto una volta costruito e testato. Alcune agenzie adottano lo stesso approccio con i cumuli di aggregati vergini.

L'approccio opposto e più comune consiste nel permettere il rifornimento continuo di cumuli con nuovo materiale. La maggior parte delle imprese utilizza questo approccio per gli aggregati vergini, perché ci sono altri controlli sui test degli aggregati alla fonte. Ciò è appropriato anche per il RAP se la coerenza può essere stabilita attraverso un piano di controllo della sua qualità.

L'approccio più conservativo dei cumuli vincolati si basa sulla premessa che le loro proprietà debbano essere conosciute con precisione se venissero utilizzati come componenti in una miscela di conglomerato bituminoso.

Tuttavia, alcuni appaltatori sono stati in grado di sviluppare pratiche di elaborazione del RAP utilizzando cumuli continuamente riforniti che hanno gradazioni, proprietà aggregate e contenuti di bitume molto coerenti per un lungo periodo di tempo.

Determinare se l'elaborazione del RAP fornisce un materiale coerente nel tempo richiede test e analisi regolari del RAP stesso per documentare la variabilità dei cumuli.

In alcuni casi, lo spazio ristretto per i cumuli può limitare le pratiche di lavorazione e stoccaggio. I cantieri con aree limitate potrebbero non avere spazio sufficiente per cumuli più piccoli di RAP.

Ciò può influire sul modo in cui alcuni appaltatori utilizzino tale materiale.

La Figura 3.2.1 seguente illustra importanti pratiche per lo stoccaggio e l'elaborazione del RAP che aiuteranno a fornire e formare un materiale coerente. Un piccolo bulldozer dovrebbe spingere il RAP su cumuli a strati, facendo attenzione a non spingere il materiale sui pendii in quanto ciò eliminerà l'effetto stratificato e tenderà a far segregare il materiale mentre precipita lungo il pendio.

Solo i dozer leggeri dovrebbero lavorare sui cumuli, per ridurre al minimo la compattazione. Se il RAP accumulato è la fresatura di un singolo progetto, il materiale può essere sufficientemente consistente da essere alimentato direttamente nell'impianto. In questo caso, il caricatore dovrebbe avvicinarsi dalla parte laterale del cumulo e scavare attraverso il materiale per caricare la benna con materiali provenienti da numerosi strati.

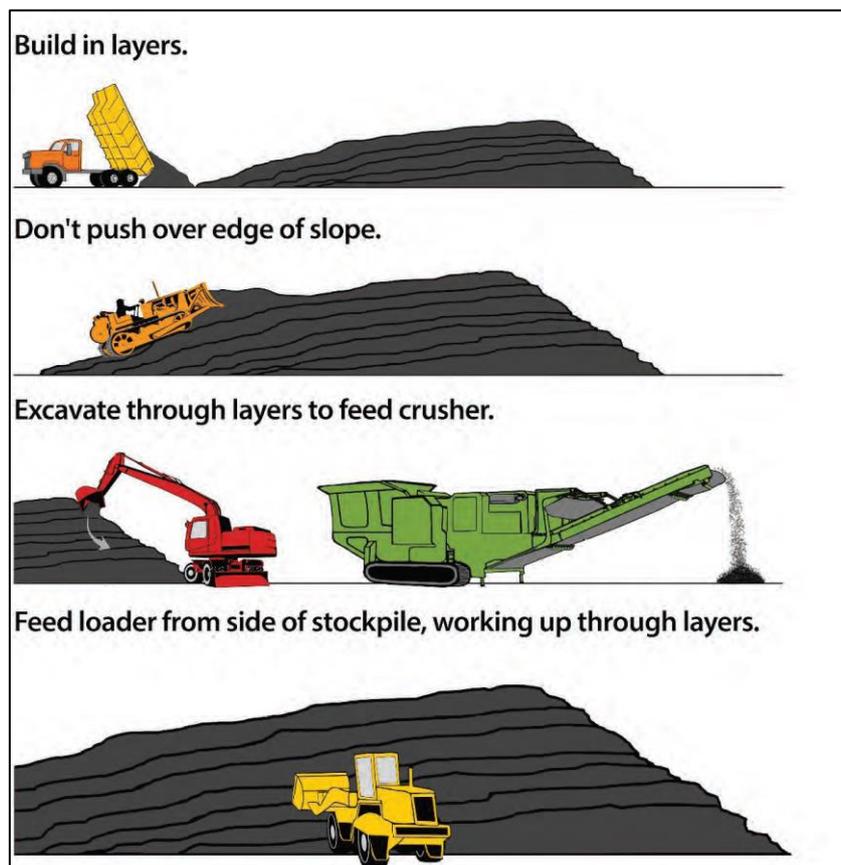


Figura 3.2.1 - Schematizzazione dello stoccaggio del RAP (<https://www.asphaltpavement.org/>).

La Figura 3.2.2 successiva mostra la superficie di lavoro di un cumulo di materiale fresato correttamente costruito a strati.

Quando il materiale immagazzinato proviene da più fonti, un escavatore dovrebbe scavare attraverso più strati per alimentare l'unità di elaborazione in modo che il materiale uscente dalla medesima unità sia un composto di RAP da diversi strati provenienti da fonti differenti.

Gli obiettivi fondamentali dell'elaborazione del RAP sono:

- 1) Creare un cumulo uniforme di materiale.
- 2) Separare o rompere i grandi agglomerati di particelle di RAP a una dimensione che possa essere essiccata, riscaldata e frantumata in modo efficiente durante la miscelazione con gli aggregati vergini.
- 3) Ridurre la dimensione massima delle particelle di aggregato nel RAP in modo che questo possa essere utilizzato nelle miscele di superficie (oppure in altre piccole miscele di dimensioni massime nominali dell'aggregato).
- 4) Ridurre al minimo la generazione di P200 aggiuntivo (cioè polvere).

Le fresature di un singolo progetto sono generalmente molto coerenti in termini di gradazione, contenuto di asfalto, proprietà degli aggregati e proprietà del legante. Pertanto, la lavorazione delle fresature potrebbe essere necessaria solo per raggiungere gli obiettivi n. 2 o n. 3. Tuttavia, come notato in precedenza, una limitazione comune all'aumento del contenuto di RAP nelle miscele di conglomerato è il suo contenuto di polvere. Poiché il RAP fresato contiene già quantità apprezzabili di P200 (tipicamente tra il 10% e il 20%) a causa della fresatura del materiale dalla carreggiata, è meglio ridurre al minimo l'ulteriore frantumazione del materiale fresato quando possibile. Pertanto, quando un appaltatore ottiene una grande quantità di fresato da un singolo progetto, è considerata una buona pratica non frantumare ulteriormente questo materiale, ma piuttosto usarlo così come lo ha ricevuto nei mix design o solo vagliare il RAP per rimuovere le particelle più grandi.



Figura 3.2.2 - Superficie di lavoro di un cumulo di RAP, in cui sono evidenti gli strati dei materiali
(<https://www.asphaltpavement.org/>).

3.3. Opzioni di lavorazione consigliate per i cumuli di fresato

Le operazioni consigliate durante la lavorazione del materiale fresato sono le seguenti:

- 1) Ricevere le fresature di progetto e accumulare il materiale in modo tale da ridurre al minimo la segregazione, drenare efficacemente le precipitazioni ed evitare la contaminazione con il materiale sottostante o con i cumuli adiacenti.

- 2) Campionare e testare alcune posizioni dei cumuli di macinazione per determinare la gradazione ricevuta e controllare la dimensione massima dell'aggregato.
- 3) Se la dimensione massima dell'aggregato delle fresature ricevute è sufficientemente piccola da poter essere utilizzata nei progetti di miscelazione desiderati, non bisogna elaborare ulteriormente le fresature. Si può così procedere con la campionatura e relativi test.
- 4) Se la dimensione massima delle particelle è troppo grande per le miscele desiderate, allora:
 - Frazionare il RAP in una dimensione uguale o inferiore al NMAS (acronimo che definisce la Dimensione Massima Nominale dell'Aggregato) delle miscele desiderate. Accumulare il RAP fine e verificarne le proprietà. Accumulare le frazioni grossolane di RAP in cumuli separati per l'uso in altre miscele NMAS più grandi; oppure,
 - Schiacciare le fresature in modo tale che raggiungano la dimensione desiderata. Questa è l'opzione meno auspicabile, perché si tradurrà in facce non più rivestite di particelle RAP e genererà polvere aggiuntiva, che può ostacolare gravemente la quantità di RAP frantumato che può essere utilizzata nei mix design. Quando un appaltatore desidera aumentare i contenuti di RAP, ma è spesso limitato dai requisiti VMA (Valori Massimi Ammissibili) o dal rapporto polvere/legante durante i progetti di miscelazione, l'obiettivo n. 4 (ridurre al minimo la generazione di P200 aggiuntivo) deve diventare una considerazione primaria nel piano di elaborazione del materiale fresato.

RAP provenienti da più fonti che hanno diverse composizioni devono essere lavorati per creare un materiale uniforme adatto per l'uso in una nuova miscela di conglomerato bituminoso.

La chiave per ottenere un RAP coerente da più fonti è un'attenta miscelazione come parte dell'operazione di elaborazione. È necessario utilizzare un bulldozer, un escavatore o un'attrezzatura simile per miscelare materiali provenienti da posizioni diverse nei cumuli di RAP a più fonti, mentre vengono immessi nell'operazione di vagliatura e frantumazione. La Figura 3.3.1 mostra un escavatore che alimenta un'unità di elaborazione del RAP con materiale proveniente da diverse fonti.



Figura 3.3.1 - Escavatore che carica il materiale in un processo di frantumazione e vagliatura del RAP (<https://www.asphaltpavement.org/>).

Poiché la frantumazione del RAP creerà inerti più fini, è meglio impostare l'operazione di frantumazione in modo che il fresato venga vagliato prima che entri nel frantoio. Ciò consentirà alle sue particelle più fini, che passano attraverso lo schermo, di bypassare il frantoio. La Figura 3.3.2 che segue mostra un'unità di frantumazione RAP portatile dotata di un piano di vagliatura in linea prima del frantoio. Solo le particelle di RAP trattenute sullo schermo passeranno attraverso il frantoio.



Figura 3.3.2 - Unità di elaborazione RAP con vagliatura a monte del frantoio (<https://www.asphaltpavement.org/>).

Alcune unità di frantumazione sono impostate in modo che tutto il RAP venga convogliato dal silo di alimentazione al frantoio, seguito da un circuito di ricircolo a valle del medesimo frantoio. Il circuito di ricircolo è progettato per restituire al frantoio le particelle più grandi che non passano attraverso il vaglio. Tuttavia, poiché tutto il materiale deve passare attraverso il frantoio al primo passaggio, c'è una buona probabilità che si verifichi la rottura per alcune particelle più piccole che non avevano bisogno di essere ridotte di dimensioni.

Per la frantumazione del RAP vengono utilizzate differenti tipologie di frantoio. Molti appaltatori preferiscono come frantoio i dispositivi di simulazione ad albero orizzontale (HSI, Horizontal Shaft Impactor, Impattatore ad albero orizzontale), come illustrato nella Figura seguente.

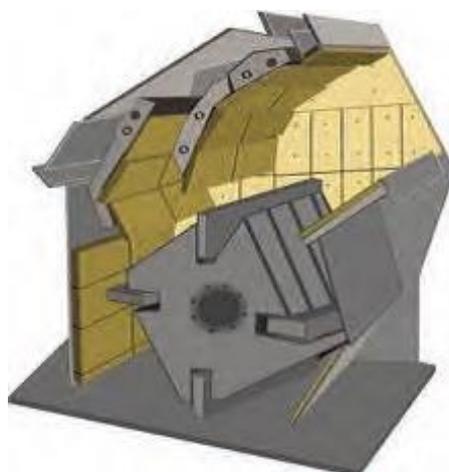


Figura 3.3.3 - Impattatore ad albero orizzontale (HSI, <https://www.asphaltpavement.org/>).

Anche i demolitori a rullo o mulino sono realizzati appositamente per la lavorazione del RAP. Questi frantoi / frantumatori di RAP sono progettati per rompere pezzi di pavimentazione o agglomerati di fresato, piuttosto che ridimensionare la gradazione dell'aggregato. I frantoi HSI in genere utilizzano una disposizione della barra di impatto a tre stadi che può essere impostata per dimensionare il materiale in base alla taglia superiore desiderata. Tuttavia, un'ulteriore frantumazione per il raggiungimento di dimensioni più piccole aumenterà la percentuale di materiale che supera il setaccio, il che spesso limita la quantità di RAP che può essere utilizzata nei progetti di miscelazione, pur rispettando i criteri di VMA (Valori Massimi Ammissibili) ed il rapporto polvere-legante.

I frantoi a compressione come quelli a ganasce e quelli a cono tendono a intasarsi a causa dell'imbavagliamento (agglomerazione) del RAP quando questo è caldo o umido. I frantoi a mulino a martelli tendono a generare materiale più fine a causa della ritenzione del materiale nella camera. I mulini a martelli possono anche richiedere una manutenzione intensiva quando il materiale si inceppa tra i martelli e le incudini. La velocità e la distanza dei frantoi a mulini a martelli possono essere regolate per ridurre la frantumazione degli aggregati.

Alcuni appaltatori hanno utilizzato fresatrici per frantumare il RAP accumulato. Questa pratica è sconsigliata in quanto potrebbe esserci il rischio di ribaltamento della fresatrice, perché il cumulo è irregolare e potrebbe non fornire un supporto stabile per la macchina più pesante.

Non sono disponibili dati sull'efficacia di questo metodo di trattamento in termini di riduzione dimensionale o coerenza del RAP.

L'umidità e la temperatura possono influenzare la frantumazione e la vagliatura del RAP. Quando questo risulta umido e/o le temperature sono elevate, il RAP sarà più appiccicoso e tenderà ad accumularsi in alimentatori e frantoi, schermi ciechi, aderire ai nastri e accumularsi sotto i trasportatori. Ciò non solo richiede una maggiore manutenzione delle unità di elaborazione del RAP e dei suoi sistemi di alimentazione per la produzione di miscele, ma può anche influenzare la gradazione ed il contenuto del materiale fresato nel conglomerato bituminoso.

Il frazionamento è un processo che sta guadagnando popolarità, nel quale il RAP viene selezionato in genere in due o tre dimensioni. Queste ultime generalmente sono 3/4" (1,91 cm) × 3/8" (0,95 cm), 3/8" (0,95 cm) × 3/16" (0,48 cm) e -3/16" (-0,48 cm). In alcuni casi, il materiale di dimensioni +3/4" (+1,91 cm) viene restituito ad un frantoio ed il materiale frantumato viene quindi restituito all'unità di vagliatura. Il vantaggio principale del frazionamento del RAP è quello di avere cumuli di diverse dimensioni che offrano una maggiore flessibilità nel soddisfare i requisiti di progettazione della miscela.



Figura 3.3.4 - Differenti campioni di RAP frazionato (<https://www.asphaltpavement.org/>).

I produttori che possono rispondere positivamente alle seguenti sette domande dovrebbero considerare la possibilità di frazionare il RAP.

- 1) Il vostro impianto può produrre miscele contenenti il 20% o più di RAP senza problemi di emissioni?
- 2) Il vostro impianto può produrre miscele contenenti il 20% o più di RAP senza una significativa riduzione del tasso di produzione?
- 3) Il mercato fornito da questo impianto consente contenuti di RAP superiori al 20%?
- 4) Il vostro impianto ha una quantità eccessiva di RAP (cioè, la quantità di RAP immagazzinata supera l'utilizzo di RAP all'anno)?
- 5) Il sito del vostro impianto ha almeno 1.000 m² di area disponibili per i cumuli per un'unità di frazionamento del RAP?
- 6) Avete difficoltà a soddisfare i requisiti di progettazione della miscela come VMA minimo, proporzione di polvere o contenuto di P200 per miscele con più del 20% di RAP?
- 7) Avete difficoltà a mantenere le miscele di RAP entro i limiti di controllo di qualità e accettazione?

La decisione se frazionare o meno il RAP in diverse dimensioni dovrebbe essere la scelta del produttore della miscela e non una specifica. Alcune agenzie hanno recentemente iniziato a richiedere il frazionamento per contenuti di RAP più elevati. Questo tipo di specifica non è consigliato, perché un approccio migliore per garantire la coerenza del RAP consiste nel fissare limiti alla variabilità dei suoi cumuli.



Figura 3.3.5 - Cumuli di RAP di dimensioni differenti (a sinistra di dimensione 3/16", ossia 0,48 cm, e a destra di 3/4", ossia 1,91 cm) (<https://www.asphaltpavement.org/>).

Nella maggior parte dei casi, il RAP elaborato verrà spostato dal luogo in cui viene vagliato e/o frantumato in un altro più conveniente per essere immesso nell'impianto di produzione del conglomerato bituminoso. Questa è un'altra opportunità per remixare il materiale e migliorarne la consistenza. Utilizzando il caricatore per scavare nei cumuli di RAP presso l'unità di elaborazione in diverse posizioni intorno alla catasta e rimescolare i carichi durante la costruzione del cumulo nella posizione finale, può essere nuovamente utilizzato per calcolare la media delle variazioni.

Come per gli aggregati vergini, esiste la possibilità che i fresati vengano separati in cumuli. Questo è un problema comune quando questi vengono creati utilizzando trasportatori fissi che consentano alle particelle di RAP di farle cadere a lunghe distanze.

Le particelle più grandi hanno più energia cinetica e tenderanno a rotolare verso il fondo del cumulo. Questo metodo di funzionamento produce particelle più grossolane con un contenuto di bitume inferiore alla base del cumulo ed un maggior contenuto più fine di RAP nella parte superiore del cumulo.

Questo problema può essere ridotto al minimo utilizzando trasportatori di tipo indicizzato che estendono e sollevano l'estremità del trasportatore all'aumentare delle dimensioni dei cumuli. Se la segregazione è evidente, è possibile utilizzare un caricatore frontale per rimescolare i medesimi cumuli.

Il contenuto di umidità degli aggregati e del RAP è un fattore primario che influisce sulla velocità di produzione e sui costi di essiccazione di un impianto di conglomerato bituminoso. Alcuni appaltatori hanno implementato approcci creativi per ridurre il contenuto di umidità nei cumuli. La migliore pratica per ridurre al minimo l'accumulo di umidità è di coprire il cumulo con un riparo o un edificio, per evitare che le precipitazioni lo raggiungano. In secondo luogo, è buona norma utilizzare cumuli conici per eliminare naturalmente la pioggia o la neve e posizzarli su una superficie pavimentata e inclinata per aiutare il drenaggio dell'acqua dal mucchio.

I cumuli di forma irregolare con depressioni superficiali che favoriscono il ristagno di acqua, dovrebbero essere corretti modellando la pila costruita con un piccolo bulldozer o un caricatore frontale. Tuttavia, l'uso di attrezzature pesanti sulla sommità dei cumuli di RAP dovrebbe essere ridotto al minimo per evitare la compattazione del RAP. Allo stesso modo, i cumuli e le fresature lavorate dovrebbero essere limitati a circa 10 metri di altezza per ridurre il potenziale di auto-consolidamento dei cumuli.



Figura 3.3.6 - Protezione dei cumuli di RAP all'interno di strutture apposite (<https://www.asphaltpavement.org/>).

I frantoi di RAP o i circuiti di frantumazione, integrati nella linea di alimentazione del RAP dell'impianto di produzione di conglomerato bituminoso, vengono utilizzati da alcuni produttori. Un esempio di frantoio in linea è mostrato nella Figura seguente:



Figura 3.3.7 - Circuito di frantumazione in linea aggiunto ad un impianto per la lavorazione di materiale sovradimensionato (<https://www.asphaltpavement.org/>).

Il vantaggio dei circuiti di frantumazione del RAP in linea è l'eliminazione dell'accumulo di particelle sovradimensionate. Tuttavia, i frantoi in linea possono modificare la gradazione del materiale fresato che viene immesso nella miscela.

I risultati dei test di gradazione sul RAP stoccato diventano quindi privi di significato ed il tecnico del controllo qualità dovrà apportare modifiche non necessarie e probabilmente sostanziali alla miscela per ottenere la gradazione e le proprietà volumetriche nelle specifiche durante l'avvio della produzione. In molti casi, ciò potrebbe portare il tecnico a ridurre il contenuto di RAP per soddisfare le tolleranze del controllo di qualità per la miscela.

Pertanto, quando si utilizzano frantoi in linea, è buona norma controllare le gradazioni estratte prima e dopo il frantoio per assicurarsi che la gradazione dell'aggregato del RAP non stia cambiando. Alcuni proprietari di impianti preferiscono riportare le particelle sovradimensionate dallo schermo al punto di lavorazione iniziale, trovando che sia più facile ed efficace rispetto all'aggiunta di un frantoio in linea.

I frantoi a rulli in linea ed i frantoi ad urto a velocità ridotta sono progettati per rompere gli agglomerati di RAP piuttosto che modificare la gradazione. Esempi di frantoi a rulli sono mostrati nella Figura 3.3.8 che segue. Si consiglia di eseguire un semplice controllo della gradazione estratta dei campioni di fresato prima e dopo il frantoio in linea per determinare se si stia correttamente abbattendo l'aggregato del RAP.



Figura 3.3.8 - Esempi di frantoi a rulli (<https://www.asphaltpavement.org/>).

La tabella sottostante sintetizza i vantaggi e gli svantaggi delle varie opzioni di elaborazione del RAP:

Tabella 3.3.1 - Vantaggi e svantaggi nell'uso del RAP.

Possibili vantaggi e svantaggi nell'utilizzo del RAP		
Processo	Possibili vantaggi	Possibili svantaggi
Utilizzo della fresatura senza ulteriori lavorazioni	<ul style="list-style-type: none"> - Evita l'ulteriore frantumazione delle particelle di aggregato nel RAP, che può consentire un contenuto di RAP più elevato nelle miscele. - Costo più basso delle opzioni di elaborazione del RAP. - È probabile che le fresature di grandi progetti abbiano una gradazione ed un contenuto di bitume coerenti. 	<ul style="list-style-type: none"> - Richiede più cumuli di RAP presso l'impianto. - Le fresature dei singoli progetti sono diverse; pertanto, quando un particolare cumulo di fresature è esaurito, è necessario sviluppare nuovi progetti di miscelazione con altri RAP.
Monitorare il RAP prima della frantumazione	<ul style="list-style-type: none"> - Limita la frantumazione delle particelle inerti nel RAP, che riduce la generazione di polvere. 	<ul style="list-style-type: none"> - Poche unità di frantumazione e vagliatura RAP sono impostate per pre-vagliare il RAP.
Frantumare il RAP in un'unica taglia	<ul style="list-style-type: none"> - Consente al RAP elaborato di essere utilizzato in molti diversi tipi di mix. - Fornisce generalmente una buona uniformità dai materiali RAP ottenuti da più fonti. - È possibile generare grandi cumuli di RAP per la produzione annuale. 	<ul style="list-style-type: none"> - Tende ad aumentare il contenuto di polvere dei cumuli di RAP, il che può limitare la quantità di RAP che può essere utilizzata nei mix design.
Frazionamento del RAP	<ul style="list-style-type: none"> - L'utilizzo di cumuli di RAP di dimensioni diverse offre una maggiore flessibilità nello sviluppo di progetti di miscelazione. 	<ul style="list-style-type: none"> - Richiede più spazio per molteplici cumuli più piccoli. - Opzione di elaborazione più costosa (con costo dell'unità di frazionamento e in più il contenitore di alimentazione a freddo del RAP aggiuntivo). - Può generare un eccesso dimensionale del RAP se i mix design non sono bilanciati con il quantitativo di RAP corretto.

3.4. Campionamento e Test del RAP

In questo paragrafo si andranno a trattare i metodi e le pratiche migliori per il campionamento e le prove sul RAP come parte di un programma di gestione della qualità. Un piano di campionamento e test ben eseguito per il fresato è necessario per valutare la consistenza dei suoi cumuli e per ottenere proprietà rappresentative da utilizzare nei progetti di miscelazione.

Esiste un malinteso comune sul fatto che i cumuli di fresato siano altamente variabili e, quindi, l'utilizzo di contenuti di RAP più elevati nelle nuove miscele di conglomerato bituminoso porterà a una maggiore variabilità nelle miscele. Tuttavia, i cumuli di RAP ben gestiti hanno una gradazione più consistente rispetto agli aggregati vergini (Nady, 1997). Questo è stato il risultato di uno studio del 1998 dell'International Center for Aggregate Research (Estakhri et al., 1998) e confermato con dati recenti raccolti dall'NCAT (National Center for Asphalt Technology, West, 2009). Considerando che il RAP è stato ottenuto da un unico progetto di fresatura in cui la pavimentazione è stata realizzata con miscele soggette ad elevati standard di garanzia di qualità, non sorprende che le fresature avessero gradazione, contenuto di bitume e proprietà leganti coerenti. Sebbene possa essere inaspettato, il RAP elaborato da più fonti può anche essere coerente in termini di gradazione e contenuto di bitume come le fresature.

Il campionamento di almeno un set di test per 1.000 tonnellate di RAP è considerato una buona pratica. Questo è generalmente più frequente di quanto richiesto per gli aggregati vergini, ma è

appropriato per un componente che comprenderà una grande porzione di una miscela di conglomerato bituminoso. È necessario eseguire un minimo di 10 test su un cumulo di RAP per ottenere buoni risultati statistici per un'analisi coerente. Alcune agenzie consentono una frequenza di test ridotta dopo che è stata dimostrata la coerenza delle proprietà del materiale dei cumuli.



Figura 3.4.1 - RAP elaborato con un aspetto uniforme (<https://www.asphaltpavement.org/>).

Si consiglia di campionare cumuli di RAP mentre vengono creati nel luogo in cui verranno immesse nell'impianto di produzione. I campioni provenienti dalle diverse posizioni intorno ai cumuli non dovrebbero essere combinati, poiché i risultati delle diverse posizioni verranno utilizzati per calcolare le statistiche di variabilità. Il campionamento al momento della costruzione del cumulo sarà più facile e più rappresentativo di quello rispetto ai campioni prelevati successivamente, dopo che si forma una crosta sullo stesso cumulo di RAP. Quando quest'ultimo è stato posizionato da parecchio tempo, è generalmente difficile scavare con una pala. Il modo migliore per campionare i cumuli di RAP esistenti è con l'assistenza di un caricatore frontale.

Questo metodo è descritto di seguito e illustrato nella sequenza di immagini nelle Figure 3.4.2 e 3.4.3.

- 1) Utilizzare un caricatore frontale per scavare il cumulo di RAP pronto per l'uso.
- 2) Svuotare la pala su una superficie pulita per formare una riserva di campionamento in miniatura.
- 3) Utilizzare il caricatore per far passare la lama attraverso la parte superiore del cumulo realizzato di dimensioni inferiori, per creare una superficie piana.
- 4) Creare un cumulo di piccole dimensioni pronto per essere campionato.
- 5) Utilizzare una pala con estremità quadrata per ottenere campioni dalla superficie di questo piccolo cumulo.
- 6) Campionare da tre punti sulla superficie.
- 7) Combinare i campioni prelevati da questo stesso cumulo e successivamente suddividerli in porzioni di prova.
- 8) Ripetere questi passaggi per ottenere campioni in altre posizioni intorno ai cumuli di RAP. Non combinare campioni provenienti da posizioni diverse.

Per i progetti che utilizzano impianti di conglomerato bituminoso portatili installati su un sito temporaneo adiacente o vicino al progetto, in genere l'unico RAP disponibile è quello delle fresature generate da quel progetto. In queste situazioni, il RAP viene normalmente stoccato nel sito dell'impianto subito dopo che quest'ultimo sia stato installato, continuando contemporaneamente le operazioni di pavimentazione. Per preparare un mix design utilizzando le fresature di progetto, è

necessario ottenere campioni di RAP dalla carreggiata circa un mese prima della messa a punto dell'impianto.



Figura 3.4.2 - Step per campionare correttamente il RAP (1, <https://www.asphaltpavement.org/>).



Figura 3.4.3 - Step per campionare correttamente il RAP (2, <https://www.asphaltpavement.org/>).

Il metodo migliore per ottenere campioni di RAP è utilizzare una fresatrice per fresare piccole aree della carreggiata alla profondità di fresatura pianificata in fase di progetto, in posizioni rappresentative selezionate. Ciò richiede la mobilitazione di una fresatrice ed altre attrezzature per riempire le aree campionate, nonché il controllo del traffico per le chiusure temporanee delle brevi corsie interessate dall'intervento.

È molto probabile che questo metodo di campionamento produca provini rappresentativi di RAP per il mix design.

È stato riscontrato che l'uso di una minipala, con un piccolo attacco nella parte alta della fresatura, produca una gradazione diversa rispetto ad una fresatrice di grandezza naturale. Inoltre, è stato riscontrato che fresare nuclei stradali e frantumarli in laboratorio non produca materiale rappresentativo per i progetti di miscelazione.

Per i mix design che utilizzano materiale fresato, i dati necessari dai test sul RAP sono:

- Contenuto di legante.
- Gradazione dell'aggregato recuperato dal RAP.
- Peso specifico dell'aggregato.
- Proprietà dell'aggregato recuperato dal RAP.
- Proprietà del legante, per contenuti di RAP elevati.

In alcuni casi, potrebbero essere necessari ulteriori test sugli aggregati. Ad esempio, se il RAP dovesse essere utilizzato in una miscela di superficie per il traffico ad alta velocità, alcune agenzie potrebbero richiedere test per valutare la lucidatura o la composizione mineralogica dell'aggregato.

Infine, gli altri due parametri da calcolare in questa sede e oggetto della tesi sono:

- La coesione (c) dei cumuli di fresato.
- L'angolo di resistenza al taglio (ϕ).

Ottenuti i campioni di fresato, l'idea è quella di eseguire su di essi una serie di test a taglio diretto, come mostrato nell'esempio di Figura 3.4.4 seguente, in cui si evince come in questo caso siano già presenti i valori di sforzo normale e tangenziale ricavati proprio dai test di taglio diretto eseguiti sul materiale fresato, con conseguente calcolo di coesione e angolo di resistenza al taglio:

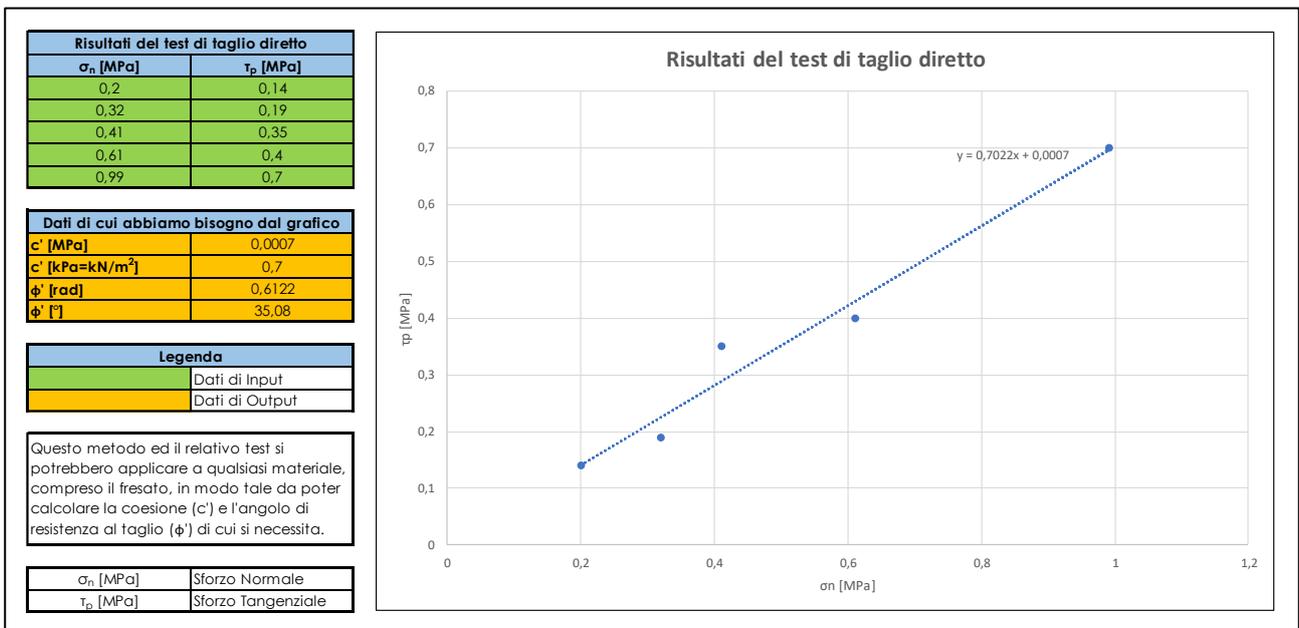


Figura 3.4.4 - Esempio di come ricavare i valori di coesione (c') ed angolo di resistenza al taglio (ϕ'), tramite l'esecuzione di test di taglio diretto sul materiale fresato, che permettono di calcolare sforzo normale e tangenziale e, successivamente, i parametri c' e ϕ' .

3.5. Preoccupazioni per la produzione di miscele contenenti RAP

Alcune delle considerazioni importanti per la produzione di conglomerati bituminosi contenenti RAP sono state menzionate nei paragrafi precedenti. Queste includono la riduzione al minimo dell'umidità nei cumuli di RAP ed il controllo della loro uniformità nel momento in cui vengono immessi nell'impianto.

