

3.1. Analisi granulometriche

Le informazioni ottenute con tali prove forniscono un criterio di classificazione del terreno ed una prima informazione sulla tipologia di comportamento del materiale.

L'obiettivo di tali analisi è pertanto quello di raggruppare in diverse classi di grandezza le particelle costituenti il terreno e di determinare quindi le percentuali in peso di ciascuna di esse, con riferimento al peso secco del campione iniziale.

Perché esse siano significative, i campioni utilizzati devono essere statisticamente rappresentativi del terreno in esame; tale compito è stato però semplificato dalla natura omogenea del terreno presente all'interno della vasca di sedimentazione; il fango viene infatti immesso per mezzo di una singola tubazione e scaricato tramite un unico sfioro superficiale: nella zona d'imbocco è avvenuta pertanto la sedimentazione del materiale più grossolano, mentre la frazione più fine si è depositata nell'area di scarico.

Per tale motivo sono stati prelevati sette campioni di materiale, due all'imbocco e cinque allo sbocco, e su di essi sono state effettuate analisi per vagliatura della componente più grossolana e analisi di sedimentazione della frazione fine.

3.1.1. Analisi granulometrica per setacciatura

La normativa *ASTM D 422*, a cui solitamente ci si riferisce per le apparecchiature di analisi tramite vagliatore, prevede una serie completa di 13 setacci a cui viene affiancata una seconda serie di 11 setacci che permettono, al termine della prova, di ottenere una sequenza di punti con spaziatura pressoché uniforme su scala semilogaritmica (tab.3.1).

A tali serie occorre aggiungere il coperchio superiore ed il contenitore di fondo che raccoglie la frazione con diametro inferiore a 0.075 mm.

La procedura di prova utilizzata è stata svolta "ad umido", secondo la normativa *ASTM D 2217*: partendo da un campione di circa 623 g essiccato in stufa a 110°, si è separata una frazione trattenuta ed una passante al setaccio n° 10 (2.00 mm). La frazione trattenuta, viene quindi saturata con acqua distillata e successivamente lavata con acqua pulita: con l'utilizzo di una bacinella, il materiale viene trasferito nuovamente sul setaccio n° 10 per quantità successive fino a 100 g, viene così pulito con acqua e fatto seccare a 110°C: successivamente esso viene analizzato per setacciatura. La frazione passante viene invece lasciata riposare in acqua fino a che non si sia sedimentata e non si sia creata una lama di acqua pulita: quest'ultima viene poi rimossa con l'aiuto di un tubicino in gomma; il

materiale rimasto viene poi fatto essiccare a 60°C, viene frantumato con il pestello, pesato e setacciato a partire dal setaccio n° 20 fino al n° 200.

Norme ASTM		Norme ASTM	
Denominazione	Apertura	Denominazione	Apertura
3"	75	3"	75
2"	50	1.5"	37.5
1.5"	37.5	3/4"	19.0
1"	25.0	3/8"	9.5
3/4"	19.0	No.4	4.75
3/8"	9.5	No.8	2.36
No.4	4.75	No.16	1.18
No.10	2.00	No.30	0.6
No.20	0.85	No.50	0.30
No.40	0.425	No.100	0.15
No.60	0.250	No.200	0.075
No.140	0.106		
No.200	0.075		

Tabella 3.1: serie di setacci adottata dalla Norma ASTM

La vagliatura avviene attraverso il posizionamento della serie di setacci su una piastra vibrante, la quale viene lasciata operare per almeno 15 minuti (fig.3.2). Al termine, ciascun setaccio, precedentemente tarato, viene pesato tramite una bilancia di sensibilità pari a 0.01 g, in modo da poter conoscere il peso di ciascuna frazione trattenuta: teoricamente la somma dei pesi di ogni singola frazione dovrebbe essere pari al peso iniziale del campione; in pratica, si accettano perdite massime del 2 %.



Figura 3.2 : piastra vibrante Controls per la vagliatura del terreno tramite setacci

La scelta del metodo ad “umido” è dipesa sostanzialmente dalla natura del materiale da investigare: trattandosi di un terreno con un’elevata frazione di fini, tale sistema consente di separare dalla sabbia e dalla ghiaia le particelle con diametri inferiori a 0.075 mm, rendendo così significativo un campione di 623 g (al contrario sarebbe stato più onerosa un’analisi a “secco” su un campione di almeno 2 Kg di peso).

3.1.2. Analisi granulometrica per sedimentazione

La componente che si deposita nel contenitore di fondo ha, secondo le norme *ASTM*, un diametro inferiore a 0.075 mm: per poterne determinare l’esatta dimensione, si utilizza un metodo indiretto che consiste nel valutare il tempo di sedimentazione di una dispersione di particelle di terreno poste all’interno di un cilindro contenente acqua distillata ed antiflocculante.

Il calcolo della grandezza del singolo grano di limo ed argilla avviene sfruttando la legge di Stokes (1880), la quale assimila le singole particelle a sfere di peso specifico e velocità di caduta note, all’interno di un liquido di peso specifico e viscosità conosciuti; nel corso della prova si misura la velocità di caduta ovvero il tempo che la particella impiega a percorrere la distanza che separa il pelo libero della soluzione acqua-terreno dal baricentro di uno strumento detto *densimetro* (fig.3.3) .



