

POLITECNICO DI MILANO - POLO REGIONALE DI LECCO

Facoltà di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale

Master of Science in Civil Engineering

Anno Accademico 2009-2010



Valutazione della produzione di sedimenti di un bacino alpino:

stima volumetrica e granulometrica
di un caso reale

Relatore: Prof.ssa Laura Longoni

Correlatore: Ing. Luigi Barazzetti

Ing. Davide Brambilla

Ing. Alessio Radice

Autore: Federica Bonacina, matricola 740118

INDICE

INTRODUZIONE	1
Obiettivi.....	2
Schema di lavoro.....	3
CAPITOLO 1_ Descrizione territoriale generale	5
1.1 La Val Tartano.....	5
1.1.1 Inquadramento geografico e geologico - morfologico	5
1.1.2 Reticolo idrografico	8
1.1.3 Punti critici all'interno del bacino idrografico.....	11
1.2 Il rischio idrogeologico.....	20
1.2.1 Erosione dei versanti	21
1.2.2 Aree di instabilità.....	23
1.2.3 Alluvioni ed esondazioni.....	24
1.2.4 Trasporto solido in alveo.....	25
CAPITOLO 2_ Calcolo della perdita di sedimenti dai versanti.....	26
2.1 Modelli utilizzati.....	26
2.2 Modello di Gavrilovic.....	27
2.2.1 Dati del modello	28
2.2.2 Applicazione e risultati del modello	32
2.2.3 Confronto dei risultati e analisi dei parametri utilizzati	33
2.3 Modello USLE (Universal Soil Loss Equation).....	35
2.3.1 Dati del modello	36
2.3.2 Applicazione e risultati del modello	41
2.3.3 Confronto ed analisi dei risultati.....	41
2.4 Modello di RUSLE (Revised USLE).....	42
2.4.1 Risoluzione del modello e analisi dei risultati.....	43
2.5 Confronto tra i modelli utilizzati: (Gavrilovic, USLE, RUSLE).....	44

CAPITOLO 3_ Caso studio: la Valle del Piscino	47
3.1 Descrizione generale della Valle del Piscino.....	49
3.1.1 Definizione di faglia	49
3.2 Fasi di lavoro	52
3.2.1 Operazione di sopralluogo	52
3.3 Ricostruzione del versante.....	52
3.3.1 Cenni sulla fotogrammetria	53
3.3.2 Basi teoriche.....	53
3.3.3 Rete topografica	54
3.3.4 Acquisizione del blocco fotogrammetrico	56
3.4 Studio degli spostamenti	58
3.4.1 Matlab.....	58
3.4.2 Struttura dell'algoritmo.....	58
3.4.3 Risultati ottenuti e discussione.....	61
CAPITOLO 4_ Analisi granulometrica	65
4.1 Tecnologie di campionamento	65
4.1.1 Scelta e considerazioni sulla tecnologia utilizzata.....	69
4.2 Granulometria del versante	70
4.2.1 Classificazione dei sedimenti	71
4.2.2 Rappresentazione grafica dell'analisi granulometrica	73
4.2.3 Parametri della distribuzione granulometrica.....	76
4.3 Fasi operative.....	78
4.2.1 Campionamento del versante.....	78
4.2.2 Attribuzione delle classi granulometriche e calcolo delle frequenze relative	83
4.2.3 Costruzione delle curve granulometriche	88
4.3 Calcolo volume materiale movimentabile.....	91
4.3.1 Modello del cubo di Kellerhals e Bray	92

INDICE

4.3.2 Applicazione del cubo di Kellerhals e Bray	93
4.3.3 Modello e applicazione del cubo modificato di Displas e Sutherland	95
4.4. Utilizzo di PhotoModelerScanner.....	97
4.4.1 Calcolo delle pendenze del versante	98
4.4.2 Applicazione alla Valle del Piscino	98
4.4.3 Relazione tra pendenza e D_{50}	105
CAPITOLO 5_ Portate di incipiente movimento e portate di piena su bacini di piccole dimensioni	109
5.1 Principi di trasporto solido	109
5.1.1 Calcolo delle portate di incipiente movimento	110
5.1.2 Applicazione al Versante del Piscino.....	111
5.2 Portate di piena derivanti da eventi meteorici	114
5.2.1 Modelli afflussi-deflussi.....	114
5.2.2 Scelta del modello di Nash.....	117
5.2.3 Applicazione e risultati del modello	119
5.3 Confronto tra le portate di incipiente movimento e quelle di deflusso	122
Conclusioni finali	124
Appendice A.....	131
A.1 Valori ottenuti dal campionamento con transetto	131
A.2 Frequenze e curve granulometriche	136
A.2.1 Sezione 1.....	138
A.2.2 Sezione 2.....	140
A.2.3 Sezione 3.....	142
A.2.4 Sezione 4.....	144
A.2.5 Sezione 5.....	146
A.2.6 Sezione 6.....	148
A.2.7 Sezione 7	150
A.2.8 Sezione 8.....	152

INDICE

A.2.9 Sezione 9	154
A.2.10 Sezione 10	156
A.2.11 Sezione 11	158
A.2.12 Sezione 12	160
A.2.13 Sezione 13	162
A.2.14 Sezione 14	164
A.2.15 Sezione 15	166
A.2.16 Sezione 16	168
A.2.17 Sezione 17	170
A.2.18 Sezione 18	172
A.2.19 Sezione 19	174
A.2.20 Sezione 20	176
A.3 Idrogrammi delle portate dei deflussi superficiali	178
A.3.1 $T_r= 20$ anni.....	178
A.3.2 $T_r= 100$ anni.....	178
A.3.3. $T_r= 200$ anni	179
A.3.4. $T_r= 500$ anni	179
Lista dei simboli	180
B.1 Modellazione della perdita dei sedimenti dai versanti	180
B.1.1 Modello di Gavrilovic.....	180
B.1.2 Modello di USLE	180
B.1.3 Modello di RUSLE	181
B.2 Analisi granulometrica.....	181
B.2.1 Costruzione delle curve granulometriche	181
B.2.2 Modello del cubo di Kellerhals e Bray e del cubo modificato di Displas e Sutherland	182
B.3 Portate di incipiente movimento e trasporto solido	182
Bibliografia	184

ELENCO DELLE FIGURE

<i>Figura 1 Inquadramento generale</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2: Lineamenti tettonici presenti lungo la Valle del Tartano.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 3 Ubicazione del Bacino del Tartano.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 4: Reticolo Idrografico</i>	<i>10</i>
<i>Figura 5: Una delle frane che interessano la Val Lunga.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 6: Briglia lungo il Val Lunga.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 7: Particolare della Confluenza tra i torrenti Val Lunga e Val Corta.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 8: Vista da valle del ponte alla confluenza tra i due Torrenti.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 9: Vista da monte del ponte alla confluenza tra i due Torrenti</i>	<i>16</i>
<i>Figura 10: Diga di Campo.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 11: Ubicazione frana della Pruna.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 12: Conoide del Tartano nei pressi di Talamona.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 13: Danni provocati da un debris flow.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 14: Rischio idrogeologico.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 15: Erosione lungo i versanti.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 16: Aree instabili.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 17: Piena del 1987.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 18: Ubicazione Valle del Piscino</i>	<i>47</i>
<i>Figura 19: Valle del Piscino.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 20: Esempio di faglia.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 21: Sezione di cataclasite.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 22: Sezione di milonite.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 23: Rete topografica.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 24: Camera per la presa dei fotogrammi.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 25: Visione dei centri di presa dei fotogrammi rispetto al versante</i>	<i>57</i>
<i>Figura 26: Immagini provenienti dalle acquisizioni del 15 Luglio e del 3 Agosto</i>	<i>61</i>
<i>Figura 27: Fasi di elaborazione delle immagini e risultato finale</i>	<i>62</i>
<i>Figura 28: Possibili spostamenti avvenuti.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 29: Campionamento areale.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 30: Campionamento con griglia</i>	<i>68</i>
<i>Figura 31: Campionamento lineare</i>	<i>68</i>
<i>Figura 32: Granulometria presente sul versante</i>	<i>71</i>

ELENCO DELLE FIGURE

<i>Figura 33: Curve granulometriche</i>	<i>74</i>
<i>Figura 34: Assi minore e maggiore misurati sul grano</i>	<i>79</i>
<i>Figura 35: Posizione delle 20 sezioni.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 36: Affioramenti rocciosi laterali</i>	<i>82</i>
<i>Figura 37: Versante al di sotto del ponticello in cemento</i>	<i>82</i>
<i>Figura 38: Modello cubico di Kellerhals e Bray.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 39: Modello del cubo modificato.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 40: Ricostruzione del versante con PhotoModelerScanner.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 41: Visione dei punti comuni con PhotoModelerScanner.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 42: Schematizzazione del fenomeno di afflusso - deflusso</i>	<i>116</i>

ELENCO DELLE TABELLE

<i>Tabella 1: Coefficienti di copertura del suolo</i>	<i>30</i>
<i>Tabella 2: Coefficienti di resistenza del suolo</i>	<i>31</i>
<i>Tabella 3: Coefficienti di estensione e tipologia del suolo</i>	<i>32</i>
<i>Tabella 4: Volumi in arrivo ed evacuati annualmente dalla diga.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabella 5: Confronto dei risultati ottenuti con Gavrilovic.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabella 6: Tipologia e percentuale della composizione dei depositi superficiali</i>	<i>37</i>
<i>Tabella 7: Coefficienti di copertura del suolo</i>	<i>39</i>
<i>Tabella 8: Confronto dei risultati ottenuti con USLE.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabella 9: Confronto dei risultati ottenuti con RUSLE.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabella 10: Risultati riassuntivi dei modelli di calcolo.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabella 11: Classificazione dell'American Geophysical Union.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabella 12: Identificazione delle classi granulometriche</i>	<i>83</i>
<i>Tabella 13: D_{eq} medio – classi delle sezioni.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabella 14: Classe – F_{rel} delle classi per ogni sezione e sull'intero versante</i>	<i>86</i>
<i>Tabella 15: Numero di clasti per classe delle 20 sezioni</i>	<i>87</i>
<i>Tabella 16: Parametri rappresentativi delle curve granulometriche</i>	<i>90</i>
<i>Tabella 17: Modello del cubo di Kellerhals e Bray</i>	<i>94</i>
<i>Tabella 18: Modello del cubo modificato.....</i>	<i>96</i>
<i>Tabella 19: Coordinate dei punti utilizzati per il calcolo delle pendenze.....</i>	<i>101</i>
<i>Tabella 20: Inclinazione tra le sezioni</i>	<i>102</i>
<i>Tabella 21: Quote delle sezioni.....</i>	<i>104</i>
<i>Tabella 22: Relazione tra D_{50} e pendenza.....</i>	<i>105</i>
<i>Tabella 23: Range delle pendenze.....</i>	<i>106</i>
<i>Tabella 24: Parametri conclusivi</i>	<i>107</i>
<i>Tabella 25: Calcolo delle portate di incipiente movimento</i>	<i>113</i>
<i>Tabella 26: Calcolo del coefficiente CN.....</i>	<i>121</i>
<i>Tabella 27: Tempo critico, intensità di pioggia e portate ,massime</i>	<i>122</i>
<i>Tabella 28: Confronto fra portate di incipiente movimento e portate di deflusso superficiale.....</i>	<i>123</i>

ELENCO DEI GRAFICI

<i>Grafico 1: Classe – D_{eq} medio delle sezioni.....</i>	<i>84</i>
<i>Grafico 2: F_{rel} – Classi sul versante.....</i>	<i>86</i>
<i>Grafico 3: F_{rel} – Classi sul versante.....</i>	<i>87</i>
<i>Grafico 4: Numero di clasti per classe granulometrica lungo il versante.....</i>	<i>88</i>
<i>Grafico 5: Andamento dei parametri rappresentativi delle curve granulometriche.....</i>	<i>91</i>
<i>Grafico 6: Andamento del versante in funzione delle pendenze.....</i>	<i>104</i>
<i>Grafico 7: Pendenza – D_{50}.....</i>	<i>106</i>
<i>Grafico 8: Confronto tra i parametri sull'intero versante.....</i>	<i>108</i>
<i>Grafico 9: D_{50} – portata critica.....</i>	<i>113</i>

INTRODUZIONE

In una realtà complessa come quella alpina, caratterizzata da peculiarità morfologiche ed orografiche, alcuni fenomeni tipici necessitano di particolare attenzione. Fra questi vi è senza dubbio la valutazione della volumetria del materiale che può essere eroso dai versanti e confluire nell'alveo di un corso d'acqua, dando origine a quel fenomeno noto come trasposto solido, che, a causa della sua potenza e delle conseguenze catastrofiche che può causare, è oggetto di ricerca da parte della comunità scientifica.