I contenitori di alimentazione del RAP ed i trasportatori sono simili alle loro controparti inerti; tuttavia, tali contenitori hanno in genere lati più ripidi rispetto a quelli di alimentazione degli inerti per evitare l'accumulo di RAP sul fondo del contenitore, che può arrestare o limitare il suo flusso sulla cinghia del trasportatore. Se un mix design utilizza più di una dimensione di RAP frazionato, l'impianto deve essere dotato dello stesso numero di contenitori di alimentazione.

Negli Stati Uniti, il RAP viene tipicamente aggiunto all'impianto in un punto dopo la zona di combustione del bruciatore in modo che il RAP stesso non venga a contatto con la fiamma o con gas estremamente caldi. Se il RAP è esposto ai gas caldi della combustione, il relativo legante emette fumo e può essere gravemente danneggiato. La maggior parte degli impianti moderni è progettata per gestire percentuali più elevate di RAP aggiungendolo a valle del bruciatore, disponendo di un essiccatore in controcorrente. Gli impianti progettati per contenuti di RAP più elevati forniscono anche tempi di miscelazione più lunghi per l'aggregato, il RAP ed il legante vergine.

L'approccio all'essiccazione e al riscaldamento del RAP negli Stati Uniti consiste nell'utilizzare il calore in eccesso dall'aggregato vergine per essiccare e aumentare la temperatura del RAP. In altri termini, l'aggregato vergine è "surriscaldato" ben al di sopra della temperatura di miscelazione in modo che il calore in eccesso possa essere trasferito al RAP durante la miscelazione. Pertanto, quando si utilizza più RAP, l'aggregato vergine deve essere riscaldato a temperature molto più elevate. Ciò può creare il rischio di incendio nel miscelatore o nella sezione di miscelazione del tamburo, se l'alimentazione del RAP viene interrotta a causa di un cancello ostruito, di un nastro rotto o di un ingresso dell'asciugatrice intasato ed il bitume vergine entra in contatto con l'aggregato surriscaldato.

Come notato in precedenza, il contenuto di umidità nel RAP ha anche un grande impatto sulla temperatura alla quale l'aggregato vergine deve essere surriscaldato. È necessaria una considerevole energia (cioè calore) per convertire l'umidità nel RAP in vapore prima che la temperatura delle sue particelle aumenti al di sopra del punto di ebollizione dell'acqua. Le linee guida per le temperature di surriscaldamento degli aggregati sono fornite dai produttori di impianti. L'aggregato vergine surriscaldato non danneggia il bitume liquido del RAP, perché protetto dal vapore formatosi dalla sua essiccazione. Il vapore sposta l'ossigeno prevenendo, così, l'ossidazione del conglomerato bituminoso.

Come con l'aggregato vergine, un contenuto di umidità errato per l'immissione di RAP nei controlli dell'impianto, comporterà l'aggiunta di una quantità errata di bitume vergine alla miscela. Le variazioni del contenuto di umidità dell'aggregato vergine e/o del RAP nel corso della giornata porteranno anche a variazioni del contenuto di bitume della miscela prodotta.

Contenuti di RAP più elevati possono anche richiedere l'uso di un legante vergine di grado più morbido, un agente di riciclaggio o un ringiovanente. Ciò richiederebbe serbatoi aggiuntivi e possibilmente anche pompe e misuratori supplementari per questi materiali.

4. SICUREZZA PER LO STOCCAGGIO DEL RAP

4.1. Incidenti per i mezzi da cantiere nella formazione dei cumuli di materiale

I cumuli di fresato, per essere creati, hanno bisogno di una maggiore attività di veicoli da cantiere. Questa attività si verifica principalmente in cima al cumulo, dove avviene lo scarico del materiale, ed alla base della stessa pila, dove avviene invece il carico del materiale. Gli incidenti relativi ai cumuli di solito coinvolgono autocarri da trasporto, caricatori frontali e apripista, ma possono essere coinvolti anche autocarri stradali, camion utilitari, ruspe e pedoni. Anche la costruzione di cumuli con nastri trasportatori presenta una serie unica di pericoli durante la loro formazione.

Gli incidenti si verificano in tutte le industrie minerarie, anche durante lo scarico del materiale, che normalmente è associato a strutture permanenti o semipermanenti come discariche e cumuli di materiale.

4.2. Tecniche di stoccaggio del materiale

Le tecniche di stoccaggio variano a seconda delle dimensioni dell'impianto, del tipo di materiale movimentato e del tipo di attrezzatura disponibile. Alcune tecniche sono più sicure di altre e dovrebbero essere utilizzate quando è possibile applicarle.

Un buon metodo di stoccaggio prevede che il camion di trasporto scarichi il suo carico all'indietro dalla cresta del mucchio. Il materiale viene, quindi, spinto oltre il bordo da un apripista o da un caricatore frontale utilizzando altro materiale. Questo metodo consente la facile costruzione e manutenzione delle barriere. Inoltre, mantiene anche i mezzi lontano dal bordo della pila, dove si hanno maggiori possibilità di essere coinvolti in un incidente. Quando questo metodo viene combinato con operatori ben addestrati e ispezioni di routine ove siano presenti segni di instabilità del pendio, ciò riduce drasticamente la possibilità di un incidente.

Inoltre, per effettuare al meglio lo stoccaggio del materiale, è necessario che il camion di trasporto scarichi il suo carico direttamente sulla cresta del mucchio. Affinché questo metodo possa essere eseguito in sicurezza, è necessario mantenere le barriere adeguate e gli operatori delle attrezzature ben addestrati in merito ai pericoli durante la formazione dei cumuli. È necessario considerare altri fattori, tra cui il tipo di materiale, le sue condizioni, le condizioni meteorologiche, la tipologia e le dimensioni del camion di trasporto. È anche importante ispezionare regolarmente l'area dell'impianto in cui avviene lo stoccaggio, per capire se ci siano segni d'instabilità del pendio. Quando si utilizza questo metodo è importante assicurarsi che il materiale non venga rimosso dalla base della pila dove si sta verificando lo scarico.

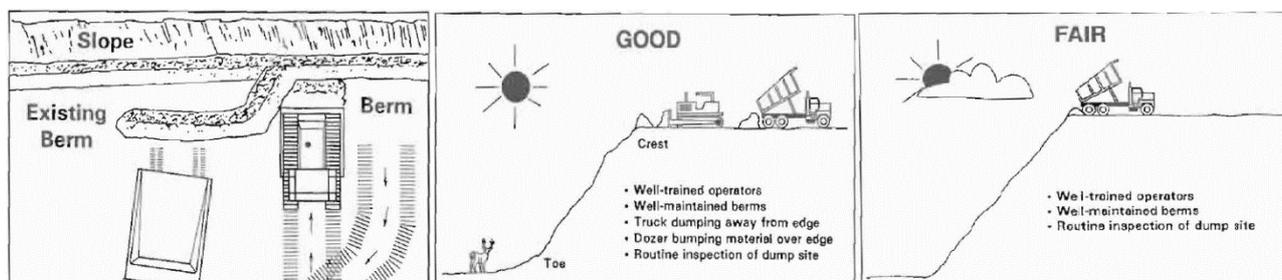


Figura 4.2.1 – Metodi di stoccaggio corretti del materiale (vista dall'alto e laterale, Stockpiling Safety, U.S. Department of Labor).

Un metodo "pericoloso" di stoccaggio, invece, prevede che il camion di trasporto scarichi il suo carico direttamente sulla cresta di un cumulo dove il materiale è stato rimosso dalla base. La rimozione del materiale dalla base di una pila generalmente si traduce in una pendenza più ripida. Un pendio ripido è meno stabile e non può sostenere tanto peso.

Ciò crea un pericolo per le apparecchiature che operano in prossimità della cresta del cumulo di materiale, che rischiano di essere coinvolte in un cedimento del pendio. Il supervisore dell'impianto, l'operatore del caricatore e il conducente del camion di trasporto devono garantire che lo scarico non avvenga dove il pendio è stato reso più ripido dalle attività di bonifica. Dovrebbe essere vietata la pratica di scaricare il materiale oltre il bordo di un cumulo, in un'area in cui il pendio è stato caricato in punta.

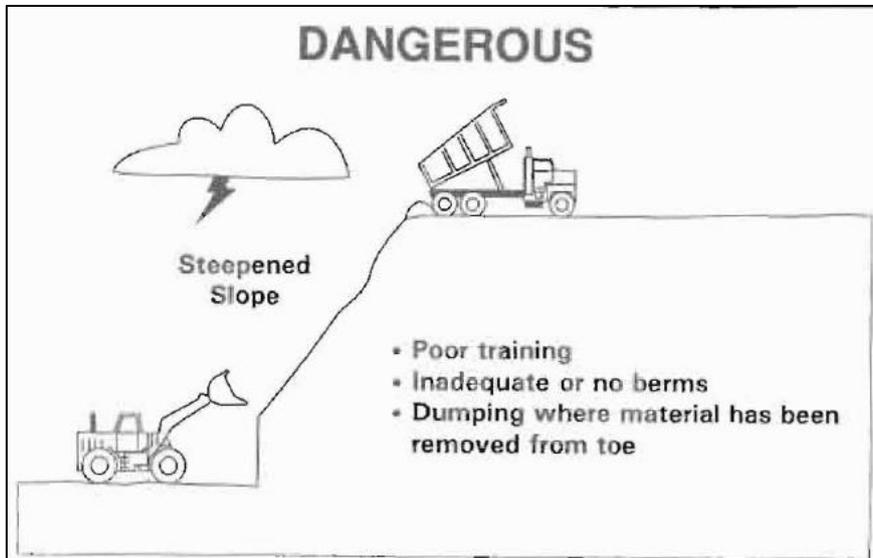


Figura 4.2.2 - Metodo pericoloso per lo scarico del materiale in cima al cumulo (Stockpiling Safety, U.S. Department of Labor).

Un ottimo metodo "alternativo" di accumulo prevede la costruzione di cumuli a strati. In questo metodo, i camion di trasporto scaricano il materiale in cumuli su un unico livello. Dopo che un livello è completo, viene quindi levigato da un apripista e lo scarico continua sullo strato successivo. Il funzionamento dell'attrezzatura mobile che compatta lo strato precedente si traduce in una maggiore resistenza del mucchio. Inoltre, il metodo consente di mantenere l'angolo di inclinazione inferiore all'angolo di ripiego, con conseguente maggiore stabilità del pendio. Anche i camion di trasporto sono tenuti lontani dal bordo della pila. Dal punto di vista del controllo di qualità, questo metodo evita anche una separazione dimensionale indesiderata del materiale.

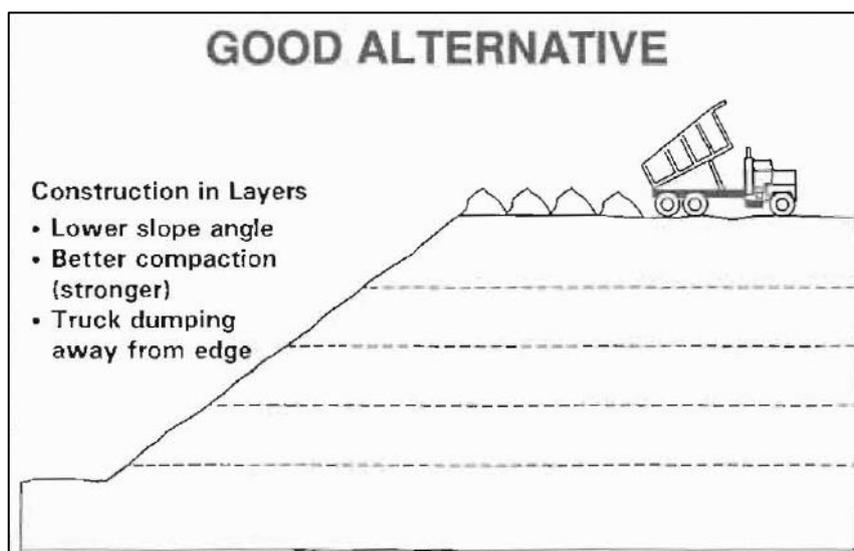


Figura 4.2.3 - Metodo alternativo per lo scarico del materiale, per la creazione, in sicurezza, dei cumuli (Stockpiling Safety, U.S. Department of Labor).

4.3. Caricamento in punta del materiale

Con "caricamento in punta" ci si riferisce alla rimozione di materiale dalla base o dalla punta del cumulo. Questo di solito viene fatto dai caricatori frontali. Il materiale viene caricato sui camion per la spedizione o viene alimentato direttamente in frantoi o alimentatori per un'ulteriore lavorazione. Questo metodo spesso si traduce in un pendio ripido con stabilità ridotta. Ciò rappresenta un pericolo per l'operatore del caricatore alla base della pila, il quale deve controllare continuamente che non vi sia l'instaurarsi di un collasso del pendio ripido.

Gli operatori dell'attrezzatura sul bordo superiore del cumulo corrono il rischio di essere coinvolti in un cedimento del pendio. Il peso di un camion da trasporto, in particolare, può causare il cedimento di una pendenza indebolita. Quando ciò accade, il camion spesso cade lungo il pendio con risultati disastrosi. Il carico in punta presenta anche un pericolo per i pedoni alla base del cumulo, in particolare per i conducenti dei camion, che possono essere inghiottiti dalla caduta di materiale mentre operano tra il loro camion ed il medesimo cumulo di materiale.

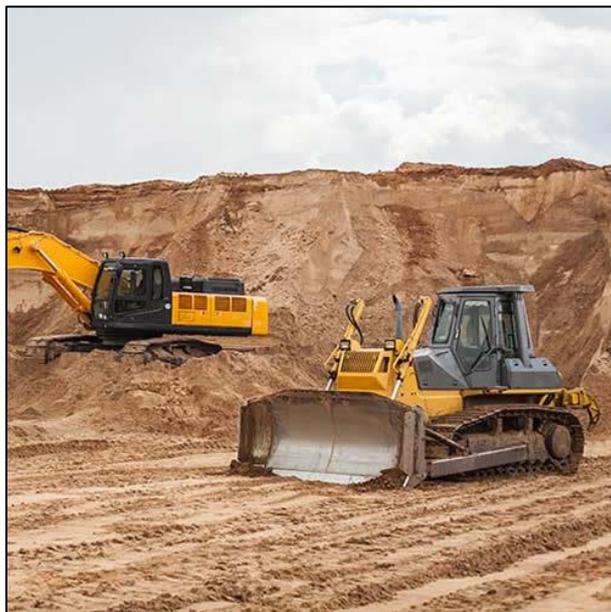


Figura 4.3.1 – Scarico/carico di materiale alla base dei cumuli (waynet.it).

Il caricamento in punta può provocare pendenze così indebolite che il pendio, compresa la banchina, collasserà quando un camion indietreggia per scaricare. Le banchine in questi casi danno un falso senso di sicurezza all'operatore del camion di trasporto, poiché si presume che ci sia una pendenza stabile. Anche la rimozione del materiale dalla base del cumulo può provocare il collasso della banchina. Ciò potrebbe consentire ai conducenti dei mezzi di trasporto di tornare indietro semplicemente oltre il bordo di una pila quando, inaspettatamente, una banchina non è più presente nello stesso posto.

Quando si carica in punta:

- L'operatore del caricatore deve prestare attenzione al materiale che si stacca dalla pila e alla caduta di pezzi congelati o consolidati.
- L'operatore del caricatore deve assicurarsi che i camion di trasporto non scarichino in cima ad una pila dove la punta sia stata rimossa.
- I conducenti dei camion non devono camminare intorno alla base del cumulo o tra i mezzi di trasporto e lo stesso cumulo.
- I conducenti dovrebbero regolarmente osservare la base del cumulo dove stanno scaricando, per assicurarsi che questo non sia stato sovraccaricato dalla rimozione del materiale.

- Gli stessi conducenti dei mezzi di trasporto del materiale dovrebbero scaricare solo in un'area designata che è stata preparata con la costruzione di banchine e dopo un'ispezione di un supervisore per verificare eventuali segni d'instabilità del pendio.

Se la pendenza del cumulo è troppo ripida:

- Il camion di trasporto deve scaricare a una distanza di sicurezza dalla cresta. Quindi, il materiale può essere scaricato oltre il bordo da un apripista o da un caricatore frontale, utilizzando altro materiale.
- Il camion di trasporto può anche scaricare alla base del cumulo, adiacente al punto in cui sta operando il caricatore.
- Non è consentito scaricare sulla cresta fino a quando il materiale in cima non raggiungerà la sua forma originale, le banchine non verranno costruite e non viene completata un'ispezione per la stabilità del pendio.

4.4. Instabilità dei pendii di un cumulo

I cumuli per loro natura sono solo marginalmente stabili. Quando il materiale viene scaricato oltre il bordo di una pila, scivola lungo il pendio e si ferma all'angolo di riposizionamento. Nell'angolo di riposo il mucchio è abbastanza forte da sostenere il proprio peso. La resistenza dei cumuli aumenterà spesso di una certa quantità a causa della compattazione e delle vibrazioni delle apparecchiature mobili che operano su di essi. Ciò può essere evidente dalle pendenze più ripide che si formano quando il materiale viene rimosso dalla base della pila. Tuttavia, questa resistenza aggiuntiva può essere fuorviante, poiché una pendenza troppo ripida potrebbe non supportare il peso dell'attrezzatura mobile e dei mezzi che operano sui cumuli all'interno degli impianti di produzione. Inoltre, l'umidità all'interno dei cumuli consentirà al pendio di mantenere un angolo più ripido. Questa indicazione di una maggiore resistenza del pendio è nota come "**coesione apparente**". Questa forza può scomparire rapidamente con un aumento o una diminuzione dei livelli di umidità. L'apparente coesione è anche vulnerabile al collasso indotto dalle vibrazioni dell'apparecchiatura. Il congelamento può anche provocare un aumento temporaneo della resistenza dei cumuli. Questo suo incremento, però, è molto variabile e può scomparire rapidamente con condizioni al contorno che cambiano nel tempo. In generale, l'umidità od il congelamento, daranno un'indicazione temporanea della resistenza su cui non si può fare affidamento.

A causa della resistenza marginale dei cumuli, è importante segnalare qualsiasi segno di instabilità del pendio.

Se apparisse uno dei seguenti segnali, il bordo del pendio potrebbe non essere sicuro per l'operatività dei mezzi mobili di cantiere:

- 1) Crepe lungo la cresta.
- 2) Crolli lungo il pendio.
- 3) Rigonfiamento in punta.

1) Le crepe lungo il bordo di un pendio indicano che quest'ultimo abbia difficoltà a sostenere il proprio peso. Quello aggiuntivo dell'attrezzatura mobile sarebbe probabilmente sufficiente a causare un suo cedimento. Quando vengono osservate crepe, la zona deve essere segnalata da banchine o coni fino a quando la condizione non sia corretta. Una crepa è un segnale di avvertimento importante e non dovrebbe essere nascosta. Lo scarico può continuare ad una distanza di sicurezza dalle fessure con il materiale che viene scaricato oltre il bordo, preferibilmente da un apripista cingolato. Il dozer non deve operare oltre le fessure.

Se la pendenza indebolita è il risultato di un carico in punta, il materiale deve essere scaricato oltre il bordo fino a quando la pendenza non raggiungerà l'angolo di riposo originale. Spingere il materiale oltre il bordo fino a ottenere l'angolo di riposo originale dovrebbe rafforzare la pila sufficientemente da consentire un ulteriore scarico finale oltre il bordo. Il materiale di scarico alla base del cumulo

aggiungerà ulteriore resistenza. Se la stabilità del pendio dovesse risultare ancora incerta, lo scarico dovrebbe continuare alla base del cumulo piuttosto che sulla sua cima.



Figura 4.4.1 - Possibile presenza di crepe lungo la cresta di un cumulo (iterchimica.it).

2) I crolli di materiale ai lati di un cumulo sono la prova che il pendio non può sostenere il proprio peso e sta cedendo. Normalmente si verifica su cumuli di materiale costituiti da sovraccarico e si verifica quando l'angolo di inclinazione, vicino alla sommità del cumulo, è troppo ripido (spesso causato dalla tendenza delle particelle fini di "sostare" temporaneamente in cima alla pila). Quando si osserva un cedimento, bisogna assolutamente arrestare lo scarico di materiale oltre il bordo. I camion di trasporto dovrebbero scaricare il loro carico ad una distanza di sicurezza dal bordo del pendio e dovrebbero essere usati dei bulldozer per spingere il materiale in cima al cumulo.

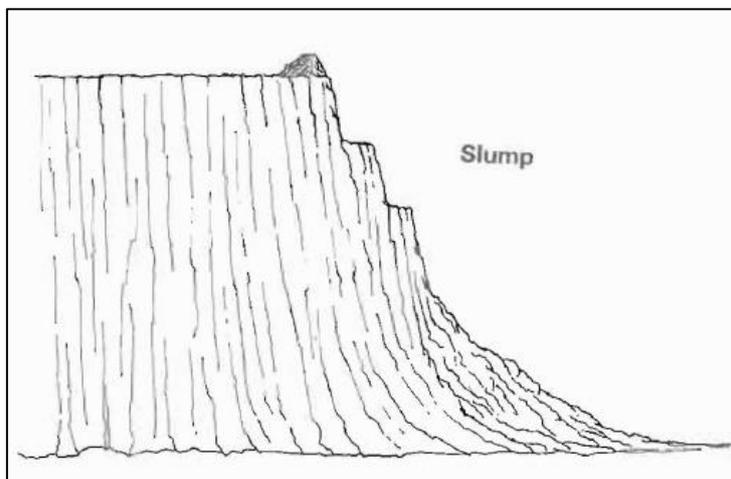


Figura 4.4.2 - Rappresentazione di un crollo ai lati di un cumulo (Stockpiling Safety, U.S. Department of Labor).

3) Il rigonfiamento alla base di una pila è la prova che la fondazione non può sostenere il suo peso. Questo è raro e di solito si verifica in impianti che ricevono carichi di materiale in grande quantità. Il movimento del materiale è generalmente molto lento. Il rigonfiamento può indicare la possibilità di un cedimento del pendio che potrebbe comportare il movimento del materiale fino alla cima del cumulo. Quando si osserva un rigonfiamento vicino alla base, le operazioni di scarico devono essere attentamente monitorate, si devono eseguire frequenti ispezioni per rilevare segni di cedimento imminente (come crepe alla sommità della pila) e valutare minuziosamente la stabilità del pendio.

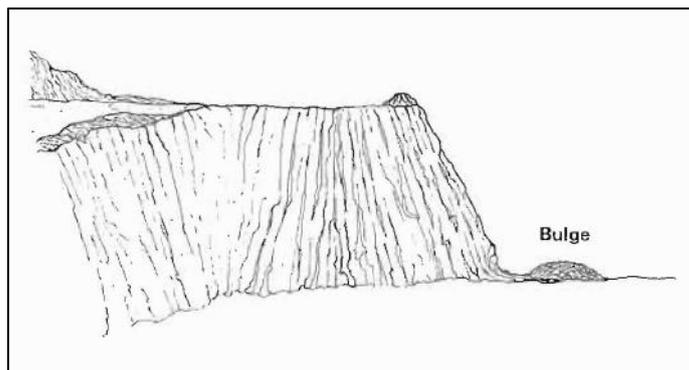


Figura 4.4.3 - Rappresentazione di un rigonfiamento del materiale alla base del cumulo (Stockpiling Safety, U.S. Department of Labor).

I segni d'instabilità del pendio possono essere difficili da vedere quando si utilizzano apparecchiature mobili. Per questo motivo un'ispezione di un supervisore a piedi dovrebbe integrare la costante vigilanza dell'operatore dell'apparecchiatura. In generale, in caso di terreno instabile:

- I luoghi di scarico devono essere ispezionati visivamente prima dell'inizio dei lavori e se le condizioni del terreno lo richiedono.
- Se fosse dimostrato che il terreno in un punto di scarico non possa supportare l'attrezzatura mobile, il materiale dovrebbe essere scaricato ad una distanza di sicurezza dal bordo dell'area instabile del pendio.

In caso di ispezione giornaliera dei cumuli di materiale superficiale tramite persona certificata e report di comprovata ispezione, si ha che:

- Almeno una volta durante ogni turno di lavoro, o più spesso, se necessario, per la sicurezza, ciascuna area di lavoro attiva deve essere esaminata da una persona certificata designata dall'operatore per condurre tali verifiche per valutare eventuali condizioni pericolose annotate, le quali devono essere segnalate all'operatore e corrette sempre da quest'ultimo.

4.5. Macchine ed attrezzature negli impianti di produzione

4.5.1. Dumper e camion per il trasporto del materiale

Gli operatori devono prestare attenzione quando utilizzano i loro camion di trasporto vicino alla cresta di un cumulo. Devono sapere dove siano i loro pneumatici posteriori rispetto al bordo del pendio. Un numero sorprendente di incidenti che avvengono sui cumuli di materiale, si verifica quando un mezzo carico si trova semplicemente oltre il bordo di un cumulo. Quando gli operatori terminano lo scarico sulla sommità di una pila di materiale, devono assicurarsi di trovarsi in un'area designata con banchine adeguate o altri dispositivi di impedimento.



Figura 4.5.1.1 – La posizione degli pneumatici posteriori è fondamentale quando si lavora sui bordi dei cumuli (Stockpiling Safety, U.S. Department of Labor).

I vetri del mezzo di trasporto devono essere puliti e adeguatamente regolati. In caso di scarico notturno dovrebbe esserci un'illuminazione adeguata, permettendo all'operatore di verificare la corretta posizione del suo mezzo rispetto al bordo. I freni devono essere testati e mantenuti per assicurarsi che funzionino correttamente.

Gli operatori dovrebbero indietreggiare lentamente per assicurarsi che ci sia tempo sufficiente per reagire e fermarsi prima di entrare in contatto con la banchina, sulla quale non si può fare affidamento per arrestare il movimento di un dumper carico. Quando viene utilizzato un osservatore, questo deve posizionarsi dove un suo segnale possa essere chiaramente visto e riconosciuto. Gli osservatori dovrebbero utilizzare luci di segnalazione di notte e quando la visibilità risulti limitata.

Indietreggiare sopra una banchina è una causa comune di incidenti sui cumuli. Una regola pratica normale è che l'altezza della banchina dovrebbe essere uguale all'altezza dell'asse centrale del camion più grande che utilizza il sito di scarico. Le banchine dovrebbero essere costruite abbastanza resistenti in modo tale da resistere ad un impatto moderato. Tuttavia, non dovrebbero essere usate per arrestare il moto di un camion, ma come indicatore visivo, rappresentando il punto in cui il camion deve essere fermato o per fornire un riferimento quando le ruote posteriori la toccano.

Pertanto, una banchina dovrebbe essere utilizzata solo ed esclusivamente come struttura di riferimento oltre la quale un mezzo non deve muoversi.

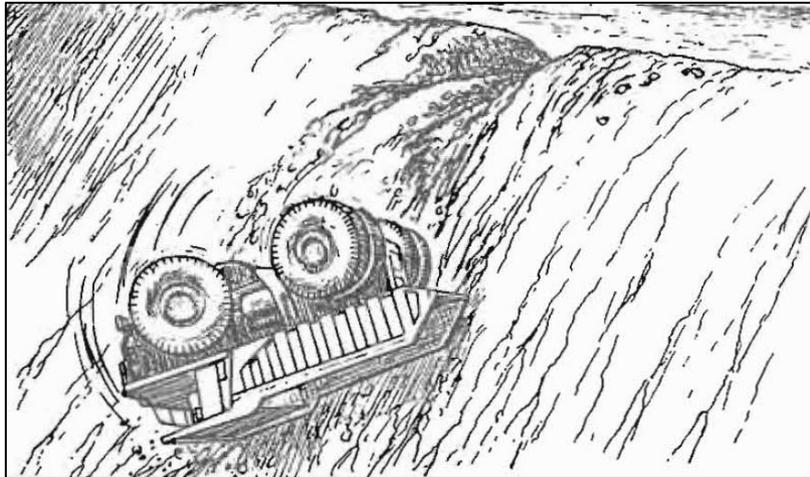


Figura 4.5.1.2 - Non bisogna utilizzare una banchina per arrestare il moto di un camion sul bordo di un cumulo (Stockpiling Safety, U.S. Department of Labor).

Se è presente una banchina, non si deve presumere che sia sicuro scaricare il materiale. L'autista del camion dovrebbe verificare che il materiale non sia stato rimosso dalla punta del cumulo. Dovrebbero essere eseguite anche ispezioni di supervisione di routine per garantire che la pendenza sia stabile. Le normative stabiliscono che, per quanto concerne le restrizioni del sito dell'impianto, banchine, barriere di sicurezza, ganci di sicurezza o simili dispositivi di impedimento devono essere previsti nei punti di scarico in cui sussista il rischio di traslazione o ribaltamento.

Le stesse linee guida sono applicate per attrezzature di carico, trasporto ed installazioni.

Pertanto, a seconda dell'impianto di produzione o di scarico specifico, può essere utilizzato un dispositivo di impedimento diverso da una semplice banchina. Quindi, i conducenti dei camion devono assicurarsi di scaricare solo dove siano presenti banchine ed altri dispositivi di impedimento, evitando crolli o incidenti da caduta di mezzi operanti in cima o sui bordi dei cumuli di fresato all'interno degli impianti di produzione.

I conducenti devono scaricare solo in una posizione designata dal supervisore. Se un conducente non è sicuro della posizione in cui scaricare, allora non deve farlo. Infatti, dovrebbero contattare il proprio supervisore e determinare la posizione di scarico corretta piuttosto che correre il rischio e scaricare in un'area potenzialmente pericolosa. Un supervisore può designare le posizioni di scarico

in base non solo ai requisiti di produzione, ma anche a considerazioni di sicurezza di cui i conducenti non sono a conoscenza. Quando questi ultimi vengono assegnati ad una discarica o ad un impianto di produzione, devono stare all'erta per la presenza di potenziali pericoli e avvisare immediatamente il supervisore se viene individuato un problema o un potenziale pericolo.

Se lo scarico venisse effettuato in un'area in cui vengono utilizzati dozer per spingere il materiale oltre il bordo della pila, dovrebbe essere consentito loro di svolgere il proprio lavoro. I conducenti devono scaricare il carico da una posizione più interna rispetto al bordo del pendio per sicurezza. Gli incidenti si verificano abitualmente quando un camion scarica oltre il bordo dove è stato assegnato un apripista per spingere il materiale. In molti di questi casi, la cresta del mucchio non è abbastanza resistente da sostenere il peso del camion o le banchine risultano, di conseguenza, inadeguate.

Quando si indietreggia con un determinato angolo rispetto al bordo del pendio, un set di doppi pneumatici posteriori raggiungerà il bordo prima dell'altro. Se ciò avvenisse, potrebbe aumentare la possibilità che si possa verificare un incidente. Ciò accade quando l'operatore guarda il lato opposto del camion e inaspettatamente si posiziona con l'altro lato del mezzo sulla banchina. Di conseguenza, il camion l'attraversa o la supera. Se le banchine risultassero inadeguate o non venissero forniti altri dispositivi di impedimento, l'operatore posizionerà il set di doppi pneumatici posteriori del lato più lontano oltre il bordo. Per comprendere meglio tale criticità, di seguito viene riportato uno schema di quanto descritto:

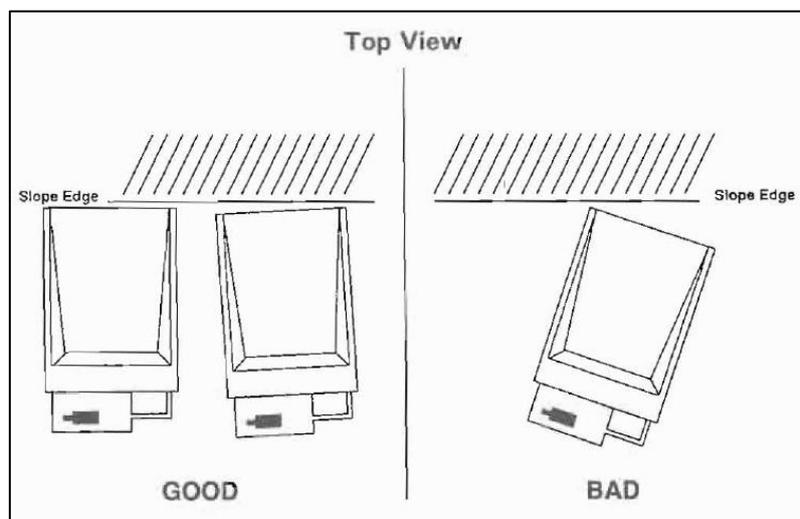


Figura 4.5.1.3 - Vista dall'alto delle posizioni che può assumere la parte posteriore di un mezzo rispetto al pendio, durante lo scarico del materiale da parte dell'operatore (Stockpiling Safety, U.S. Department of Labor).

È importante che i conducenti arretrino i loro camion perpendicolarmente al bordo del pendio o con una leggera angolazione che porti il lato dell'operatore più vicino al bordo del pendio. I conducenti devono utilizzare principalmente gli specchietti sul lato del guidatore durante la retromarcia. È molto più facile giudicare la distanza di retromarcia quando si utilizzano questi accorgimenti. Sono più vicini e forniscono un'immagine più grande rispetto agli specchietti situati sul lato opposto del camion.

Riassumendo, gli autisti devono eseguire la retromarcia del mezzo utilizzando lo specchietto retrovisore più vicino a loro, dando occasionalmente uno sguardo anche agli specchietti più lontani per verificare il corretto orientamento ed i potenziali ostacoli anche dal lato opposto alla loro posizione di guida.