Figura 3.3 : densimetro Controls tipo ASTM 151H adottato per l’analisi per sedimentazione

Il densimetro utilizzato per le prove sui materiali di Lonate Pozzolo risponde alla normativa *ASTM 151H* ed è costituito da uno stelo e da un bulbo di vetro a sezione circolare assialsimmetrico, che garantisce il galleggiamento verticale per qualsiasi posizione del baricentro rispetto al pelo libero.

All’ interno dello stelo è posizionata una scala graduata, variabile tra 995 e 1030 per soluzioni di densità da 0.995 a 1.030 g/cm³ , tarata in modo tale che, in acqua distillata a 20°C, fornisca una lettura pari a 1.000 g/cm³ . La precisione minima di tale scala è pari a 0.0005 g/cm³ . In fig.3.4 sono riportate le principali misure del densimetro.

La prova viene eseguita utilizzando almeno 40 g di materiale passante al setaccio 0.075 mm ed essiccato in stufa a 110°C: esso viene introdotto successivamente in un baker da 250 cm³ contenente 125 g di soluzione di Calgon® (esametafosfato di sodio), il quale

opera da antiflocculante, garantendo così che, durante la fase di prova, non si formino aggregati di particelle di argilla (le quali normalmente, a causa della loro natura chimica, si combinano in aggregati flocculanti), che fornirebbero una densità apparente superiore a quella reale.

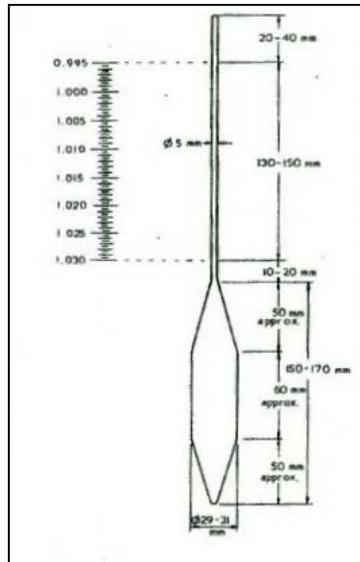


Figura 3.4 : dimensioni caratteristiche del densimetro Controls tipo ASTM 151H

Dopo 16 ore, la soluzione viene trasferita in un agitatore per la dispersione delle particelle, avendo cura di perdere la minore quantità di terreno (per questo si è lavato il baker con acqua distillata). Come si nota dalla fig.3.5, l'agitatore è costituito da un elica mescolatrice collegata ad un motorino elettrico, la quale viene inserita nell'apposita coppa contenente la miscela, e da un cestello disperdente interno: tale apparato, viene mantenuto in funzione per almeno 2 min e garantisce la totale separazione delle particelle fini della miscela.

Terminata la fase di agitazione, il contenuto della coppa viene immediatamente versato in un cilindro da 1000 cm³, evitando ogni perdita di materiale; viene quindi aggiunta acqua distillata e, con l'aiuto di un pistone manuale forato, si disperde ulteriormente la miscela.

A questo punto si da inizio alla prova, facendo partire un cronometro e introducendo, a tempi geometrici, il densimetro nel cilindro. Per evitare di influenzare le letture, il densimetro viene introdotto solo 15 sec prima di ciascuna lettura e solo nei primi 2 min, a causa della maggior velocità di sedimentazione, esso viene mantenuto costantemente all'interno del baker.

La prova, secondo la normativa, si dovrebbe ritenere conclusa dopo 12-16 ore: per ottenere una curva granulometrica rappresentativa delle frazioni più fini, si è però deciso di effettuare delle letture per circa 90 giorni.



Figura 3.5 : agitatore per la dispersione della soluzione con cilindro sedimentatore, cronometro e termometro a bulbo

3.1.2.1. Taratura del densimetro

Per determinare correttamente le caratteristiche geometriche del densimetro, e stimare quindi con maggior accuratezza la correlazione tra distanza percorsa nel tempo dalle particelle e lettura effettuata sulla scala graduata, si è resa necessaria una valutazione del volume e dell'altezza del bulbo, e della sezione del cilindro di sedimentazione.

Per quanto riguarda il volume del bulbo, è sufficiente posizionare il densimetro in un cilindro graduato contenente acqua distillata, in modo che il bulbo risulti completamente immerso e il pelo libero coincida con la base dello stelo: prendendo nota del livello dell'acqua prima e dopo l'immersione del bulbo, se ne determina il volume. Nel caso in esame, si è ottenuto :

$$V_B = 74.7 \text{ cm}^3 \text{ Volume del bulbo}$$

L'altezza del bulbo viene invece misurata, tramite un calibro, a partire dal punto inferiore del bulbo alla base dello stelo :

$$H_B = 15.00 \text{ cm}^3 \text{ Altezza del bulbo}$$

La sezione del cilindro utilizzato per l'areometria, è stata ottenuta misurando la distanza tra le letture di 100 cm³ e 900 cm³, corrispondente quindi ad un volume di 800 cm³; nel caso esaminato si è ottenuta una distanza di 27.70 cm :