Per dare un'idea delle problematiche connesse a tale fenomeno basti ricordare l'evento dell'agosto del 1987 in Valtellina: l'elevato tasso di intense precipitazioni, unito ad altre condizioni climatiche, diede origine ad un'onda di piena che trasportò a valle ingenti quantità di materiale solido, travolgendo e distruggendo tutto ciò che incontrava. L'effetto devastante di tale onda di piena venne ancor più accentuato dalla presenza dei sedimenti che fu in grado di movimentare, che, aumentando l'altezza del fondo dell'alveo, andarono ad aumentare anche la forza d'impatto e distruttiva, nonché il suo grado erosivo.

Da questo evento si può apprendere quanto sia importante prevedere i fenomeni erosivi lungo i versanti, determinare quali siano le zone sorgenti e quantificare il volume massimo dei sedimenti potenzialmente instabili.

Non meno importante è la capacità di prevedere, al possibile verificarsi di un evento, anche la sua intensità e i diversi scenari che può generare per poter pianificare gli interventi della Protezione Civile; una buona pianificazione è possibile solo se si conoscono con precisione quali siano i fattori in gioco ed il loro "movimento". Tutto ciò per prevedere quali siano le condizioni nelle quali si dovrà lavorare e quali siano le misure atte a garantire le minime condizioni di sicurezza per la popolazione in caso proprio di un evento calamitoso.

Saper valutare quali siano le volumetrie di materiale potenzialmente movimentabile e saper prevedere dove questo materiale andrà a depositarsi costituiscono informazioni di grande importanza, non solo per gli effetti che i possibili fenomeni franosi possono causare, ma anche per i conseguenti fenomeni di trasporto solido del materiale in alveo.

Le problematiche connesse allo studio di tali fenomeni, di erosione dei versanti ed il trasporto solido in alveo non derivano solo dai vari fattori in gioco ma anche dalla variabilità spaziale degli eventi stessi.

Attualmente lo studio della perdita di sedimenti dai versanti, nonché della stima volumetrica è basato su modelli ormai di vecchia data, ma che, come tutte le scienze, risultano essere in continuo sviluppo, portando ampliamenti delle conoscenze in letteratura.

Obiettivi

Oggetto di studio di questo lavoro è un bacino di medie dimensioni, il Bacino del Tartano in provincia di Sondrio, facente parte delle Alpi Orobie.

La scelta è ricaduta su tale bacino per una serie di motivi, tra i quali la problematicità dell'area data dalla presenza di zone instabili diffuse e localizzate; ed il fatto che in passato era già stata svolta un'analisi simile, con la possibilità di mettere in evidenza le diversità adottate nei modelli di calcolo, e quindi un confronto con i risultati ottenuti.

Con questo lavoro ci si propone in primo luogo di effettuare una stima del materiale di copertura superficiale potenzialmente movimentabile, che potrebbe generare fenomeni franosi a scala di bacino, avvalendosi di modelli di calcolo numerico comunemente a disposizione dei professionisti del settore.

I risultati ottenuti verranno poi confrontati con il già citato precedente lavoro, all'interno del quale si sono applicati gli stessi modelli, basati su equazioni empiriche di calcolo.

Si metteranno in evidenza ed in discussione le differenze dei risultati dei diversi approcci ai modelli, dell'elaborazione e dell'affidabilità tramite un confronto con i dati ricavati direttamente in sito.

Verranno messi in evidenza i diversi approcci utilizzati nei due lavori, che, schematicamente, possiamo così riassumere:

- la scelta input dei parametri per le equazioni;
- l'elaborazione dei dati;
- i risultati finali ottenuti.

Terminata l'analisi di bacino a grande scala (che comprende il confronto con lavoro precedente), si passerà ad un'analisi a piccola scala, analizzando una faglia laterale dello stesso bacino.

Si inizierà con la stima granulometrica e del volume del materiale coprente la superficie, per poi passare al calcolo della portata di incipiente movimento delle particelle stesse ed infine le portate provenienti da intense precipitazioni. I valori delle portate ottenute saranno messi a confronto per quantificare, in termini di tempo di ritorno, il verificarsi di eventi di *debris flow* lungo il versante.

Schema di lavoro

Dell'intero lavoro si riporta qui di seguito una breve descrizione strutturale dei vari capitoli.

Il **capitolo 1**, intitolato *Descrizione Territoriale*, conterrà informazioni riguardo l'aspetto territoriale del bacino, dalle caratteristiche geologiche a quelle idrauliche; in aggiunta una breve descrizione del reticolo idrografico comprendente i corsi d'acqua principali e la diga di Campo. Si analizzeranno i "punti critici" del bacino per evidenziare la problematicità della zona. La parte conclusiva sarà dedicata al rischio idrogeologico: l'erosione dai versanti, il trasporto solido in alveo e le possibili inondazioni.

Il **capitolo 2** sarà dedicato alla *Modellazione della perdita di sedimenti dai versanti*. Si analizzeranno una serie di modelli di uso comune per il calcolo della produzione di sedimenti da parte dei versanti a scala di bacino. Tra i vari modelli incontrati in letteratura si analizzeranno ed utilizzeranno quello di Gavrilovic, di USLE (Universal Soil Loss Equation) e quello di RUSLE (Revised USLE). Di tali modelli si darà una breve descrizione teorica delle equazioni di base e dei parametri in gioco. I risultati ottenuti saranno confrontati sia tra di loro, sia con quelli ottenuti nel precedente lavoro evidenziandone le diversità ed infine con quelli ricavati direttamente in sito.

Nel **capitolo 3**, dal titolo *Caso studio: la Valle del Piscino*, si avrà il passaggio da un'analisi a grande scala (bacino del Tartano) ad una a piccola scala, con lo studio di un lineamento tettonico laterale presente sul bacino. Si partirà dalla ricostruzione

del versante attraverso l'utilizzo della tecnica fotogrammetrica tramite l'acquisizione di fotogrammi, supportata dall'utilizzo della stazione totale. La ricostruzione sarà effettuata utilizzando il programma PhotoModelerScanner, che permette appunto la ricostruzione di oggetti 3D. Tale programma, con il supporto di un algoritmo di Matlab, verrà inoltre utilizzato per verificare i possibili spostamenti avvenuti sul versante tra due acquisizioni di dati in epoche differenti.

Il **capitolo 4** sarà interamente dedicato all'*Analisi granulometrica* del versante del Piscino. A causa della mancanza di informazioni, si dovranno eseguire campagne operative direttamente in sito per il campionamento del versante, seguite da un'analisi dei dati in ufficio. Per tale analisi granulometrica si userà il campionamento lineare suddividendo l'intero versante in sezioni, per ognuna delle quali si otterrà, utilizzando la suddivisione granulometrica di Upper-Wentworth, la rispettiva curva granulometrica ed il rispettivo diametro rappresentativo. Inoltre, con il metodo del cubo di Kellerhals e Bray e del cubo modificato di Displas e Sutherland, si cercherà di avere un valore volumetrico in percentuale delle varie granulometrie sul versante. Infine, sempre con l'utilizzo del programma PhotoModelerScanner per calcolare le pendenze sul versante, si cercherà una correlazione tra queste ed il diametro rappresentativo delle sezioni.

Nel **capitolo 5**, intitolato *Portate e Intensità di pioggia*, con i dati ottenuti dall'analisi granulometrica effettuata nel capitolo 4, si tenterà di calcolare quale sia il valore delle portate che portano al movimento del materiale granulare, basandosi sulle leggi che governano il trasporto solido di fondo in alveo. Inoltre, si eseguirà una valutazione dell'intensità di pioggia con il calcolo delle portate massime di pioggia per diversi tempi di ritorno, attraverso l'uso di modello di afflussi-deflussi di Nush. Il valore di tali portate ottenute dall'ultimo punto verranno poi confrontate con quelle di incipiente movimento, ottenendo così "una risposta" del sistema versante rispetto al fattore piogge.

La parte finale è dedicata alle *Conclusioni* e conterrà la sintesi di tutto il lavoro, un breve riepilogo dei punti salienti e le possibili utilità pratiche dei risultati e delle considerazioni ottenute.

CAPITOLO 1_ Descrizione territoriale generale

Il presente capitolo fornisce informazioni riguardo l'ubicazione, le caratteristiche geologiche ed idrauliche del bacino in esame; inoltre è presente un'analisi del rischio idrogeologico, comprendente: le aree instabili e potenzialmente instabili, l'erosione dei versanti, un accenno alle alluvioni ed inondazioni avvenute nel passato, ed al trasporto solido in alveo con le conseguenti possibili problematiche [1].

1.1 La Val Tartano

1.1.1 Inquadramento geografico e geologico - morfologico

La Val Tartano è situata in provincia di Sondrio, nell'ambito territoriale del Comune di Morbegno, nelle immediate vicinanze del centro urbano di Talamona, nella media Valtellina (appartenente al Parco delle Orobie Valtellinesi). Con una lunghezza complessiva di 15km fa parte della catena montuosa delle Alpi (figura 1); un tipico esempio di catena collisionale che si estende dal Golfo di Ginevra fino a Vienna, formatasi a seguito della collisione tra due zone litosferiche: quella europea, a N e quella africana in rapido movimento verso l'Europa a S.



Figura 1 Inquadramento generale

Le Alpi sono divise in due catene da un importante lineamento tettonico: la Linea Insubrica o Lineamento Periadrico, un sistema di fratture sub verticali in senso E-O. Le Alpi Orobiche formano una lunga catena montuosa che costituisce la sponda meridionale della Bassa Valtellina; si estendono per oltre 50km e sono limitate dalla cresta spartiacque tra la Val Belvisio e la Val Camonica ed a ovest dal Monte Legnone.

Come è caratteristica di molte valli della Valtellina, la Val Tartano si compone di una notevole porzione ad alta quota di pendenza moderata, seguita da un tronco molto ripido che scende fino al fondovalle, con un percorso di circa 1.700m (fino all'inizio della conoide nei pressi di Talamona) e copre un dislivello di 457m. L'intera valle è posizionata ad una quota altimetrica quasi interamente sopra i 1.000m s.l.m.

Dal punto di vista morfologico tale valle risulta essere di origine glaciale nella parte più alta, che gli attribuisce la classica forma ad U, e successivamente incisa dall'azione delle acque fluviali, dalla forma a V; si nota come nel fondovalle si hanno scarpate rocciose alte oltre i 200m.

I versanti hanno forti pendenze, superiori a 35°, e la rete drenante è formata da numerosi impluvi e depressioni che costituiscono vie preferenziali per il passaggio delle acque superficiali.

Sull'intero bacino del Tartano affiorano rocce metamorfiche appartenenti alla formazione degli Gneiss di Morbegno; sono gneiss contenenti una grande quantità di biotite, quarzo e graniti facenti parte del basamento cristallino delle Alpi Meridionali. Tale basamento risulta essere ricoperto da depositi superficiali di origine glaciale costituiti da abbondante matrice limoso-sabbiosa, ricoperti a loro volta in alcune parte da detriti di versante, a testimoniare l'intenso dissesto idrologico in atto sul bacino.

Dal punto di vista delle caratteristiche meccaniche e della stabilità, le formazioni rocciose affioranti si dividono in quattro classi principali:

1. rocce metamorfiche massive;
2. rocce metamorfiche scistose;
3. rocce metamorfiche scistose intensamente fratturate;
4. rocce ad alternanza di tipi litologici sedimentari paleozoici e triassici.

Le formazioni rocciose metamorfiche, essendo state colpite dall'azione dei ghiacciai, risultano in molte parti ricoperte da coperture detritiche di età quaternaria, che possono essere così classificate:

- depositi di falda;
- depositi alluvionali;
- depositi colluvionali;
- depositi detritico-fluviali;
- depositi glaciali;
- accumuli di frana.