I conducenti devono avvicinarsi al bordo del pendio a una velocità da moderata a lenta quando indietreggiano per scaricare e frenare gradualmente durante l'arresto. La frenata brusca all'ultimo momento impone una grande forza orizzontale oltre alla normale forza verticale imposta dal peso dell'autocarro. Questa forza orizzontale aggiuntiva aumenta sostanzialmente la possibilità di un

cedimento del pendio. Anche quando si torna lentamente sul bordo del pendio, è importante frenare gradualmente.

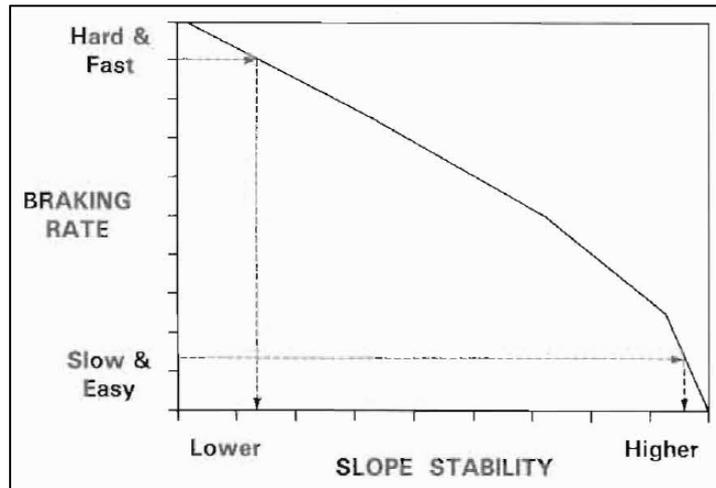


Figura 4.5.1.4 - Effetto del tasso di frenata (Breaking Rate) sulla stabilità del pendio (Slope Stability, Stockpiling Safety, U.S. Department of Labor).

Oltre ai cedimenti dei pendii, ci sono altri pericoli associati all'arretramento troppo veloce. Indietreggiare troppo velocemente riduce il tempo di reazione del conducente ai pericoli che possono svilupparsi nel punto di scarico o ai problemi che possono svilupparsi con il carrello. Aumenta anche il rischio che il conducente tocchi la banchina troppo velocemente, superandola o attraversandola.

Il baricentro del veicolo si alza quando il pianale del camion viene sollevato in posizione di ribaltamento. Se il carrello è parcheggiato su una leggera pendenza verso la banchina o se è inclinato lateralmente, può essere in pericolo di ribaltamento. Il rischio di ribaltamento aumenta quando il carico è sospeso nel pianale del camion o il materiale non scorre liberamente.

Il punto di scarico non dovrebbe mai essere costruito in modo che il camion sia parcheggiato su un pendio in discesa verso la banchina. Se la discesa è troppo ripida ed il materiale si blocca nel pianale, il camion rischia di ribaltarsi all'indietro. Anche l'inclinazione del punto di scarico verso la banchina fornisce uno scarso drenaggio, consentendo all'acqua di accumularsi sulla banchina. Un accumulo d'acqua nel punto di scarico può comportare una diminuzione della resistenza in pendenza ed un appoggio morbido che può consentire l'affondamento degli pneumatici posteriori. Inoltre, l'arresto in discesa richiede una forza frenante aggiuntiva. Ciò pone un ulteriore affidamento sull'impianto frenante e impone maggiori stress sul pendio, aumentando il rischio di un suo potenziale cedimento.

Pertanto, il punto di scarico dovrebbe essere costruito a livello o con una leggera inclinazione verso l'alto. Mantenere il punto di scarico con una leggera inclinazione verso l'alto (da 1° a 3°) consente il drenaggio e riduce la forza necessaria per fermare il camion. Ciò riduce anche la possibilità di ribaltarsi all'indietro se il materiale si blocca nel pianale del camion.

Il punto di scarico deve essere costruito in modo che il camion di trasporto sia piatto, non pendente da un lato. Se l'angolo laterale è troppo ripido o il materiale si blocca nel pianale, il carrello rischia di ribaltarsi su un lato. Questo è anche un problema quando il punto di scarico è morbido. Gli pneumatici posteriori possono affondare quando il pianale del camion viene sollevato in posizione di scarico. Se gli pneumatici non dovessero affondare nel terreno in modo uniforme, allora il camion si inclinerà su un lato aumentando la possibilità di ribaltarsi. Il materiale morbido costringerà anche l'operatore ad applicare più potenza alle ruote motrici quando si avvicina alla banchina, complicando il controllo del carrello in quest'area potenzialmente pericolosa.

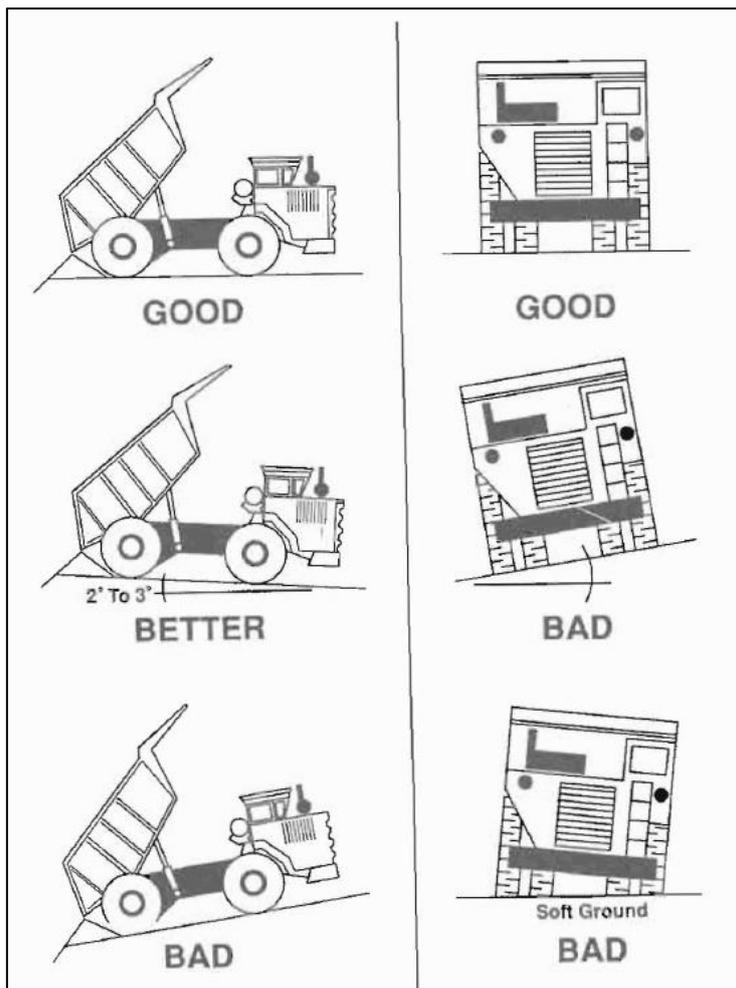


Figura 4.5.1.5 – Posizioni corrette e scorrette durante lo scarico del materiale su terreno irregolare o soffice da parte del dumper (Stockpiling Safety, U.S. Department of Labor).

Quando ci si avvicina all'impianto di produzione per lo scarico del materiale, bisogna verificare eventuali ostacoli sopraelevati, come le linee elettriche, che potrebbero trovarsi nell'area. Dopo aver indietreggiato fino al punto di scarico, bisogna arrestare completamente il carrello e applicare il freno di stazionamento. Di conseguenza è necessario seguire le procedure fornite nel manuale dell'operatore per il carrello specifico che si sta utilizzando.



Figura 4.5.1.6 - Dumper durante la fase di scarico vicino ad una banchina (freepik.com).

Dopo aver scaricato il materiale, estraendolo lentamente, bisognerebbe innestare la trasmissione prima di rilasciare il freno di stazionamento per evitare che il carrello si muova all'indietro. Successivamente, è necessario abbassare il pianale il più rapidamente possibile. Se il materiale è appeso alle pareti del cassone, spostare il camion può aumentare le possibilità di ribaltamento. Il pianale del dumper deve essere completamente abbassato prima di lasciare la discarica o l'impianto di produzione per rientrare nuovamente in strada per un ulteriore trasporto.

4.5.2. Caricatori frontali

Per quanto concerne, invece, i caricatori frontali, è molto importante che la benna sia mantenuta bassa durante il tragitto. Ciò mantiene un baricentro basso e fornisce una migliore stabilità. Inoltre, consente una visuale libera della carreggiata. La benna deve essere inclinata all'indietro e tenuta a 15-20 pollici (38 – 50 cm) da terra. Durante il trasporto con una benna piena, questa deve essere scossa leggermente prima di iniziare a rimuovere qualsiasi materiale sciolto che potrebbe cadere. Durante il trasporto con benna vuota, invece, questa non deve essere inclinata in avanti o trasportata troppo in basso, perché potrebbe impigliarsi o colpire inaspettatamente un ostacolo o un punto della carreggiata.

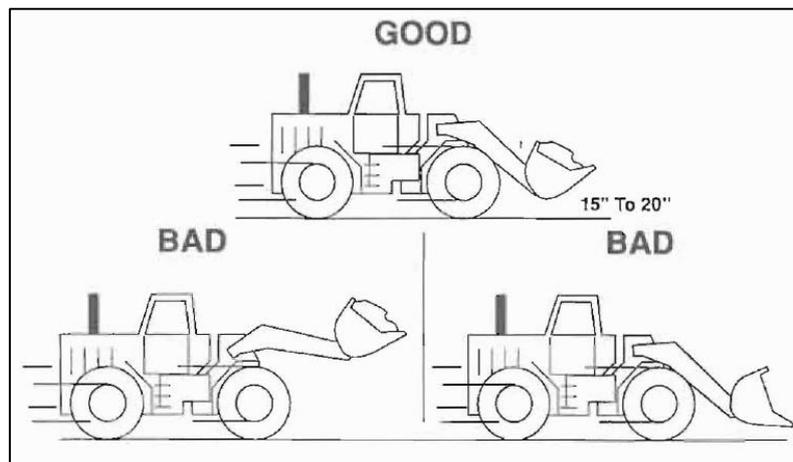


Figura 4.5.2.1 - Posizioni della benna (carica e vuota) durante il trasporto (Stockpiling Safety, U.S. Department of Labor).

Se il trasporto avvenisse su un pendio ripido, l'operatore dovrebbe rallentare e mantenere la trasmissione in una marcia bassa. Ciò consentirà un regime motore più elevato e una pressione idraulica adeguata, per una potenziale frenata e/o sterzata. Una marcia più bassa aiuterà anche a mantenere una velocità inferiore con meno rischi di stallo.

Avere la benna sollevata (soprattutto quando è piena) aumenta notevolmente la possibilità di ribaltarsi lateralmente. Ciò può verificarsi durante il trasporto su una leggera pendenza o se l'operatore sale inavvertitamente lungo il bordo inferiore di una pila o di una banchina. Se un caricatore viene trasportato su una carreggiata dove esiste un dislivello o un pericolo di ribaltamento, l'operatore deve assicurarsi che siano mantenute adeguate banchine.

Quando un caricatore viene trasportato su una rampa sopraelevata verso un alimentatore, le banchine diventano particolarmente importanti. La pendenza della rampa deve essere mantenuta a 10° o meno e l'operatore dovrebbe essere in grado di vedere il bordo superiore della rampa quando inizia ad allontanarsi dalla tramoggia. Le banchine dovrebbero essere presenti ed i lati della rampa dovrebbero essere costruiti più in basso dell'angolo di riposo per garantire un'adeguata stabilità.

Quando si carica un camion, l'impatto del materiale sul suo pianale dovrebbe essere ridotto al minimo. Ciò può essere ottenuto caricando le particelle fini prima di eventuali pezzi grandi, inclinando lentamente la benna per ridurre l'improvvisa caduta di materiale e, quando possibile,

rompendo grandi pezzi consolidati prima del caricamento. È altrettanto importante non colpire il carrello con la benna del caricatore o i bracci della benna. Qualsiasi impatto improvviso può causare danni al carrello e lesioni al conducente del camion.

Gli operatori del caricatore dovrebbero fare attenzione ai conducenti del camion e assicurarsi che rimangano nella loro cabina di guida. Se devono scendere, è necessario e sicuro farli stare ad una distanza di sicurezza dal pendio e fuori dal percorso delle apparecchiature. L'operatore del caricatore non deve far oscillare la benna sulla cabina del camion o del carico mentre le persone sono in piedi accanto al mezzo. Inoltre, l'operatore del caricatore deve mantenere l'area di carico pulita e, quando il tempo lo consente, pulire, livellare e mantenere le banchine in cima alla pila.



Figura 4.5.2.2 - Caricatore frontale scarica materiale sul dumper, prestando attenzione intorno al loro raggio d'azione (mining.com).

Gli operatori del caricatore ed i conducenti dei dumper o camion devono stare attenti ad altre apparecchiature che potrebbero essere in funzione nell'area e ad occasionali pedoni imprevisti. I finestrini e gli specchietti devono essere puliti e adeguatamente regolati. Se fosse presente vento e polvere, l'operatore del caricatore dovrebbe mantenere il vento alla sua schiena durante lo scarico in modo che la polvere non oscuri la visione. Infine, è importante che gli allarmi di backup siano controllati regolarmente per assicurarsi che funzionino correttamente.

Nella maggior parte dei casi, quando il materiale viene rimosso dalla punta di una pila, il materiale collasserà e scorrerà verso la sua superficie laterale. Ciò è positivo poiché la pendenza rimane con un angolo di riposo costante mantenendo la stabilità dei cumuli. Se il materiale non scorre facilmente a causa dell'umidità, del congelamento o della compattazione, c'è il pericolo che la pila venga imbibita troppo o che venga tagliata. Ciò può provocare la caduta o il crollo imprevisto del pendio. Il caricatore operante alla base del cumulo rischia di essere inghiottito dal materiale sciolto o urtato da grossi pezzi consolidati.

Il pericolo aumenta con l'aumentare dell'altezza dei cumuli, specialmente quando la pila diventa più alta della portata del caricatore. I pendii non solo si indeboliscono con l'altezza (per il materiale che non scorre facilmente), ma c'è più materiale coinvolto se il pendio dovesse cedere. Se una riserva, significativamente più alta della portata del caricatore, inizia a diventare troppo imbibita o tagliata, è necessaria un'azione immediata. Il materiale deve essere urtato sulla cresta e la pila deve essere lavorata dall'alto fino a quando la pendenza si avvicina all'angolo di riposo originale. Quando possibile, ciò dovrebbe essere realizzato con un apripista (quando disponibile, anche macchinari appositamente attrezzati come un retro-escavatore a braccio lungo possono offrire un'alternativa più sicura, senza i pericoli intrinseci associati al funzionamento dell'attrezzatura in cima alla pila).

È molto importante che non ci siano condizioni e situazioni pessime da non poter essere corrette senza mettere in pericolo i lavoratori. Se si verificassero regolarmente imbibizioni o tagli dei cumuli dal basso, l'altezza della pila dovrebbe essere ridotta in modo tale da essere solo leggermente superiore alla portata del caricatore.

Quando l'altezza della pila non diminuisce, aumenta anche il pericolo. Se una pila solo leggermente più alta della portata della benna del caricatore si presenta bagnata o troppo rigida, bisogna utilizzare la benna del caricatore per lavorare la superficie del cumulo dall'alto verso il basso. È molto importante che le condizioni non diventino pericolose prima di intraprendere un'azione correttiva.

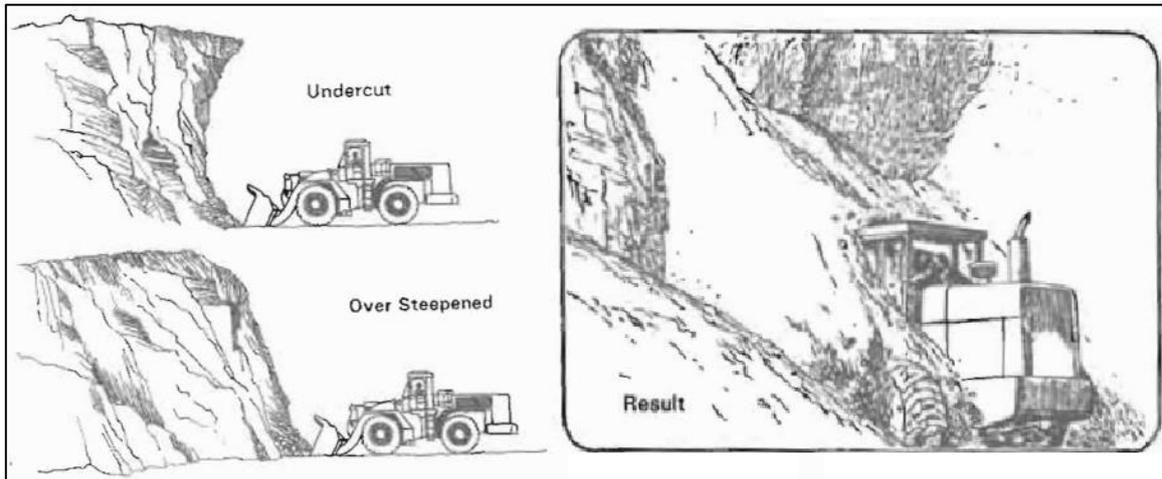


Figura 4.5.2.3 - Rappresentazioni di cumuli imbibiti (*oversteepened*) e tagliati alla base (*undercut*), mostrando anche il risultato peggiore che si possa avere se si operasse su di essi senza verifiche preventive del materiale (*Stockpiling Safety, U.S. Department of Labor*).

Se alcune parti della pila risultino congelate, i pezzi di grandi dimensioni potrebbero scivolare o cadere. Possono colpire il caricatore, ferendo gravemente l'operatore all'interno della cabina. Possono anche rimbalzare nella cabina stessa colpendo l'operatore. Si sono verificati incidenti in cui intere cabine del mezzo sono state schiacciate.

Il caricatore dovrebbe essere sempre azionato in perpendicolare invece che parallelo alla base della pala. Ciò colloca la cabina dell'operatore più lontano dal pendio. Consente una risposta più rapida durante lo spostamento del caricatore in caso di cedimento del cumulo. Inoltre, quando si opera sia vicino che parallelamente al pendio, è necessario meno materiale per seppellire la cabina e l'operatore diventa più suscettibile alla caduta o al rimbalzo di massi.

L'operatore del caricatore è nella posizione migliore per osservare un rischio durante lo stoccaggio del materiale. Se si sviluppa una situazione pericolosa, egli deve intervenire immediatamente. Si dovrebbe impedire ad altre apparecchiature di operare in cima o alla base del cumulo fino a quando la situazione non sarà corretta.

Durante l'operatività in cima alla pila, i caricatori frontali sono soggetti a molti degli stessi pericoli dei camion di trasporto. Questi pericoli includono guidare oltre il bordo, attraversare o superare una banchina inadeguata o essere coinvolti in un cedimento del pendio. Come con i camion di trasporto, la maggior parte dei cedimenti del pendio si verifica a causa della rimozione del materiale dalla base del cumulo. Inoltre, quando si opera vicino e parallelamente al bordo del pendio, l'assessamento del materiale o il terreno soffice possono essere sufficienti per ribaltare il caricatore o causare la perdita di controllo all'operatore.

Il metodo migliore per prevenire gli incidenti del caricatore sulla parte superiore del cumulo è quello di mantenere il mezzo perpendicolare e di fronte al bordo del pendio. Ciò mantiene il peso del caricatore più lontano dal bordo e se quest'ultimo si assettesse, ridurrebbe la possibilità di ribaltarsi o inclinarsi lateralmente. Inoltre, ciò consentirebbe di allontanare rapidamente il caricatore in caso di pericolo.



Figura 4.5.2.4 - Ribaltamento di un caricatore frontale operante sul bordo di un cumulo (constructionenquirer.com).

4.5.3. Dozer o Apripista

La potenza, la stabilità e la trazione dei dozer possono provocare un falso senso di sicurezza. Gli operatori non dovrebbero mai diventare troppo sicuri delle capacità del dozer o delle loro capacità di utilizzarlo. Quando si spinge il materiale sopra la cresta di un cumulo o di una pila di materiale, l'operatore deve fermarsi a una distanza di sicurezza dal bordo e utilizzare altro materiale per urtarlo. Dovrebbe essere sempre mantenuta una banchina sulla cresta del cumulo per evitare che gli operatori dell'attrezzatura oltrepassino inavvertitamente il bordo. Quando si lavora o si livella la parte superiore della pila, gli operatori devono tenere traccia di dove si trovi il bordo.

Molti incidenti si verificano quando l'apripista indietreggia inaspettatamente oltre il bordo di una pila. Il dozer deve essere sempre perpendicolare e rivolto verso il bordo del pendio. Ciò consentirà una risposta più rapida all'indietro, allontanandosi dal bordo in caso di rottura o cedimento del pendio. Un operatore non deve mai guidare il dozer lungo il bordo del pendio. Il peso e le vibrazioni della macchina aumentano la possibilità che si verifichi un suo cedimento ed un ribaltamento del mezzo. Quando si opera parallelamente al bordo del pendio, c'è anche meno spazio e tempo di reazione in caso di errore dell'operatore.



Figura 4.5.3.1 - Dozer in azione perpendicolarmente al bordo del pendio (wvrecord.com).

Gli operatori dei dozer devono sempre prestare attenzione ai segni d'instabilità del pendio, come crepe lungo la cresta o crolli sul pendio. Se sono presenti segni visibili di instabilità, gli operatori devono mantenere una distanza di sicurezza dal bordo. Devono stare attenti ai cambiamenti delle condizioni del terreno causati dal tempo (pioggia, nevischio, neve, gelo e disgelo). Se il materiale viene rimosso dalla base del cumulo, è necessario ispezionare il pendio per rilevare eventuali sovratensioni, tagli alla base, imbibizioni e sporgenze. Gli operatori del dozer devono sempre tenere la lama bassa e operare a una velocità coerente con il tipo di lavoro svolto e con le relative condizioni del terreno.

Se fosse necessario lavorare ai lati di un cumulo, gli operatori dei dozer dovrebbero operare verticalmente lungo il pendio. Dovrebbero tenere la lama rivolta in discesa e risalire il pendio prima di iniziare il passaggio successivo. Ciò ridurrà la possibilità di scivolare lateralmente o di ribaltarsi.



Figura 4.5.3.2 - Incidente di un dozer operante sul bordo di un cumulo (it.dreamstime.com).

Le pile e gli accumuli di materiale che devono essere rimossi dagli alimentatori sotterranei possono essere particolarmente pericolosi. Esistono due pericoli principali: il materiale debole attorno al foro di estrazione e la possibilità di cavità nascoste (materiale a ponte).

Quando l'alimentatore sotterraneo rimuove il materiale, si forma un foro di estrazione. Il bordo superiore di tale foro è molto instabile e sempre vicino al collasso.

Quando un apripista viene azionato vicino al bordo, può provocare un cedimento del pendio e scivolare verso il basso nel foro di estrazione.

Lesioni e incidenti si verificano quando il materiale cade sulla parte superiore del dozer, schiacciando o soffocando l'operatore. Pertanto, gli operatori non devono mai spingere il materiale direttamente nel foro. Dovrebbero urtarlo con altro materiale, mantenendo il dozer a una distanza di sicurezza dal bordo.

Quando si lavora vicino al foro di estrazione, il dozer deve sempre essere azionato perpendicolarmente al suo bordo. Gli operatori devono stare attenti alla posizione del punto di estrazione e prestare attenzione a non indietreggiare o scivolare al suo interno.

La posizione di ogni punto dovrebbe essere chiaramente indicata da un segnale, come una sagoma ben visibile dai colori vivaci sospesa direttamente sopra di esso.

Inoltre, gli operatori non devono mai scendere dal loro mezzo e camminare fino al bordo del foro di estrazione. Potrebbero essere facilmente trascinati dal materiale che scorre nell'alimentatore.



Figura 4.5.3.3 - Aripista o Dozer in opera su un cumulo di materiale (cat.com).

Di tanto in tanto il punto di estrazione può spostarsi. Ciò può essere particolarmente pericoloso in quanto potrebbe essere impossibile determinare l'esatta dimensione e posizione della cavità sotto il materiale a ponte. Il materiale può continuare a fluire nell'impianto mentre si forma la cavità. Potrebbe non esserci alcuna indicazione di pericolo per il personale dell'impianto. L'operatore del dozer deve disporre di un mezzo di comunicazione diretto, come una radio a due vie, con il personale dell'impianto, per determinare quali alimentatori vengano utilizzati e la quantità di materiale da rimuovere. Le posizioni degli alimentatori devono essere chiaramente contrassegnate, utilizzando grandi indicatori o luci sospese direttamente sopra di essi. L'operatore del dozer dovrebbe anche essere dotato di un mezzo per spegnere l'alimentatore ed il nastro trasportatore dalla cabina. Con queste informazioni e un'ispezione preventiva del cumulo che aumenta di dimensioni, potrebbe essere possibile determinare se si sia formato un ponte di materiale con cavità sottostanti pericolose.

Lesioni e incidenti si verificano quando il ponte di materiale cede sotto il peso del dozer, causando una sua caduta nella cavità e rischiando di essere sepolto. In caso di incidente, è estremamente importante che l'operatore del dozer rimanga in cabina. Se è nota l'esistenza di una cavità, gli operatori devono usare estrema cautela mantenendo il dozer ad una distanza di sicurezza dal punto di estrazione. Potrebbe essere necessario rimuovere il materiale dalla pila per far collassare in sicurezza la cavità. Il materiale deve essere rimosso lateralmente dal cumulo, lavorando con attenzione verso la cavità.

Si raccomanda che i mezzi operanti sui cumuli sovralimentati siano dotati di cabine abbastanza rinforzate per resistere alla pressione interrata o utilizzare attrezzature di controllo in remoto. I finestrini dei bulldozer possono essere realizzati per resistere alla pressione di sepoltura mediante una combinazione di installazione di supporti e miglioramento del supporto a bordo per il vetro, utilizzando anche vetro ad alta resistenza (come quello rinforzato chimicamente). Devono essere forniti anche dispositivi di auto-salvataggio, comunicazioni radio ed illuminazione, in modo che l'operatore possa essere soccorso immediatamente in caso di incidente.

4.5.4. Scraper

Questo mezzo viene utilizzato per lo spianamento superficiale del materiale oggetto dell'intervento. Il materiale morbido lungo la cresta di una pila può consentire alle gomme di affondare, trascinando lo scraper oltre il bordo. Su pendii laterali, gli scraper diventano molto instabili e possono facilmente

ribaltarsi. Se supera il bordo, l'operatore deve rimanere con la macchina e spostarla fuori. In alcune circostanze, l'operatore può essere in grado di applicare maggiore potenza per mantenere il mezzo sterzante lungo il pendio.

Gli operatori devono sempre rallentare prima di svoltare e non devono mai farlo bruscamente in salita o in discesa, soprattutto in discesa. Se si viaggiasse lungo un cumulo, si dovrebbe percorrere lentamente e ruotare con molta attenzione. Non si dovrebbe mai salire su una pendenza laterale ripida.



Figura 4.5.4.1 - Scraper a lavoro in un impianto di produzione (blog.iseekplant.com.au).

Gli operatori devono conoscere i percorsi di traffico all'interno degli impianti di produzione o nei cantieri e dare sempre la precedenza alle macchine caricate. Durante il passaggio, la tramoggia deve essere mantenuta più bassa possibile per aumentare la stabilità del mezzo.

4.5.5. Spostamenti a piedi all'interno dell'impianto

Le persone dovrebbero trovarsi sopra o intorno ad un cumulo di materiale all'interno degli impianti di produzione solo se il loro lavoro lo richiede. Se i lavoratori percorressero dei tratti a piedi e lavorassero attorno ad un raccogliitore, dovrebbero avvisare il loro supervisore e tutti gli operatori della macchina. Nella maggior parte dei casi e per buone ragioni, i pedoni non sono ammessi sopra o nelle vicinanze di un cumulo. La quantità di attrezzature in operatività e la natura instabile del materiale presentano troppi rischi per le persone a piedi.

Quando si lavora intorno ad un cumulo, i lavoratori dovrebbero stare lontani dalla cima. Potrebbero essere facilmente inghiottiti o colpiti da materiale in caduta che è stato scaricato in cima al cumulo o è caduto a causa di un crollo improvviso di un pendio imbibito o tagliato alla base.



Figura 4.5.5.1 - Bisogna mantenere una distanza di sicurezza dal cumulo se si è a piedi (bgeuropa.co.uk).

I lavoratori devono assicurarsi che gli operatori dei caricatori e gli autisti dei camion siano consapevoli della loro presenza. Gli operatori delle attrezzature non si aspettano che le persone siano a piedi quando lavorano intorno ai cumuli di materiale e non si può contare sul fatto che vedano o notino qualcuno a piedi. Inoltre, la maggior parte delle attrezzature minerarie mobili avrà ampie aree cieche dove l'operatore non ha la possibilità di vedere tutto lo spazio circostante.



Figura 4.5.5.2 - I lavoratori a piedi devono stare attenti agli allarmi di backup ed essere pronti a muoversi in fretta se necessario (Stockpiling Safety, U.S. Department of Labor).

Quando si lavora in cima ad un cumulo, i lavoratori dovrebbero stare lontani dal bordo. Quest'ultimo potrebbe cedere inaspettatamente in qualsiasi momento, soprattutto quando il materiale viene rimosso dalla cima. Inoltre, quando si cammina lungo il bordo superiore della pila, la base di appoggio è generalmente accidentata ed il lavoratore potrebbe semplicemente inciampare e cadere. Quando il materiale su cui ci si trova inizia a muoversi o a collassare, è molto facile essere risucchiati e sepolti.

Una persona può rimanere intrappolata dal materiale, potrebbe rischiare il soffocamento soprattutto se il cumulo presenta un'altezza molto elevata e, quindi, una maggiore mole di materiale che cade sul diretto interessato.

I lavoratori possono essere catturati e trascinati nel materiale che viene gradualmente lavorato verso il basso dall'alimentatore, oppure possono cadere improvvisamente in una cavità coperta da materiale a ponte. Il peso di un individuo è sufficiente a causare il collasso del materiale a ponte. Se i lavoratori devono lavorare su una pila a sbalzo, devono assicurarsi che tutti gli alimentatori che forniscono o rimuovono materiale dalla pila siano bloccati. Dovrebbero anche assicurarsi di rimuovere una quantità sufficiente di materiale intorno al punto di estrazione per evitare un collasso imprevisto. Quando si lavora su un cumulo sovradimensionato in cui esistono condizioni pericolose, i lavoratori devono assicurarsi che qualcuno possa vederli e che possano mantenere le comunicazioni a due vie. A causa del pericolo di imbattersi in una cavità collegata a ponte, è necessario fornire scale, piattaforme o qualche altra forma di supporto. La persona coinvolta dovrebbe indossare una cintura di sicurezza o un'imbracatura, collegata ad un cavo salvavita, ed una seconda persona dovrebbe mantenere tale cavo teso per evitare un'eventuale caduta.

In generale, i regolamenti stabiliscono che:

- 1) per quanto concerne i cumuli di materiale stoccato e sovradimensionato, a nessuna persona deve essere permesso di:
 - Camminare o stare in piedi immediatamente sopra un'area di bonifica o in qualsiasi altra area vicino o al di sotto di un cumulo in lavorazione o in stoccaggio dove l'operazione di bonifica potrebbe esporla ad un pericolo.
 - Lavorare attorno ai punti di estrazione, a meno che non vengano utilizzate piattaforme o linee di sicurezza, le persone non devono posizionarsi sopra tali punti se esiste il pericolo che il materiale frantumato possa essere ritirato o estratto.

- 2) Per quanto riguarda contenitori, tramogge, silos, serbatoi e cumuli di materiale di elevate dimensioni, dove i materiali sciolti non consolidati siano immagazzinati, manipolati o trasferiti, devono essere:
 - Dotati di dispositivi meccanici o altri mezzi efficaci per la movimentazione dei materiali in modo che durante le normali operazioni le persone non siano obbligate a entrare o lavorare dove possano essere esposte ad intrappolamento a causa dello scorrimento di materiali.
 - Dotati di controlli operativi di alimentazione e scarico. I controlli devono essere effettuati in modo che fuoriuscite o sovraccarichi non mettano in pericolo le persone.
- 3) Laddove gli operatori debbano spostarsi intorno o sopra qualsiasi struttura all'interno degli impianti di produzione, devono essere forniti percorsi o passaggi adeguati.
- 4) Quando le persone devono entrare in una struttura all'interno dell'impianto di produzione per scopi di manutenzione o ispezione, devono essere fornite scale, piattaforme o allestimenti adeguati. Nessuno può entrare nell'impianto fino a quando la fornitura e lo scarico dei materiali non siano cessati e l'attrezzatura di fornitura e scarico non sia stata bloccata. Le persone che entrano nell'impianto devono indossare una cintura di sicurezza o un'imbracatura dotata di un cavo salvavita adeguatamente allacciato. Una seconda persona, equipaggiata in modo simile, deve essere posizionata vicino al punto in cui è fissato il cavo salvavita e deve costantemente regolarlo o mantenerlo teso secondo necessità, con il minimo gioco.