$$S_c = 28.88 \text{ cm}^2 \text{ Sezione del cilindro}$$

Definendo poi

$$R = (r - 1) \cdot 1000 \quad [3.1]$$

$$H_R = H_1 + \frac{1}{2} \cdot (H_B - \frac{V_B}{S_c}) = H_1 + 6.207 \quad [3.2]$$

$$R' = R + C_M \quad [3.3]$$

dove r è la lettura di densità effettuata, H_R è la distanza percorsa dalle particelle durante la fase di sedimentazione per mezzo di un calibro, H₁ la distanza dalla base dello stelo alle varie letture sulla scala graduata, e C_M è una correzione da applicare a causa della presenza di un menisco, è possibile correlare linearmente H_R con R'. In tab.3.2, sono riportate le misure ottenute :

R'	H ₁	H _R
35	1,168	7,375
30	2,353	8,56
25	3,538	9,745
20	4,723	10,93
15	5,908	12,115
10	7,093	13,3
5	8,278	14,485
0	9,463	15,67
-5	10,648	16,855

Tabella 3.2 : dati sperimentali di calibrazione del densimetro Controls utilizzato per l'areometria

Ponendo quindi in diagramma H_R in funzione di R', si ottiene la retta riportata sul grafico 3.1, la cui equazione risulta

$$H_R = 15.67 - 0.237 \cdot R' \quad [3.4]$$

Come sottolineato in precedenza, la lettura effettuata allo stelo del densimetro non corrisponde al pelo libero della superficie dell'acqua a causa della presenza di un menisco: di norma, pertanto, le letture sono effettuate in corrispondenza del menisco stesso e, solo successivamente, vengono corrette tramite un fattore C_M che le trasforma in misure relative al pelo libero.

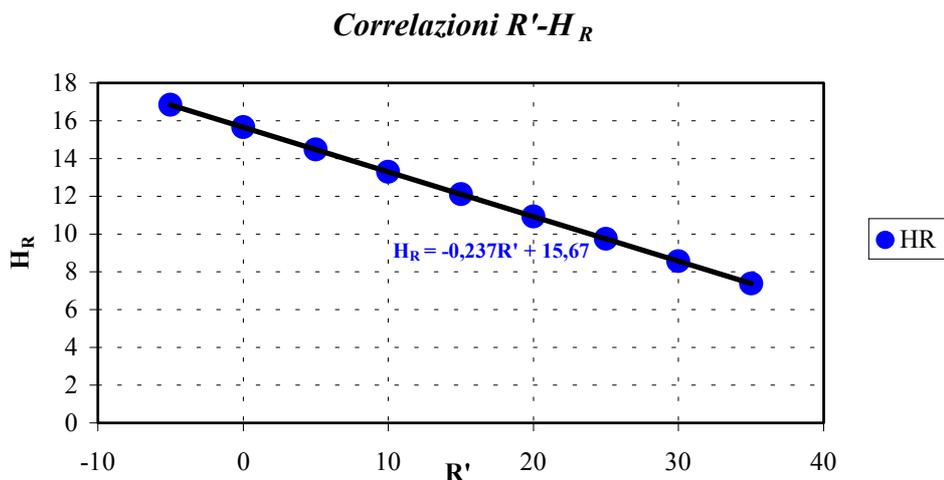


Grafico 3.1 : interpolazione dei dati di distanza H_R con le letture R' del densimetro

La valutazione di tale termine avviene inserendo il densimetro in un cilindro contenente 700 cm^3 di acqua distillata e valutando qualitativamente per quale valore di densità si osserva un pelo libero orizzontale; questo procedimento va ripetuto 2 volte, prendendo nota delle letture R_1 e R_2 , ottenendo così C_M per differenza :

$$C_M = R_1 - R_2 = 0.3 - (-0.2) = 0.5 \quad \text{Correzione del menisco}$$

In precedenza si è osservato che il densimetro è tarato affinché in acqua distillata fornisca una densità pari a 1.000 g/cm^3 alla temperatura di 20°C ; nella prova si utilizza, al contrario, una miscela di esametafosfato di sodio a temperature variabili in relazione alle condizioni esterne del laboratorio.

Per questo motivo, è necessario apportare due coefficienti correttivi, uno per l'antiflocculante ed un secondo per la temperatura. Il procedimento da seguire prevede l'utilizzo di due cilindri da 1000 cm^3 , uno contenente acqua distillata, il secondo una soluzione di 125 g di esametafosfato di sodio: con l'utilizzo di un bagno termostatico, si produce una variazione della temperatura della miscela nei limiti operativi della prova (ovvero tra 18° e 30°), e si registrano le letture del densimetro come riportato in tab. 3.3.