Rispetto alla probabile movimentazione e instabilità tali depositi possono essere divisi in tre principali categorie a seconda della causa della loro instabilità:

1. movimenti provocati dalle acque superficiali;
2. movimenti gravitativi;
3. movimenti provocati da masse nevose e glaciali e delle conseguenti forme di erosione e dissesto.

Per ogni categoria è importante saper distinguere i movimenti in atto da quelli in stato di quiescenza (che non sono attualmente in atto, ma presentano segni di evoluzione recente e quindi di non completo esaurimento) e da quelli ormai inattivi, che sembrano aver compiuto il loro ciclo evolutivo ed essere quindi in una situazione stabile di inattività.

Importante sottolineare come il bacino sia attraversato da numerosi lineamenti tettonici (faglie e fratture), responsabili di un intenso stato di fratturazione delle rocce affioranti, che hanno influenzato in modo significativo il reticolo idrografico (figura 2).

Si individuano due sistemi principali: del primo sistema (direzione NE-SO) fanno parte per esempio la Val Vicima, la Val Corta e la Val Budria; nel secondo sistema (direzione ONO-ESE) si ricorda la Val Lunga, la Valle del Castrino (che è il proseguimento della Val Lunga al di là della confluenza con la Val Corta in località Biorca) e i diversi canali che confluiscono nella Val Budria.

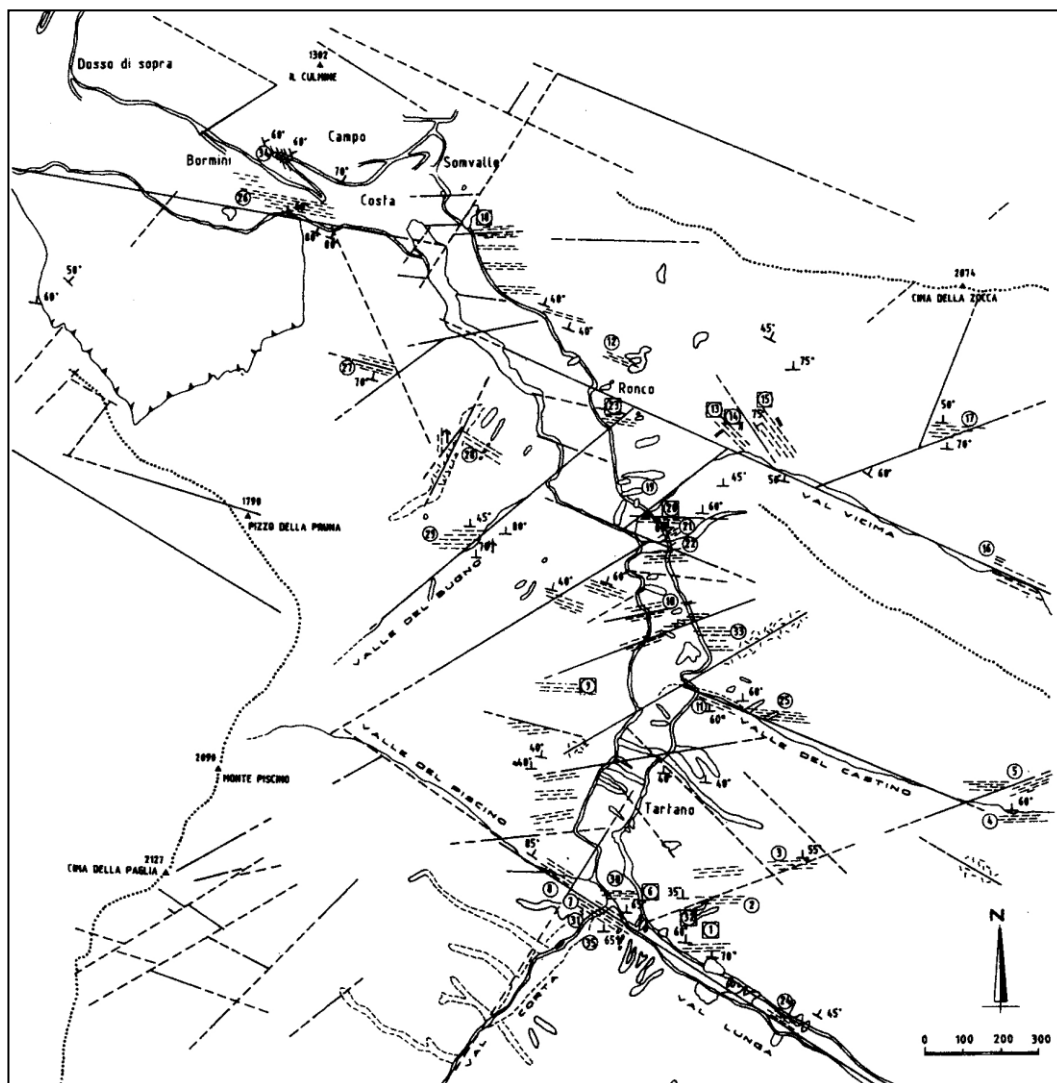


Figura 2: Lineamenti tettonici presenti lungo la Valle del Tartano

1.1.2 Reticolo idrografico

Il bacino del fiume Tartano è situato nella Provincia di Sondrio sul versante Valsassinese delle Alpi Orobie. È un affluente di sinistra del fiume Adda e vi confluisce sulla sinistra idrografica poco a monte del centro abitato di Talamona dove forma un'ampia conoide (figura 3).

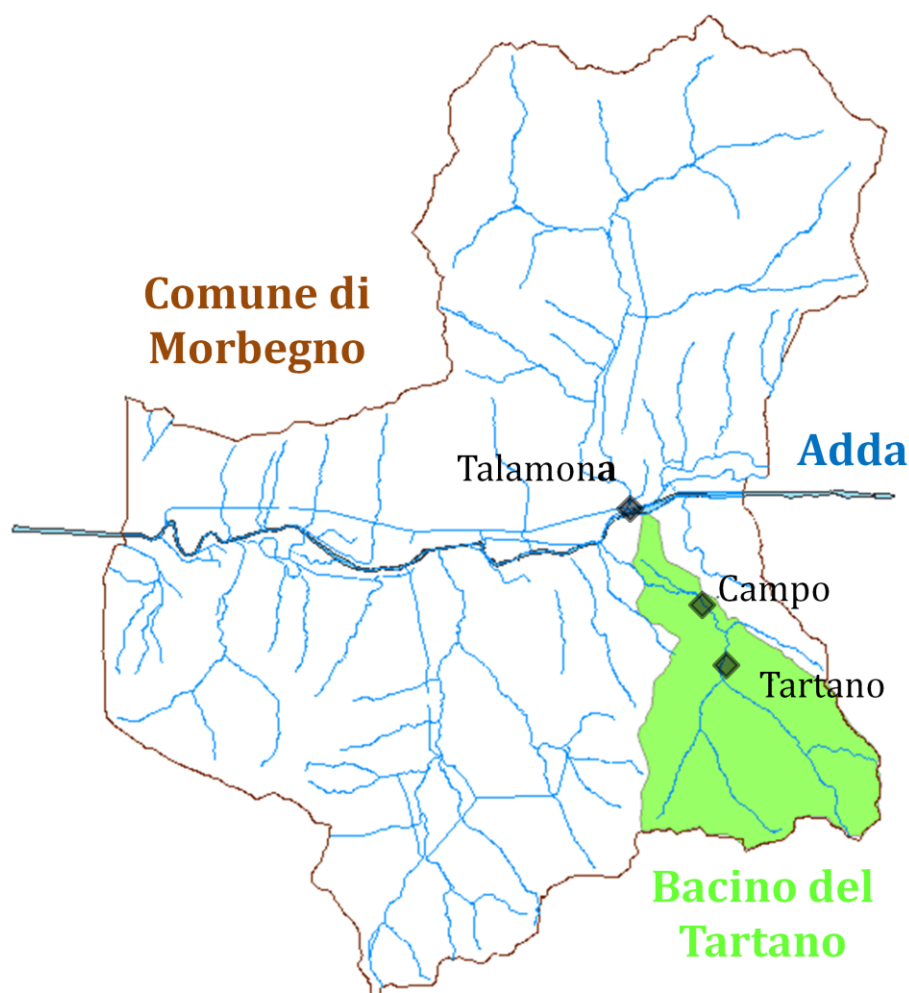


Figura 3 Ubicazione del Bacino del Tartano

La superficie totale del bacino è di circa 56km², di cui 2,16km² occupati dalla conoide poco più a monte della confluenza con l'Adda; è possibile suddividerlo in tre sottobacini principali: Tartano, Val Corta e Val Lunga.

Il reticolo idrografico è costituito nella parte superiore da due rami: il Val Lunga proveniente da SE e il Val Corta proveniente da SO, che confluiscono in località Biorca, alla periferia dell'abitato di Tartano. Da qui in poi il corso del Tartano procede incanalato fino alla stretta di Colombera, sotto l'abitato di Campo di Tartano, dove è sbarrato dalla diga detta "di Campo", costruita dalla Società Comacina negli anni 1927-1929 a scopo idroelettrico ed oggi gestita dall'ENEL. A valle dell'invaso, il torrente scorre per quasi 1km, alla destra del piede della grossa

frana denominata “Pizzo della Pruna” e, dopo un tratto con forti pendenze, forma un’ampia conoide prima di confluire nel fiume Adda.

La Val Lunga, dalla quale si può dire abbia inizio la rete idrografica, è formata nella sua parte iniziale da quattro laghetti naturali, posti ad una quota rispettivamente di 1.990m, 2.030m, 2.095m e 2.250m.

Il torrente che percorre la Val Corta invece, ha origine dalla confluenza di due torrenti, uno orientale denominato di Lemma, lungo 4.062m ed uno occidentale denominato di Budria, lungo 3.312m.

L’asta principale può essere costituita dal torrente che percorre la Val Lunga seguita dal Tartano propriamente detto fra Biorca e la foce in Adda, ha una lunghezza totale di 14.456m, di cui 6.700m in Val Lunga fino alla confluenza di Biorca, 3.530m tra Biorca e lo sbarramento di Campo e altri 4.226m, di cui 2.300m sulla conoide, fino alla foce con l’Adda (figura 4).



Figura 4: Reticolo Idrografico

Per quanto riguarda la quota a cui si trova l'intero corso del Tartano, si può dire che più della metà dell'intero bacino si sviluppa ad una quota di circa 2.000m s.l.m., raggiungendo la quota massima di 2.057m s.l.m. in prossimità del Monte Seleron.

La pendenza del fondo dell'asta principale può essere suddivisa in tre tratti con valori di pendenza media molto differenti [1]:

1. il tratto del Val Lunga e quello tra Biorca ed una sezione posizionata a 800m a valle dello sbarramento di Campo Tartano alla quota di circa 870m s.l.m., mantiene un andamento abbastanza regolare con un valore medio di 7,4%;
2. successivamente subisce un brusco aumento fino all'inizio della conoide, posta a quota di circa 413m s.l.m., con un valore medio di 27,5%;
3. lungo la conoide la pendenza si mantiene attorno all'8% fino allo sbocco nell'Adda, che avviene ad una quota di 257m s.l.m.

1.1.3 Punti critici all'interno del bacino idrografico

All'interno dell'intero bacino idrografico del torrente Tartano, si possono individuare vari punti critici che hanno creato numerosi problemi sia alle abitazioni sia alle infrastrutture viarie poste nelle vicinanze della conoide situata a monte della confluenza tra il Tartano a l'Adda, per ognuno dei quali è possibile constatare la situazione attuale nonché i possibili scenari evolutivi.

Punto critico n°1: versanti della Val Lunga

Questa valle è interessante da un punto di vista degli eventi franosi, in quanto è possibile osservare numerose tracce di franamenti superficiali. Si tratta per lo più di *soil slip* di piccole dimensioni che progressivamente divengono sempre più estesi man mano che procedono i fenomeni di erosione lungo il versante, evolvendo anche in *debris flow* (figura 5).

I motivi per cui si ha una così intensa attività di questi fenomeni sono molteplici e sono da attribuire a cause divise tra predisponenti e scatenanti.

Tra le cause predisponenti si ricordano:

- l'elevata pendenza dei versanti, variabile tra i 30° e 45°, soprattutto nella parte di fondovalle, come testimonianza dell'origine glaciale di tali valli che

hanno subito un'ulteriore forte incisione dalla successiva azione delle acque torrentizie;

- il comportamento geologico-tecnico dei terreni estremamente sensibile alle variazioni del contenuto di acqua;
- la presenza di una grande quantità di materiale detritico a disposizione.