In conclusione, la sicurezza è responsabilità di tutti, dall'operatore dell'attrezzatura al responsabile degli impianti di produzione. Solo attraverso il coinvolgimento attivo di tutti i dipendenti è possibile garantire un ambiente di lavoro sicuro. Un buon atteggiamento verso la sicurezza si riflette bene sulla professionalità degli operatori e dei dipendenti e può essere utilizzato come strumento per migliorare la competitività. Un programma di sicurezza attivo può instillare il lavoro di squadra, migliorare la comunicazione e rafforzare per i dipendenti il loro valore per le attività all'interno dei cantieri e degli impianti di produzione.

5. PROVE DI TAGLIO DIRETTO SUI PROVINI DI RAP

5.1. Resistenza a taglio dei terreni

La “legge di resistenza a rottura” di ogni materiale è definibile attraverso una superficie limite di stato, cioè il luogo geometrico che separa gli stati (tensionali e non) possibili da quelli impossibili.

Il modello di riferimento per i mezzi discontinui è quello di blocco rigido scabro a contatto con un piano (Figura 5.1.1 a). Per esso, la superficie limite di stato è la curva che esprime, per ogni valore dello sforzo normale N , il valore dello sforzo trasversale F necessario per produrre scorrimento all'interfaccia.

Per analogia, il comportamento di un elemento di volume di un mezzo particellare (semplice o complesso, Figura 5.1.1 b, c), se visto come continuo, è esprimibile in termini di relazione limite tra la tensione tangenziale τ e lo sforzo normale σ , cioè nel piano di Mohr (Figura 5.1.1 d).

Il “criterio di resistenza” si può dunque formulare mediante la curva limite (o “curva intrinseca”) osservabile nel piano ($\sigma - \tau$). Per un mezzo granulare monofase, la curva è indipendente dalla giacitura dell'elemento e caratterizzata da un andamento lineare (Figura 5.1.2):

$$\tau = \sigma \cdot \tan\varphi + c.$$

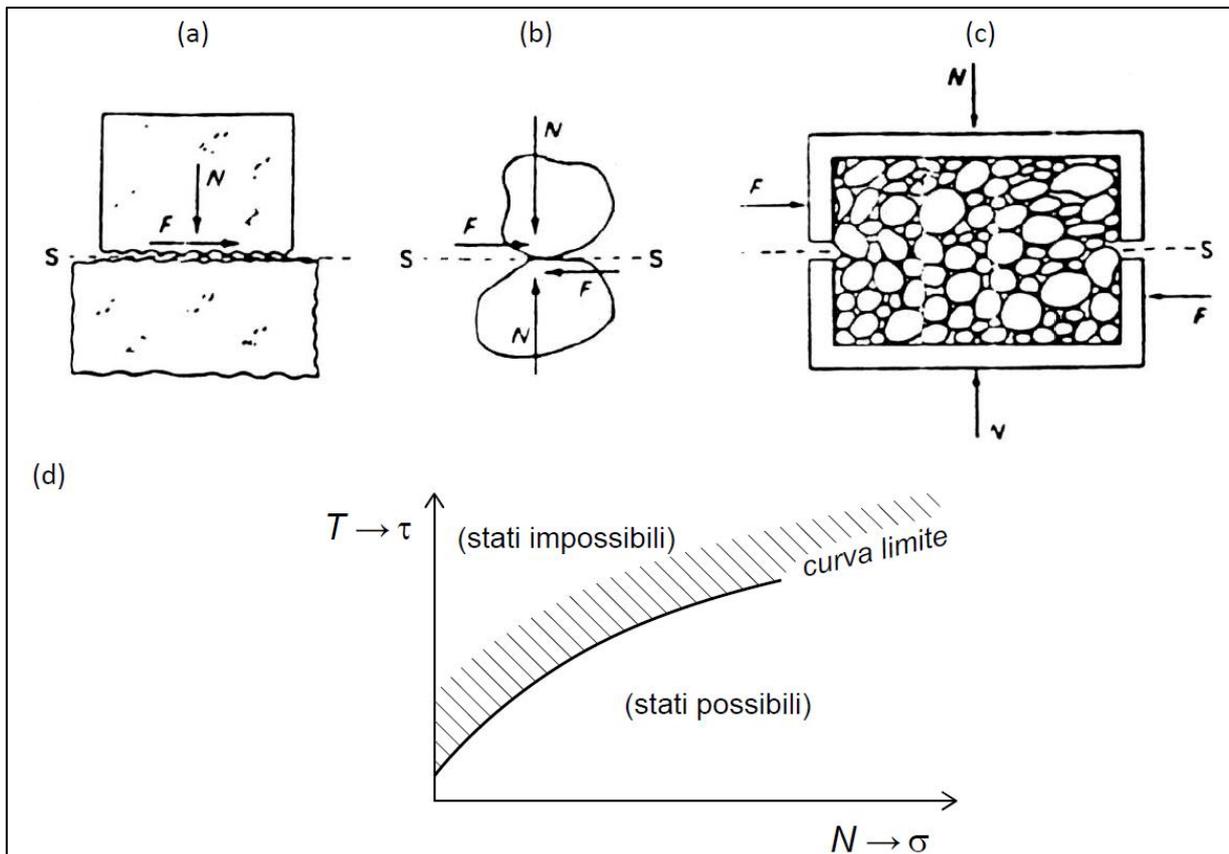


Figura 5.1.1 - Modello elementare di blocco scorrevole per attrito (a), mezzo granulare semplice (b) e complesso (c); superficie limite di stato (d).

In tali ipotesi, si parla di “criterio di resistenza di Mohr-Coulomb” (Figura 5.1.2 a): c viene definita “coesione”, e rappresenta la resistenza allo scorrimento in assenza di tensioni normali; φ è l'angolo d'attrito, e $\tan \varphi$ rappresenta l'incremento della resistenza con l'aumento della tensione σ .

Nei terreni sono possibili due casi limite opposti:

- Materiale puramente attritivo (Figura 5.1.2 b), caratterizzato da $c = 0$, $\varphi > 0$ (chiamato “mezzo di Coulomb”), che rappresenta il comportamento tipicamente associato ai materiali a grana

grossa (sabbie e ghiaie, che per l'assenza di coesione vengono definiti spesso "terreni incoerenti") ed a quelli a grana fine (limi ed argille), in condizioni drenate.

- Materiale puramente coesivo (Figura 5.1.2 c), caratterizzato da $c > 0$, $\phi = 0$ (chiamato "mezzo di Tresca"), che rappresenta il comportamento tipicamente associato ai terreni a grana fine (che per la presenza di coesione vengono spesso definiti "terreni coesivi") in condizioni non drenate.

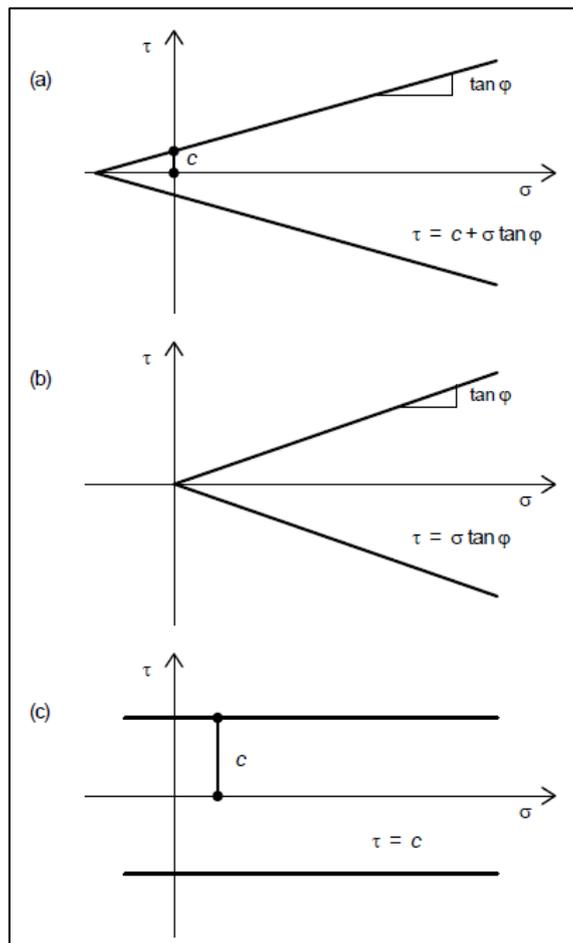


Figura 5.1.2 - Criterio di resistenza di Mohr-Coulomb (a): terreno incoerente (b) e terreno coesivo (c).

5.2. Prova a taglio diretto

L'obiettivo di questa prova è determinare le caratteristiche di resistenza a taglio di un terreno, nel caso in esame del fresato bituminoso, mediante l'interpretazione della relazione $(\tau - \sigma)$ nel piano di Mohr. Lo strumento sperimentale convenzionalmente adoperato allo scopo è l'attrezzatura di taglio diretto piano (la cosiddetta "scatola di Casagrande", Figura 5.2.1).

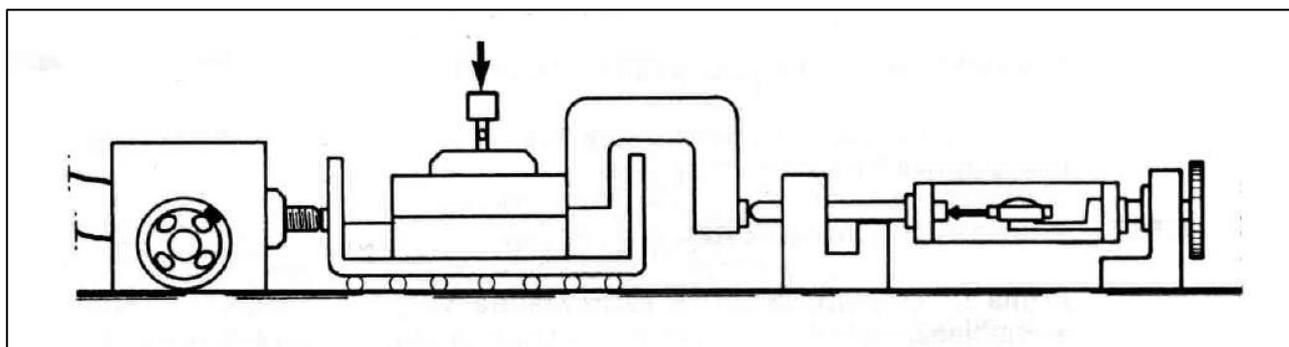


Figura 5.2.1 - Scatola di Casagrande.

5.3. Modalità d'esecuzione

Una prova completa viene eseguita su almeno tre provini consolidati a tensioni σ_v diverse. I provini adoperati sono in genere prismatici a sezione quadrata (ma talvolta anche cilindrici) e devono soddisfare i seguenti requisiti dimensionali (Tabella 5.3.1):

Tabella 5.3.1 - Requisiti dimensionali dei provini per prove di taglio diretto piano.

Raccomandazioni AGI			Raccomandazioni ETC5		
H_{min} (mm)	L_{min} (mm)	$(L/H)_{min}$	H_{min}/d_{max}	Dimensioni tipiche provino $L \times L \times H$ (mm)	Massa minima di terreno W_{min} (g)
12.5	50	2	10	60 × 60 × 20 100 × 100 × 20 300 × 300 × 150	150 450 30000

Prima della prova, occorre registrare le dimensioni ed il peso di ciascun provino. Questo, una volta introdotto nell'apparecchiatura (Figura 5.3.2) tra le due semi-scatole inferiore (mobile) e superiore (fissa e solidale con il sistema di carico verticale), viene poi sottoposto a condizioni di compressione di tipo "K₀" mediante l'applicazione di una forza verticale, N, generata da un sistema di leve e pesi. La tensione effettiva di consolidazione, σ_v (= N/A, con: A = area del provino), non deve di norma risultare inferiore a quella geostatica alla profondità di prelievo del campione.

Nella fase di consolidazione, si registra la relazione cedimenti-tempi, che viene poi interpretata nel piano ($w - \sqrt{t}$), ottenendo il valore di t_{100} come indicato in Figura 5.3.2 a.

Nella fase di rottura viene azionato un motore passo-passo che produce uno scorrimento relativo δ tra le due semi-scatole, agendo su quella inferiore (Figura 5.3.2 b).

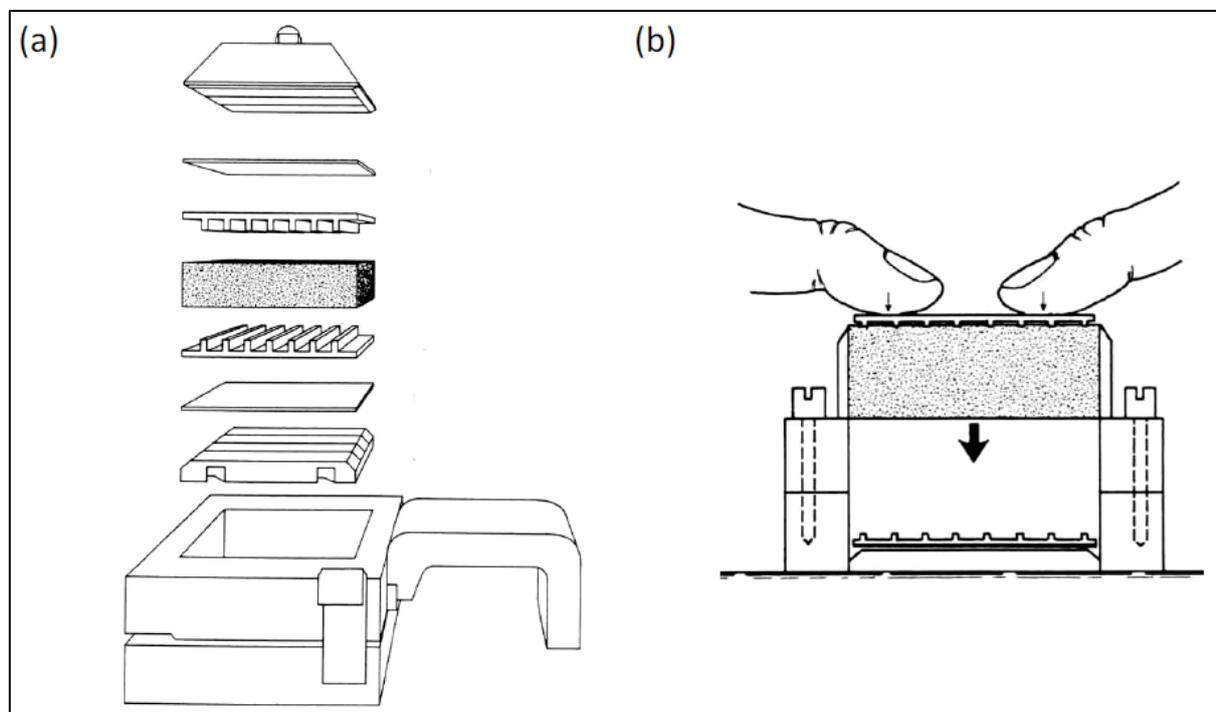


Figura 5.3.1 - Schema di montaggio (a) ed inserimento del provino (b) nella scatola di taglio.

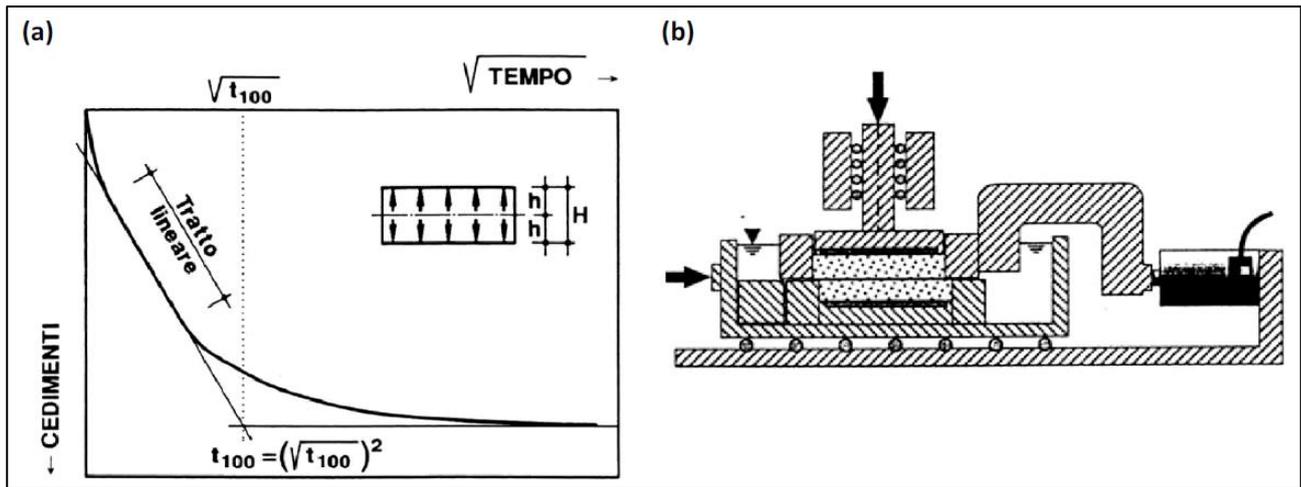


Figura 5.3.2 - Curva di consolidazione (a) e schema di controllo delle sollecitazioni nella fase di taglio (b).

In questa fase, vengono registrati nel tempo lo scorrimento δ (letto da un micrometro o da un trasduttore di spostamento), la forza di taglio orizzontale T (misurata da un anello dinamometrico o una cella di carico) e lo spostamento verticale w (rilevato con un sistema analogo a δ).

Pertanto, il sistema di carico verticale deve rendere possibili anche gli spostamenti verticali e, per evitare il disassamento di N e T , si adottano a volte sistemi di controllo del parallelismo (ad esempio cuscinetti a sfera lungo l'asta che trasmette il carico verticale, come in Figura 5.3.2 b).

Le letture simultanee di spostamenti orizzontali e verticali, nonché del carico orizzontale, vanno condotte fino all'evidenza del raggiungimento della resistenza del materiale.

Al termine della prova, il provino va smontato con cura, pesato e poi fatto essiccare in stufa a 105° - 110° per almeno 24 h, dopodiché ne viene registrato il peso secco.

5.4. Interpretazione della prova di taglio diretto

Le modalità di interpretazione risentono di alcune limitazioni intrinseche dell'apparecchiatura:

- La superficie di rottura è predeterminata.
- Le tensioni orizzontali al contorno non sono misurabili, pertanto sia i cerchi di Mohr che i percorsi tensionali sono ignoti fino alla rottura.
- Le deformazioni tangenziali (concentrate intorno alla superficie di rottura) non sono deducibili dagli spostamenti orizzontali misurati.

Ne deriva che la prova di taglio diretto è interpretabile solo in termini di relazione $(\tau - \sigma)$ in condizioni di rottura.

Malgrado la disuniforme distribuzione di tensioni tangenziali lungo la sezione trasversale del provino, nell'interpretazione il rapporto T/A viene indicato come "valore nominale di τ ". Quindi, i risultati sono rappresentabili attraverso curve $(\tau - \delta)$ e $(w - \delta)$ associabili a ciascun valore della tensione di consolidazione σ_v applicata (Figura 5.4.1 a,b).

Per ciascun provino, sono determinabili, in linea di principio, tre distinti valori della tensione tangenziale di rottura τ_r :

- La resistenza di picco τ_p (corrispondente al valore massimo T_{max}).
- La resistenza di stato stazionario τ_{cv} (corrispondente alle condizioni di stazionarietà di w , cioè "a volume costante").
- La resistenza residua τ_r (corrispondente a scorrimenti δ elevati).

Riportando le relative coppie di valori $(\sigma - \tau)$ sul piano di Mohr, sono di conseguenza determinabili (per esempio mediante regressione lineare) tre diversi involuipi ed altrettante coppie di parametri di resistenza a rottura (Figura 5.4.1 c). Risulta in genere $\phi_p > \phi_{cv} > \phi_r$, nonché $c_{cv} \approx c_r = 0$.

L'uso progettuale dei diversi inviluppi di resistenza così determinabili è questione molto dibattuta e nel caso in esame, a titolo di orientamento, si ricordano le regole generali riassunte nella seguente Tabella 5.4.1:

Tabella 5.4.1 - Uso dei diversi parametri di resistenza.

Resistenza	Significato	Esempi
Picco	Resistenza di calcolo per problemi in cui il terreno non è soggetto a fenomeni di scorrimento in atto	Fondazioni su terreni stabili Pendii stabili
Stato stazionario (o 'a volume costante')	Stima cautelativa della resistenza di calcolo per terreni a stabilità incerta	Opere di sostegno di terreni in sede Pendii di stabilità incerta
Residua	Resistenza di calcolo per problemi in cui il terreno è stato soggetto a scorrimenti elevati	Pendii già instabilizzati

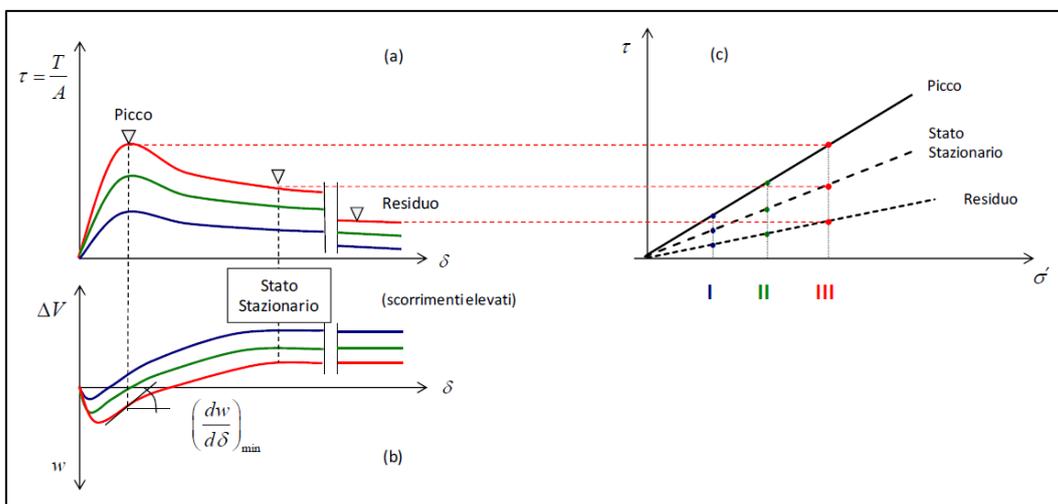


Figura 5.4.1 - Risultati di una prova di taglio in termini di relazioni tensione-scorrimento (a), cedimento-scorrimento (b) e tensioni limite nel piano di Mohr (c).

5.5. Prove di taglio diretto in laboratorio

Le prove di taglio non drenate a temperatura ambiente sono state eseguite in laboratorio utilizzando una macchina a taglio diretto costituita da due scatole 30 cm x 30 cm (come da raccomandazioni ETC5) costruite ed assemblate in officina: una scatola inferiore mobile, alta 8,5 cm, mossa da una piastra con cuscinetti che scorre grazie ad un pistone mobile che permette di caricare il provino, all'interno delle scatole, con una forza di taglio T, ed una scatola superiore fissa, con altezza pari a 10 cm, vincolata da un braccio per mezzo di un incastro a "C".

Il tutto viene comandato da una pulsantiera che permette l'azionamento della macchina.

La forza N, invece, viene applicata grazie ad un martinetto idraulico con manovella che pressa una piastra (di spessore pari a 15 mm) posta all'estremità della scatola superiore, che permette di attuare una pressione normale omogeneamente distribuita in tutto il provino di materiale. Il martinetto è dotato di dinamometro, il quale misura l'intensità della forza normale applicata.

Lo scorrimento, invece, è misurato con l'ausilio di un trasduttore a molla a contatto con una piastra, che misura nel tempo tutti gli spostamenti (in mm) della scatola inferiore rispetto a quella superiore. Tramite un PC è stato possibile immagazzinare i dati delle prove e le tabelle dei parametri (forza di taglio T in Newton, scorrimento γ in mm e velocità di scorrimento della scatola inferiore mobile in mm/s), utili per la realizzazione dei diagrammi $\sigma - \tau$, necessari per ricavare la coesione e l'angolo di resistenza al taglio. La frequenza di acquisizione dei dati è stata impostata ad 1 Hz (un dato al secondo).

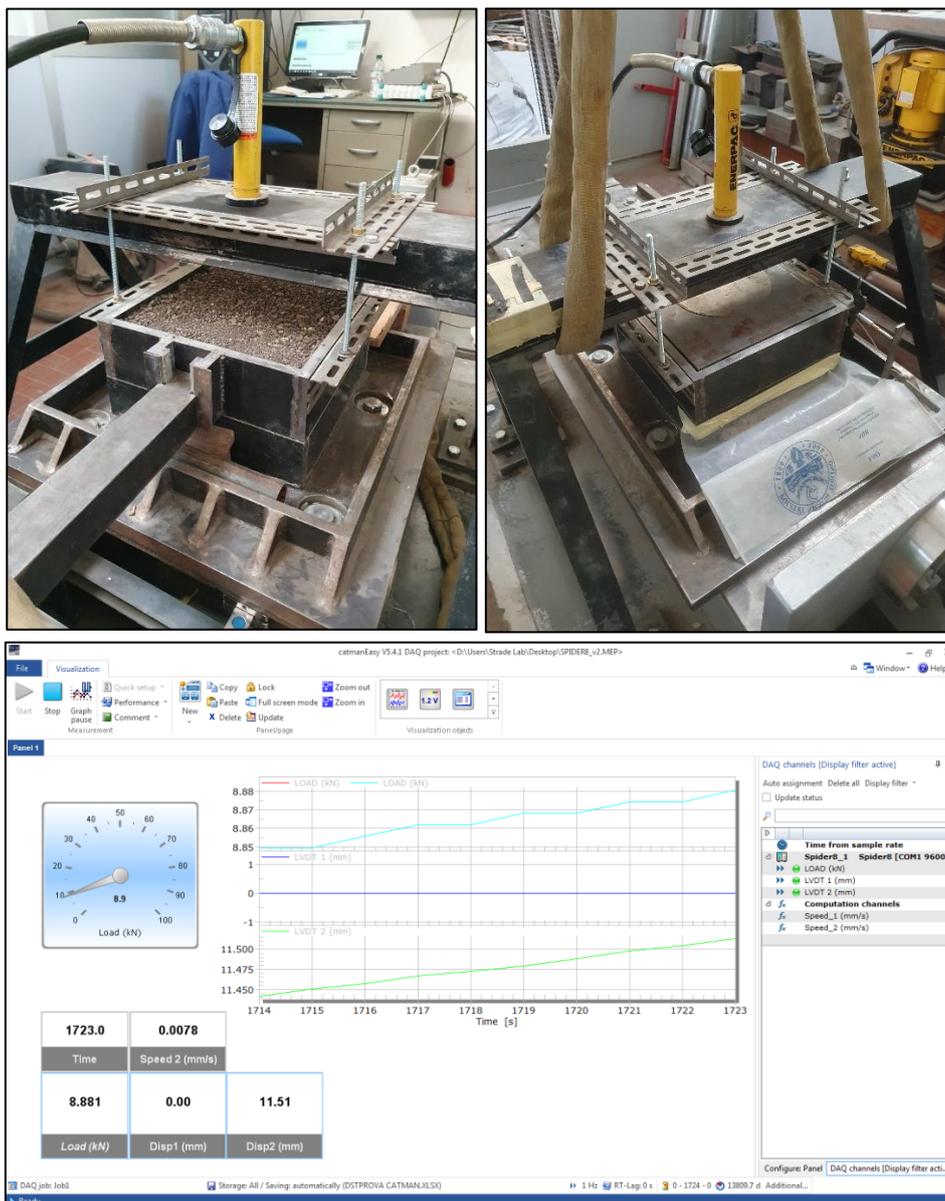


Figura 5.5.1 - Macchina di taglio diretto e schermata del software per l'immagazzinamento dei dati su PC.

Le prove di taglio diretto sono state eseguite rispettando le normative vigenti, ossia:

- AGI, 1994 - Raccomandazioni sulle Prove Geotecniche di Laboratorio.
- ETC5-ISSMGE (1998): Recommendations of the ISSMGE for geotechnical laboratory testing.
- ASTM D5607-16: Standard Test Method for Performing Laboratory Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens Under Constant Normal Force.
- Norme UNI EN ISO 17892-10:2019: Indagini e prove geotecniche - Prove di laboratorio sulle terre - Parte 10: Prove di taglio diretto.

Grazie alle normative elencate, sono state rispettate le seguenti condizioni per la corretta esecuzione dei test:

- Assenza di attrito, ottenuta grazie al distanziamento millimetrico regolabile delle scatole pari al diametro dei grani, grazie all'ausilio di una struttura creata in laboratorio costituita da barre filettate e piastre con asole, come mostrato in figura 5.5.1.
- Velocità di scorrimento minore o uguale ad 1 mm/s.
- Scorrimento massimo pari a 1/10 della dimensione delle scatole: nel caso in esame, essendo le scatole di sezione quadrata 30 cm x 30 cm, lo scorrimento massimo è equivalente a 3 cm.

- Esecuzione di tre prove per ogni provino, eseguite con forze normali differenti grazie al martinetto con dinamometro: in questo caso sono state eseguite prove con $N_1 = 6 \text{ kN}$, $N_2 = 9 \text{ kN}$, $N_3 = 12 \text{ kN}$, per ogni tipologia di materiale testato.

Di seguito si riporta una tabella con le dimensioni, i dati ed i parametri usati in input per le prove e la computazione dei parametri in output:

Tabella 5.5.1 - Dati di input per l'analisi dei parametri ottenuti dalle prove.

DATI DI INPUT PER L'ANALISI				
Dati	Simboli	Misure	Unità di misura	Note
Spessore Piastra	S	15	mm	-
Tensione Normale	σ	Calcolata sotto	MPa	Costante
Tensione di Taglio	τ	Da tabelle	MPa	L'area A cambia
Lati Scatola a base quadrata	l	300	mm	-
Area Scatola	A	90000	mm ²	-
Altezza Scatola	h	90	mm	-
Volume Scatola	V	8100000	mm ³	-
Carico #1 in kg	f_1	600	kg	Carichi in kg
Carico #2 in kg	f_2	900	kg	
Carico #3 in kg	f_3	1200	kg	
Carico #1 in N	f_1	6000	N	Carichi in N
Carico #2 in N	f_2	9000	N	
Carico #3 in N	f_3	12000	N	
Carico #1 in kN	F_1	6,00	kN	Carichi in kN
Carico #2 in kN	F_2	9,00	kN	
Carico #3 in kN	F_3	12,00	kN	

Le prove sono state eseguite su tre differenti materiali: ghiaia, fresato setacciato, fresato non setacciato. Il motivo risiede nel fatto che si sia voluto comparare il fresato con un materiale tipicamente geotecnico come la ghiaia, per capire se il RAP possa essere trattato anch'esso come tale, essendo un materiale utilizzato prevalentemente in ambito infrastrutturale. Inoltre, per una maggiore completezza sono stati eseguiti i test su due fresati differenti (setacciato e non) per confrontare il loro comportamento in funzione della dimensione dei grani.

5.5.1. Test su ghiaia

Come detto precedentemente, sono state eseguite 3 prove sui provini di ghiaia in funzione del carico normale: $N_1 = 6 \text{ kN}$, $N_2 = 9 \text{ kN}$, $N_3 = 12 \text{ kN}$.

La distanza tra le scatole, per questo primo materiale testato, è stata impostata a 5 mm poiché, come descritto in precedenza, questa deve essere pari al diametro massimo delle particelle di materiale, verificato grazie all'analisi granulometrica eseguita sui grani di ghiaia passanti al setaccio, testimoniata rispettivamente dalla tabella e dal grafico riportati di seguito:

Tabella 5.5.1.1 - Analisi granulometrica eseguita sui grani di ghiaia.

Sieve size (mm)	Sieve Mass (g)	Sieve + soil (g)	Retained (g)	Retained (g) + Filler	Cumulative R (g)	Cumulative R (%)	Passing (%)
31,5	1421,1	1421,1	0	0	0	0	100
20	1318,2	1328,2	10	10	10	0,7	99,3
16	1302,7	1302,7	0	0	10	0,7	99,3
8	1070,9	1070,9	0	0	10	0,7	99,3
4	1108,3	1981	872,7	872,7	882,7	64,4	35,6
2	980,3	1442,8	462,5	462,5	1345,2	98,1	1,9
0,5	783,8	800,9	17,1	17,1	1362,3	99,3	0,7
0,25	726,7	727,5	0,8	0,8	1363,1	99,4	0,6
0,063	767,8	769,6	1,8	1,8	1364,9	99,5	0,5
Pan	916,9	920,1	3,2	6,4	1371,3	100	0
TOTAL	10396,7	11764,8	1368,1	1371,3			

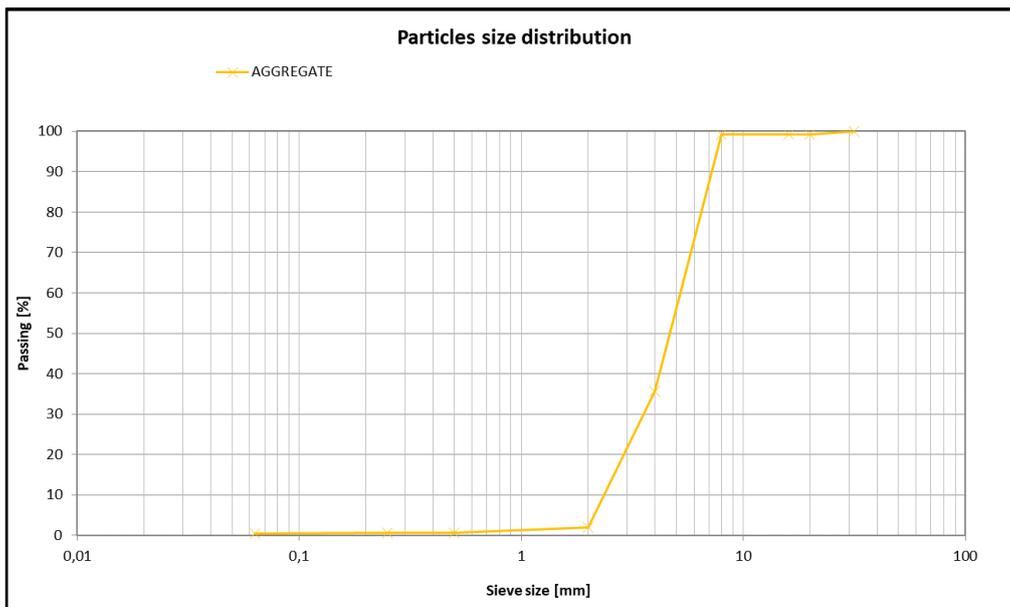


Figura 5.5.1.1 - Distribuzione granulometrica delle particelle di ghiaia.