Effettuando una regressione lineare dei dati ottenuti (grafico 3.2), si ottengono le seguenti relazioni :

$$R'_{dist} = K_1 + L_1 \cdot T = 4.083 - 0.2016 \cdot T \quad [3.5]$$

$$R'_{defloc} = K_2 + L_2 \cdot T = 8.2167 - 0.2167 \cdot T \quad [3.6]$$

T(C°)	R' distillata	R' Deflocculante
18	0,6	4,2
19	0,1	4,1
22	-0,4	3,6
25	-1,4	2,9
27	-0,9	2,3
28	-1,9	2,1
30	-1,9	1,7

Tabella 3.3 : letture registrate per le correzioni di temperatura e antiflocculante

I coefficienti correttivi C_T per la temperatura e C_D per l' antiflocculante vengono così definiti come :

$$C_T = -K_1 - L_1 \cdot T = -4.083 + 0.2016 \cdot T \quad [3.7]$$

$$C_D = K_1 - K_2 = 4.083 - 8.2167 = -4.1337 \quad [3.8]$$

Relazioni $R'_{dist}-T$ e $R'_{defl}-T$

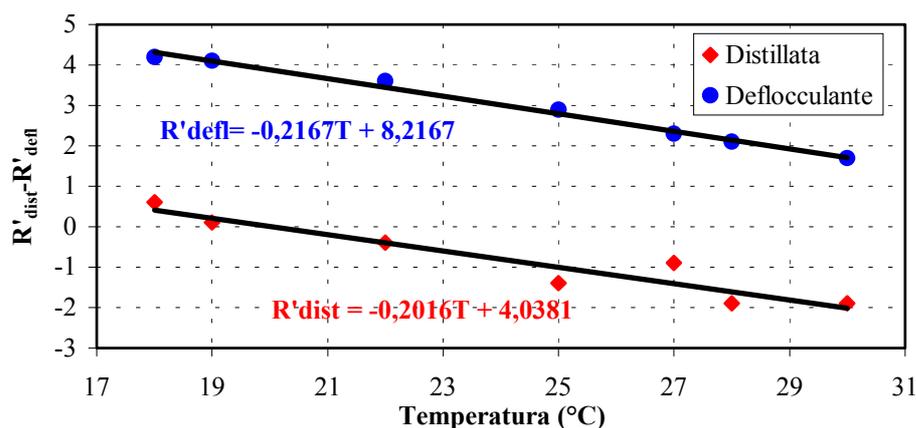


Grafico 3.2 : regressioni lineari e relative equazioni per l'ottenimento dei coefficienti correttivi

Durante la rielaborazione dei dati forniti dal densimetro, si è riscontrato che, a volte, pur utilizzando il coefficiente correttivo per la temperatura, le percentuali di materiale trattenuto in un setaccio ideale con diametro corrispondente a quello valutato con le formule di Stokes, potevano risultare superiori al 100 % , anche se per valori inferiori all'1% .

Per ovviare a tale assurdo, in tali casi si è reso necessario l'uso di un secondo metodo di correzione delle temperature, fornito da Head (1970), che prevede l'uso di un abaco, come illustrato in fig.3.6:

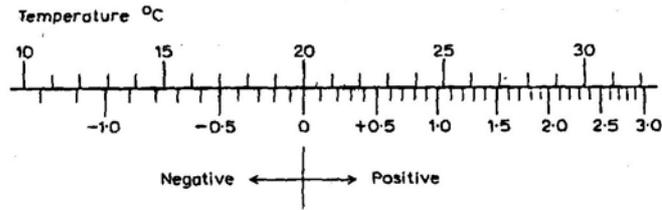


Figura 3.6 : abaco di Head (1970) per la valutazione del coefficiente correttivo della temperatura

3.1.2.2. Metodo di calcolo

Di seguito viene presentata la procedura di calcolo dei diametri dei grani in una prova granulometrica per sedimentazione, con un accenno alla derivazione delle formule di calcolo.

Nel corso della prova vengono misurati :

R = lettura di densità in corrispondenza del menisco = $(r-1) \cdot 1000$;

δt = intervallo di tempo, espresso in minuti, a partire dall'inizio della fase di sedimentazione;

T = temperatura in gradi Celsius relativa all'istante di misura.

Dalle tarature iniziali sono note :

C_M = correzione del menisco;

C_D = correzione del dispersivo;

C_T = correzione della temperatura;

H_R = percorso di sedimentazione delle particelle, espresso in cm.

Il diametro delle particelle, espresso in mm, è calcolato tramite l'utilizzo della formula di Stokes espressa come segue :

$$D = \sqrt{\frac{1800 \cdot \eta_L}{G_S - \gamma_W}} \cdot \sqrt{\frac{H_R}{\delta t \cdot 60}} \quad [3.9]$$

dove η_L [g·sec/cm²] è un fattore ricavato da Poiseuille (1840), definito come :

$$\eta_L = \frac{1.81 \cdot 10^{-5}}{1 + 0.034 \cdot T + .00022 \cdot T^2} \quad [3.10]$$

La percentuale di terreno avente un diametro inferiore al valore D , ovvero la percentuale di particelle passanti attraverso un setaccio ideale di maglia pari a D , è quindi fornita dalla seguente relazione :

$$\% = (R + C_M + C_D + C_T) \cdot \frac{100}{P_S} \cdot \frac{G_S}{G_S - \gamma_W} \quad [3.11]$$

dove P_S è il peso secco del materiale utilizzato per l'areometria.