Mentre per le cause scatenanti si fa riferimento a:

- la saturazione dei depositi dovuta alle prolungate precipitazioni meteoriche;
- l'azione erosiva del torrente al piede del versante.

Si è notato come la maggior parte dei dissesti si siano sviluppati a seguito degli eventi alluvionali avvenuti nel 1987 e che poi hanno subito un'ulteriore riattivazione durante i successivi eventi meteorologici particolarmente intensi.

Un pericolo che non è da escludere è quello di uno sbarramento del corso d'acqua nel caso in cui ingenti quantità di materiale proveniente da una frana ostruiscano l'alveo del torrente stesso.



Figura 5: Una delle frane che interessano la Val Lunga

Punto critico n°2: alveo del torrente Val Lunga

Nell'alveo del torrente Tartano per diminuire il trasposto solido e per ridurre in modo definitivo la pendenza dell'alveo, sono state costruite alcune briglie (figura 6) ed una serie di muri paramassi laterali ai piedi dei pendii.

Nonostante la presenza di tali opere, l'alveo del torrente è affetto da fenomeni di erosione laterale che potrebbero generare delle frane lungo le sponde dell'asta principale; si nota anche la presenza di massi di grandi dimensioni che ostruiscono in modo marcato il corso d'acqua e la presenza di materiale che mobilizzandosi può innescare a sua volta una colata.



Figura 6: Briglia lungo il Val Lunga

Punto critico n°3: confluenza Val Lunga – Val Corta

La confluenza tra i torrenti Val Lunga e Val Corta rappresenta un punto importante e di particolare interesse (figure 7, 8 e 9), che già in passato ha destato preoccupazione, come nell'evento del 1987, causando non solo il crollo della passerella pedonale di attraversamento del Val Corta, ma anche il superamento del ponte stradale di attraversamento da parte del torrente.

Per poter comprendere le problematiche di questo tratto occorre analizzare separatamente le condizioni idrauliche di entrambi i torrenti a monte della confluenza.

In Val Lunga il torrente scorre con regolarità fino alla zona di confluenza e l'altezza del corso d'acqua, anche in condizioni di piena, risulta essere minore rispetto alla quota delle sponde.

La Val Corta invece, è caratterizzata dalla presenza di forti irregolarità dovute alla particolare forma dell'alveo scavato nella roccia, che risulta essere stretto e sinuoso; in caso di piena, in alcuni tratti la quota del pelo libero supera le sponde laterali, e l'acqua riesce a raggiungere in alcuni tratti anche la strada laterale sulla sponda sinistra. Prima dell'ingresso con la confluenza con il Val Lunga, il flusso si regolarizza con l'allargamento dell'alveo.

Di particolare interesse è proprio la sezione in corrispondenza della quale i due torrenti si incontrano: si va a generare una situazione di moti vorticosi ad elevata turbolenza, senza però che il livello d'acqua raggiunga quote preoccupanti, passando al di sotto del ponte stradale presente.

Le condizioni cambiano se intervengono alcuni fattori che possono essere connessi ad eventi meteorologici particolarmente intensi.

La prima situazione considerata è quella di un abbondante trasporto solido: in questo caso si verrebbero a formare delle zone di deposito in corrispondenza della confluenza a monte del ponte. A seguito di analisi è risultato che la quantità di depositi riversata all'interno dell'alveo in occasione delle piene è risultata sempre compatibile con la capacità del corso d'acqua.

Una seconda situazione da analizzare, che si potrebbe verificare a seguito di intensi eventi meteorologici (temporali, piogge intense prolungate o concentrate), è quella della presenza di materiale galleggiante quale tronchi d'albero, rami, etc. Se tale materiale proviene dalla Val Lunga, non sembra provocare gravi preoccupazioni in quanto riesce a defluire abbastanza facilmente; se invece proviene dalla Val Corta, si è notato come non riesca a fluire a causa della morfologia dell'alveo, provocando così uno sbarramento in corrispondenza del ponte e quindi possibili esondazioni.

Un'altra situazione critica potrebbe verificarsi nel caso in cui una frana improvvisa dovesse creare sbarramenti dei corsi d'acqua, andando così ad ostruire il flusso dei due torrenti prima della confluenza.

Secondo alcuni studi l'evento del 1987 è stato causato dalla presenza contemporanea di più fattori negativi: una significativa quantità di trasporto solido di fondo e detriti galleggianti all'interno dell'alveo. Si è così verificato un notevole

accumulo di materiale alla confluenza, con una conseguente esondazione del torrente.



Figura 7: Particolare della Confluenza tra i torrenti Val Lunga e Val Corta



Figura 8: Vista da valle del ponte alla confluenza tra i due Torrenti



Figura 9: Vista da monte del ponte alla confluenza tra i due Torrenti

Punto critico n°4: media Val Tartano

Sapendo, come già accennato in precedenza, che si ha a che fare con una valle glaciale profondamente incisa dalla successiva azione delle acque torrentizie, in corrispondenza della parte intermedia e del fondovalle si sono generate scarpate rocciose alte più di 200m caratterizzate da forti pendenze. Tali versanti risultano essere interessati da diffusi fenomeni franosi riconducibili a colate di fango e detrito; inoltre è proprio su questi versanti che si originano frane di piccole dimensioni che però risultano particolarmente pericolose per la rapidità ed imprevedibilità di accadimento. Vengono favorite dalla concentrazione delle acque di ruscellamento superficiali e minacciano abitazioni, infrastrutture e vie di comunicazioni presenti lungo i versanti, andando ad alimentare il trasporto solido dell'asta torrentizia principale. Tale trasporto solido derivante da fenomeni di piena in questa zona assume caratteri differenti rispetto a quelli presenti a valle della diga di Campo sia in termini qualitativi sia di dimensione del materiale movimentato.

Infatti il materiale solido presente in questa parte intermedia del bacino deriva da fenomeni di erosione diffusa sia areale che lineare lungo gli alvei, mentre a valle

della diga, come si vedrà, è determinato dall'apporto della frana della Pruna, che comprende massi con diametri rilevanti.

Una ulteriore differenza è data dai diversi valori delle pendenze degli alvei. Infatti, nella parte a monte della diga, la granulometria del materiale trasportato è molto minore rispetto a quella di valle. Qui si trovano infatti massi aventi volumi che variano da alcune decine anche a centinaia di metri cubi.

Occorre ricordare che tutto il materiale trasportato dal Tartano e dai suoi affluenti viene trattenuto all'interno del suo alveo, non contribuendo al trasporto solido verso valle, che può essere imputabile solo al materiale proveniente dalla frana del Pizzo della Pruna. Inoltre il trasporto solido nella parte mediana della valle è influenzato anche da numerosi fenomeni di *debris flow* e *soil slips* che si verificano su alcune delle aste torrentizie degli affluenti.

Punto critico n°5: diga di Campo

La diga di Campo, costruita come detto intorno agli anni '20 per scopi idroelettrici, può raggiungere un valore della portata di scarico pari a $230\text{m}^3/\text{s}$, che in situazioni eccezionali può anche risultare superiore, essendo il ciglio della diga una soglia tracimabile (figura 10). La diga riveste un'importanza fondamentale per la dinamica del bacino, in quanto permette di trattenere tutto il materiale solido proveniente da monte. Come testimonianza dell'inteso trasporto solido che giunge alla diga e che da questa viene trattenuto si noti come la capacità di invaso della diga stessa si è ridotta in circa 13 anni, dal 1984 al 1996, da $1.400.000\text{m}^3$ a 700.000m^3 .



Figura 10: Diga di Campo

Punto critico n°6: zona a valle della diga e della frana del Pizzo della Pruna

A valle della diga di Campo, lungo l'asta principale del torrente si trova la grossa paleofrana denominata del Pizzo della Pruna (figura 11), che riveste un ruolo fondamentale per l'intero bacino, sia perché costituisce un pericolo legato ad una sua eventuale riattivazione che ha un volume stimato di alcune decine di milioni di metri cubi, sia perché costituisce un probabile contributo al trasporto solido del torrente a valle della diga fino alla confluenza con l'Adda.

Un eventuale movimento del materiale ricoprente il versante potrebbe provocare uno sbarramento del normale flusso del Tartano con la formazione di una diga naturale, ed il connesso pericolo di una sua possibile rottura improvvisa, dando origine a quel fenomeno noto con il nome di *dam break*, con la conseguente formazione di una colata di detrito che si riverserebbe verso valle con un'elevata energia.

La diga di Campo, situata a monte della paleofrana, trattiene tutto il materiale solido proveniente dalla parte medio alta del bacino. Di conseguenza la conoide situata in prossimità della confluenza con l'Adda viene alimentata solamente dal materiale dei versanti situati a valle della diga stessa, ed in particolare dal versante interessato dalla frana della Pruna.

Per quanto riguarda le dimensioni dei clasti della conoide, analizzandone la granulometria, si evince che la frana della Pruna, almeno nella sua porzione del piede, è attiva e continua a scaricare nel torrente. Inoltre, tutto ciò è favorito dall'intensa erosione operata dal torrente al piede del versante stesso.



Figura 11: Ubicazione frana della Pruna

Punto critico n°7: conoide del Tartano

A valle dello sbarramento, il torrente scorre per circa 1km al piede della frana della Pruna e, dopo un breve tratto caratterizzato da forti pendenze, forma un'ampia conoide, avente una superficie di 1,6km² e pendenza circa dell'8,3% (figura 12).

A seguito di sopralluoghi si è notato come il torrente scorra in un alveo posto nella parte centrale della conoide; tale assesto è stato causato dalle piene avvenute negli anni 1911 e 1912. Infatti, prima di tali eventi l'alveo era posizionato sul margine destro della conoide, utilizzato oggi come canale di scarico dell'impianto idroelettrico.

Di fondamentale importanza fu l'evento del 1987, a seguito del quale si ebbero sostanziali modifiche del profilo del letto del torrente. In quell'occasione una grossa quantità di materiale solido si è depositata sulla conoide, comportando l'innalzamento del profilo e quindi un aumento della pendenza. Dopo il 1987 il profilo ha ripreso ad abbassarsi diminuendo la pendenza, a seguito di escavazioni artificiali e della naturale erosione dell'alveo in assenza di grandi piene.

A seguito di un'analisi granulometrica del materiale costituente la conoide si evince come numerosi siano i massi di notevole dimensione, con volumi anche superiori ad alcune decine di metri cubi, ed alcuni anche di centinaia di metri cubi.

In conclusione si può dire che la morfologia, l'estensione e la granulometria del materiale costituente la conoide fanno ritenere che il bacino del Tartano sia in continua ed attuale evoluzione, soprattutto nella parte a valle della diga di Campo.



Figura 12: Conoide del Tartano nei pressi di Talamona

1.2 Il rischio idrogeologico

Il rischio idrogeologico occupa un posto importante nei problemi che il nostro Paese deve affrontare, principalmente a causa degli ingenti danni causati ad oggetti, beni e soprattutto per la perdita di molte vite umane. Si può dire che in Italia tale rischio è diffuso su tutto il territorio in modo differente a seconda delle caratteristiche geomorfologiche della zona, quali frane, esondazioni, trasporto solido lungo le conoidi nelle zone collinari e di pianura, dissesto di carattere torrentizio.

Sul bacino del Tartano, il rischio idrogeologico si articola in diverse tipologie di dissesti:

- frane, che comprendono sia quelle areali che quelle dovute all'azione erosiva delle acque incanalate negli alvei;
- allagamenti ed esondazioni, a seguito di eventi di piena;
- valanghe (se pur meno frequenti).



Figura 13: Danni provocati da un debris flow

Uno schema riassuntivo del rischio idrogeologico gravante sul bacino del Tartano può essere rappresentato dalla figura sottostante (figura 14), nella quale si può notare come i sedimenti ricoprenti i versanti possono, attraverso fenomeni di *rock flow*, *debris flow* o *mud flow*, ostruire il normale corso provocando un eccessivo aumento del trasporto solido verso valle e possibili esondazioni. Le citate problematiche sono tipiche dei bacini montani a causa della presenza sui versanti di elevate pendenze di materiale potenzialmente instabile che, a seguito del disgelo o di intense precipitazioni, può originare varie tipologie di fenomeni franosi.