Prima di iniziare i test, è stata calcolata la densità del materiale misurata tramite il suo peso con un contenitore di volume e peso noti, effettuando tre misurazioni e calcolandone la media.



Figura 5.5.1.2 - Pesatura della ghiaia per il calcolo della densità media.

Di seguito si riportano i dati per il calcolo della densità della ghiaia:

Tabella 5.5.1.2 - Calcolo della densità della ghiaia.

CALCOLO DENSITA' E PESATURA DELLA GHIAIA				
Dati	Simboli	Misure	Unità di misura	Note
Volume Contenitore	V_c	5040	cm^3	Pesatura #1
Peso Contenitore	P_c	4248,4	g	
Peso Contenitore + Ghiaia	P_{CG}	11402,3	g	
Peso Ghiaia	P_G	7153,9	g	
Densità Ghiaia	γ_G	1,419	g/cm^3	
Peso Contenitore + Ghiaia	P_{CG}	11749	g	Pesatura #2
Peso Ghiaia	P_G	7500,6	g	
Densità Ghiaia	γ_G	1,488	g/cm^3	
Peso Contenitore + Ghiaia	P_{CG}	11741,7	g	Pesatura #3
Peso Ghiaia	P_G	7493,3	g	
Densità Ghiaia	γ_G	1,487	g/cm^3	
MEDIA DELLE DENSITA' CALCOLATE	γ_G	1,465	g/cm^3	

A questo punto è stato possibile eseguire le 3 prove sulla ghiaia, ottenendo migliaia di dati per ogni test, importati in tabelle che, per la loro lunghezza, non sono state inserite nel presente documento. Per semplicità si riporta la parte di tabella in cui si ricavano i picchi delle curve, rispettivamente per le prove con $N_1 = 6$ kN, con $N_2 = 9$ kN e con $N_3 = 12$ kN, compresi i relativi grafici di tensioni di taglio – scorrimento ($\tau - \gamma$):

Tabella 5.5.1.3 - Dati ricavati dalla prova su ghiaia con $N = 6$ kN.

SCATOLA CON GHIAIA, CON CARICO DA 6 KN								
#	Spostamento [mm]	Carico [kN]	Carico [N]	Velocità [mm/s]	Riduzione lato l scatola [mm]	Area ridotta [mm ²]	Tensione normale σ_N [MPa]	Tensione di taglio τ [MPa]
2307	22,1	8,287	8287	0,02966	277,90	83370	0,07197	0,09940
2308	22,13	8,287	8287	0,03122	277,87	83361	0,07198	0,09941
2309	22,16	8,287	8287	0,02966	277,84	83352	0,07198	0,09942
2310	22,19	8,287	8287	0,02966	277,81	83343	0,07199	0,09943
2311	22,22	8,287	8287	0,03122	277,78	83334	0,07200	0,09944
2312	22,25	8,281	8281	0,03122	277,75	83325	0,07201	0,09938
2313	22,28	8,275	8275	0,03122	277,72	83316	0,07201	0,09932
2314	22,31	8,275	8275	0,03122	277,69	83307	0,07202	0,09933
2315	22,34	8,269	8269	0,03122	277,66	83298	0,07203	0,09927

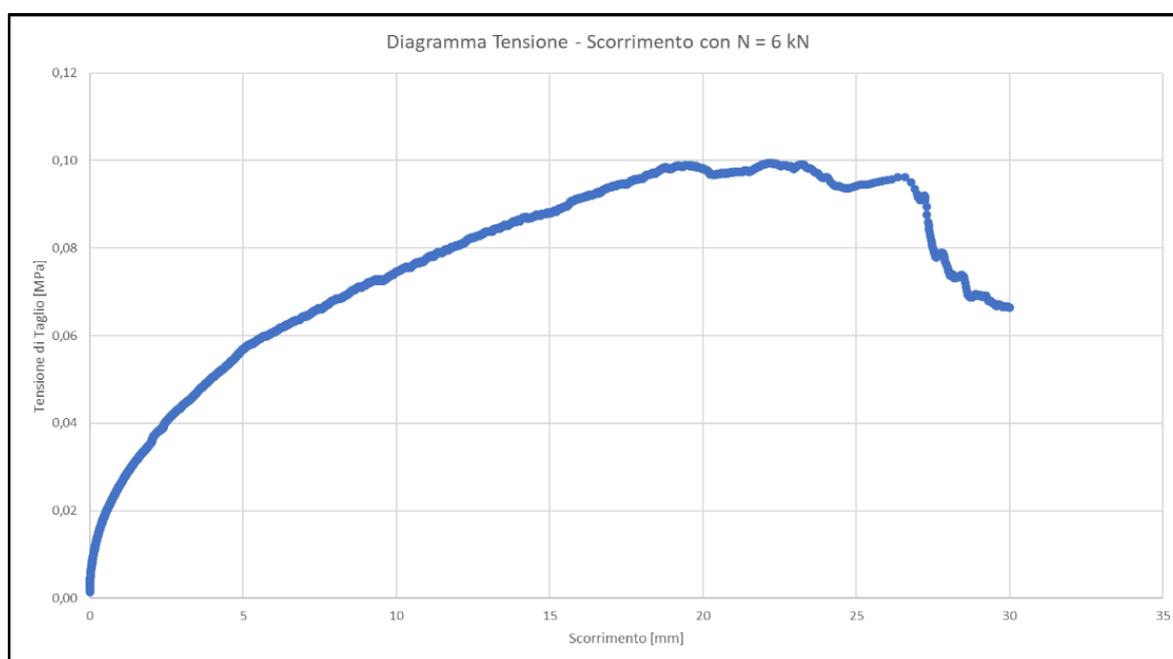


Figura 5.5.1.3 - Diagramma tensione di taglio - scorrimento con $N = 6$ kN.

Tabella 5.5.1.4 - Dati ricavati dalla prova su ghiaia con $N = 9$ kN.

SCATOLA CON GHIAIA, CON CARICO DA 9 KN								
#	Spostamento [mm]	Carico [kN]	Carico [N]	Velocità [mm/s]	Riduzione lato l scatola [mm]	Area ridotta [mm ²]	Tensione normale σ_N [MPa]	Tensione di taglio τ [MPa]
2333	22,45	11,09	11090,0	0,03434	277,55	83265	0,10809	0,13319
2334	22,49	11,09	11090,0	0,03434	277,51	83253	0,10810	0,13321
2335	22,52	11,1	11100,0	0,0359	277,48	83244	0,10812	0,13334
2336	22,56	11,1	11100,0	0,03746	277,44	83232	0,10813	0,13336
2337	22,6	11,1	11100,0	0,03746	277,40	83220	0,10815	0,13338
2338	22,64	11,08	11080,0	0,03902	277,36	83208	0,10816	0,13316
2339	22,68	11,02	11020,0	0,04215	277,32	83196	0,10818	0,13246
2340	22,73	10,92	10920,0	0,04527	277,27	83181	0,10820	0,13128
2341	22,78	10,81	10810,0	0,04839	277,22	83166	0,10822	0,12998

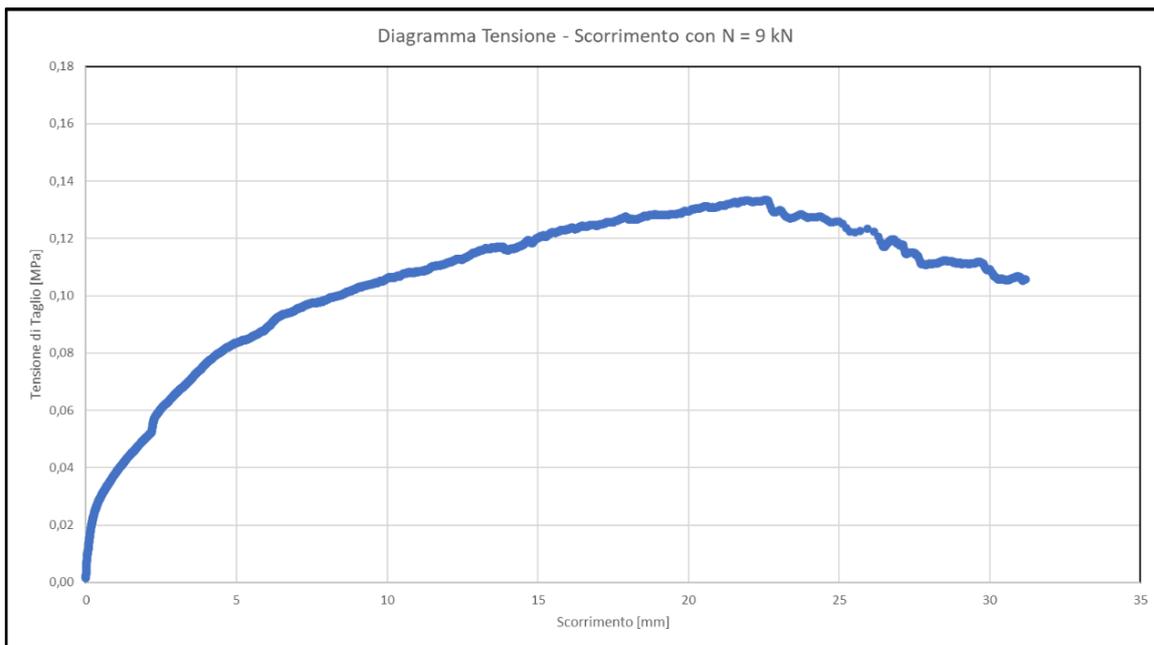


Figura 5.5.1.4 - Diagramma tensione di taglio - scorrimento con N = 9 kN.

Tabella 5.5.1.5 - Dati ricavati dalla prova su ghiaia con N = 12 kN.

SCATOLA CON GHIAIA, CON CARICO DA 12 KN								
#	Spostamento [mm]	Carico [kN]	Carico [N]	Velocità [mm/s]	Riduzione lato l scatola [mm]	Area ridotta [mm ²]	Tensione normale σ_N [MPa]	Tensione di taglio τ [MPa]
2242	19,41	14,04	14040,0	0,02029	280,59	84177	0,14256	0,16679
2243	19,43	14,04	14040,0	0,02029	280,57	84171	0,14257	0,16680
2244	19,46	14,04	14040,0	0,02185	280,54	84162	0,14258	0,16682
2245	19,48	14,05	14050,0	0,02185	280,52	84156	0,14259	0,16695
2246	19,5	14,05	14050,0	0,02185	280,50	84150	0,14260	0,16696
2247	19,52	14,04	14040,0	0,02185	280,48	84144	0,14261	0,16686
2248	19,54	14,03	14030,0	0,02185	280,46	84138	0,14262	0,16675
2249	19,57	14	14000,0	0,02341	280,43	84129	0,14264	0,16641
2250	19,59	13,95	13950,0	0,02341	280,41	84123	0,14265	0,16583

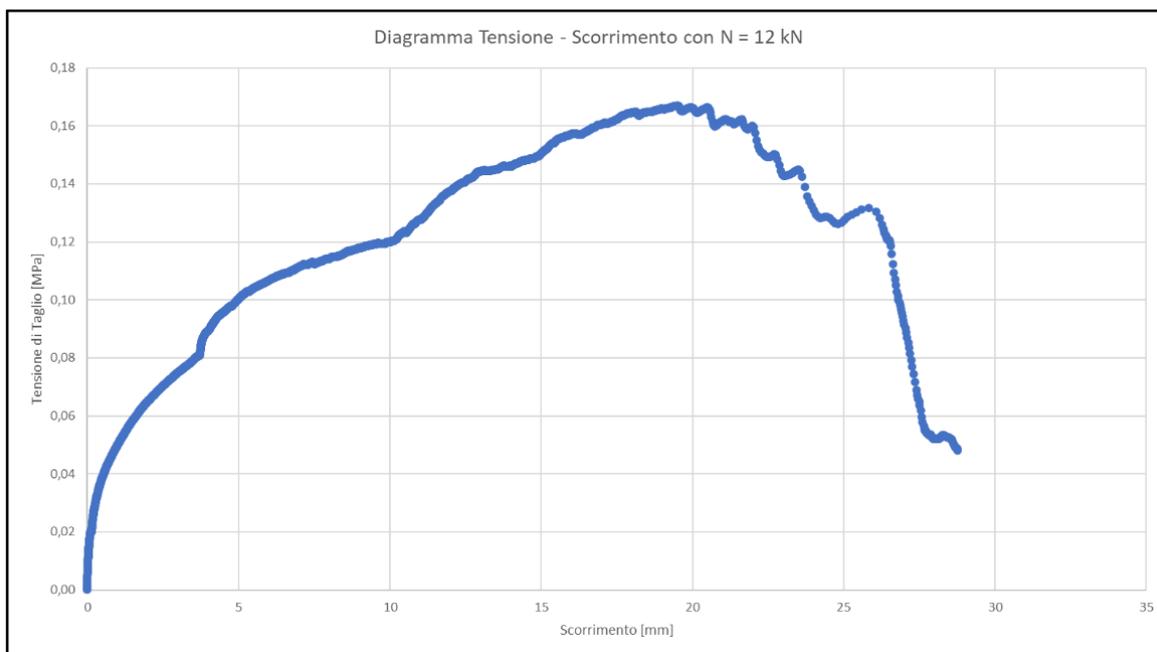


Figura 5.5.1.5 - Diagramma tensione di taglio - scorrimento con N = 12 kN.

Di seguito si riportano i dati di output per la realizzazione dei diagrammi $\sigma - \tau$:

Tabella 5.5.1.6 - Dati di output per la realizzazione dei grafici $\sigma - \tau$ per la ghiaia.

DATI DI OUTPUT PER L'ANALISI				
Dati	Simboli	Misure	Unità di misura	Note
Tensione Normale con 3 kN di carico	σ_1	0,07200	MPa	Tensioni Normali Massime in MPa
Tensione Normale con 6 kN di carico	σ_2	0,10815	MPa	
Tensione Normale con 9 kN di carico	σ_3	0,14260	MPa	
Tensione Normale con 3 kN di carico	σ_1	72,00	kPa	Tensioni Normali Massime in kPa
Tensione Normale con 6 kN di carico	σ_2	108,15	kPa	
Tensione Normale con 9 kN di carico	σ_3	142,60	kPa	
Tensione di Taglio MAX con 3 kN di carico	τ_1	0,09944	MPa	Tensioni di Taglio Massime in MPa da tabelle
Tensione di Taglio MAX con 6 kN di carico	τ_2	0,13338	MPa	
Tensione di Taglio MAX con 9 kN di carico	τ_3	0,16696	MPa	
Tensione di Taglio MAX con 3 kN di carico	τ_1	99,44	kPa	Tensioni di Taglio Massime in kPa da tabelle
Tensione di Taglio MAX con 6 kN di carico	τ_2	133,38	kPa	
Tensione di Taglio MAX con 9 kN di carico	τ_3	166,96	kPa	

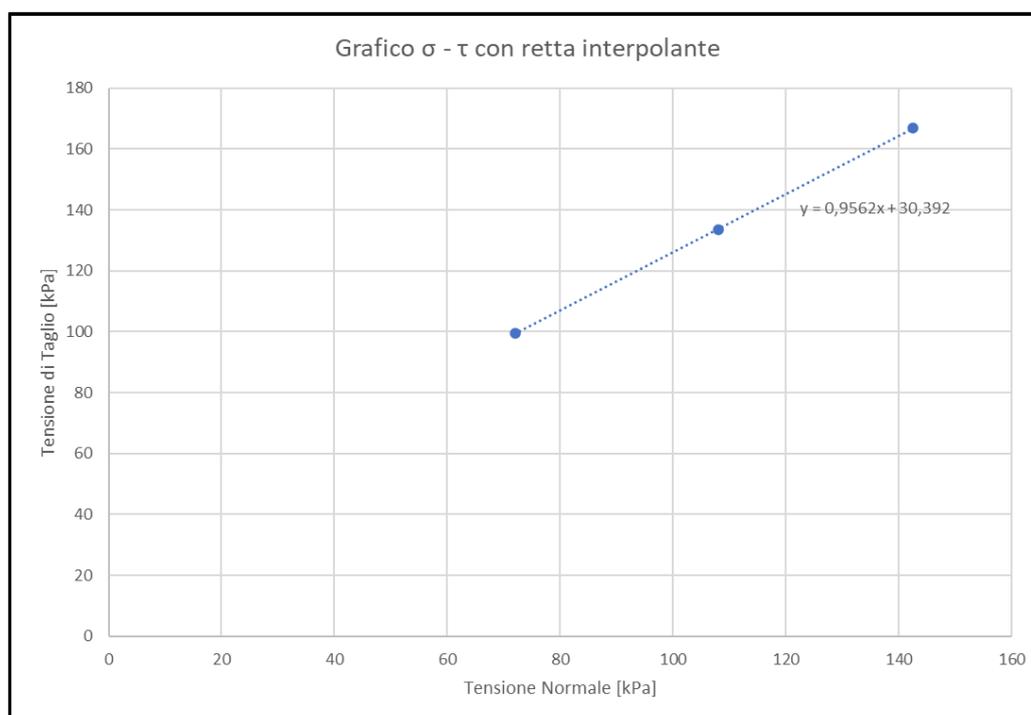


Figura 5.5.1.6 - Grafico $\sigma - \tau$ con retta interpolante, per ricavare coesione e angolo di resistenza a taglio della ghiaia.

Dal grafico precedente si ricavano coesione e angolo di resistenza al taglio della ghiaia:

Tabella 5.5.1.7 - Valori di coesione e angolo di resistenza a taglio della ghiaia.

Dati estratti dal grafico $\sigma - \tau$			
Dato	Simbolo	Misura	Unità
Coesione	c	30,392	kPa
Coesione	c	0,030392	MPa
Angolo di resistenza al taglio	ϕ	0,76	Radiani
Angolo di resistenza al taglio	ϕ	43,72	Gradi

Inoltre, per un ulteriore confronto con i dati precedenti, è stato costruito anche il grafico $\sigma - \tau$ con retta interpolante e intercetta all'origine degli assi:

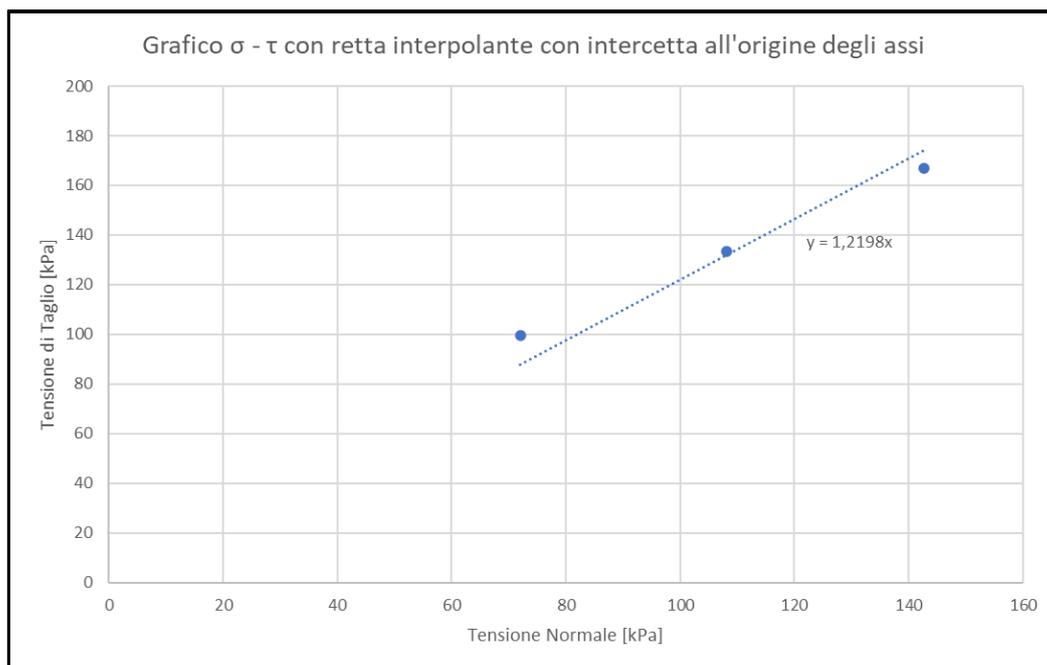


Figura 5.5.1.7 - Grafico $\sigma - \tau$ con retta interpolante ed intercetta all'origine, per ricavare l'angolo di resistenza a taglio della ghiaia, con coesione nulla.

Tabella 5.5.1.8 - Angolo di resistenza al taglio ricavato con intercetta all'origine.

Dati estratti dal grafico $\sigma - \tau$			
Dato	Simbolo	Misura	Unità
Angolo di resistenza al taglio	ϕ	0,88	Radiani
Angolo di resistenza al taglio	ϕ	50,65	Gradi

Infine, per confermare i risultati è stato creato in laboratorio un cumulo in piccola scala di ghiaia per misurare il suo angolo di inclinazione, da confrontare con l'angolo di resistenza a taglio ricavato dalle prove di taglio e richiesto dalla norma ASTM. I risultati sono riscontrabili dalle seguenti foto:



Figura 5.5.1.8 - Misurazione dell'angolo di inclinazione del cumulo di ghiaia da due differenti angolazioni. È stata aggiunta la foto di un imbuto con inclinazione nota (56°) per verificare l'affidabilità dello strumento di misurazione degli angoli tramite una APP.

Come si evince dalle immagini sopra, l'angolo di inclinazione del cumulo è pari a circa 37° , valore vicino a quello dell'angolo di resistenza al taglio pari a $43,72^\circ$ ricavato dalle prove di taglio.

5.5.2. Test su fresato setacciato

Come per la ghiaia, anche per il fresato setacciato sono stati ripetuti tutti i passaggi necessari per la determinazione dei parametri "c" e " ϕ ", ripetendo le 3 prove sempre con i 3 step di carico N (6 kN, 9 kN, 12 kN).

Anche in questo caso la distanza tra le scatole della macchina a taglio diretto è stata impostata a 5 mm, dopo aver effettuato l'analisi granulometrica sulle particelle di fresato setacciato, come riportato di seguito:

Tabella 5.5.2.1 - Analisi granulometrica realizzata sulle particelle di fresato setacciato.

Sieve size (mm)	Sieve Mass (g)	Sieve + soil (g)	Retained (g)	Retained (g) + Filler	Cumulative R (g)	Cumulative R (%)	Passing (%)
31,5	1421,1	1421,1	0	0	0	0	100
20	1318,8	1318,8	0	0	0	0	100
16	1302,5	1302,5	0	0	0	0	100
8	1070,8	1077,1	6,3	6,3	6,3	0,6	99,4
4	1108,2	1331,5	223,3	223,3	229,6	21,7	78,3
2	980,3	1231,7	251,4	251,4	481	45,5	54,5
0,5	783,8	1147,9	364,1	364,1	845,1	80	20
0,25	726,7	831,4	104,7	104,7	949,8	89,9	10,1
0,063	768,1	843,9	75,8	75,8	1025,6	97	3
Pan	916,6	932,2	15,6	31,2	1056,8	100	0
TOTAL	10396,9	11438,1	1041,2	1056,8			

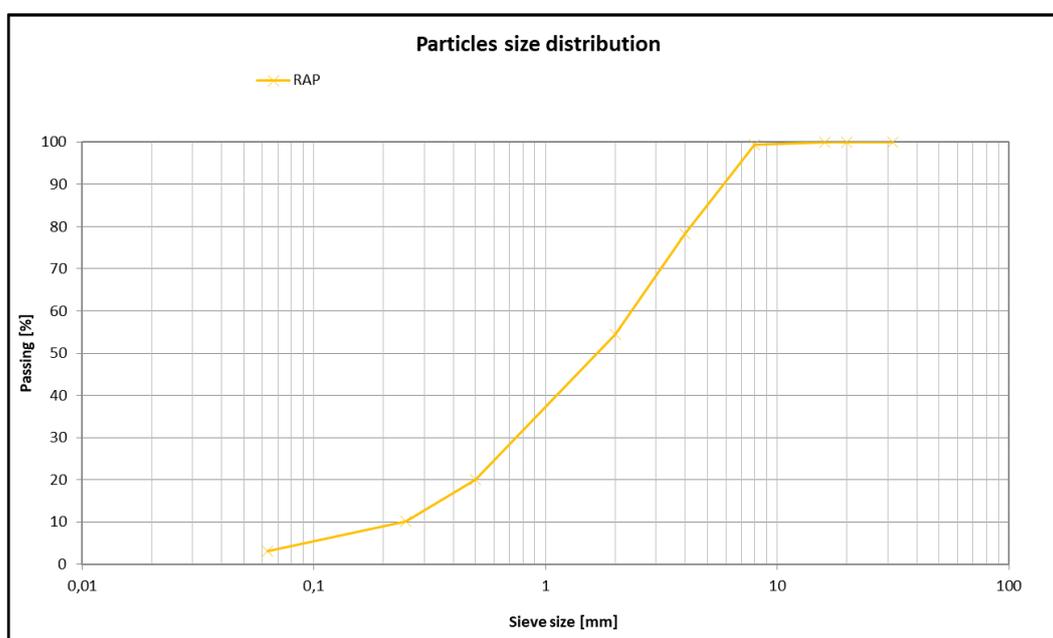


Figura 5.5.2.1 - Distribuzione granulometrica delle particelle di fresato setacciato.

Anche per il fresato setacciato, prima di iniziare i test, si è calcolata la densità tramite pesatura:

Tabella 5.5.2.2 - Calcolo della densità del fresato setacciato.

CALCOLO DENSITA' E PESATURA DEL FRESATO SETACCIATO				
Dati	Simboli	Misure	Unità di misura	Note
Volume Contenitore	V_C	5040	cm^3	Pesatura #1
Peso Contenitore	P_C	4248,4	g	
Peso Contenitore + Fresato Setacciato	P_{CF}	11737,1	g	
Peso Fresato Setacciato	P_F	7488,7	g	
Densità Fresato Setacciato	γ_F	1,486	g/cm^3	Pesatura #2
Peso Contenitore + Fresato Setacciato	P_{CF}	11633,6	g	
Peso Fresato Setacciato	P_F	7385,2	g	
Densità Fresato Setacciato	γ_F	1,465	g/cm^3	Pesatura #3
Peso Contenitore + Fresato Setacciato	P_{CF}	11988,4	g	
Peso Fresato Setacciato	P_F	7740	g	
Densità Fresato Setacciato	γ_F	1,536	g/cm^3	
MEDIA DELLE DENSITA' CALCOLATE	γ_F	1,496	g/cm^3	

Di seguito si riportano i dati ricavati dalle 3 prove sul fresato setacciato:

Tabella 5.5.2.3 - Dati ricavati dalla prova su fresato setacciato con $N = 6$ kN.

SCATOLA CON FRESATO SETACCIATO, CON CARICO DA 6 KN								
#	Spostamento [mm]	Carico [kN]	Carico [N]	Velocità [mm/s]	Riduzione lato l scatola [mm]	Area ridotta [mm ²]	Tensione normale σ_N [MPa]	Tensione di taglio τ [MPa]
2387	25,9	8,837	8837,0	0,1015	274,10	82230	0,07297	0,10747
2388	26,02	8,912	8912,0	0,1124	273,98	82194	0,07300	0,10843
2389	26,16	9,012	9012,0	0,128	273,84	82152	0,07304	0,10970
2390	26,32	9,162	9162,0	0,153	273,68	82104	0,07308	0,11159
2391	26,54	9,287	9287,0	0,1936	273,46	82038	0,07314	0,11320
2392	26,74	9,149	9149,0	0,2092	273,26	81978	0,07319	0,11160
2393	26,87	8,843	8843,0	0,1639	273,13	81939	0,07323	0,10792
2394	26,95	8,556	8556,0	0,103	273,05	81915	0,07325	0,10445
2395	27	8,331	8331,0	0,06556	273,00	81900	0,07326	0,10172

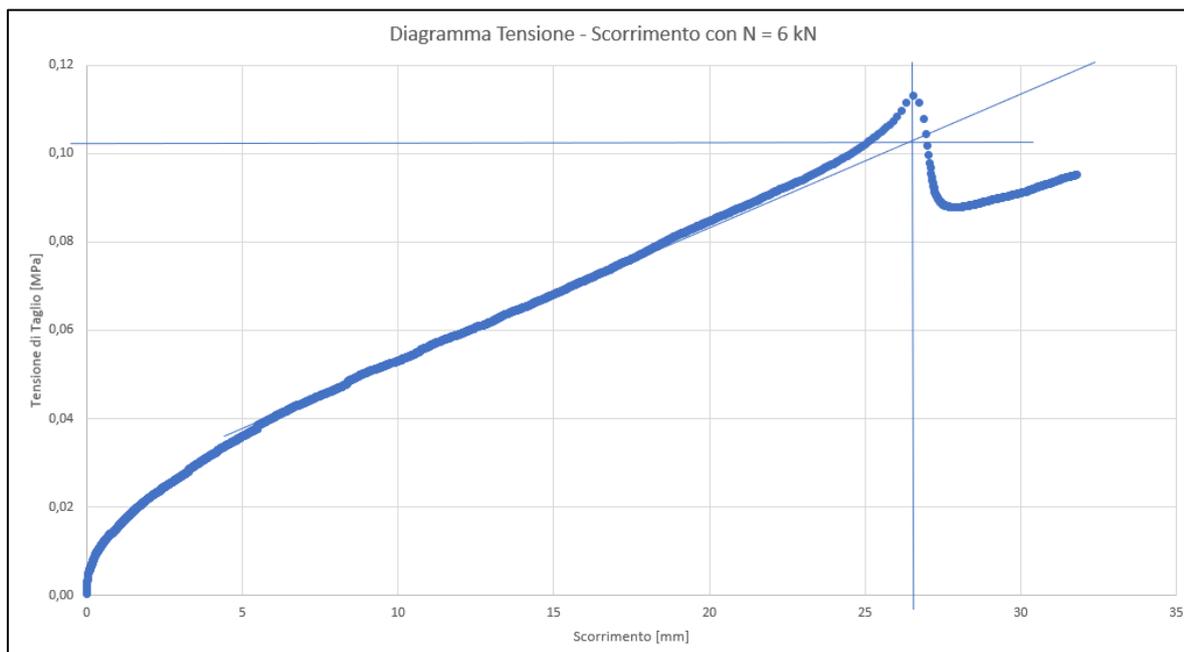


Figura 5.5.2.2 - Diagramma tensione di taglio - scorrimento con $N = 6$ kN.

Tabella 5.5.2.4 - Dati ricavati dalla prova su fresato setacciato con $N = 9$ kN.