La formula finale, che permette il calcolo della percentuale di materiale, può essere ricavata sapendo che la densità iniziale della miscela, ovvero la densità di una soluzione in cui tutte le particelle solide risultano in sospensione, è definibile ipotizzando che all'istante $t=0$, ogni volume unitario di soluzione contenga un peso solido pari al peso totale (acqua + terreno secco) diviso il volume da esso occupato :

$$\begin{aligned} \gamma_0 &= \frac{\text{peso}}{\text{volume}} = \frac{\text{peso acqua} + \text{peso secco}}{\text{volume}} = \frac{(V - \frac{P_S}{G_S}) + P_S}{V} = \\ &= 1 + \frac{P_S}{V} \cdot (1 - \frac{1}{G_S}) = 1 + \frac{P_S}{V} \cdot \frac{G_S - 1}{G_S} \end{aligned} \quad [3.12]$$

A partire dall'istante $t=0^+$, la generica particella di diametro D , definito dalla legge di Stokes, si troverà ad una certa profondità z_D : è lecito supporre che le particelle con diametro D raggiungano il fondo con una velocità superiore delle particelle più fini, il cui numero rimarrà invariato nell'elemento unitario di sospensione; ciò significa che in sospensione si ha solamente una quota parte del peso secco P_S : a partire da tale istante, la miscela avrà una densità pari a :

$$\gamma_t = 1 + \frac{\%P_S}{100 \cdot V} \cdot \frac{G_S - 1}{G_S} \quad [3.13]$$

Da essa si può ricavare la percentuale di particelle passanti :

$$\begin{cases} \% = (\gamma_t - 1) \cdot \frac{100 \cdot V}{P_S} \cdot \frac{G_S - 1}{G_S} = \frac{R \cdot 100}{P_S} \cdot \frac{G_S - 1}{G_S} \\ R = (\gamma_t - 1) \cdot V = (\gamma_t - 1) \cdot 1000 \end{cases} \quad [3.14]$$

3.1.3. Risultati

I campioni di terreno sui quali sono state effettuate le indagini granulometriche coprono l'intera area della vasca di sedimentazione. Gli aspetti di cui si è dovuto tener conto nel campionamento dipendevano sostanzialmente da ragioni pratiche :

1. nel periodo tra Ottobre e Novembre 2003 non è stato possibile accedere alle zone più interne della vasca, dato che il terreno si presentava in condizioni prossime al limite liquido;
2. necessità di conoscere in modo approfondito l'eventuale variazione spaziale della granulometria lungo l'intera estensione della vasca;
3. necessità di indagare con maggior precisione l'area prevista per l'utilizzo della strumentazione in sito.

Tenendo conto di tali aspetti, nel periodo tra i mesi di Ottobre 2003 e Maggio 2004, sono stati effettuati sette campionamenti a profondità variabile fino ad un metro dalla superficie, dei quali due relativi alla zona di imbocco, uno alla zona di sbocco, uno nella zona centrale della vasca e tre nella zona limitrofa il pontile, come indicato nella figura seguente :