**DESCRIZIONE DEL POSSIBILE RISCHIO IDROGEOLOGICO
GRAVANTE SUL BACINO DEL TARTANO**

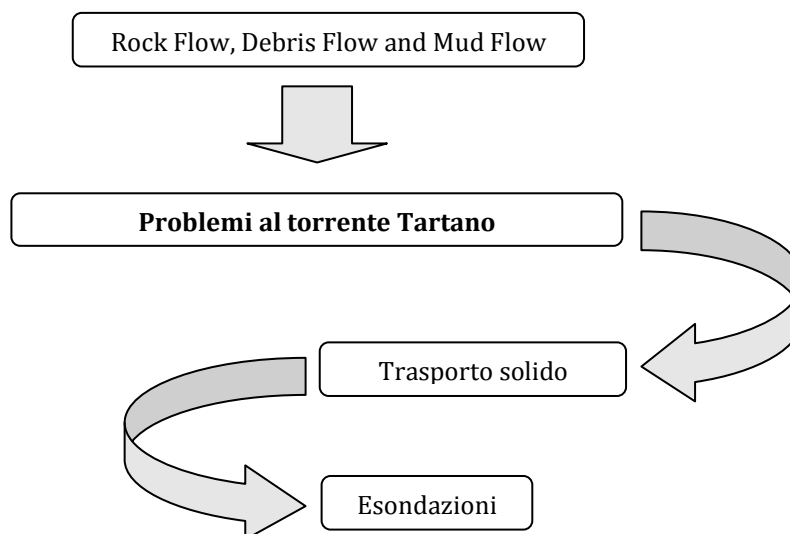


Figura 14: Rischio idrogeologico

1.2.1 Erosione dei versanti

Il suolo è un corpo naturale che costituisce la superficie terrestre, con caratteristiche differenti rispetto agli strati geologici sottostanti; tale diversità è il risultato dell'operato degli agenti atmosferici e del mondo biologico. La sua erosione è un processo naturale che, unito ad altri, porta ad un mutamento del paesaggio. In alcuni casi tale processo di degrado naturale è affiancato a quello causato dall'uomo,

portando così ad una rapida degradazione del suolo che può causare, nel peggiore dei casi, anche una desertificazione.

In base alla zona presa in considerazione il degrado porta a differenti conseguenze, più o meno significative: è di facile intuizione come il degrado di un suolo coltivabile possa produrre gravi danni e perdite [2].

La Val Tartano è caratterizzata da numerosi fenomeni franosi diffusi su tutto il bacino: crolli, scivolamenti, colate di detrito e terra. Questi eventi normalmente si verificano a seguito di intense precipitazioni, causando molto spesso, oltre a danni ad oggetti, anche vittime (figura 15).

Importanti per le loro conseguenze catastrofiche sono quei fenomeni di lave torrentizie, noti con il termine di *debris flow*, dovuti all'elevata instabilità delle pendici degli alvei e soprattutto per le caratteristiche geotecniche dei terreni di copertura: si tratta infatti di ghiaie, ciottoli e sabbie limose.

Tra le tipologie di frane in roccia, si ricorda, per le sue notevoli dimensioni e per la sua continua evoluzione, la frana della Pruna: il suo intenso stato di fratturazione è dovuto alla presenza di importanti lineamenti strutturali. Fra le cause determinanti di tale movimento franoso vanno ricordate la forte pendenza del versante, la giacitura sfavorevole delle rocce alterate particolarmente deboli (mioliti) e la circolazione idrica sotterranea, la cui presenza è testimoniata da numerose piccole sorgenti che vi affiorano nella parte verso valle.

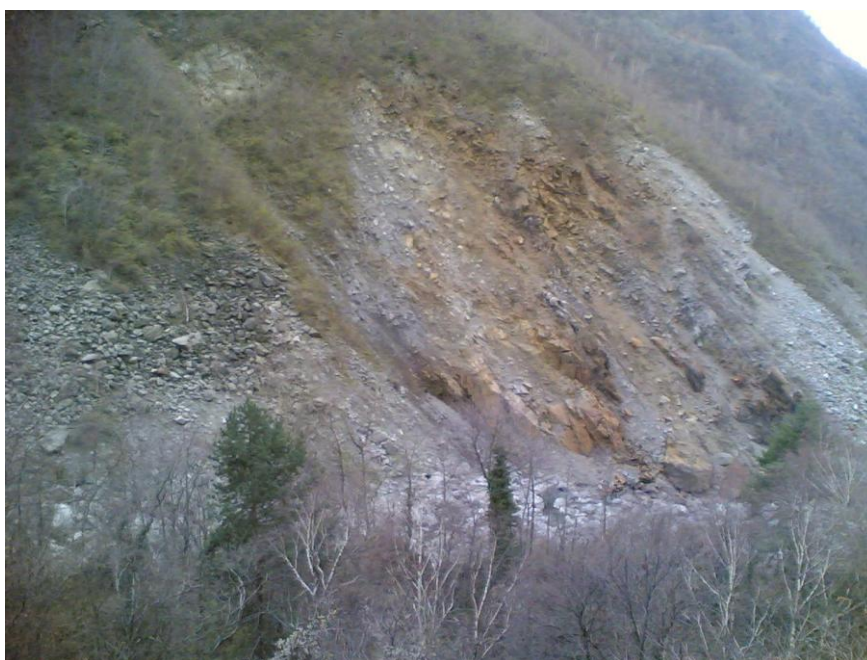


Figura 15: Erosione lungo i versanti

1.2.2 Aree di instabilità

L'area dell'intero bacino, per quanto riguarda le zone instabili, è suddivisa in base alla loro pericolosità in due categorie: quella ad elevata instabilità con fenomeni franosi attivi ed in continua evoluzione, e quella potenzialmente instabile che ha quindi delle condizioni al limite della stabilità. Per ognuna di queste categorie, è importante la valutazione di alcuni parametri, quali la superficie complessiva e la lunghezza dei tronchi di alveo interessati da tali fenomeni erosivi. Dall'analisi della carta dei dissesti e della pericolosità, dalle carte geo-ambientali della Comunità Montana della Valtellina di Morbengo si sono potute ricavare le seguenti informazioni:

- aree ad elevata instabilità: 1,53km², per esempio il versante della Pruna e della Foppa dell'Orso;
- aree potenzialmente instabili: 7,12km²;
- tratte dell'asta principale in erosione attiva: 6.187m;
- tratte degli affluenti con erosione attiva: 5.750m.

Si nota come le aree ad elevato grado di instabilità occupino una porzione modesta dell'intero bacino; maggiore invece sono le aree potenzialmente instabili e le erosioni dell'alveo (figura 16).



Figura 16: Aree instabili

1.2.3 Alluvioni ed esondazioni

Fenomeni di alluvioni ed esondazioni che colpirono la Val Tartano sono registrati fin dalla metà del XIX secolo. Si ricordano per la loro gravità:

- l'evento del 1855 e quello del 1885 (quest'ultimo provocò, oltre ad ingenti danni alle abitazioni di Piana in Val Lunga, anche cinque morti);
- gli eventi del 1911 e del 1912 che portarono all'attuale forma della conoide;
- le piene del 1927, del 1937, del 1939, del 1968, che, a seguito della forma assunta dalla conoide dopo gli eventi del 1991-1912, causarono ulteriori esondazioni ed alluvioni;
- la piena del 1987, a seguito della quale si sono avuti profondi cambiamenti delle aste torrentizie lungo l'intera vallata: sono state distrutte o danneggiate le difese spondali esistenti, si sono innescati numerosi fenomeni di erosione sia degli alvei sia dei versanti con la conseguente movimentazione di una grande quantità di materiale successivamente trasportato verso valle dalla corrente di piena (figura 17).

È stato valutato alla conoide un volume di materiale giuntovi nell'ordine di un milione/un milione e mezzo di metri cubi.



Figura 17: Piena del 1987

1.2.4 Trasporto solido in alveo

Un aspetto strettamente collegato all'erosione dei versanti, a scala di bacino, è il trasporto solido di materiale lungo e/o all'interno delle aste fluviali, che può portare all'alterazione di tratti del reticolo idrografico; depositi ed erosioni possono modificarne la morfologia [14]. Approfonditi studi dovranno essere eseguiti in presenza di materiale movimentabile e delle opere di sistemazione idraulica (invasi, serbatoi naturali, briglie...).

Una volta staccatisi dai versanti, i sedimenti potrebbero interagire con l'idraulica del bacino originando differenti scenari che potrebbero costituire dei veri e propri rischi: quindi è necessario tenerne monitorata l'evoluzione.

La presenza di un'ingente quantità di materiale movimentato lungo le aste torrentizie aumenta il potere erosivo della corrente, che porta ad una riduzione della capacità portante del fiume e degli invasi, con un aumento della probabilità di esondazione, e quindi del rischio idrogeologico. Il verificarsi o meno di esondazioni dipende in primo luogo dalla dimensione delle particelle all'interno dell'alveo, ed in secondo luogo dalla geometria dell'alveo stesso (planimetria, altimetria, sezioni) di solito nota sulla base di rilievi topografici. In effetti, nel caso generale in cui l'alveo sia scavato in un materiale incoerente, come nel caso del torrente Tartano, la geometria non può essere considerata fissa nel tempo, a causa dei fenomeni di erosione e deposito del materiale costituente il fondo e le sponde, che viene mosso dalla corrente. Sotto l'azione delle spinte idrodinamiche infatti, i grani possono essere messi in movimento e trasportati verso valle [15].

In conseguenza dei processi descritti, l'alveo di un corso d'acqua può subire mutamenti progressivi nel tempo, in relazione alle sue caratteristiche planimetriche, ossia al suo percorso, altimetriche (pendenze), di forma delle sezioni e di distribuzione granulometrica del materiale di fondo. Le modifiche dell'alveo possono essere conseguenza di eventi limitati nel tempo (piene, alluvioni), che fanno comunque parte del regime normale di un corso d'acqua [3].

Risulta per questo motivo utile, ai fini della sicurezza, prendere informazioni sulle dimensioni e natura dei sedimenti presenti nelle aste torrentizie, ed ancor più cercare di prevedere il comportamento di tale materiale, sia sul breve periodo (piene eccezionali) sia sul lungo periodo (ciclo annuale/pluriennale).

CAPITOLO 2_ Calcolo della perdita di sedimenti dai versanti

All'interno di questo capitolo si affronta il problema di determinare, attraverso l'uso di diversi modelli di calcolo, la capacità dell'intero bacino di produrre sedimenti. Si andrà ad analizzare la situazione attuale dei versanti, le possibili zone di produzione del materiale, ed una stima del valore della volumetria di sedimenti rilasciati annualmente. I valori ottenuti saranno confrontati, in primo luogo, con quelli empirici già in nostro possesso ricavati in prossimità della diga di Campo. In secondo luogo saranno confrontati con quelli stimati in una precedente tesi dal titolo: "Bilancio di sedimenti a scala di bacino: applicazione alla Val Tartano", svolta nell'anno accademico 2006-2007 da Matteo Mandelli [4]. Si procederà poi a mettere in evidenza le diversità tra le due procedure operative.

2.1 Modelli utilizzati

Ad oggi in letteratura esistono diverse formulazioni e modelli che permettono di valutare l'erosione del suolo (qualitativi, semi-qualitativi, quantitativi), che si differenziano per i dati input utilizzati e per l'elaborazione e l'accuratezza dei risultati. Con il fine di eseguire un'analisi il più dettagliata e completa possibile si è scelto di utilizzare modelli empirici, ciascuno dei quali capace di aggiungere nuove informazioni, ottenendo come risultato un valore numerico.

Tra i modelli utilizzati si ricordano: Gavrilovic, USLE, RUSLE, che forniscono come dato output il valore della volumetria di materiale instabile potenzialmente movimentabile da un pendio: più precisamente sono capaci di valutare la produzione media di sedimenti su un bacino [5].