SCATOLA CON FRESATO SETACCIATO, CON CARICO DA 9 KN								
#	Spostamento [mm]	Carico [kN]	Carico [N]	Velocità [mm/s]	Riduzione lato l scatola [mm]	Area ridotta [mm ²]	Tensione normale σ_N [MPa]	Tensione di taglio τ [MPa]
2385	25,6	11,53	11530,0	0,1046	274,40	82320	0,10933	0,14006
2386	25,72	11,63	11630,0	0,1155	274,28	82284	0,10938	0,14134
2387	25,86	11,77	11770,0	0,1311	274,14	82242	0,10943	0,14311
2388	26,04	11,98	11980,0	0,1623	273,96	82188	0,10951	0,14576
2389	26,26	12,03	12030,0	0,1998	273,74	82122	0,10959	0,14649
2390	26,43	11,75	11750,0	0,1936	273,57	82071	0,10966	0,14317
2391	26,54	11,37	11370,0	0,1405	273,46	82038	0,10971	0,13859
2392	26,6	11,05	11050,0	0,08741	273,40	82020	0,10973	0,13472
2393	26,65	10,8	10800,0	0,05619	273,35	82005	0,10975	0,13170

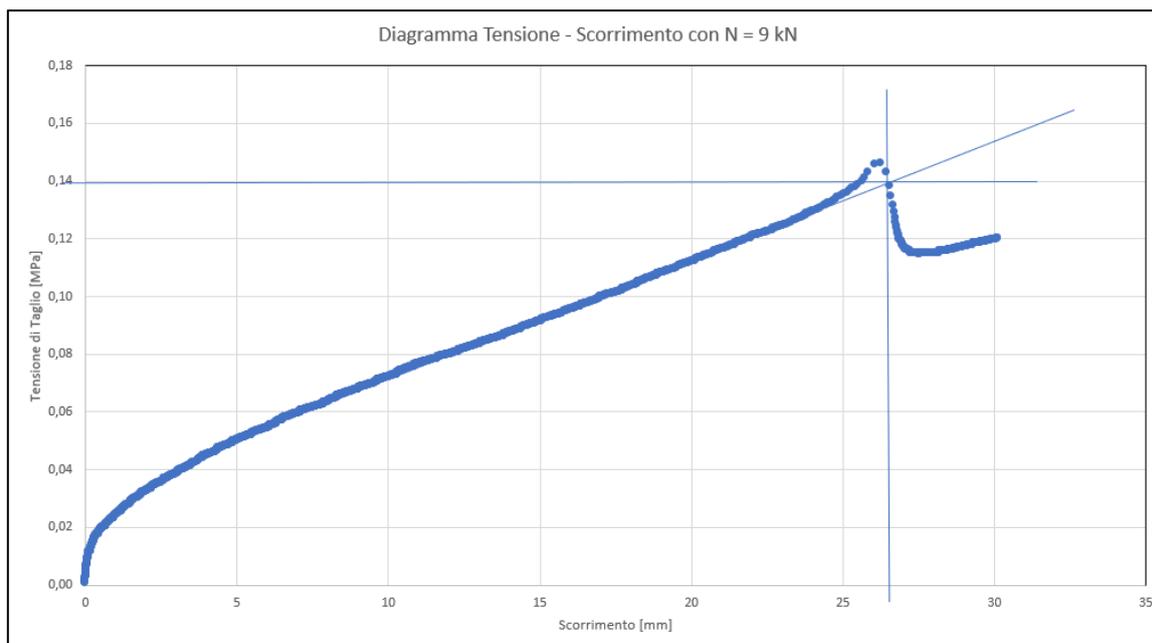


Figura 5.5.2.3 - Diagramma tensione di taglio - scorrimento con N = 9 kN.

Tabella 5.5.2.5 - Dati ricavati dalla prova su fresato setacciato con N = 12 kN.

SCATOLA CON FRESATO SETACCIATO, CON CARICO DA 12 kN								
#	Spostamento [mm]	Carico [kN]	Carico [N]	Velocità [mm/s]	Riduzione lato I scatola [mm]	Area ridotta [mm ²]	Tensione normale σ_N [MPa]	Tensione di taglio τ [MPa]
2388	24,81	16,41	16410,0	0,09366	275,19	82557	0,14535	0,19877
2389	24,92	16,54	16540,0	0,1015	275,08	82524	0,14541	0,20043
2390	25,04	16,72	16720,0	0,1139	274,96	82488	0,14548	0,20270
2391	25,2	16,98	16980,0	0,1389	274,80	82440	0,14556	0,20597
2392	25,39	17,18	17180,0	0,1733	274,61	82383	0,14566	0,20854
2393	25,55	16,99	16990,0	0,1779	274,45	82335	0,14575	0,20635
2394	25,66	16,58	16580,0	0,1389	274,34	82302	0,14580	0,20145
2395	25,74	16,19	16190,0	0,0921	274,26	82278	0,14585	0,19677
2396	25,79	15,87	15870,0	0,06088	274,21	82263	0,14587	0,19292

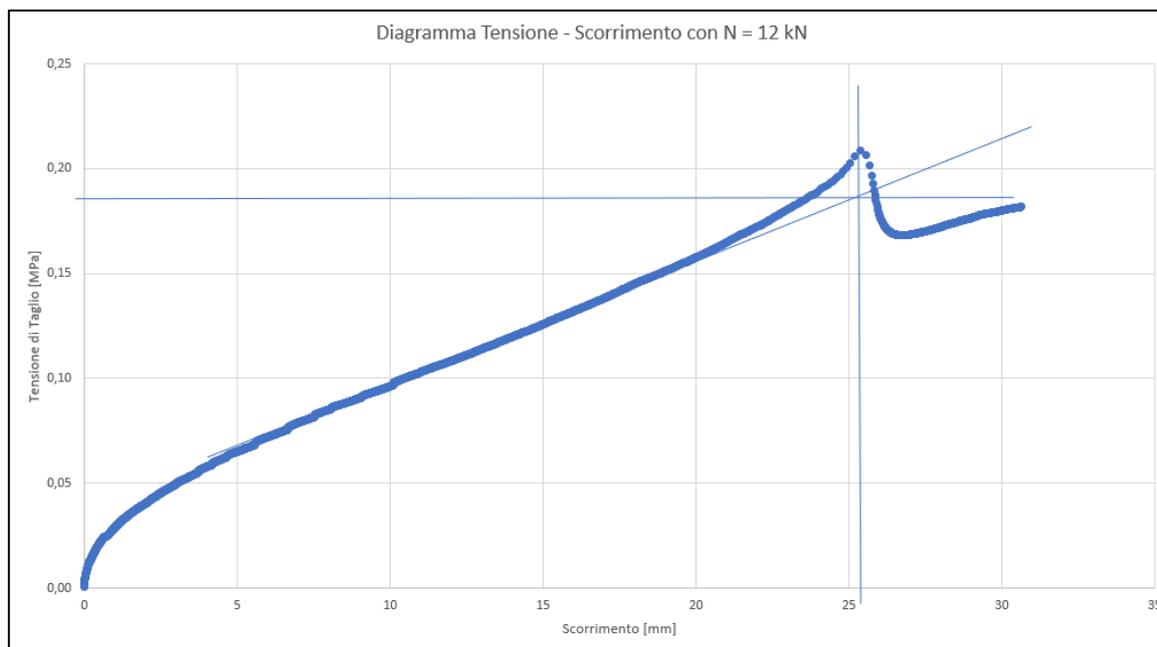


Figura 5.5.2.4 - Diagramma tensione di taglio - scorrimento con N = 12 kN.

Come si può notare dalle immagini e dalle tabelle sopra riportate, come valori massimi nelle tre prove sono stati presi i punti sulla stessa verticale dei picchi, ma con andamento tangente alla curva nella parte pre-picco, per un trend anomalo dei reali punti di massima intensità di τ dalle prove.

Dall'intersezione tra la tangente e la verticale, tracciando una retta orizzontale parallela all'asse delle ascisse, si è potuto ricavare il valore della tensione di taglio τ reale per le 3 prove, come riportato nella seguente tabella 5.5.2.6. Stessa cosa è stata effettuata per il fresato non setacciato, che verrà discusso nel paragrafo successivo, che presentava la stessa anomalia. A questo punto si riportano di seguito i dati di output per la realizzazione dei diagrammi $\sigma - \tau$ per il fresato setacciato, come fatto in precedenza con la ghiaia:

Tabella 5.5.2.6 - Dati di output per la realizzazione dei grafici $\sigma - \tau$ per il fresato setacciato.

DATI DI OUTPUT PER L'ANALISI				
Dati	Simboli	Misure	Unità di misura	Note
Tensione Normale con 3 kN di carico	σ_1	0,07314	MPa	Tensioni Normali Massime in MPa
Tensione Normale con 6 kN di carico	σ_2	0,10959	MPa	
Tensione Normale con 9 kN di carico	σ_3	0,14566	MPa	
Tensione Normale con 3 kN di carico	σ_1	73,14	kPa	Tensioni Normali Massime in kPa
Tensione Normale con 6 kN di carico	σ_2	109,59	kPa	
Tensione Normale con 9 kN di carico	σ_3	145,66	kPa	
Tensione di Taglio MAX con 3 kN di carico	τ_1	0,10200	MPa	Tensioni di Taglio Massime in MPa da tabelle
Tensione di Taglio MAX con 6 kN di carico	τ_2	0,14000	MPa	
Tensione di Taglio MAX con 9 kN di carico	τ_3	0,18100	MPa	
Tensione di Taglio MAX con 3 kN di carico	τ_1	102,00	kPa	Tensioni di Taglio Massime in kPa da tabelle
Tensione di Taglio MAX con 6 kN di carico	τ_2	140,00	kPa	
Tensione di Taglio MAX con 9 kN di carico	τ_3	181,00	kPa	

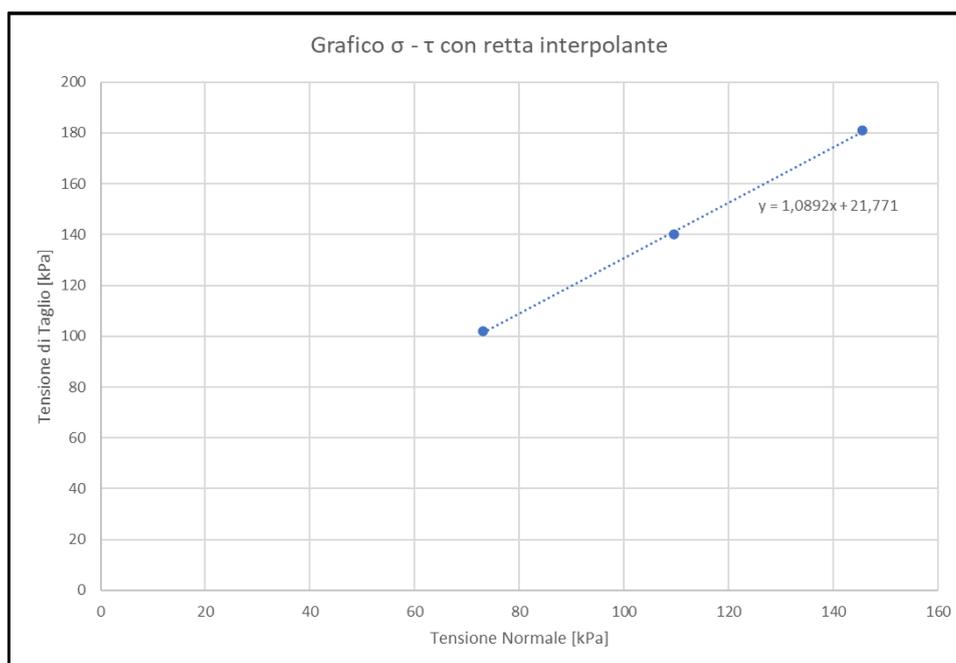


Figura 5.5.2.5 - Grafico $\sigma - \tau$ con retta interpolante, per ricavare coesione e angolo di resistenza a taglio del fresato setacciato.

Dal grafico precedente si ricavano coesione e angolo di resistenza al taglio del fresato setacciato:

Tabella 5.5.2.7 - Valori di coesione e angolo di resistenza a taglio del fresato setacciato.

Dati estratti dal grafico $\sigma - \tau$			
Dato	Simbolo	Misura	Unità
Coesione	c	21,771	kPa
Coesione	c	0,021771	MPa
Angolo di resistenza al taglio	ϕ	0,83	Radiani
Angolo di resistenza al taglio	ϕ	47,44	Gradi

Anche in questo caso, per confronto con i dati precedenti, è stato costruito il grafico $\sigma - \tau$ con retta interpolante e intercetta all'origine degli assi:

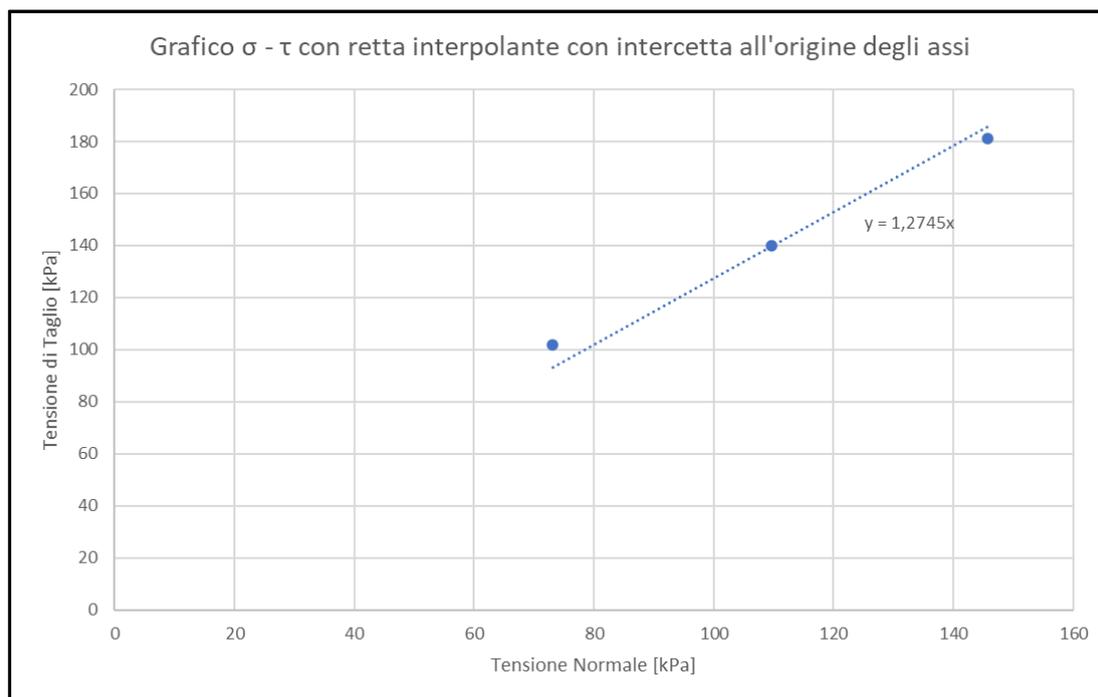


Figura 5.5.2.6 - Grafico $\sigma - \tau$ con retta interpolante ed intercetta all'origine, per ricavare l'angolo di resistenza a taglio del fresato setacciato, con coesione nulla.

Tabella 5.5.2.8 - Angolo di resistenza al taglio ricavato con intercetta all'origine.

Dati estratti dal grafico $\sigma - \tau$			
Dato	Simbolo	Misura	Unità
Angolo di resistenza al taglio	ϕ	0,91	Radiani
Angolo di resistenza al taglio	ϕ	51,88	Gradi

Infine, anche per il fresato setacciato, per confermare i risultati è stato creato in laboratorio un cumulo in piccola scala per misurare il suo angolo di inclinazione, da confrontare con l'angolo di resistenza ricavato dalle prove di taglio. I risultati sono riscontrabili dalle seguenti foto:

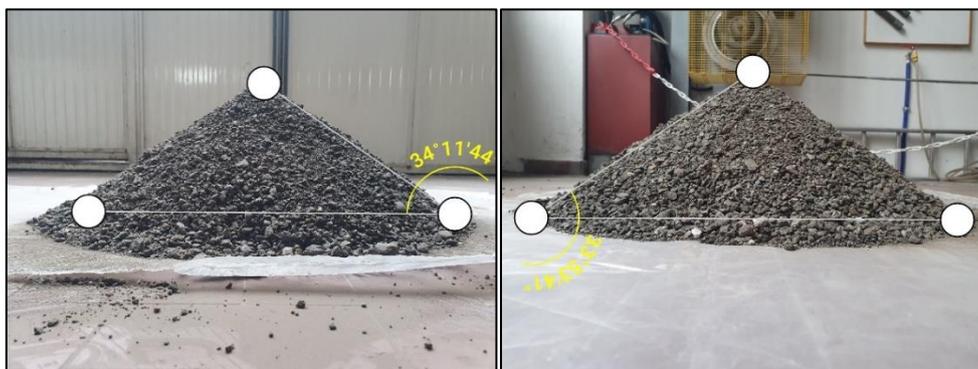


Figura 5.5.2.7 - Misurazione dell'angolo di inclinazione del cumulo di fresato setacciato da due differenti angolazioni.

Come si può constatare dalle immagini, l'angolo di inclinazione del cumulo di fresato setacciato in piccola scala è all'incirca pari a 34° (misurato da più angolazioni), valore lontano, a differenza della ghiaia, rispetto a quello dell'angolo di resistenza al taglio ricavato dalle prove pari a $47,44^\circ$.

5.5.3. Test su fresato non setacciato

A differenza del fresato setacciato, quello non setacciato presenta grani con dimensioni differenti e maggiori e, per tale motivo, le due scatole sono state allontanate proprio per rispettare la normativa che richiede una maggiore distanza dei contenitori all'incirca uguale al diametro massimo dei grani. Perciò, la distanza è stata aumentata da 5 mm per ghiaia e fresato setacciato a 15 mm per il fresato non setacciato. In questo caso, però, non è stata effettuata un'analisi granulometrica poiché i diametri delle particelle di fresato non setacciato presentavano dimensioni molto differenti tra loro, essendo stato prelevato fresato setacciato grezzo direttamente da un reale cumulo di fresato. Si sono riscontrati addirittura dei grani con 60 mm di diametro che, essendo facilmente rintracciabili, sono stati esclusi dall'analisi (questo perché tali particelle avrebbero compromesso la prova provocando fuoriuscita di materiale da ogni lato tra le scatole) e con una verifica di tipo visivo è stato stimato un diametro massimo dei grani pari a 15 mm, motivo per il quale sia stata scelta la medesima distanza tra le scatole della macchina a taglio.

Anche per quest'ultimo materiale sono stati seguiti gli stessi passaggi, come per i due precedenti, partendo proprio dal calcolo della sua densità tramite sua pesatura preliminare:

Tabella 5.5.3.1 - Calcolo della densità del fresato NON setacciato.

CALCOLO DENSITA' E PESATURA DEL FRESATO NON SETACCIATO				
Dati	Simboli	Misure	Unità di misura	Note
Volume Contenitore	V_C	5040	cm^3	Pesatura #1
Peso Contenitore	P_C	4248,4	g	
Peso Contenitore + Fresato non setacciato	P_{CF}	11502,6	g	
Peso Fresato non setacciato	P_F	7254,2	g	
Densità fresato non setacciato	γ_F	1,439	g/cm^3	
Peso Contenitore + Fresato non setacciato	P_{CF}	11566,6	g	Pesatura #2
Peso Fresato non setacciato	P_F	7318,2	g	
Densità fresato non setacciato	γ_F	1,452	g/cm^3	
Peso Contenitore + Fresato non setacciato	P_{CF}	11895,2	g	Pesatura #3
Peso Fresato non setacciato	P_F	7646,8	g	
Densità fresato non setacciato	γ_F	1,517	g/cm^3	
MEDIA DELLE DENSITA' CALCOLATE	γ_F	1,470	g/cm^3	

Di seguito si riportano le tabelle con i dati ricavati dalle 3 prove sul fresato non setacciato:

Tabella 5.5.3.2 - Dati ricavati dalla prova su fresato NON setacciato con $N = 6 \text{ kN}$.

SCATOLA CON FRESATO NON SETACCIATO, CON CARICO DA 6 KN								
#	Spostamento [mm]	Carico [kN]	Carico [N]	Velocità [mm/s]	Riduzione lato I scatola [mm]	Area ridotta [mm^2]	Tensione normale σ_n [MPa]	Tensione di taglio τ [MPa]
2384	25,83	7,75	7750,0	0,103	274,17	82251	0,07295	0,09422
2385	25,95	7,832	7832,0	0,1124	274,05	82215	0,07298	0,09526
2386	26,08	7,931	7931,0	0,128	273,92	82176	0,07301	0,09651
2387	26,26	8,094	8094,0	0,1545	273,74	82122	0,07306	0,09856
2388	26,47	8,219	8219,0	0,1951	273,53	82059	0,07312	0,10016
2389	26,66	8,081	8081,0	0,2045	273,34	82002	0,07317	0,09855
2390	26,79	7,807	7807,0	0,1577	273,21	81963	0,07320	0,09525
2391	26,86	7,544	7544,0	0,0999	273,14	81942	0,07322	0,09207
2392	26,91	7,344	7344,0	0,06244	273,09	81927	0,07324	0,08964

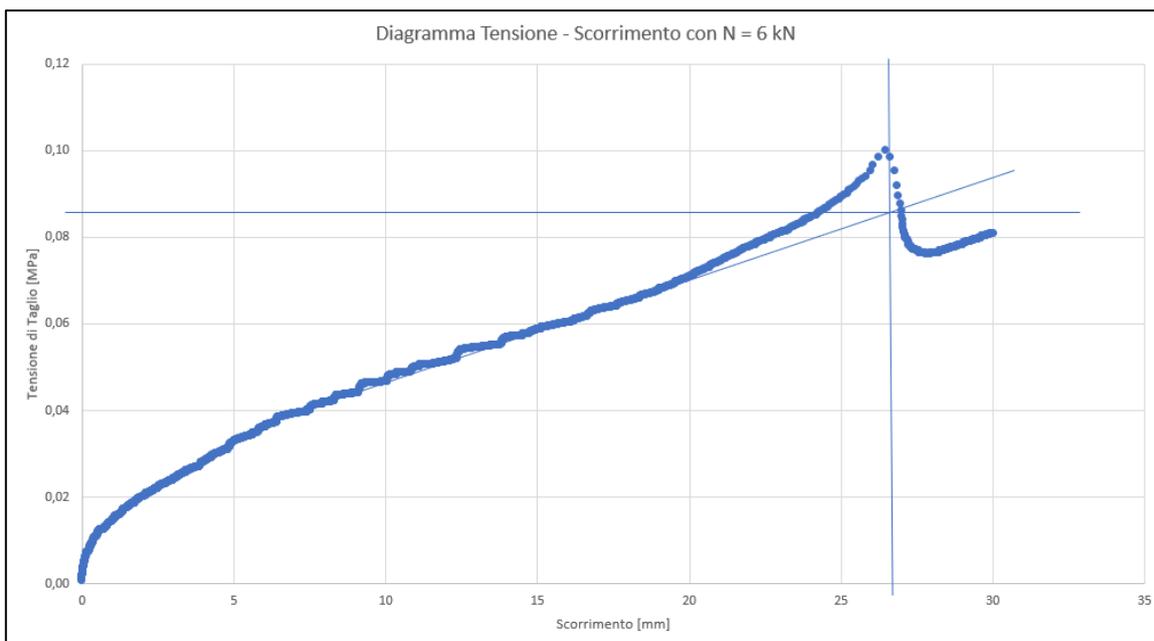


Figura 5.5.3.1 - Diagramma tensione di taglio - scorrimento con N = 6 kN.

Tabella 5.5.3.3 - Dati ricavati dalla prova su fresato NON setacciato con N = 9 kN.

SCATOLA CON FRESATO NON SETACCIATO, CON CARICO DA 9 KN								
#	Spostamento [mm]	Carico [kN]	Carico [N]	Velocità [mm/s]	Riduzione lato l scatola [mm]	Area ridotta [mm ²]	Tensione normale σ_n [MPa]	Tensione di taglio τ [MPa]
2385	25,26	10,98	10980,0	0,1046	274,74	82422	0,10919	0,13322
2386	25,38	11,1	11100,0	0,1171	274,62	82386	0,10924	0,13473
2387	25,53	11,26	11260,0	0,1342	274,47	82341	0,10930	0,13675
2388	25,71	11,5	11500,0	0,1655	274,29	82287	0,10937	0,13975
2389	25,92	11,56	11560,0	0,1936	274,08	82224	0,10946	0,14059
2390	26,07	11,3	11300,0	0,1795	273,93	82179	0,10952	0,13750
2391	26,17	10,94	10940,0	0,1264	273,83	82149	0,10956	0,13317
2392	26,23	10,62	10620,0	0,07961	273,77	82131	0,10958	0,12931
2393	26,28	10,39	10390,0	0,05307	273,72	82116	0,10960	0,12653

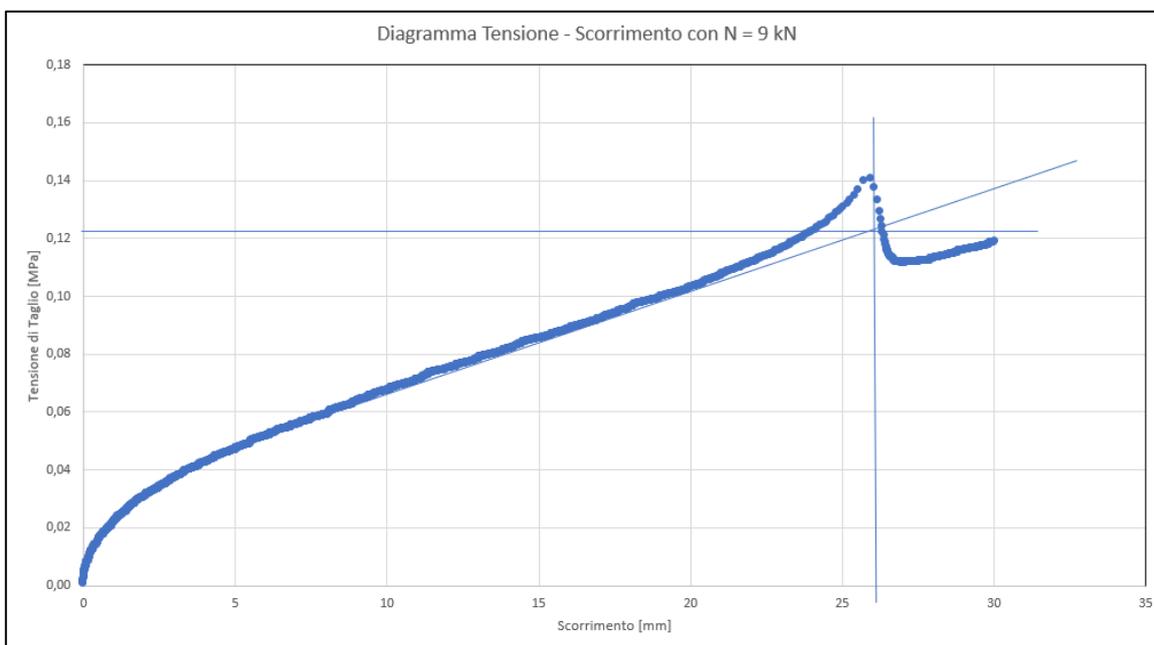


Figura 5.5.3.2 - Diagramma tensione di taglio - scorrimento con N = 9 kN.

Tabella 5.5.3.4 - Dati ricavati dalla prova su fresato NON setacciato con N = 12 kN.

SCATOLA CON FRESATO NON SETACCIATO, CON CARICO DA 12 KN								
#	Spostamento [mm]	Carico [kN]	Carico [N]	Velocità [mm/s]	Riduzione lato l scatola [mm]	Area ridotta [mm ²]	Tensione normale σ_N [MPa]	Tensione di taglio τ [MPa]
2385	25,08	13	13000,0	0,103	274,92	82476	0,14550	0,15762
2386	25,2	13,15	13150,0	0,1139	274,80	82440	0,14556	0,15951
2387	25,34	13,36	13360,0	0,1296	274,66	82398	0,14563	0,16214
2388	25,53	13,64	13640,0	0,1623	274,47	82341	0,14574	0,16565
2389	25,72	13,68	13680,0	0,1904	274,28	82284	0,14584	0,16625
2390	25,87	13,37	13370,0	0,1733	274,13	82239	0,14592	0,16257
2391	25,97	12,97	12970,0	0,1233	274,03	82209	0,14597	0,15777
2392	26,03	12,63	12630,0	0,07961	273,97	82191	0,14600	0,15367
2393	26,08	12,37	12370,0	0,05463	273,92	82176	0,14603	0,15053

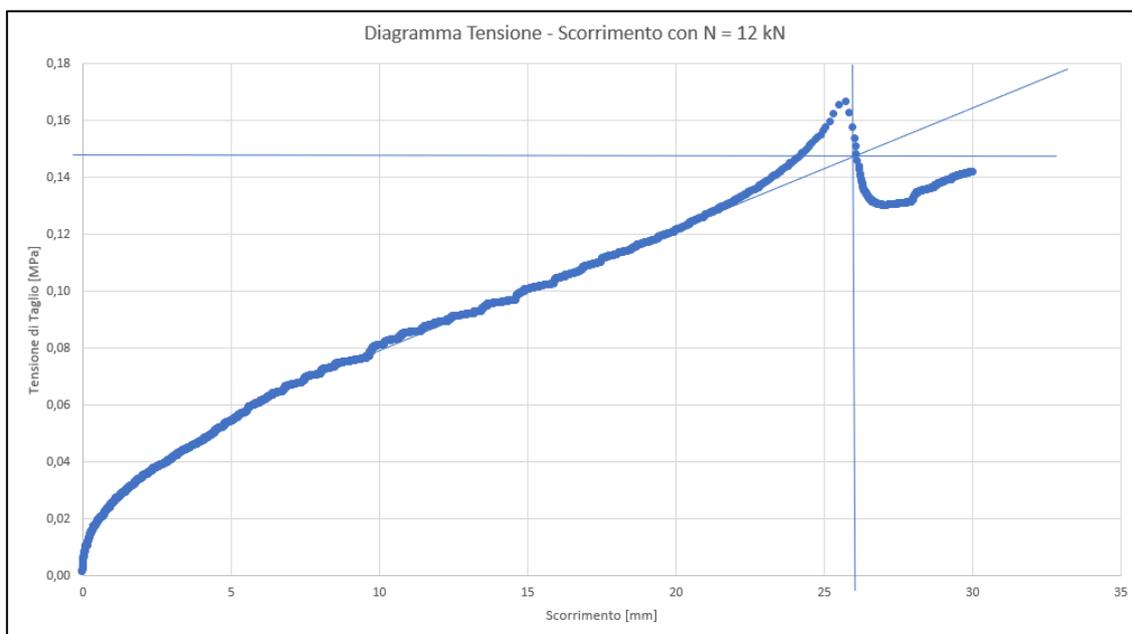


Figura 5.5.3.3 - Diagramma tensione di taglio - scorrimento con N = 12 kN.

A questo punto si riportano di seguito i dati di output per la realizzazione dei diagrammi $\sigma - \tau$ per il fresato non setacciato, così come fatto in precedenza con la ghiaia ed il fresato setacciato:

Tabella 5.5.3.5 - Dati di output per la realizzazione dei grafici $\sigma - \tau$ per il fresato NON setacciato.

DATI DI OUTPUT PER L'ANALISI				
Dati	Simboli	Misure	Unità di misura	Note
Tensione Normale con 3 kN di carico	σ_1	0,07312	MPa	Tensioni Normali Massime in MPa
Tensione Normale con 6 kN di carico	σ_2	0,10946	MPa	
Tensione Normale con 9 kN di carico	σ_3	0,14584	MPa	
Tensione Normale con 3 kN di carico	σ_1	73,12	kPa	Tensioni Normali Massime in kPa
Tensione Normale con 6 kN di carico	σ_2	109,46	kPa	
Tensione Normale con 9 kN di carico	σ_3	145,84	kPa	
Tensione di Taglio MAX con 3 kN di carico	τ_1	0,08500	MPa	Tensioni di Taglio Massime in MPa da tabelle
Tensione di Taglio MAX con 6 kN di carico	τ_2	0,12000	MPa	
Tensione di Taglio MAX con 9 kN di carico	τ_3	0,14900	MPa	
Tensione di Taglio MAX con 3 kN di carico	τ_1	85,00	kPa	Tensioni di Taglio Massime in kPa da tabelle
Tensione di Taglio MAX con 6 kN di carico	τ_2	120,00	kPa	
Tensione di Taglio MAX con 9 kN di carico	τ_3	149,00	kPa	

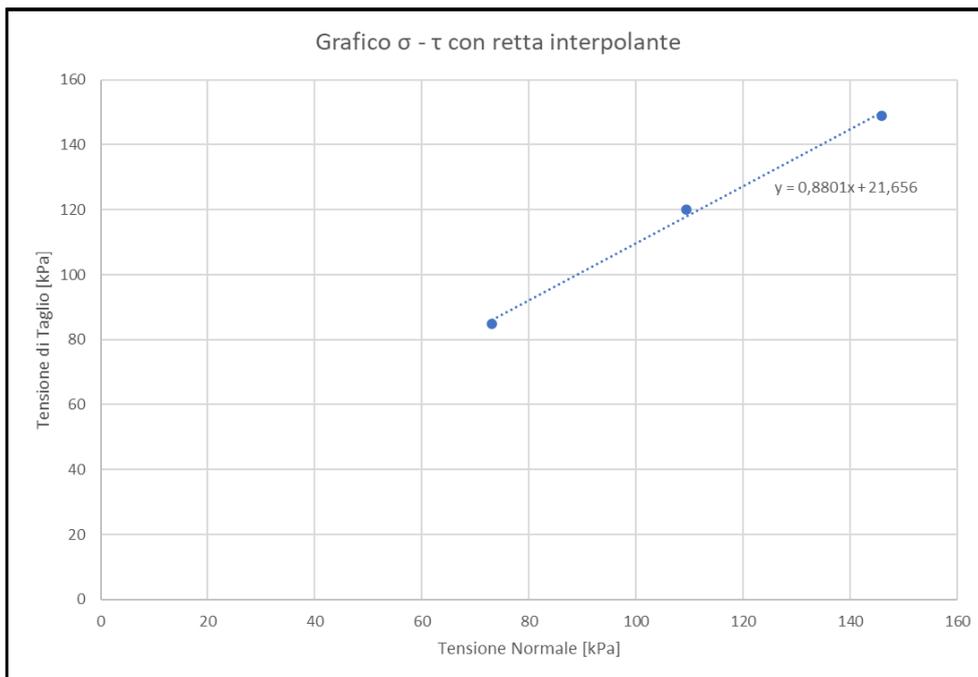


Figura 5.5.3.4 - Grafico $\sigma - \tau$ con retta interpolante, per ricavare coesione e angolo di resistenza a taglio del fresato NON setacciato.