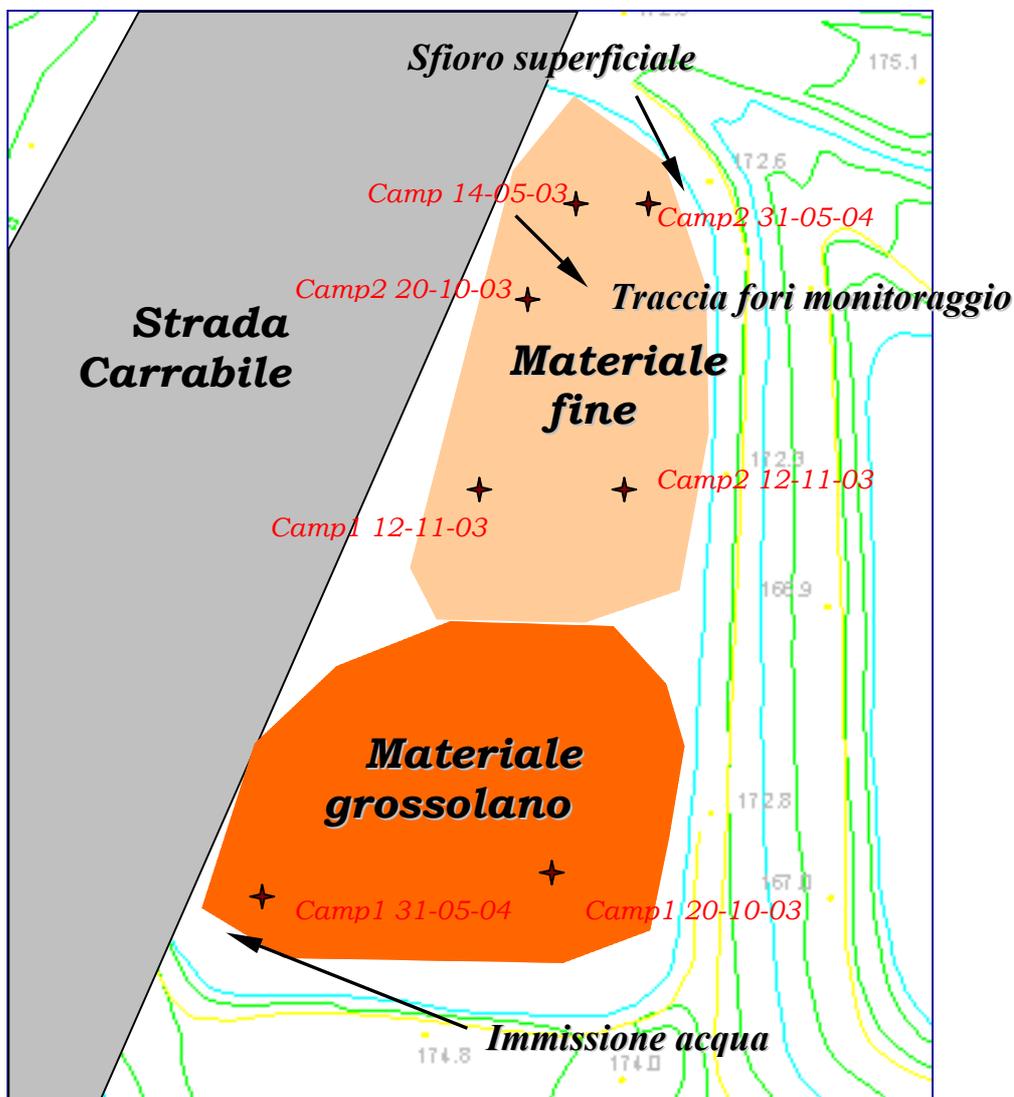


Figura 3.7 : planimetria della vasca in indagine e spaziatura dei punti di campionamento

3.1.3.1. Analisi granulometrica del materiale all'imbocco

Il materiale prelevato nelle zone limitrofe al condotto di immissione dei fanghi di risulta, è stato analizzato sia tramite setacciatura sia utilizzando il densimetro. Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti per i campioni denominati Camp1 20-10-03 e Camp1 31-05-04 :