2.2 Modello di Gavrilovic

Il modello di Gavrilovic è stato originariamente sviluppato per lo studio di bacini torrentizi appartenenti alla ex Jugoslavia meridionale, e successivamente utilizzato, con buoni risultati, per bacini in Svizzera ed Italia. Tale modello si basa su formule matematiche che portano ad ottenere il valore volumetrico della produzione di sedimenti.

$$G = W \cdot R$$

$$W = T \cdot H \cdot \pi \cdot Z^{3/2} \cdot F$$

$$R = \frac{(l + l_i) \cdot \sqrt{O \cdot D}}{(l + 10) \cdot F}$$

$$T = \sqrt{\frac{t}{10} + 0,1}$$

$$Z = \Xi \cdot \Pi \cdot (\Phi + \sqrt{I})$$

Con:

- G: discarica media annuale di materiale eroso [m³];
- W: produzione media annuale di sedimento dovuto all'erosione superficiale [m³];
- R: coefficiente di ritenzione dei sedimenti;
- t: temperatura media annuale del bacino [°C];
- T: coefficiente di temperatura [°C];
- H: precipitazione media annua [mm/anno];
- Z: coefficiente di erosione [m²km^{-4/3}mm^{-2/3}];
- A: area del bacino [km²];
- O: perimetro del bacino [km];
- I: pendenza media del bacino;
- l: lunghezza dell'asta principale del corso d'acqua [km];
- l_i: lunghezza totale delle aste degli affluenti laterali [km];
- Ξ: coefficiente di copertura del suolo;
- Π: coefficiente di resistenza del suolo;
- φ: coefficiente di tipologia ed estensione dell'erosione.

Si nota come tale modello si basi su un approccio empirico solo per tre variabili: il fattore di protezione, di erodibilità del suolo e di descrizione della tipologia ed importanza dell'erosione in atto, attribuiti a discrezione dell'operatore che esegue la stima. Gli altri parametri usati derivano da misurazioni sul territorio. Per questa ragione il modello di Gavrilovic viene considerato come il modello più quantitativo tra quelli semi-quantitativi.

2.2.1 Dati del modello

I parametri per l'applicazione del modello di Gavrilovic sono stati estrapolati da dati forniti dalle banche dati del Sistema Informativo Territoriale della Regione Lombardia, grazie all'utilizzo di un software GIS (ArcMap).

Temperatura media

Per il calcolo della temperatura media del bacino (t), si è ipotizzato che questa coincidesse con il valore medio della temperatura in corrispondenza della quota media del bacino stesso. Per il suo calcolo si è fatto riferimento ai dati provenienti dalla stazione di monitoraggio di Cancano (1.930m s.l.m.). Non avendo a disposizione dati diretti, si ottiene un valore della temperatura di 3°C, con cui poter calcolare il coefficiente di temperatura (T), si ottengono:

$$t = 3^{\circ}\text{C}$$
$$T = 0,632$$

Precipitazione media annua

Il valore della precipitazione media annua (H) viene calcolato tramite i valori provenienti dal pluviometro di Campo Tartano (1.140m s.l.m.) tra gli anni 1966 e 2005 forniti dall'ENEL. Si è potuto ottenere un valore di precipitazione media pari a 1.376mm/anno, quindi:

$$H = 1.376\text{mm/anno}$$

Perimetro, area, altezza media e pendenza media

Per il calcolo del perimetro (O), dell'area (A), dell'altezza (D) e della pendenza media del bacino (I) si è fatto uso del software ArcMap; dal suo data base si sono ricavati i valori di perimetro ed area, mentre per altezza e pendenza media si è ricorso al modello digitale del terreno con celle di 20m X 20m, ritagliato dal DEM della regione Lombardia in scala 1:10.000, ottenendo così i seguenti valori:

$$O = 30,539\text{km}$$

$$A = 47,465\text{km}^2$$

$$D = 1791\text{m s.l.m.}$$

$$I = 0,58$$

Lunghezza asta principale ed affluenti

I valori della lunghezza dell'asta principale (I) e secondaria (I_i) del corso d'acqua si sono ottenuti ancora per mezzo dell'utilizzo di ArcMap, tramite la cartografia in scala 1:2.000 fornita della Comunità Montana di Morbegno.

Si considera come asta principale la somma tra la Val Lunga e il tratto tra Biorca e la diga di Campo; mentre come secondaria la Val Corta, la Val di Lemma, la Val Budria, i rispettivi affluenti, compresi quelli dell'asta principale, e tutte le possibili vallecole e canali nei quali è possibile il formarsi di un flusso d'acqua. Dalle misurazioni risulta:

$$I = 11,026\text{km}$$

$$I_i = 110,796\text{km}$$

Coefficiente di copertura del suolo

La stima del coefficiente di copertura del suolo (Ξ) si ottiene utilizzando delle apposite tabelle pubblicate in letteratura. Per una maggiore accuratezza dei risultati, si è in primo luogo calcolata con ArcMap la quantità del tipo di copertura del bacino, (espressa in percentuale di area) assegnandole poi il rispettivo valore di coefficiente. Infine, per ottenere un unico valore del coefficiente di copertura del suolo, i vari coefficienti stabiliti in precedenza sono stati pesati rispetto all'area totale del bacino.

Tale procedura è stata seguita, dove possibile, anche per i parametri di resistenza e di tipologia ed estensione dell'erosione.

È proprio la procedura appena descritta che differenzia il procedimento attuale dell'applicazione dei modelli di calcolo, da quella utilizzata nel precedente lavoro del Mandelli. In questo modo si è andati a ridurre la soggettività da parte dell'operatore che esegue la stima.

Il bacino del Tartano può essere così suddiviso in base alla copertura:

- 60% da bosco;
- 25% da prato;
- 5% da detriti o zone sterili;
- 9% da aree idriche;
- 1% antropizzate.

Facendo riferimento ai coefficienti ricavati da Beyer e Portner, e successivamente studiati da De Vente e Poesen (tabella 1), per il metodo di Gavrilovic si ottiene un coefficiente di copertura del suolo pari a 0,289.

$$E = 0,289$$

Coefficients of soil cover	E
Mixed and dense forest	0,05 - 0,20
Thin forest with grove	0,05 - 0,20
Coniferous forest with little grove, scarce bushes, bushy prairie	0,20 - 0,40
Damaged forest and bushes, pasture	0,40 - 0,60
Damaged pasture and cultivated land	0,60 - 0,80
Areas without vegetal cover	0,80 - 1,00

Tabella 1: Coefficienti di copertura del suolo

Coefficiente di resistenza del suolo

Il calcolo del coefficiente di resistenza del suolo (Π) viene eseguito con la stessa procedura adottata per il coefficiente di copertura, ossia pesando i vari valori dei coefficienti relativi alle varie tipologie di resistenza sull'area del bacino sempre sulla base della letteratura proposta da De Vente e Poesen (tabella 2), che prende in considerazione il tipo di sedimenti presenti nel bacino.

Coefficient of soil resistance	Π
Hard rock, erosion resistant	0,2 - 0,6
Rock with moderate erosion resistance	0,6 - 1,0
Weak rock, schistose, stabilized	1,0 - 1,3
Sediment, moraines, clay and other rock with little resistance	1,3 - 1,8
Fine sediments and soil without	1,8 - 2,0

Tabella 2: Coefficienti di resistenza del suolo

Si sceglie la classe con coefficienti nel range tra 1,3 e 1,8, avendo a che fare con detriti, depositi morenici e materiale con debole resistenza. A causa della varietà di dimensione dei sedimenti di possibile movimentazione presenti, si decide di considerare i due valori estremi della classe e la media, ottenendo tre valori di coefficiente di resistenza del suolo:

$$\Pi_1 = 1,3$$

$$\Pi_2 = 1,55$$

$$\Pi_3 = 1,8$$

Coefficiente di estensione e tipologia di erosione

Per stabilire tale valore di estensione e tipologia di erosione (ϕ) si utilizza la Carta della Pericolosità redatta dalla Comunità Montana di Morbegno, che inserita in ArcMap, fornisce la percentuale della pericolosità delle varie zone (elevata

instabilità, potenzialmente instabile, elevata e potenziale instabilità lungo le aste torrentizie).

Successivamente viene assegnato ad ognuna di queste zone il suo rispettivo coefficiente, sulla base della letteratura di De Vente e Poesen (tabella 3); tali valori pesati poi rispetto all'area totale del bacino forniscono il valore del coefficiente di estensione e della tipologia di erosione, che risulta essere pari a:

$$\phi = 0,594$$

Coefficient of soil type and extend of erosion	ϕ
Little erosion on watershed	0,1 - 0,2
Erosion in waterways on 20-50% of the catchment area	0,3 - 0,5
Erosion in river, gullies and alluvial deposits, karstic erosion	0,6 - 0,7
50-80% of the catchment area affected by surface erosion and landslides	0,8 - 0,9
Whole watershed affected by erosion	1,0

Tabella 3: Coefficienti di estensione e tipologia del suolo

2.2.2 Applicazione e risultati del modello

Stabiliti i valori dei parametri da utilizzare, si passa all'applicazione del modello tramite il calcolo delle varie equazioni matematiche viste nel paragrafo 2.2; si ricorda che si otterranno tre valori del volume di perdita annuale in quanto si hanno altrettanti valori distinti del coefficiente di resistenza del suolo (Π_1, Π_2, Π_3).

Si ottengono i seguenti valori di scarica media annuale di materiale eroso pari a:

$$G(\Pi_1) = 42.527,07\text{m}^3$$

$$G(\Pi_2) = 55.366,61\text{m}^3$$

$$G(\Pi_3) = 69.288,18\text{m}^3$$

I valori ottenuti vengono poi controllati con i dati reali, ottenuti in prossimità della sezione della Diga di Campo, riportati in tabella 4.

anno	volumi in arrivo [m³]	volumi evacuati [m³]
1991	34.073	11.145
1992	43.504	13.055
1993	53.605	23.250
1994	36.737	9.825
1995	26.264	5.220
1996	39.749	11.393
1997	35.314	11.701
1998	32.800	6.898
1999	41.876	14.608
2000	57.299	43.155
2001	43.187	41.362
2002	42.022	56.683
2003	22.957	14.669
2004	50.083	131.106
2005	21.286	76.162
2006	27.844	4.197

Tabella 4: Volumi in arrivo ed evacuati annualmente dalla diga

2.2.3 Confronto dei risultati e analisi dei parametri utilizzati

Si è continuato col confrontare i valori dei parametri utilizzati e dei risultati ottenuti con il lavoro effettuato in precedenza sullo stesso bacino, nel quale si era già applicato il metodo di Gravrilovic, per il calcolo del volume di materiale movimentabile. Nella sottostante tabella (tabella 5) si riportano i valori usati nel presente lavoro e in quello precedente del Mandelli ed inoltre i valori dei risultati finali per il modello di Gavrilovic.

	Mandelli	Bonacina		
T [°C]	0,632	0,632		
H [mm/anno]	1.376	1.376		
O [km]	29,215	30,539		
A [km ²]	46,98	47,465		
I	0,58	0,58		
D [m s.l.m.]	1.791	1.791		
l [km]	11,259	11,026		
l _i [km]	149,84	110,796		
Ξ	0,2	0,289		

Π	1,6	1,3	1,55	1,8
ϕ	0,8	0,594		
W [mc]	45.371,33	47.108,35	61.331,06	76.752,35
R	1,67	0,90275		
G [m³]	52.931,4	42.527,1	55.366,6	69.288,2
ΔG [mc]=		-10.404,3	2.435,2	16.356,77
ΔG (%)=		-20	5	31

Tabella 5: Confronto dei risultati ottenuti con Gavrilovic

Come si può osservare le due applicazioni hanno portato a risultati differenti. Questo deriva dalla diversità di alcuni dati input utilizzati nelle equazioni matematiche su cui si basa proprio tale modello. Per alcuni di questi valori, quali il perimetro e l'area, la diversità è legata alla precisione delle misurazioni effettuate in ArcMap; altri valori, come la lunghezza dell'asta principale e secondaria, dipendono oltre che dalla precisione della misurazione sempre con ArcMap, dall'aver individuato o meno le possibili zone di formazione di flussi d'acqua lungo i versanti. Tali differenze sono per questi motivi accettabili.

Per quanto riguarda invece i coefficienti Ξ , Π , e ϕ , come già detto, la loro scelta risulta essere a discrezione dell'operatore che utilizza il modello; infatti la letteratura indica una serie di valori, tra i quali si è liberi di scegliere quali utilizzare. A differenza del Mandelli, in questo lavoro si sono attribuiti i valori dei vari coefficienti andando ad agire sulla percentuale di area del bacino a cui si riferiscono, e poi pesandone il valore rispetto all'area totale del bacino.