Dal grafico sopra si ricavano coesione e angolo di resistenza a taglio del fresato non setacciato:

Tabella 5.5.3.6 - Valori di coesione e angolo di resistenza a taglio del fresato NON setacciato.

Dati estratti dal grafico $\sigma - \tau$			
Dato	Simbolo	Misura	Unità
Coesione	c	21,656	kPa
Coesione	c	0,021656	MPa
Angolo di resistenza al taglio	ϕ	0,72	Radiani
Angolo di resistenza al taglio	ϕ	41,35	Gradi

Anche in quest'ultimo caso, per confronto con i dati precedenti, è stato costruito il grafico $\sigma - \tau$ con retta interpolante e intercetta all'origine degli assi:

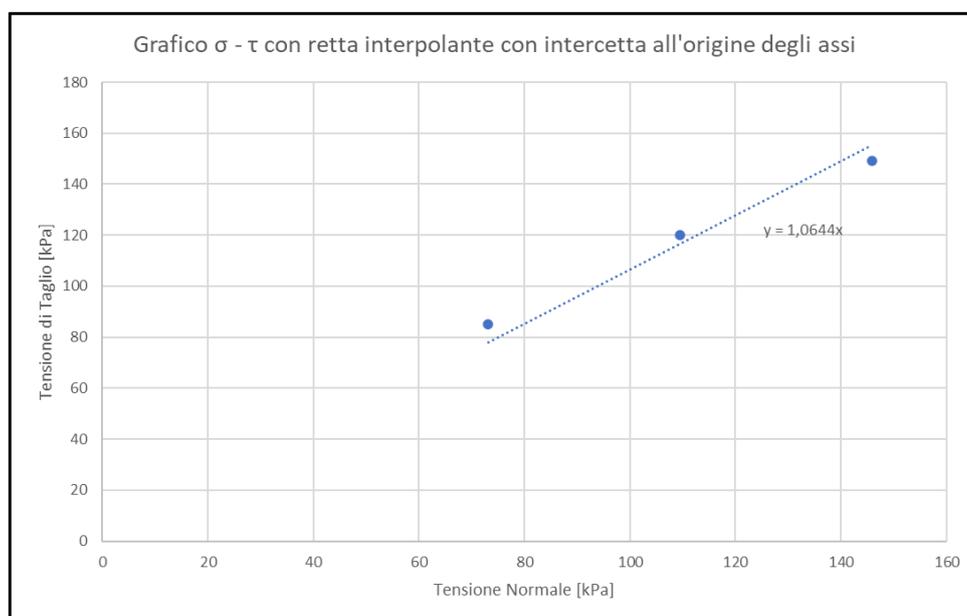
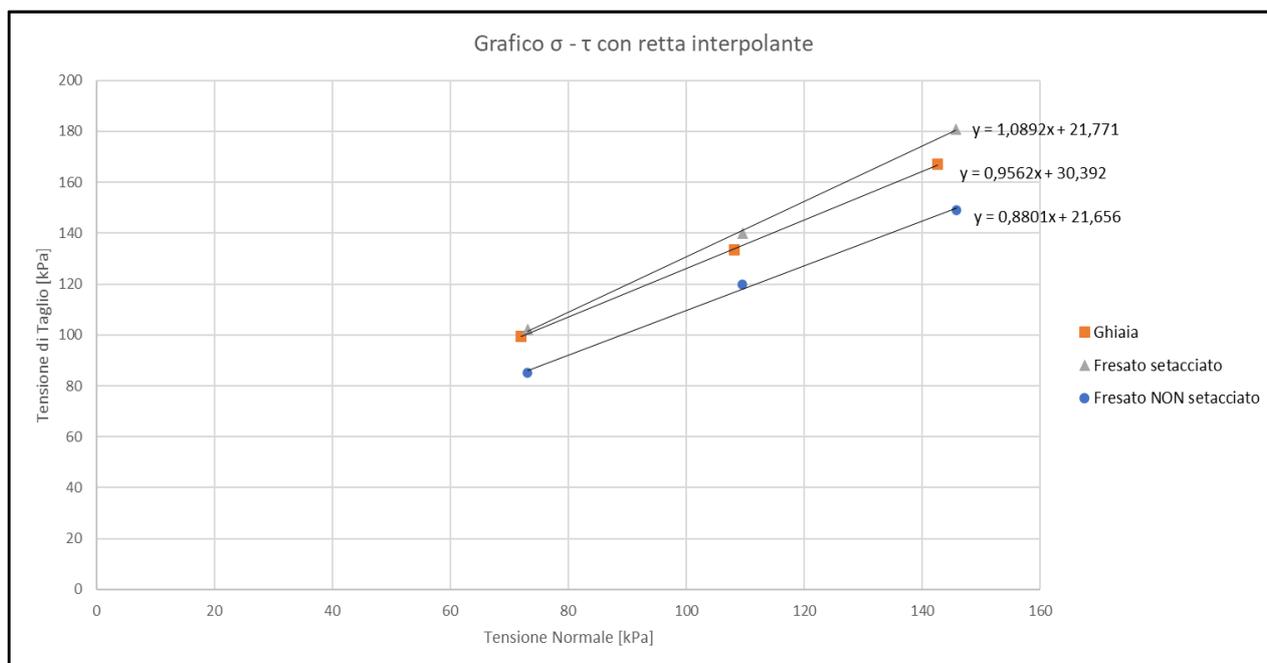


Figura 5.5.3.5 - Grafico $\sigma - \tau$ con retta interpolante ed intercetta all'origine, per ricavare l'angolo di resistenza a taglio del fresato NON setacciato, con coesione nulla.

Tabella 5.5.3.7 - Angolo di resistenza al taglio ricavato con intercetta all'origine.

Dati estratti dal grafico $\sigma - \tau$			
Dato	Simbolo	Misura	Unità
Angolo di resistenza al taglio	ϕ	0,82	Radiani
Angolo di resistenza al taglio	ϕ	46,79	Gradi

Infine, sono stati sovrapposti i grafici $\sigma - \tau$ dei vari materiali testati ed inseriti in un unico diagramma che permettesse di confrontarli:



5.6. Conclusioni sulle prove di taglio diretto

Per concludere, le 3 prove eseguite su ogni materiale hanno fornito risultati incoraggianti soprattutto per quanto riguarda il fresato confrontato con la ghiaia. Infatti, il RAP può essere considerato come un materiale geotecnico andando a calcolare parametri tipici dei materiali granulari, con le dovute ipotesi, applicando correttamente le normative vigenti in materia di prove di taglio con macchine di taglio diretto.

Ciò ha messo in evidenza cosa si è voluto raggiungere dallo studio e dal lavoro del presente documento. In particolare, le prove di taglio hanno permesso di simulare il comportamento di un cumulo reale sotto l'azione di forze di elevata intensità, come quelle negli impianti di produzione, per definire gli stress a cui è sottoposto un cumulo, la sua resistenza (tramite i parametri di coesione e angolo di resistenza al taglio) e la sicurezza necessaria affinché ci sia una stabilità durante la sua formazione negli impianti di produzione, sia per gli operatori che per le macchine che operano al loro interno. La realizzazione dei cumuli in piccola scala rappresenta un ulteriore studio per definirne le relative caratteristiche di resistenza.

Ad ogni modo, un cumulo di fresato in un impianto di produzione può essere studiato e realizzato considerando anche parametri che fino ad ora non erano stati sfruttati per definirne la sua stabilità e quella del materiale che lo compone, ma anche la sicurezza durante la sua formazione.

Questo verrà maggiormente spiegato e descritto nel capitolo seguente, dove si creeranno modelli dei cumuli di fresato tramite un software col metodo degli elementi finiti (FEM), per una loro computazione analitica e numerica, andando a ricavare dati e rappresentazioni grafiche che definiranno le deformazioni massime di taglio, gli scorrimenti, le tensioni differenziali, i coefficienti di

sicurezza e gli spostamenti totali dei cumuli di fresato dopo la loro formazione negli impianti di produzione, per una comprensione in toto del loro comportamento, non solo da un punto di vista pratico ma anche numerico e teorico.

I risultati della modellazione FEM saranno successivamente confrontati, sempre nel prossimo capitolo, con quelli ottenuti dalle prove di taglio per capire se ci siano criticità, affinità e differenze tra lo studio reale/pratico e quello analitico/teorico.

6. MODELLAZIONE DEI CUMULI DI FRESATO DA UN PUNTO DI VISTA ANALITICO

In questo capitolo si andranno a studiare i cumuli di fresato da un punto di vista analitico, schematizzandoli con l'ausilio di un software degli elementi finiti, ossia Rocscience Phase 2.

Questo programma di progettazione viene utilizzato principalmente per lo studio dei pendii e per cumuli costituiti principalmente da materiali geotecnici.

Ciò verrà eseguito per confrontare i risultati e capire se il RAP possa essere trattato come un materiale geotecnico, ricavando le relative caratteristiche e proprietà di resistenza e calcolando anche il "Fattore di Sicurezza" (FS, *Factor of Safety*), per determinare se i cumuli di fresato all'interno degli impianti di produzione siano realizzati in sicurezza (per mezzi e personale), in funzione anche del proprio angolo di riposo (angolo di inclinazione del pendio di un cumulo).

6.1. Modellazione dei cumuli di fresato col metodo degli elementi finiti

Si è realizzato un modello per il cumulo di fresato bituminoso, trattandolo esattamente come un materiale geotecnico granulare e sfruttando le stesse proprietà di un materiale puramente geotecnico.

Le ipotesi considerate per la realizzazione del modello sono le seguenti: computazione del cumulo una volta creata la sua forma finale, analisi 2D del cumulo che, in condizioni reali, è di forma conica (3D), trascurata la criticità dello studio di un singolo frame su un materiale continuo.

Ciò sarà utile per capire, in particolare, se i valori di coesione "c" e angolo di resistenza al taglio " ϕ " calcolati nelle prove di taglio diretto siano corretti, per ottenere cumuli di fresato con pendii stabili e sicuri per la sicurezza degli operatori e delle macchine all'interno degli impianti di produzione.

Una volta ottenute le rappresentazioni del comportamento del cumulo, si confronteranno con le prove di taglio diretto sul fresato bituminoso in laboratorio, descritte nel precedente capitolo della presente trattazione, per verificare se i valori di tali parametri siano idonei e se il comportamento dei cumuli sia congruo ai dati ricavati dai test con la macchina di taglio diretto.

Quindi, come primo step, si crea il modello, utilizzando le misure e le forme tipiche dei cumuli all'interno degli impianti di produzione e di lavorazione del RAP tramite i nastri trasportatori:

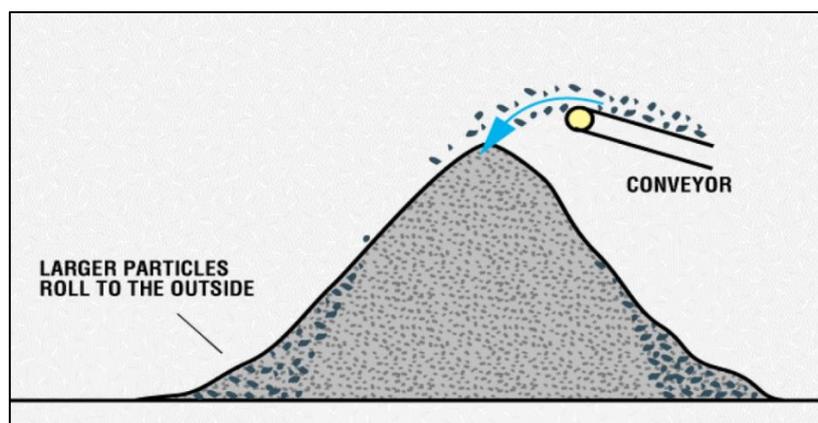


Figura 6.1.1 - Forma e dimensione del cumulo di fresato per la creazione del modello.

La forma del cumulo di fresato riportata in figura 6.1.1 verrà fedelmente replicata prima su Autocad, per stabilire le misure precise del cumulo (base, altezza, angolo di riposo), e successivamente sul software Rocscience Phase 2, sfruttando sempre il metodo degli elementi finiti (FEM).

Utilizzando un angolo di riposo del cumulo di fresato pari a 39° , una base di 50 metri ed un'altezza di 20 metri, si ottiene il seguente schema finale creato su Autocad, riportando tutte le sue fasi di realizzazione con altezze differenti raggiungendo quella finale:

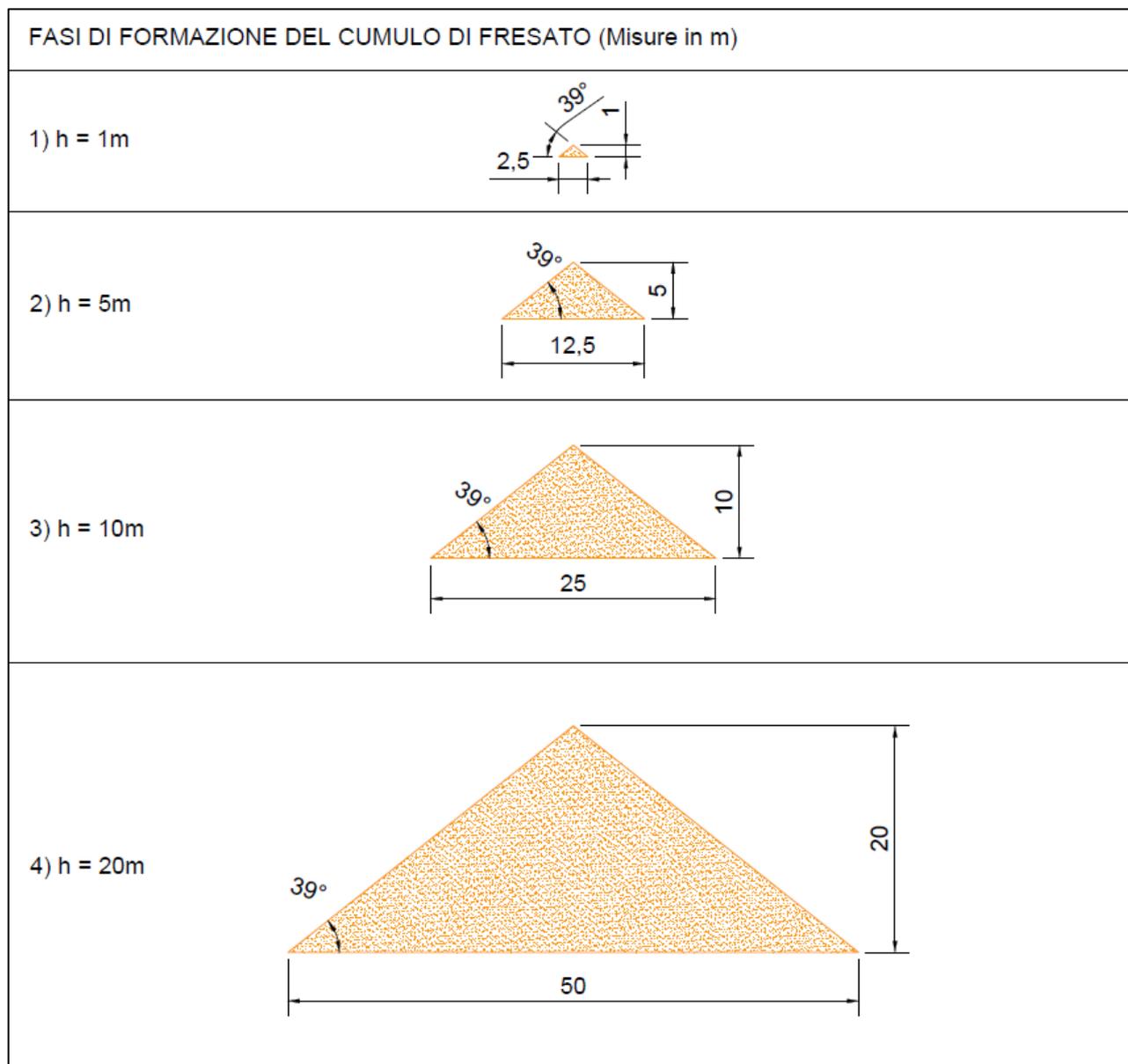


Figura 6.1.2 - Schematizzazione delle varie fasi del cumulo di fresato bituminoso su Autocad.

Riportando le misure su Rocscience Phase 2, si ottiene il seguente modello analitico (con FEM) riportando tutti i vari step di formazione del cumulo:

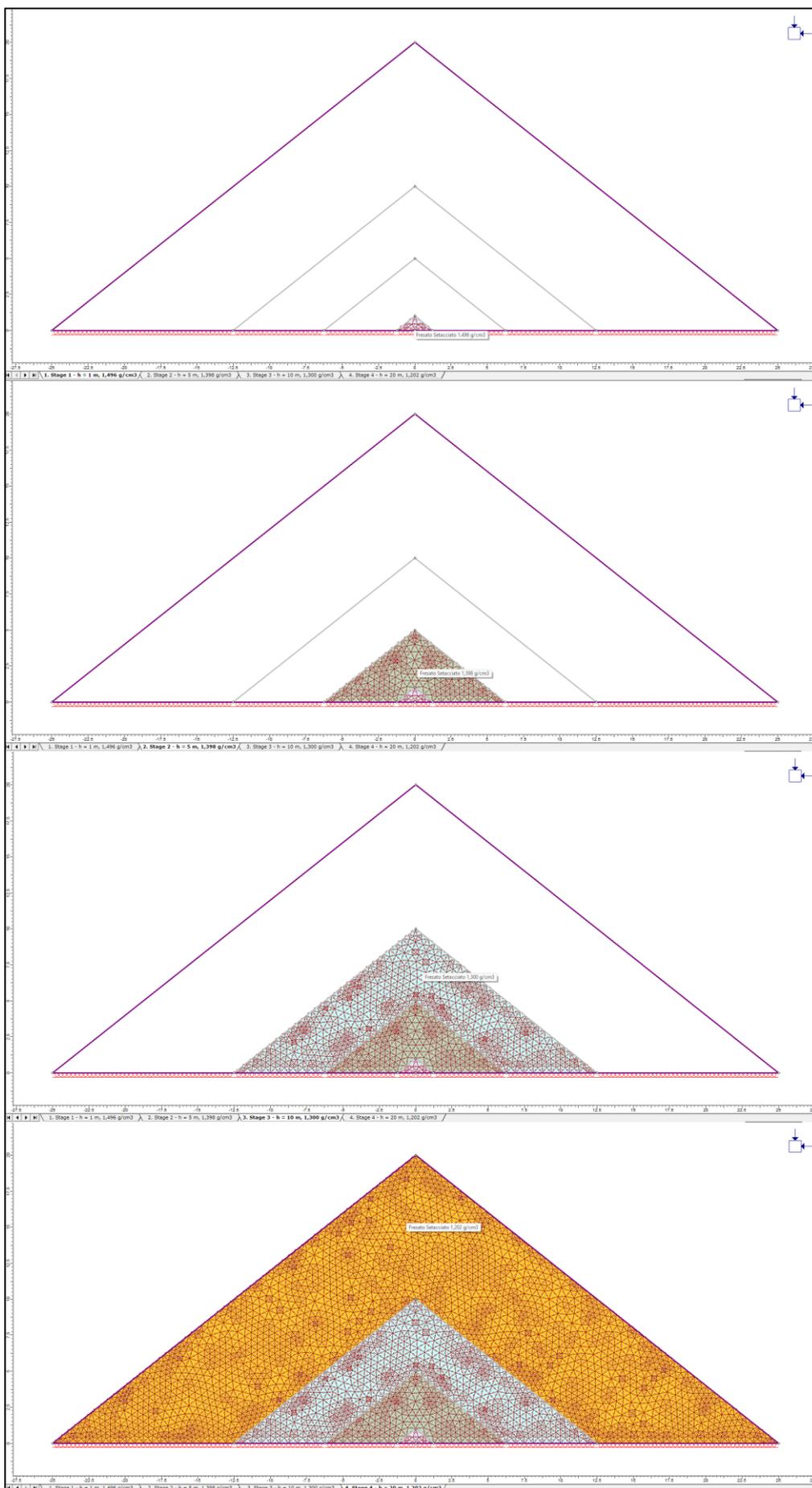


Figura 6.1.3 - Modello di formazione del cumulo di fresato creato su Rocscience Phase 2 col metodo degli elementi finiti (FEM).

Per la costruzione del modello sono stati inseriti i seguenti parametri per definire le proprietà e le caratteristiche del materiale, dove c e φ derivano dai risultati ricavati dalle prove di taglio:

- Massa volumica (γ): per il primo strato 1,496 g/cm³, che corrispondono a 0,01496 MN/m³, unità di misura richiesta dal software; per il secondo strato 1,398 g/cm³; per il terzo strato 1,300 g/cm³; infine, per il quarto strato 1,202 g/cm³.
- Proprietà elastiche: materiale di tipo isotropo.
- Modulo di Young (E): 200 MPa.
- Coefficiente di Poisson (ν): 0,3.
- Criterio di rottura: Mohr-Coulomb.
- Tipo di materiale: plastico.
- Resistenza a trazione (σ_t): 0 MPa.
- **Angolo di resistenza (φ): 47,44°.**
- **Coesione (c): 0,021 MPa.**

Il tutto viene sinteticamente riportato nella tabella seguente estratta dal software:

The screenshot shows the 'Define Material Properties' window for 'Fresato Setacciato 1.496 g/cm3'. The window is divided into several sections:

- Material Identification:** Name: 'Fresato Setacciato 1.496 g/cm3', Material Color: (dropdown menu).
- Initial Element Loading:** Field Stress & Body Force, Unit Weight: (MN/m3): 0.01496.
- Elastic Properties:** Elastic Type: Isotropic, Poisson's Ratio: 0.3, Young's Modulus (MPa): 200, Young's Modulus (resid) (MPa): 20000, E1 (MPa): 20000, E2 (MPa): 20000, E3 (MPa): 20000, ν_{12} : 0.2, ν_{13} : 0.2, ν_{23} : 0.2.
- Strength Parameters:** Failure Criterion: Mohr Coulomb, Material Type: Plastic, Tensile Strength (peak) (MPa): 0, Dilation Angle (deg): 0, Fric. Angle (peak) (deg): 47.44, Fric. Angle (resid) (deg): 47.44, Cohesion (peak) (MPa): 0.021, Cohesion (resid) (MPa): 0.021, Tensile Strength (resid) (MPa): 0.
- Advanced Options:** Stage Properties, Datum Dependent, Unsaturated Shear Strength (Phi b: 0, Air Entry (MPa): 0).

Buttons at the bottom include 'Copy To...', 'Statistics...', 'Show only properties used in model', 'OK', and 'Cancel'.

Figura 6.1.4 - Parametri del fresato per la modellazione del cumulo.

A questo punto, inserite le condizioni al contorno, la "mesh" (6 noded triangles, ossia triangoli con 6 nodi) per simulare il comportamento del materiale con gli elementi finiti del programma, gli sforzi dovuti al solo peso del cumulo ed alla gravità, è stato possibile ottenere il modello del cumulo di fresato, come riportato in precedenza nella figura 6.1.3.

Successivamente, si computano in input i dati inseriti nel modello e, interpretando i risultati, il software permette di ricavare in output il comportamento del cumulo in base ai parametri finali che si vogliono ottenere. Ciò lo si effettua sia per il cumulo di fresato finale sia per le varie fasi che permettono di raggiungere la sua configurazione:

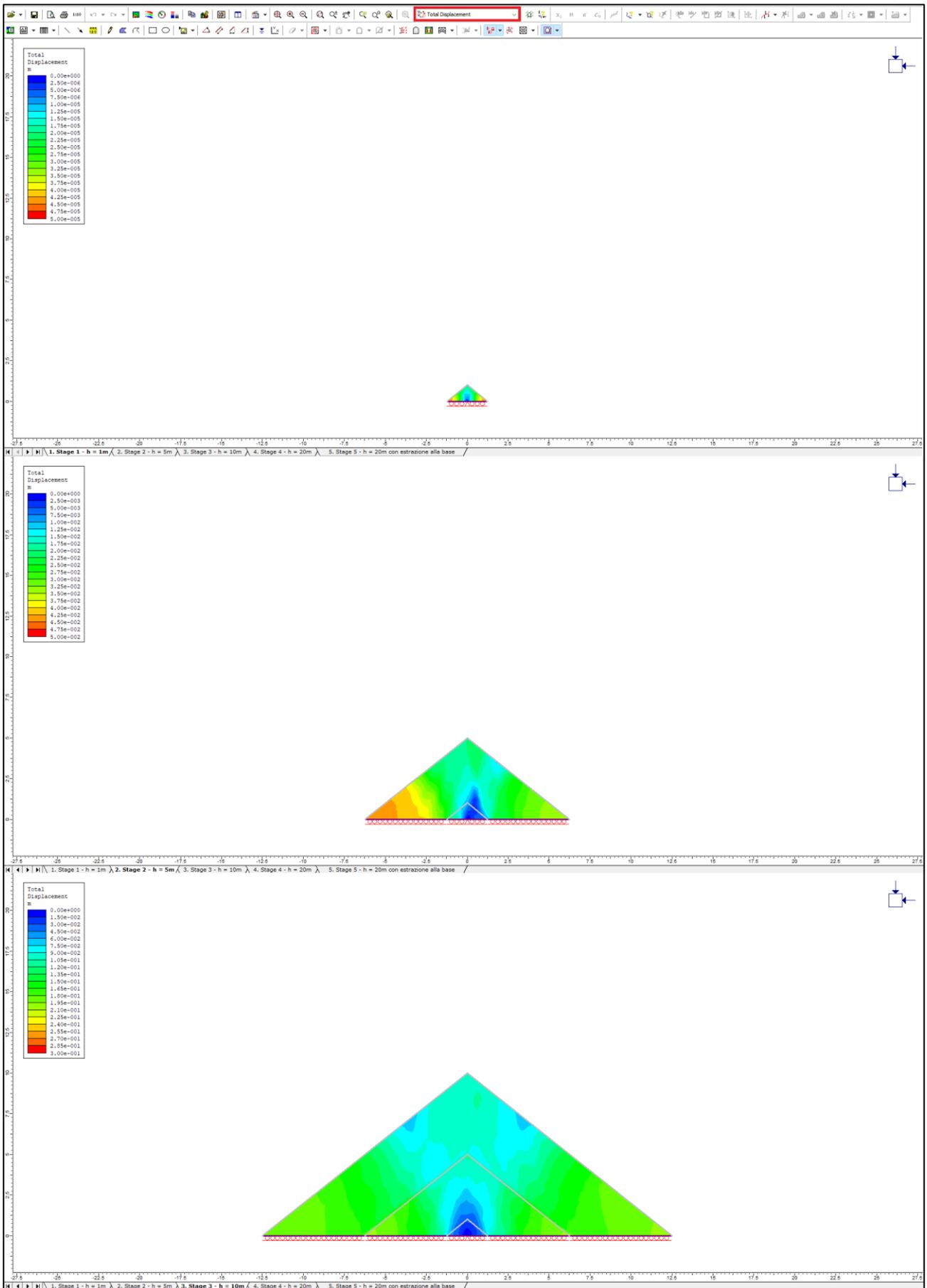


Figura 6.1.5 - Spostamenti totali delle tre fasi iniziali di formazione del cumulo ($h=1m$, $h=5m$, $h=10m$).

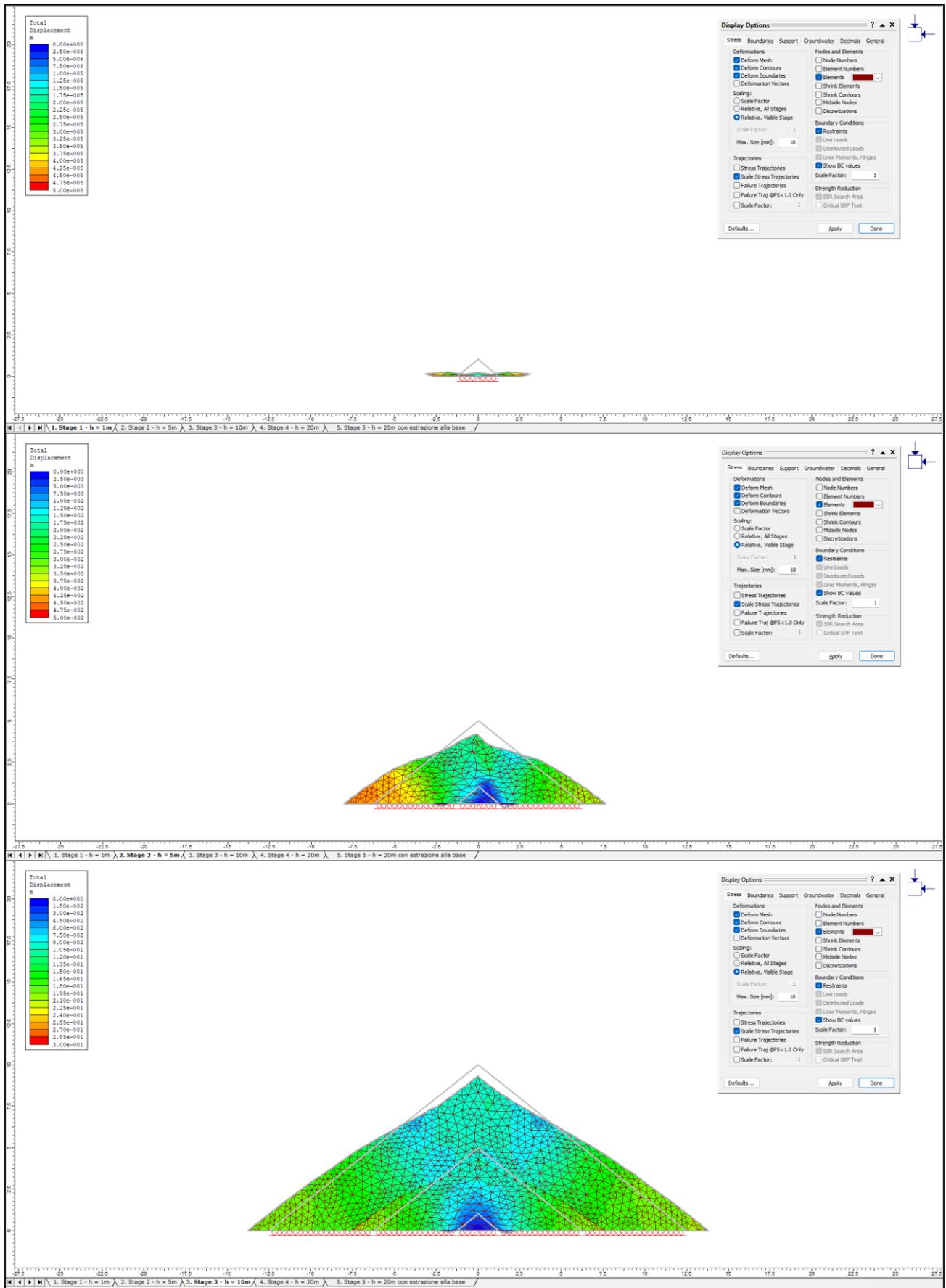


Figura 6.1.6 - Deformazioni delle tre fasi iniziali di formazione del cumulo (h=1m, h=5m, h=10m).

Per il cumulo di RAP si vogliono verificare: gli scorrimenti, gli spostamenti totali, le tensioni differenziali e le deformazioni massime di taglio.

Per quanto riguarda **scorrimenti** e **spostamenti totali** (“**Total Displacements**”) del cumulo alla fine della sua realizzazione, si ha la seguente simulazione che rappresenta l’occupazione della superficie coperta sul piano orizzontale rispetto alla sua configurazione originaria (linea spessa sullo sfondo):

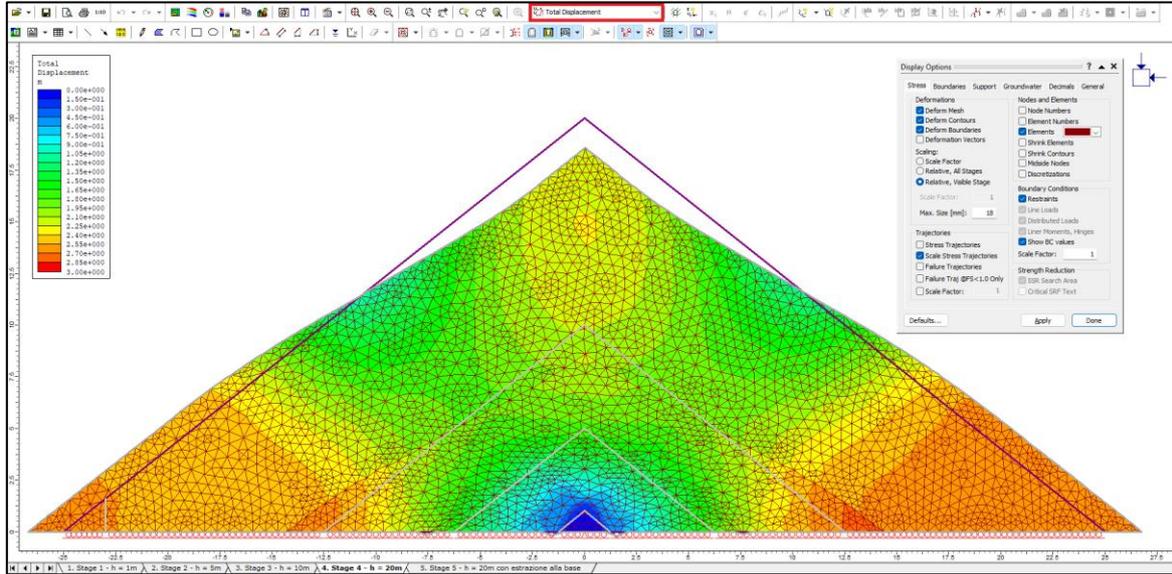


Figura 6.1.7 - Spostamenti totali e scorrimenti del cumulo finale realizzato tramite nastri trasportatori.