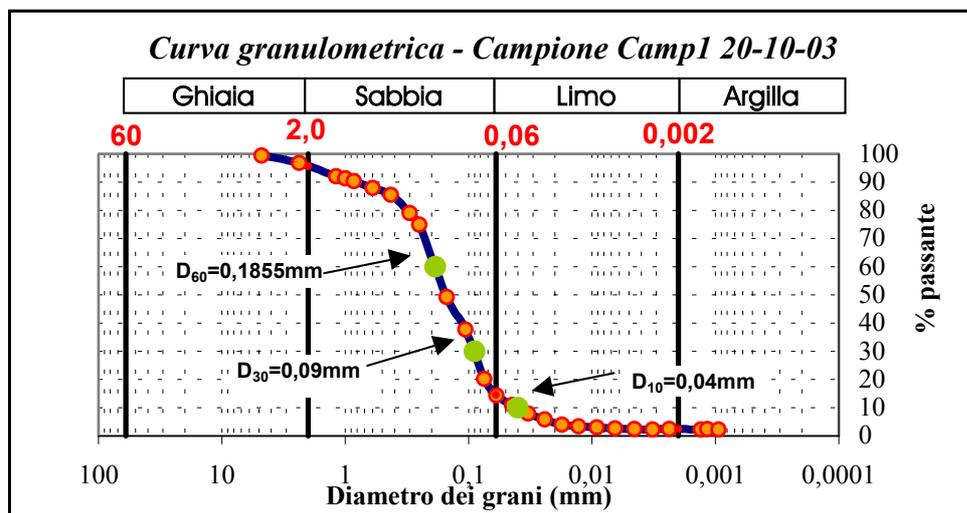


Grafico 3.3 : curva granulometrica ottenuta per il campione Camp1 20-10-03

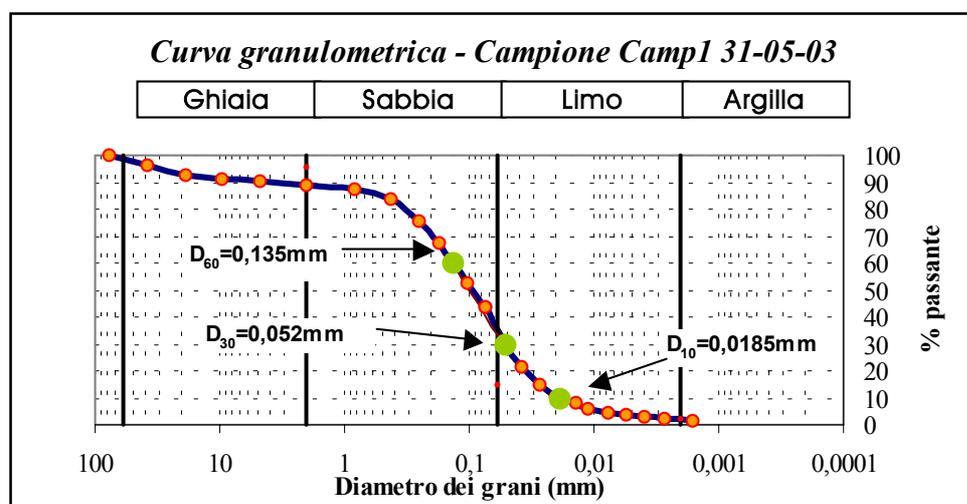


Grafico 3.4 : curva granulometrica ottenuta per il campione Camp1 31-05-04

Nella tabella che segue, vengono evidenziati i principali parametri desumibili dalle curve granulometriche; in particolare, oltre alle diverse frazioni di materiale, sono mostrati i diametri relativi al 10, 30, 60 % di passante ed i coefficienti di uniformità C_u e di curvatura C_c , rispettivamente definiti dall'Eq[3.15] :

<i>Camp1 20-10-03</i>		<i>Camp1 31-05-04</i>	
D₁₀ (mm)	0,0400	D₁₀ (mm)	0,0185
D₃₀ (mm)	0,090	D₃₀ (mm)	0,052
D₆₀ (mm)	0,186	D₆₀ (mm)	0,135
C_u	4,638	C_u	7,297
C_c	1,092	C_c	1,083
% Argilla	2,4	% Argilla	1,8
%Limo	12,1	%Limo	33,4
%Sabbia	81,3	%Sabbia	51,9
%Ghiaia	4,3	%Ghiaia	12,9

Tabella 3.4 : indici significativi delle curve granulometriche ottenute per i diversi campionamenti

$$\left\{ \begin{array}{l} C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \\ C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \end{array} \right. \quad [3.15]$$

Il parametro C_u fornisce un' indicazione dell'omogeneità del materiale: all'aumentare di C_u la curva granulometrica si presenta meno ripida, cioè il materiale è meno omogeneo ma più gradato. In particolare se il 50% delle particelle hanno ugual diametro, C_u risulta pari all'unità, se $C_u > 3$, il materiale è ben gradato e se $C_u < 2$ è invece omogeneo.

Dai campioni analizzati, si possono evidenziare alcuni aspetti: innanzitutto, il campione Camp1 31-05-04 risulta essere più grossolano poiché prelevato nella zona a ridosso dell'imbocco della vasca, nella quale sono presenti i ciottoli e la ghiaia non trattenuti dai vagliatori utilizzati dalle Cave di Lonate.

Al contrario di quanto si poteva prevedere, le curve evidenziano che nel campione Camp1 20-10-03 è presente una quantità di sabbia superiore a quella del campione Camp1 31-05-04 : ciò è dovuto probabilmente alla turbolenza generata dal condotto di immissione, che ha influenzato il processo di sedimentazione in tale zona della vasca. Tale supposizione è confermata inoltre dal fatto che al diminuire del diametro delle particelle, le due curve tendono a sovrapporsi.

Infine, i due campioni, avendo un valore di $C_u > 3$, sono ben gradati e poco omogenei.

3.1.3.2. Analisi granulometrica del materiale della zona di scarico

Come sottolineato, l'obiettivo di tale tesi è l'analisi e la ricostruzione del movimento franoso generato da uno scavo nella zona prossima allo sfioratore superficiale della vasca di sedimentazione. Pertanto si è deciso di effettuare più campionamenti nella fascia di

materiale fine: di seguito sono riportati i risultati ottenuti dalle diverse analisi granulometriche.

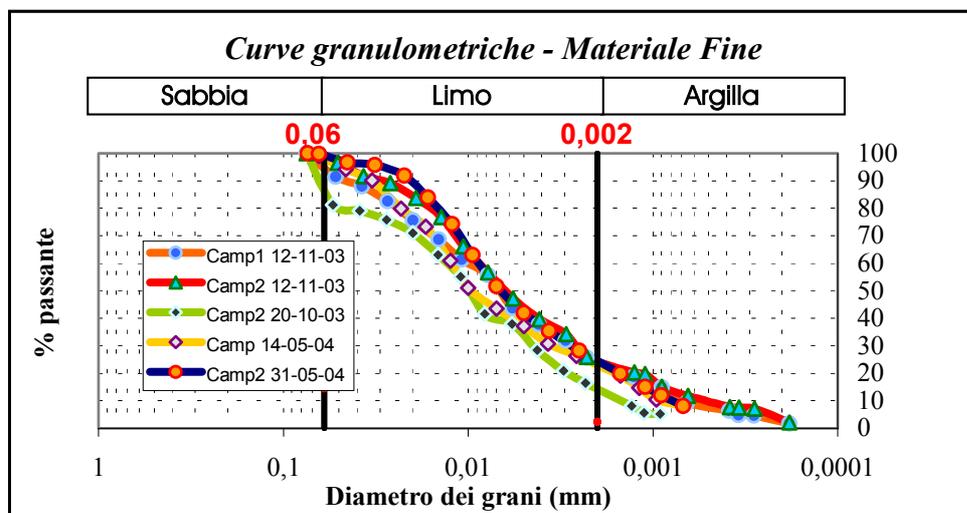


Grafico 3.5 : curve granulometriche dei campioni Camp1/2 12-11-03, Camp2 31-05-04 e Camp 14-05-04