Da notare che per il valore del coefficiente di resistenza del suolo Π , si considerano tre valori differenti ($\Pi_1=1,3$; $\Pi_2=1,55$; $\Pi_3=1,8$) in quanto non è stato possibile pesarli rispetto all'area dell'intero bacino, a causa della varietà delle dimensioni del materiale movimentabile: il risultato sarebbe un lavoro poco accurato.

Queste variazioni dei coefficienti di copertura, di resistenza del suolo e di tipologia ed estensione dell'erosione, rispetto a quelli del Mandelli, seppur piccole in valore assoluto, portano a valori della volumetria movimentabile annua molto differenti e significativi, come si può notare sempre nella tabella 5. Si ottengono differenze in percentuale, rispetto al valore ottenuto da Mandelli (52.931,41 m³), nell'ordine del -20%, 5% e 31%.

2.3 Modello USLE (Universal Soil Loss Equation)

Il modello di USLE, introdotto negli anni '50 dal Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti, si basa su un'equazione empirica, che valuta la perdita di suolo annuo di un terreno agricolo, avendo come ipotesi di base che tutto il materiale eroso venga poi trascinato via e si trascurino, quindi, quei possibili fenomeni di deposito. Il calcolo di tale volume di materiale, adottando il modello di USLE, presenta la seguente forma:

$$E_{USLE} = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

Con:

- E: perdita di suolo media annua [t/(ha anno)];
- R: fattore di erosività di pioggia e deflusso [MJ mm/(ha h anno)];
- K: fattore di erodibilità del suolo [t ha h/(ha MJ mm)];
- L: fattore di lunghezza del versante;
- S: fattore di pendenza del versante;
- C: fattore di copertura vegetale e uso del suolo;
- P: fattore riguardante le tecniche di sistemazione.

La formula per il calcolo della perdita di suolo media annua, che nel nostro caso può essere interpretata come la perdita di sedimenti media annua dai versanti del bacino, è basata su un semplice calcolo moltiplicativo tra quattro fattori adimensionali (L, S, C, P), che vanno a modificare una perdita di suolo di base. Tale perdita di base, denominata erosione potenziale, rappresenta sinteticamente l'aggressività dell'agente erosivo (R) e le caratteristiche del suolo erodibile (K), entrambi parametri dimensionali. Nel seguente modello, tutti i parametri sono stati calibrati su un pendio ideale, nel quale i parametri adimensionali assumono un valore unitario, e quindi la perdita di suolo è espressa dal prodotto dei due parametri dimensionali R e K. Per casi con caratteristiche differenti da quelle del pendio ideale, i parametri adimensionali assumono valori diversi dall'unità e dovranno quindi essere valutati.

2.3.1 Dati del modello

Si è già accennato come il modello di USLE si basa su un semplice prodotto tra una serie di fattori che possono essere calcolati come segue.

Fattore R

Tale fattore, che, come si è detto, è il fattore di erosività di pioggia e deflusso, è unico per tutto il bacino; negli Stati Uniti d'America sono state proposte varie formulazioni per il suo calcolo in funzione della precipitazione (P) in pollici. Tra le varie formulazioni si ricordano:

$$R = 16,55 \cdot P^{2,2}$$

$$R = 27,00 \cdot P^{2,2}$$

$$R = 27,38 \cdot P^{2,17}$$

In tutti e tre i casi, comunque, si ottengono risultati in pollici: è quindi opportuna una trasformazione nel sistema internazionale, attraverso:

$$R (SI) = 17,02 \cdot R (USunit)$$

Data la curva di possibilità pluviometrica, è stato possibile ricavare il valore di P, pari a 39,9mm, e quindi il fattore R:

$$R = 1241,7 \frac{\text{MJ mm}}{\text{ha h anno}}$$

Fattore K

Il fattore K esprime l'attitudine del suolo ad essere eroso. Anche per questo fattore si parte da un valore standard, calcolato su un suolo lavorato a maggese, e per il quale i fattori L, S, C e P assumo un valore unitario. A seguito di varie elaborazioni numeriche e calibrazioni si è arrivati ad una formulazione per il calcolo di tale fattore K, sulla base del diametro rappresentativo delle particelle del suolo; tale formulazione viene espressa come:

$$K = 0,0034 + 0,0405 \cdot e^{\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\log D_g + 1,659}{0,7101} \right)^2 \right]}$$

$$D_g = e^{(0,01 \sum f_i \ln m_i)}$$

Con:

- D_g : media geometrica dei diametri delle particelle del suolo [mm];
- f_i : valore % della frazione di particelle di suolo compresa nella i -esima classe;
- m_i : media aritmetica del diametro delle particelle comprese nell' i -esima classe.

Il bacino del Tartano risulta essere ricoperto da depositi superficiali, la cui composizione può essere divisa in tre microclassi: sabbie, limi ed argille, ognuna delle quali con una propria media aritmetica delle particelle, come riportato nella sottostante tabella (tabella 6).

% limo	% argilla	% sabbia	ml	ma	ms	D_g
8	24	68	0,03	0,002	0,07	0,027867

Tabella 6: Tipologia e percentuale della composizione dei depositi superficiali

Dalle formule viste in precedenza si ottiene un fattore K pari a:

$$K = 0,0435 \frac{t \text{ ha h}}{\text{ha MJ mm}}$$

Fattore C

Il fattore C, di copertura ed uso del suolo, prende in considerazione il tipo di vegetazione o coltura esistente e i tipi di interventi eseguiti. Indica la tendenza del suolo al ruscellamento; è collegato al tipo ad allo stato di sviluppo della vegetazione, alla biomassa del terreno, alle modalità di lavorazioni attuali ed agli effetti residui di precedenti lavorazioni. Matematicamente tale fattore C può essere valutato come segue:

$$C = \frac{\sum_1^6 C_i \cdot R_i}{100 \cdot R}$$

Con:

- C_i : stadio di sviluppo della coltura delle varie fasi;
- R : fattore di erosività della pioggia;
- R_i : pioggia media relativa alle varie fasi.

L'intero ciclo delle varie tipologie di colture viene suddiviso in sei fasi, per facilitare le operazioni; tali fasi possono essere così riassunte:

1. maggese lavorato: dall'aratura alla preparazione del letto di semina;
2. dal letto di semina fino al 10% del suo sviluppo;
3. sviluppo tra il 10-50%;
4. sviluppo tra 50-75%;
5. sviluppo tra 75% e la maturazione;
6. residui dalla raccolta alla nuova preparazione.

Ad ogni fase corrisponde il relativo fattore C_i , ottenibile da tabelle che si trovano in letteratura in base alla tipologia di coltivazione. Bisogna considerare il fatto che durante le fasi del ciclo completo della coltura l'erodibilità della pioggia varia; tali valori C vengono quindi poi pesati rispetto al fattore di erosività della pioggia R .

Il bacino del Tartano risulta essere coperto da:

- bosco per il 60%;
- prato per il 25%;
- detriti per il 5%;
- aree idriche per il 9%;
- area antropizzata per l'1%.

Si ricorda che le percentuali sono riferite all'area totale del bacino stesso.

Vari autori hanno creato tabelle comprendenti varie tipologie di colture, con il relativo valore del fattore C [6].

Il problema riscontrato è che una determinata letteratura non sempre comprende tutte le varie tipologie di copertura riscontrate sul bacino; si è deciso di utilizzare la sottostante letteratura, nella quale però non compare un valore per le aree ricoperte da detriti.

L'approssimazione è stata comunque accettata, in quanto tali aree detritiche ricoprono solo il 9% dell'intera area, quindi una modesta parte.

Classi di uso del suolo	Valori di C
Colture ortiche a ciclo primaverile-estivo	0,240
Aree urbane	0,030
Bacini d'acqua	0,000
Seminativi in aree prive non irrigue	0,240
Colture erbacee da pieno campo a ciclo primaverile-estivo	0,240
Vigneti irrigui	0,003
Vigneti non irrigui	0,003
Frutteti e frutti minori irrigui	0,003
Frutteti e frutti minori non irrigui	0,003
Oliveti irrigui	0,003
Oliveti non irrigui	0,003
Prati stabili non irrigui	0,050
Zone boschive	0,007
Sistemi colturali e particellari complessi	0,240
Colture temporali associate e colture permanenti	0,240
Aree agricole con presenza di spazi naturali	0,040
Prati stabili irrigui	0,050
Colture in serra e sotto plastica	0,240
Zone umide	0,003

Tabella 7: Coefficienti di copertura del suolo

Dall'elaborazione si è ottenuto un valore del fattore C pari a:

$$\mathbf{C = 0,018}$$

Fattore P

Il fattore di conservazione del suolo considera le eventuali opere per la prevenzione dell'erosione del suolo; nel caso del Tartano non ne sono presenti, e quindi tale fattore assume il valore unitario.

$$\mathbf{P = 1}$$

Fattore L

Il fattore di lunghezza del suolo L viene calcolato tramite l'equazione:

$$L = \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^m$$

Dove:

- λ : lunghezza libera della pendice [m];
- m : coefficiente empirico in base alle pendenze dei versanti, assume valori compresi tra 0,1 e 0,5; ma, come nel caso in esame, se le pendenze superano il 5%, si considera un valore unitario.

Per il calcolo di λ , ci si rifà alla formulazione proposta da L. Williams e Berndt per piccoli bacini, con la quale si sostituisce l'area effettiva del bacino A [m²] e di lunghezza complessiva del reticolo idrogeologico L_{CH} [m], con un bacino equivalente, quindi di uguale superficie, ma di forma rettangolare. Tale bacino equivalente di forma rettangolare ha il lato maggiore di lunghezza pari a L_{CH} , ed è costituito da una sola asta fluviale lunga sempre L_{CH} , localizzata lungo la mediana, che permette di dividere l'intero bacino in due parti uguali. La lunghezza di libera inflessione λ risulta pertanto esprimibile come:

$$\lambda = \frac{A}{2 L_{CH}}$$

Quindi, considerando:

- area: $A = 47,465 \text{ km}^2$;
- lunghezza asta principale $L_{CH} = 121,8 \text{ km}$;

si ottiene un valore di λ :

$$\lambda = 194,8 \text{ m}$$

Con la formula inizialmente vista si calcola il fattore di lunghezza del suolo L , che risulta essere pari a:

$$L = 2,97$$

Fattore S

Per il fattore S , di pendenza del versante, sono state proposte in letteratura varie formulazioni per il calcolo; per il bacino in esame si prende in considerazione quella

calibrata per versanti con pendenze maggiori del 29%. Tale formulazione è espressa come:

$$S = 65,41 \operatorname{sen}^2 \theta + 4,56 \operatorname{sen} \theta + 0,065$$

Con

- θ : pendenza del bacino.

Riferito al bacino del Tartano si ha:

$$\theta = 32,1^\circ$$

$$\tan \theta = 0,815$$

con tali valori si ottiene un fattore di pendenza del versante pari a:

$$\mathbf{S = 20,96}$$

2.3.2 Applicazione e risultati del modello

Si è in precedenza già vista l'equazione matematica su cui si basa il modello di USLE, che si ricorda di seguito:

$$E_{USLE} = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

Stabiliti tutti i parametri da utilizzare come dati input, la sua risoluzione porta ad ottenere un valore di perdita di sedimenti media annua pari a:

$$\mathbf{E_{USLE} = 139783 \text{ m}^3/\text{anno}}$$

2.3.3 Confronto ed analisi dei risultati

Anche per il modello di USLE, si è eseguito un confronto con i risultati ottenuti dal Mandelli; come riportato in tabella 8, si è ottenuto un valore di discarica media E molto differente, circa 6 volte maggiore.

	Mandelli	Bonacina
R	1241,7	1241,7
K	0,044	0,044
L	3,10	2,967
S	20,94	20,959
C	0,003	0,018
P	1	1
E [mc/anno]	24.708	139.783
ΔE [mc/anno]		115.075,5

Tabella 8: Confronto dei risultati ottenuti con USLE

Come si può notare sempre dalla tabella 8, vi è una minima differenza nei valori dei fattori L ed S; la prima dovuta alla diversa considerazione dell'asta fluviale principale, mentre la seconda deriva solo da approssimazione dei calcoli. Risulta evidente come sia rilevante la differenza del fattore di copertura ed uso del suolo C: si passa da un valore pari a 0,003 del Mandelli, ad un valore attuale dello 0,018. La spiegazione è dovuta al fatto che il Mandelli ha utilizzato una diversa letteratura; inoltre ha considerato solo la parte di copertura dominante di tipo forestale con uno sviluppo tra il 45% e il 75%. Potrebbe quindi risultare una migliore metodologia quella utilizzata nel presente lavoro, ossia stabilire precisamente le diverse coperture del suolo, calcolarne l'area, attribuire ad ognuna il relativo coefficiente, ed infine pesare tali valori rispetto all'area dell'intero bacino per arrivare ad ottenere un unico valore di C.