Dall’immagine sopra, il cumulo tende a spanciare e, per tale motivo, per mantenere una sicurezza elevata sia per gli operatori che per le macchine che operano nell’impianto, ai lati della formazione del cumulo si deve lasciare uno spazio libero proprio per permettere la sua posa senza che ci siano ostacoli, delimitazioni o macchinari che possano ostacolarlo e che possano provocare situazioni di pericolo e danni. Questo è il motivo per il quale, per la realizzazione del cumulo, gli operatori all’interno degli impianti di produzione utilizzano spazi aperti ampi proprio per favorire la corretta distesa del fresato. Gli spostamenti e gli scorrimenti variano da un valore minimo di 15 cm (in blu) al cuore del cumulo, fino a raggiungere valori massimi (in rosso) dell’ordine dei 3 m vicino alla superficie.

In riferimento, invece, alle **tensioni differenziali** (“**Differential Stresses**”), di seguito si riporta l’immagine del modello in cui si ottengono i suoi valori tensionali:

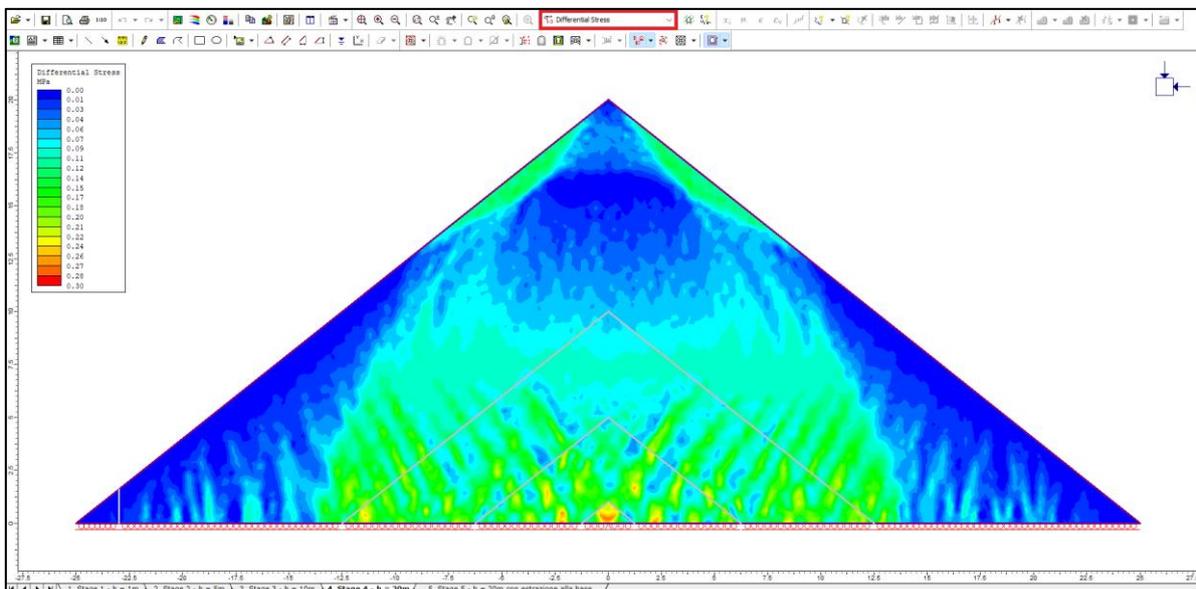


Figura 6.1.8 - Tensioni differenziali nel cumulo completo.

Si noti come la tensione maggiore è riscontrabile alla base ed al centro per la maggiore pressione a cui sono sottoposte queste porzioni di cumulo: valori massimi di tensione pari a 0,3 MPa (in rosso).

Per quanto concerne, infine, le **deformazioni massime di taglio (“Maximum Shear Strain”)**, si ottiene la seguente rappresentazione grafica:

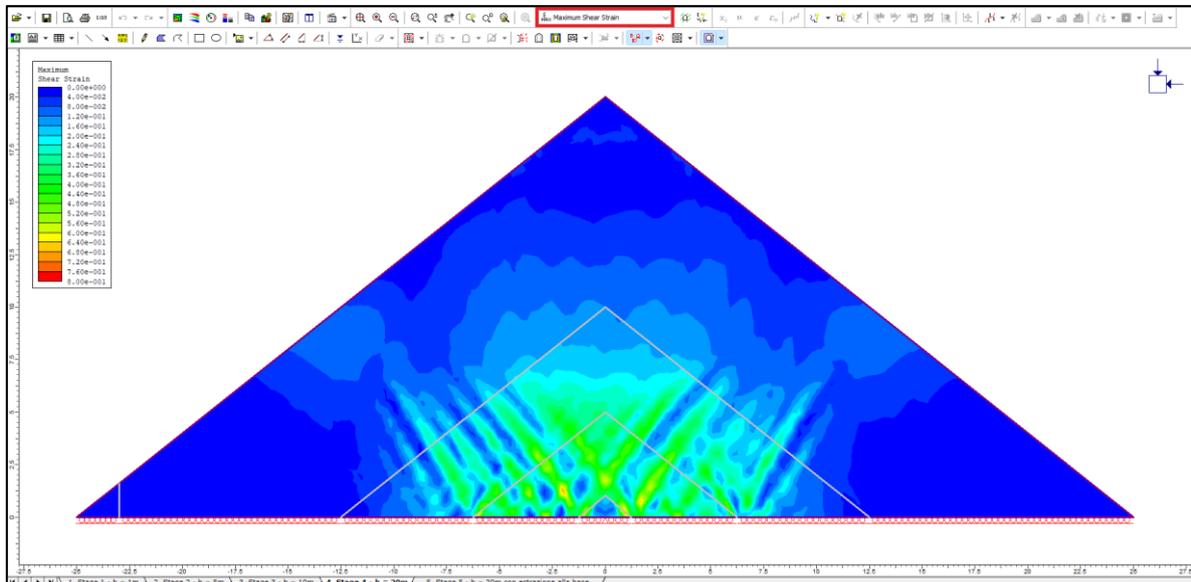


Figura 6.1.9 - Deformazioni Massime di Taglio nel cumulo completo.

Le Deformazioni Massime di Taglio sono maggiormente presenti nel cuore del cumulo e si estendono con valori decrescenti man mano che ci si sposta verso la sua superficie (pendii). Ciò è dovuto a maggiori tensioni e pressioni che devono sopportare i grani di fresato alla base del cumulo, dell'ordine di $8 \cdot 10^{-1}$.

Concludendo, si può constatare come ci sia bisogno di spazio intorno al cumulo per permettere a quest'ultimo di dilatarsi e spanciare durante la sua formazione con l'ausilio di nastri trasportatori all'interno degli impianti di produzione del RAP, e che ci voglia sempre massima attenzione ed un elevato livello di sicurezza per persone e macchine che lavorino ed operino intorno al cumulo di fresato.

Inoltre, la rappresentazione tramite software agli elementi finiti fornisce un'ulteriore prova di come i risultati delle prove di taglio diretto abbiano contribuito ad ottenere valori che simulino molto bene il comportamento di un cumulo di fresato durante la sua formazione, nonostante sia stata utilizzata un'ipotesi importante come quella della rappresentazione in 2D, con cumulo infinitamente esteso, considerando una sua sezione, e materiale ipotizzato continuo.

6.2. Modellazione dei cumuli reali creati in laboratorio in piccola scala

Come ultimo step, sono anche stati creati i modelli dei cumuli realizzati in laboratorio in piccola scala sia di ghiaia che di fresato setacciato.

Il motivo risiede nel fatto che si vuole comparare il modello del cumulo di grande scala con quello in piccola scala, per capire se ci sia omogeneità o similarità nei risultati, considerando gli angoli di inclinazione dei cumuli reali in piccola scala come angoli di resistenza al taglio “ ϕ ”, i quali vengono mantenuti costanti, facendo invece variare la coesione “ c ” fino al raggiungimento di un equilibrio limite del cumulo dato da un fattore di sicurezza appena maggiore o uguale all'unità.

Partendo da quello realizzato con ghiaia, di seguito si riporta il modello con tanto di coordinate e dimensioni, misurate post-formazione e realizzazione del cumulo in laboratorio e di cui si è discusso nel capitolo precedente:

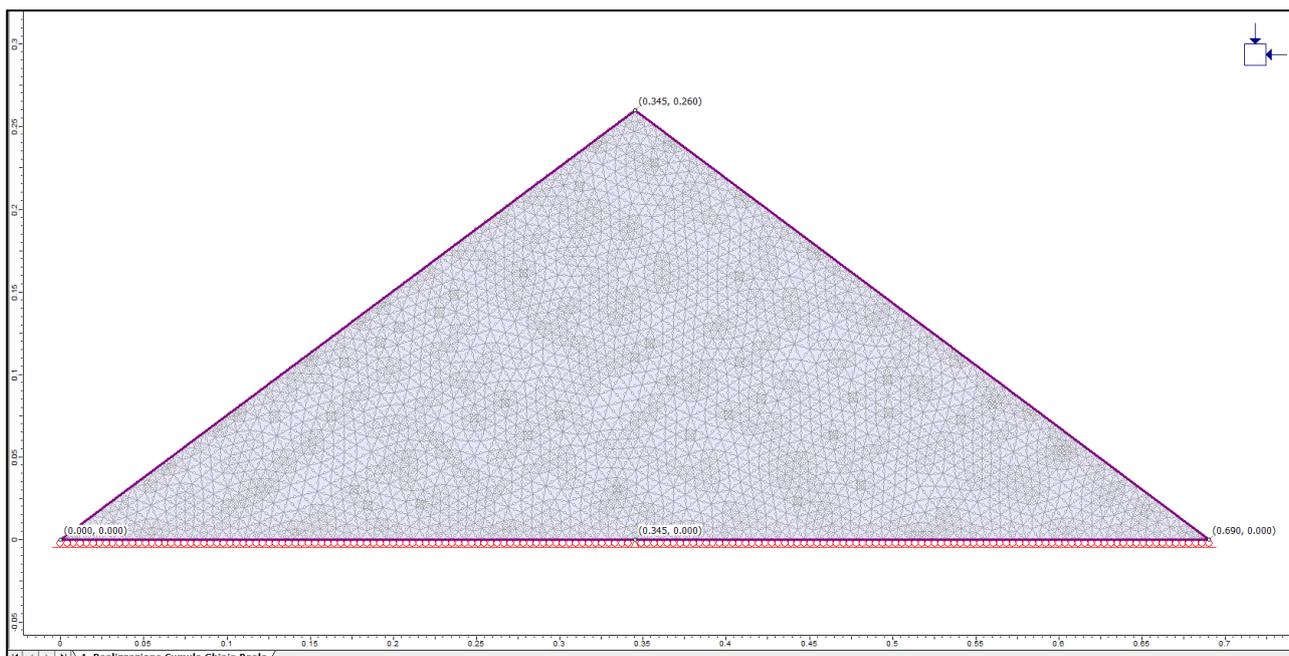


Figura 6.2.1 – Dimensioni e coordinate del modello FEM del cumulo reale di ghiaia realizzato in laboratorio.

Di seguito si riportano i valori dei parametri grazie ai quali si è potuto raggiungere un valore del fattore di sicurezza di poco superiore all'unità, che testimonia l'equilibrio limite del cumulo:

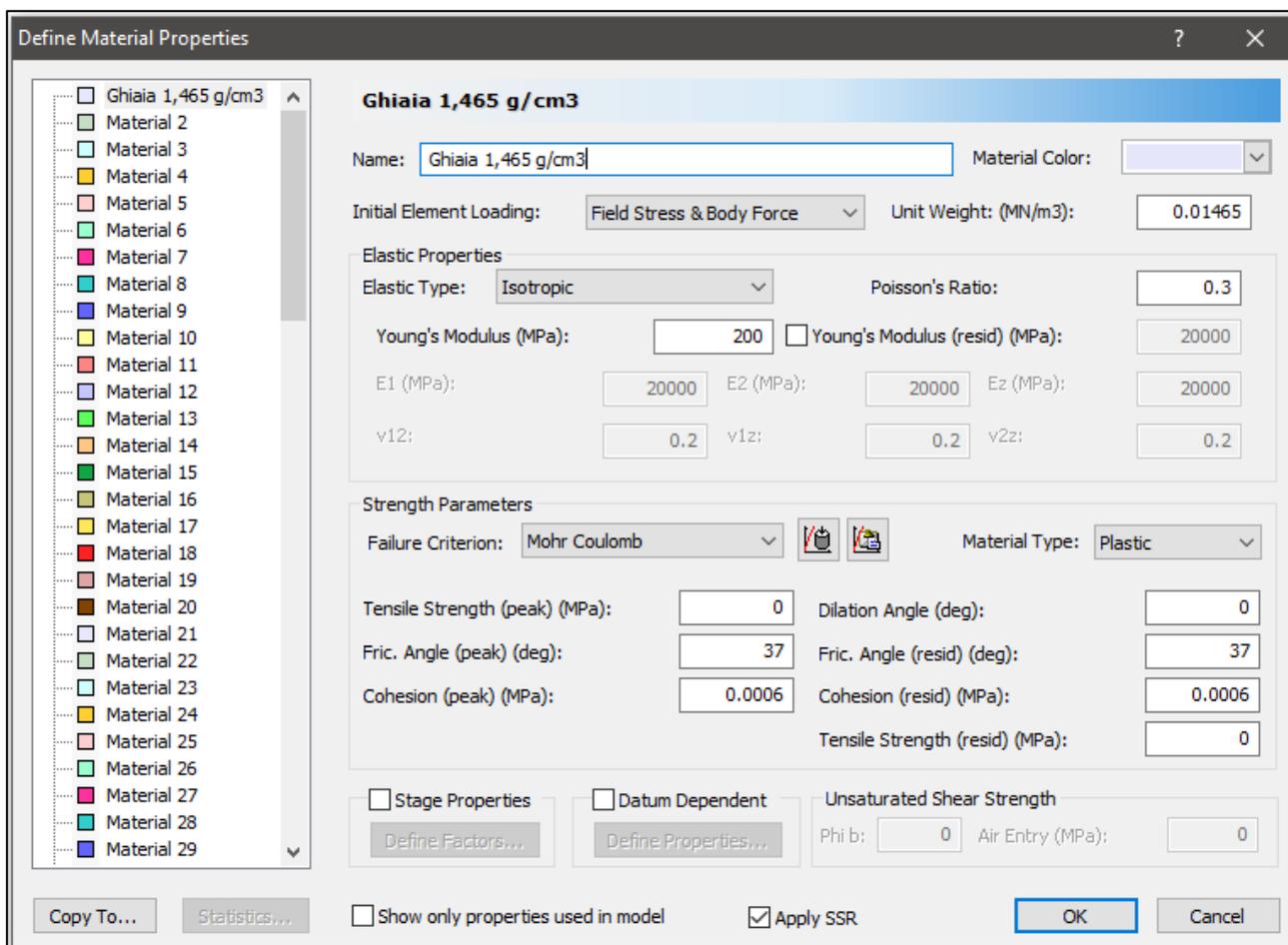


Figura 6.2.2 - Proprietà della ghiaia che hanno consentito l'ottenimento di un SRF > 1.

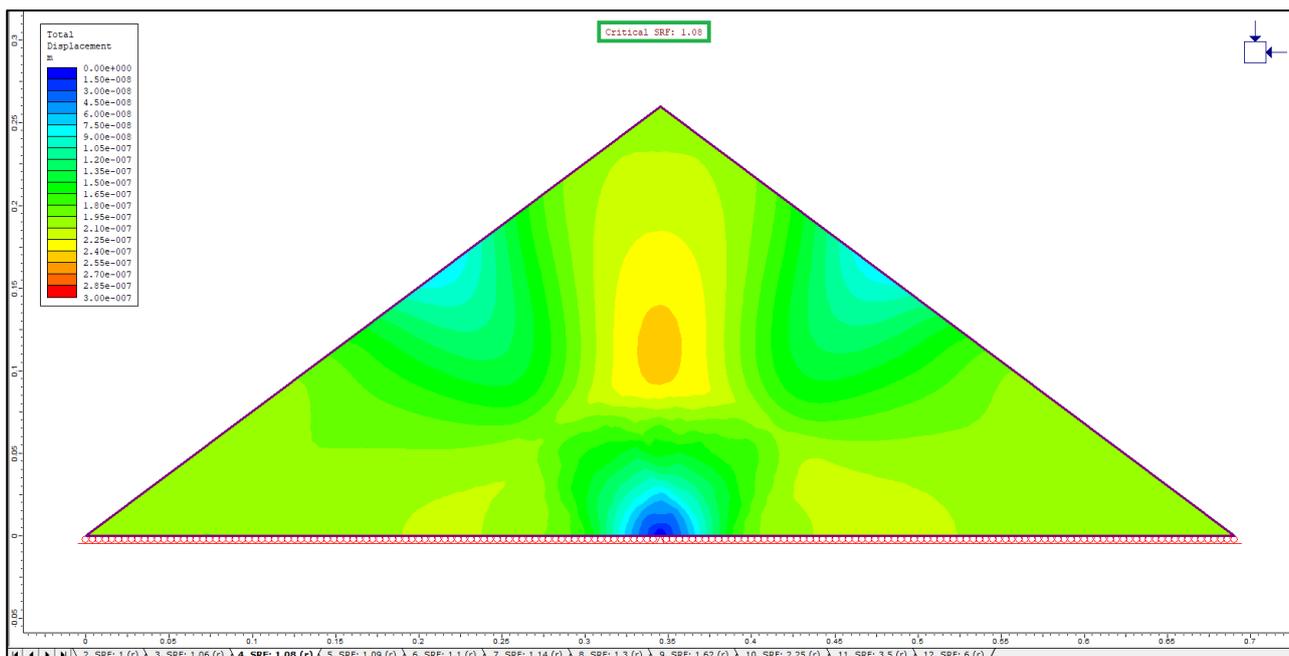


Figura 6.2.3 - Fattore di sicurezza maggiore dell'unità, con raggiungimento dell'equilibrio limite del cumulo reale in ghiaia.

Come si può constatare dall'immagine sopra, con un angolo di resistenza al taglio costante pari a 37° (che equivale, come detto precedentemente, all'angolo di inclinazione del cumulo reale) e con una coesione equivalente a 0,0006 MPa (0,6 kPa), si ottiene un SRF di poco sopra l'unità (pari a 1,08), che conferma il raggiungimento dell'equilibrio limite ricercato.

Confrontando questi risultati con le prove di laboratorio con la macchina a taglio diretto, si può notare una differenza sia nel valore dell'angolo di resistenza a taglio "φ" ($43,72^\circ$ dalla prova di taglio), sia nella coesione "c" (0.03039 MPa = 30,39 kPa).

Stessa cosa è stata eseguita per il fresato setacciato, di cui si è realizzato un cumulo reale in laboratorio, riprodotto col metodo degli elementi finiti (FEM) tramite l'ausilio del software.

Questo secondo modello è stato creato sia per confrontarlo con quello realizzato in ghiaia, sia con il modello FEM del cumulo a grandezza reale creato nel paragrafo 6.1:

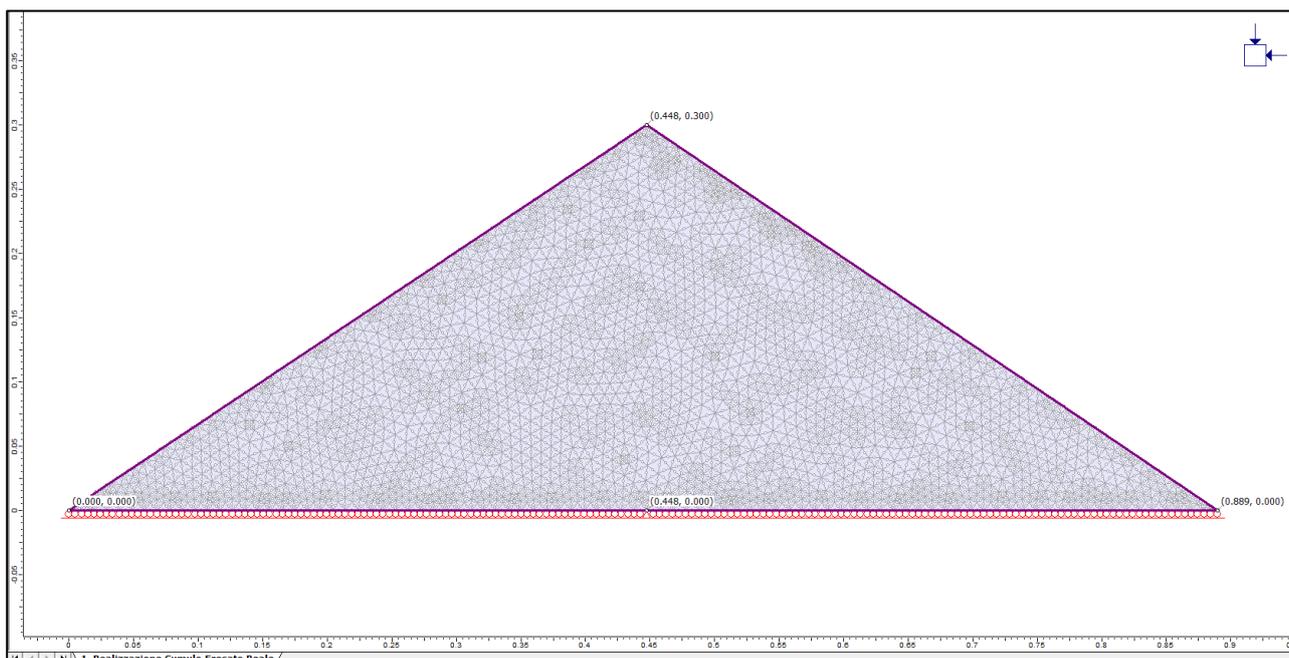


Figura 6.2.4 - Dimensioni e coordinate del modello FEM del cumulo reale di fresato setacciato realizzato in laboratorio.

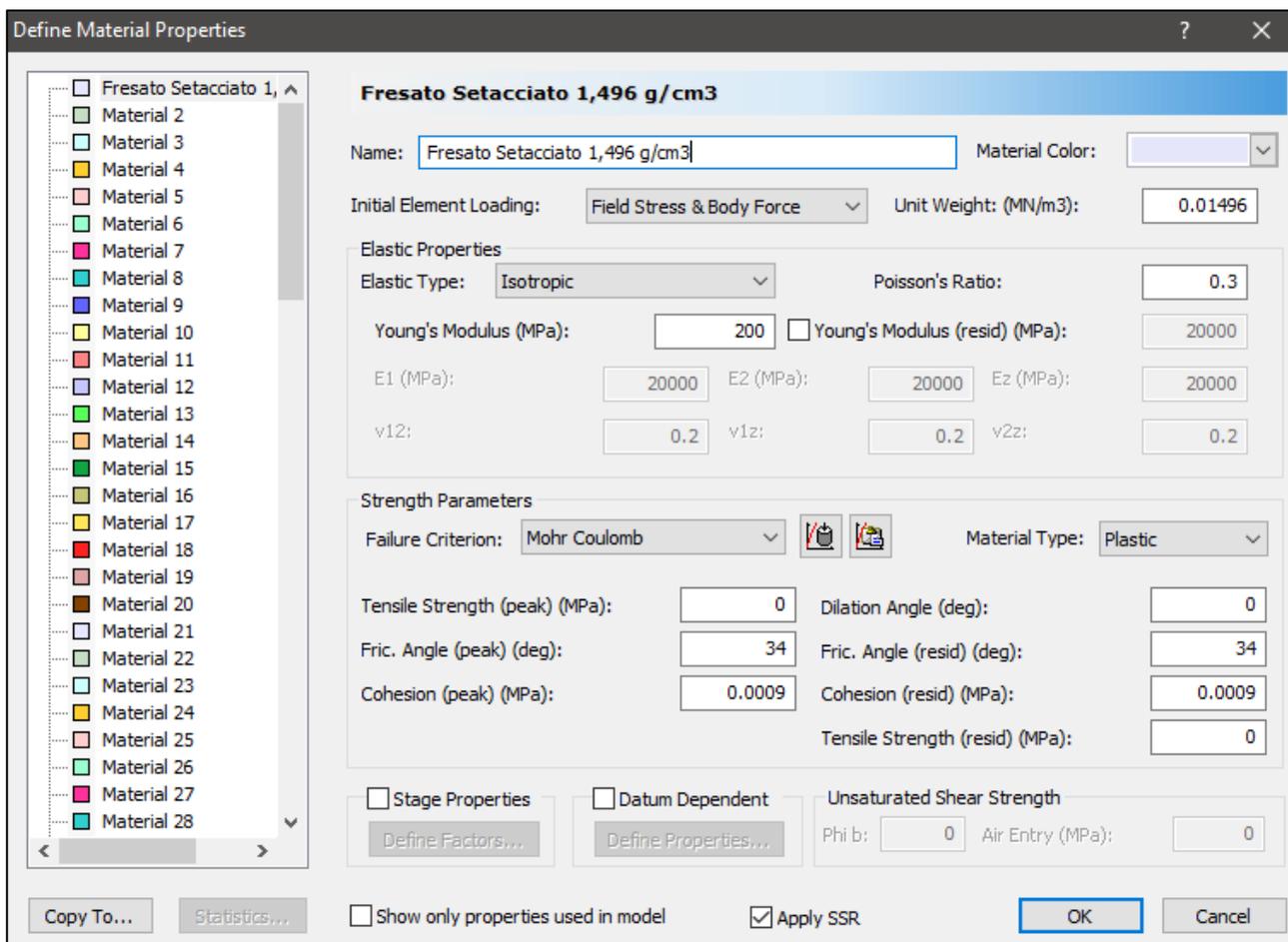


Figura 6.2.5 - Proprietà del fresato setacciato che hanno consentito l'ottenimento di un SRF > 1.

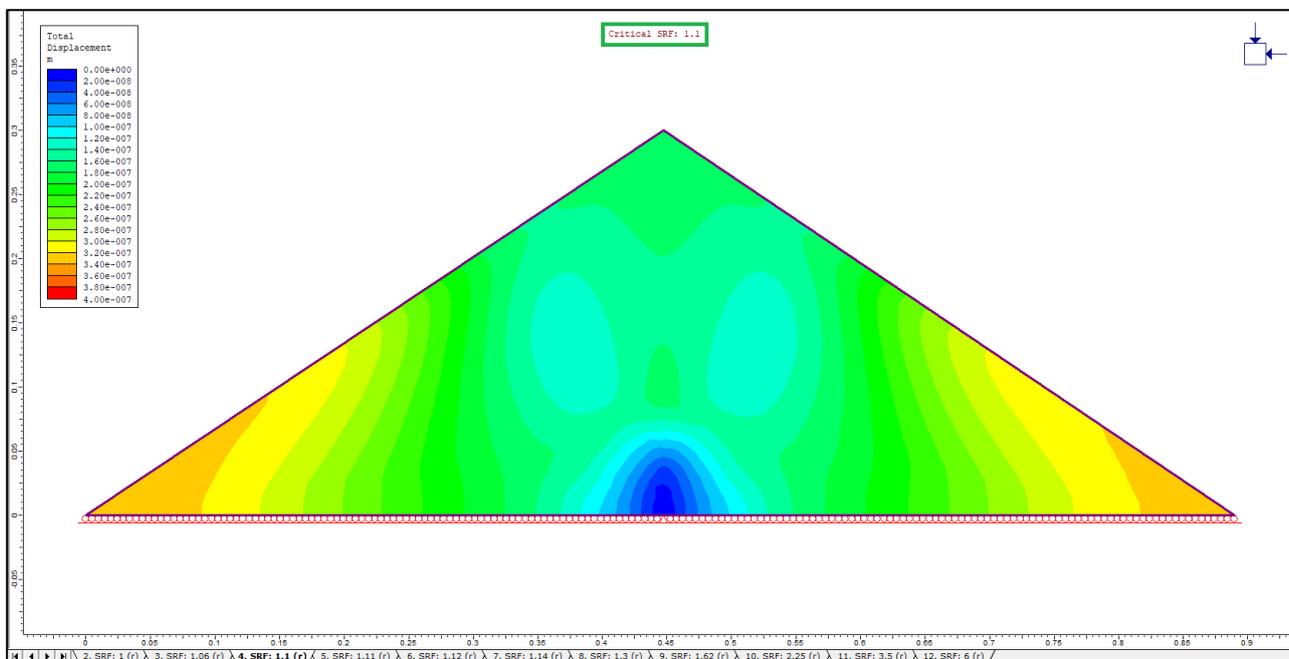


Figura 6.2.6 - Fattore di sicurezza maggiore dell'unità, con raggiungimento dell'equilibrio limite del cumulo reale in fresato setacciato.

A differenza della ghiaia, con un angolo costante di 34° misurato dal cumulo di fresato setacciato creato in laboratorio, il valore della coesione, che ha permesso il raggiungimento di un equilibrio limite e, di conseguenza, un fattore di sicurezza di poco sopra l'unità (SRF ≈ 1,1), in questo caso è

pari a $0,0009 \text{ MPa} \approx 0,9 \text{ kPa}$ (a differenza del modello in scala reale in cui si sono ottenuti: $\phi = 47,44^\circ$, $c = 0,02177 \text{ MPa} \approx 21,77 \text{ kPa}$).

In conclusione, queste modellazioni permettono di comprendere come il fattore di scala sia un parametro determinante per il raggiungimento della stabilità e dell'equilibrio limite del cumulo, con valori di angoli di resistenza a taglio e coesione differenti.

Un altro fattore che incide molto sulla diversità dei risultati è quello dovuto al fatto che nelle prove di taglio diretto eseguite in laboratorio con l'ausilio della macchina a taglio si ha un confinamento del materiale che scorre fino al raggiungimento di una sua resistenza ultima, applicando su di esso una forza di taglio T ed una normale N distribuita omogeneamente e di elevata intensità, mentre nella realizzazione del cumulo non si ha un confinamento del materiale e l'unica forza applicata su di esso è la gravità, forza decisamente inferiore rispetto a T ed N .

Pertanto, in un grafico $\sigma - \tau$, i risultati della prova con il cumulo reale si possono collocare vicini all'origine essendoci in gioco bassi valori di tensioni normali e tangenziali, mentre dalle prove di taglio diretto risultano valori di σ e τ molto più elevati e distanti dall'origine degli assi, proprio per la differenza esponenziale delle forze in gioco nelle due tipologie di prova.

7. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- "Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) - Management Plan": Australian Asphalt Pavement Association, pubblicato dal National Technology & Leadership Committee.
- "Best Practices for RAP and RAS Management": 19th Annual Oregon Asphalt Conference, March 5, 2013, Eugene, Oregon.
- "Stockpiling Safety": U.S. Department of Labor, Elaine L. Chao Secretary; Mine Safety and Health Administration, Dave D. Lauriski Assistant Secretary; Safety Manual Series, SM 27; Revised 2001.
- "I Quaderni Tecnici per la salvaguardia delle infrastrutture" – Volume V: ANAS, Gruppo FS Italiane.
- "AGI, 1994 - Raccomandazioni sulle Prove Geotecniche di Laboratorio": SGE, Padova.
- "ETC5-ISSMGE (1998): Recommendations of the ISSMGE for geotechnical laboratory testing": Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- "Norme UNI EN ISO 17892-10:2019: Indagini e prove geotecniche - Prove di laboratorio sulle terre - Parte 10: Prove di taglio diretto".
- "ASTM D5607-16: Standard Test Method for Performing Laboratory Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens Under Constant Normal Force": ASTM International - American Society for Testing and Materials International.

- ANAS – Gruppo FS Italiane, <https://www.stradeanas.it/>, consultato il 19/10/2021.
- Virginia Asphalt Association, <https://www.vaasphalt.org/>, consultato il 19/10/2021.
- NAPA - National Asphalt Pavement Association, <https://www.asphaltpavement.org/>, consultato il 19/10/2021.
- WAY - Where Are You?, <https://www.waynet.it>, consultato il 04/02/2022.
- Iterchimica SpA, <https://www.iterchimica.it>, consultato il 04/02/2022.
- Freepik - All the assets you need, in one place, <https://www.freepik.com>, consultato il 04/02/2022.
- Mining - Number one source of global mining news and opinion, <https://www.mining.com>, consultato il 04/02/2022.
- Construction Enquirer: construction news, building, construction jobs, contract news, new work, equipment, civil engineering, business, built environment, <https://www.constructionenquirer.com>, consultato il 15/03/2022.
- West Virginia Record newspaper, <https://www.wvrecord.com>, consultato il 15/03/2022.
- Dreamstime - Stock photography community that provides high quality stock photos and stock images, <https://it.dreamstime.com>, consultato il 15/03/2022.
- Caterpillar, <https://www.cat.com>, consultato il 17/07/2022.
- Iseekplant - Construction Service & Machine Hire Australia Wide, <https://blog.iseekplant.com.au/>, consultato il 17/07/2022.
- BG Europa (UK) Ltd, <http://bgeuropa.co.uk/>, consultato il 17/07/2022.