Nella tabella 3.5 vengono riassunti i principali valori ricavabili dalle curve:

<i>Camp2 20-10-03</i>		<i>Camp1 12-11-03</i>		<i>Camp2 12-11-03</i>		<i>Camp 14-05-04</i>		<i>Camp2 31-05-04</i>	
D ₁₀ (mm)	0,01295	D ₁₀ (mm)	0,01017	D ₁₀ (mm)	0,00872	D ₁₀ (mm)	0,0125	D ₁₀ (mm)	0,00905
D ₃₀ (mm)	0,00445	D ₃₀ (mm)	0,00278	D ₃₀ (mm)	0,00263	D ₃₀ (mm)	0,0036	D ₃₀ (mm)	0,00275
D ₆₀ (mm)	0,00149	D ₆₀ (mm)	0,0007	D ₆₀ (mm)	0,00052	D ₆₀ (mm)	0,00099	D ₆₀ (mm)	0,00077
C _u	0,115058	C _u	0,06883	C _u	0,059633	C _u	0,0792	C _u	0,085083
C _c	1,026276	C _c	1,085602	C _c	1,525428	C _c	1,047273	C _c	1,085241
% Argilla	24	% Argilla	24	% Argilla	24,2	% Argilla	22,8	% Argilla	24,2
%Limo	62,2	%Limo	70,3	%Limo	73,84	%Limo	75,24	%Limo	74,8
%Sabbia	13,8	%Sabbia	5,7	%Sabbia	1,96	%Sabbia	1,96	%Sabbia	1
%Ghiaia	-	%Ghiaia	-	%Ghiaia	-	%Ghiaia	-	%Ghiaia	-

Tabella 3.5 : indici significativi delle curve granulometriche tracciate nel grafico 3.5

Tutti i campioni analizzati risultano avere una granulometria uniforme, prevalentemente a carattere limoso, con un'elevata presenza di frazioni argillose. Ciò giustifica il fatto che, a parte il campione Camp2 31-05-04, tutto il materiale risultasse passante al fondo del setaccio con apertura pari a 0,075 mm, e quindi non sia stato necessario procedere ad una setacciatura completa del materiale.

Per questo tipo di terreni, è stata possibile introdurre una prima classificazione, introdotta dall'U.S.D.A. (United States Department of Agriculture), che prevede l'utilizzo di un triangolo la cui area interna è suddivisa in 12 zone rappresentanti altrettante classi di terreni; ogni zona è definita in base alle percentuali di sabbia, limo ed argilla, riportate sui tre lati del triangolo stesso (fig.3.8):

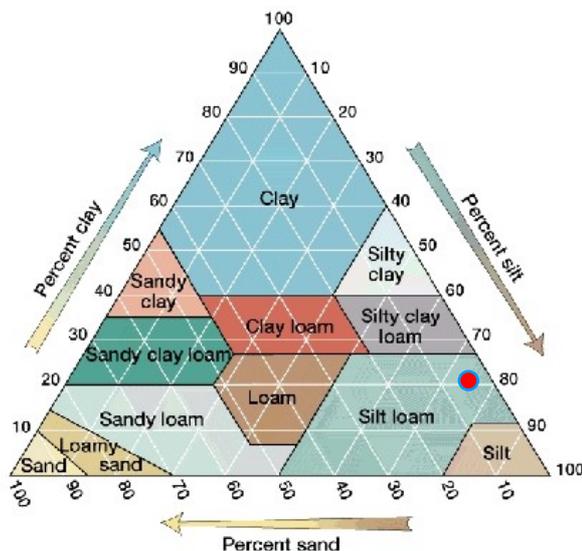


Figura 3.8 : triangolo USDA per la classificazione dei terreni fini; la base del triangolo esprime la percentuale di sabbia, mentre i lati destro e sinistro le percentuali di limo ed argilla

Riportando adeguatamente le percentuali rilevate per i cinque campioni, la definizione che si ottiene è di "silt loam" (punto rosso). In seguito tale definizione sarà completata tenendo conto dei risultati dei limiti di Atterberg, così da poter classificare il materiale di risulta secondo le norme *ASTM*.

3.2. Determinazione della gravità specifica G_s

La gravità specifica o peso specifico dei grani, rappresenta il valor medio del peso unitario delle particelle granulari che compongono il terreno; esso permette di calcolare, noto il peso specifico secco del terreno, la porosità, l'indice dei vuoti e il grado di saturazione del terreno stesso ed inoltre interviene nelle formule di calcolo della curva granulometrica per mezzo del densimetro.

In generale, il peso specifico di qualsiasi materiale è definibile come il peso unitario della sostanza stessa, con riferimento alla densità dell'acqua distillata alla temperatura di 4°C:

$$G_s = \frac{\gamma_{mat}}{\gamma_w(4^\circ C)} \quad [3.16]$$

Detti V_0 i volumi sia di acqua distillata che di particelle solide, e definito P_s come il peso delle particelle solide e P_w il peso dell'acqua distillata a 4°C, si ottiene che :