2.4 Modello di *RUSLE (Revised USLE)*

Dopo gli anni '50, con l'avanzare della ricerca, il modello USLE è stato rivisitato, apportando delle modifiche alla sua formulazione ed ottenendo così il modello *RUSLE (Revised USLE)*. La principale differenza, e quindi innovazione, consiste nell'aver incorporato il fattore di lunghezza (L) e di pendenza del versante (S) in un unico fattore (LS); questo è possibile però solo se il valore della tangente della pendenza supera lo 0,09. La nuova formulazione assume la forma:

$$E_{RUSLE} = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

in cui il nuovo fattore ha forma:

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22,13} \right)^{m'} (16,8 \sin \theta - 0,05)$$

Dove:

- E: perdita di suolo media annua [t/(ha anno)];
- R: fattore di erosività di pioggia e deflusso [MJ mm/(ha h anno)];
- C: fattore copertura vegetale e uso del suolo;
- P: fattore tecniche di sistemazione;
- λ : lunghezza libera della pendice;
- θ : pendenza del bacino;
- m' : coefficiente empirico, calcolato come:

$$m' = \frac{f}{f + 1}$$

con

$$f = \frac{\sin \theta}{0,0869} \frac{1}{[3 (\sin \theta)^{0,8} + 0,56]}$$

2.4.1 Risoluzione del modello e analisi dei risultati

I fattori R, K, C e P, da inserire nella formulazione di RUSLE vista nel paragrafo 2.4, rimangono gli stessi di quelli valutati per il modello di USLE, mentre il nuovo fattore LS, risolvendo la formula per il suo calcolo vista sempre all'interno del paragrafo 2.4, risulta:

$$\mathbf{LS = 42,00}$$

Calcolati tutti i dati input per RUSLE, si ottiene un valore di produzione media annua di sedimenti pari a:

$$\mathbf{E_{RUSLE} = 94.419,56 \text{ m}^3/\text{anno}}$$

Come per i modelli precedenti di Gavrilovic e di USLE, si è svolto un confronto con i risultati ottenuti precedentemente dal Mandelli; anche in questo caso, i valori

volumetrici di produzione di sedimenti E_{RUSLE} risultano essere differenti, come mostrato nella tabella di seguito riportata (tabella 9).

	Mandelli	Bonacina
R	1.241,7	1.241,7
K	0,0435	0,0435
LS	33,06	42,004
C	0,003	0,018
P	1	1
E [mc/anno]	12.587	94.419,6
ΔE [mc/anno]		81.832,56

Tabella 9: Confronto dei risultati ottenuti con *RUSLE*

Si ha una sostanziale differenza del risultato finale, quasi sette volte maggiore rispetto al valore ottenuto dal Mandelli. Tale risultato è dovuto ad un differente valore del parametro di copertura ed uso del suolo C, come già visto e spiegato nel modello di USLE, ed inoltre ad un differente valore del nuovo fattore LS, basato sulla pendenza del bacino e sulla lunghezza libera della pendice.

2.5 Confronto tra i modelli utilizzati: (Gavrilovic, USLE, *RUSLE*)

Per il calcolo della volumetria del possibile materiale movimentabile all'interno di un bacino, in letteratura esistono diversi modelli, che differiscono per i parametri utilizzati e per l'accuratezza dei risultati ottenibili.

Per la stima di tale valore, riferito al bacino in esame del Tartano, si è deciso di utilizzare i modelli di Gavrolovic, di USLE e di *RUSLE*, i quali forniscono come risultato il valore numerico medio della volumetria instabile potenzialmente movimentabile.

Tutti e tre i modelli usati si basano su equazioni matematiche, che differiscono per i parametri input usati; tra questi parametri, alcuni sono ricavabili da misurazioni in sito, quindi da un certo punto di vista oggettivi; altri invece sono in funzione di coefficienti adimensionali ricavabili da tabelle presenti in letteratura e scelti a discrezione dell'operatore, risultano quindi essere soggettivi.

Con Gavrilovic si sono ottenuti tre risultati, in quanto considerati tre valori differenti del coefficiente di erosione Π , a causa della varietà di dimensione dei sedimenti del bacino:

$$G(\Pi_1) = 42.527,07\text{m}^3$$

$$G(\Pi_2) = 55.366,61\text{m}^3$$

$$G(\Pi_3) = 69.288,18\text{m}^3$$

USLE e RUSLE invece, se pur basati su equazioni molto simili, che differiscono per un solo parametro, forniscono valori estremamente differenti:

$$E_{\text{USLE}} = 139.783\text{m}^3/\text{anno}$$

$$E_{\text{RUSLE}} = 94.419,56\text{m}^3/\text{anno}$$

Per ogni modello, il risultato ottenuto, come visto, è stato confrontato con quelli del Mandelli; tali risultati risultano essere alquanto differenti, principalmente per quei parametri che sono a discrezione dell'operatore.

Inoltre quelli ottenuti con Gavrilovic, si sono poi confrontati con quelli misurati direttamente sul bacino, in prossimità della diga di Campo (tabella 4) ed anche in questo caso sono risultati essere differenti, anche se per differenze dello stesso ordine di grandezza. Sempre dallo stesso confronto si nota come il risultato ottenuto nel presente lavoro, con un coefficiente di erosione Π pari a 1,3 ($G = 42.527,07\text{m}^3$), si avvicina maggiormente alla media aritmetica di tali valori pari a $38.037,5\text{m}^3$; ci si è avvicinati al valore reale, misurato direttamente in sito.

Come ultima considerazione, osservando anche le unità di misura dei risultati dei tre modelli utilizzati, si nota come USLE e RUSLE forniscano valori di produzione dei sedimenti rispetto all'anno, mentre Gavrilovic si riferisca all'intera "storia" del bacino.

I valori di produzione di sedimenti dai versanti, derivanti dall'applicazione dei tre modelli di calcolo numerici (Gavrilovic, USLE e RUSLE), sono riassunti di seguito (tabella 10).

Gavrilovic G [m3]		USLE E [m ³ /anno]		RUSLE E [m ³ /anno]	
Mandelli	Bonacina	Mandelli	Bonacina	Mandelli	Bonacina
52.931	42.527,07	24.708	139.783	12.587	94.419,56
	55.366,6				
	69.288,18				

Tabella 10: Risultati riassuntivi dei modelli di calcolo

CAPITOLO 3_ Caso studio: la Valle del Piscino

Come spiegato nell'introduzione, dopo un'analisi a grande scala a seguito della quale si è calcolato il volume del materiale potenzialmente instabile sull'intero bacino, l'attenzione si è focalizzata su una zona più ristretta, passando quindi da una visuale a grande scala ad una a piccola scala.

Come oggetto di tale analisi è stata presa in considerazione una faglia laterale, che con il passare del tempo, allargandosi, ha formato la Valle del Piscino. Tale valle, ricoperta per tutta la sua estensione da materiale movimentabile di diverse dimensioni, è posizionata sopra il piccolo centro abitato di Biorca, a valle della congiunzione del Val Lunga con il Val Corta (figura 18).

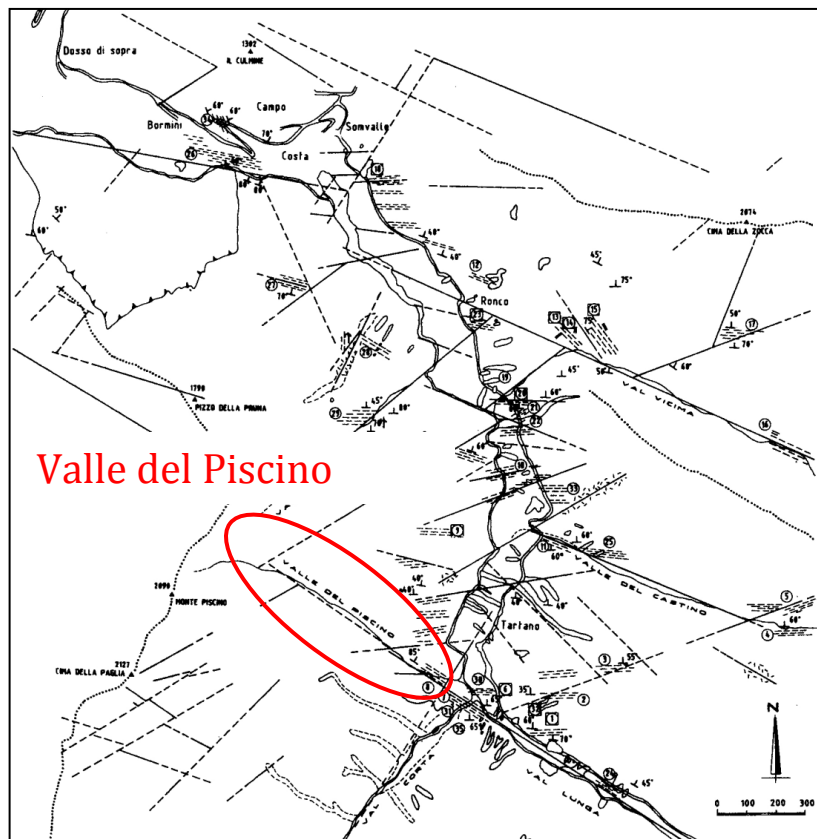


Figura 18: Ubicazione Valle del Piscino

Tale versante è costituito nella parte più alta da pareti rocciose, dalle quali si registra un distacco di materiale, che è individuato dalle differenti colorazioni delle pareti stesse e dalla presenza di materiale ai suoi piedi. Tale materiale, almeno attualmente, non riesce a raggiungere il fondo del versante. La restante parte è ricoperta da materiale granulare detritico di differenti dimensioni, che in seguito ad intense precipitazioni potrebbe essere portato verso valle.

Lateralmente la Valle del Piscino è limitata nella parte più a monte da affioramenti rocciosi ed alberi ad alto fusto (quali abeti), mentre la parte più a valle da pascoli (figura 19).

Già in passato si sono registrati eventi di caduta di materiale dal versante della Valle del Piscino, che provocarono anche l'esondazione del corso d'acqua. Il normale flusso del Tartano è stato ostruito dal materiale giuntovi all'interno, con la conseguente esondazione; in tale punto l'alveo forma un'incisione nella roccia di moderate dimensioni, soprattutto per quanto riguarda la sua larghezza.

In questo capitolo si analizzerà il versante del Piscino dal punto di vista geomorfologico e dei possibili spostamenti del materiale superficiale.



Figura 19: Valle del Piscino

3.1 Descrizione generale della Valle del Piscino

Come precisato nell'introduzione del presente capitolo, quale caso studio per un'analisi a piccola scala si è scelto di considerare la Valle del Piscino, posta sulla sinistra idrografica poco più a valle della congiunzione tra il Val Lunga e il Val Corta, che copre un'area di circa 300m di lunghezza per una larghezza che varia tra i 20m e i 15m. Il Piscino geologicamente è una faglia attiva che costituisce una via preferenziale per il ruscellare dell'acqua e per il distacco di materiale che oggi ne copre la superficie ed è potenzialmente instabile.

La decisione di focalizzarsi su tale valle deriva da una serie di considerazioni:

1. le modeste dimensioni;
2. la posizione nelle vicinanze di un piccolo centro abitato già in passato colpito dalla sua azione;
3. la presenza nella parte più alta di fenomeni attivi di crollo;
4. la facilità di accesso per le operazioni di rilievo;
5. il suo posizionamento in un punto cruciale: il letto del torrente in tale sezione forma un'incisa depressione di moderata larghezza (tipico aspetto di una valle di origine fluviale).

L'intera superficie è ricoperta da materiale detritico di differenti dimensioni disposto in modo omogeneo per tutta la sua estensione: non si notano zone in cui prevalga una certa granulometria, anche se risultano evidenti alcuni enormi massi di alcuni metri di dimensione.

3.1.1 Definizione di faglia

La faglia è una frattura della roccia che mostra evidenze di movimento relativo tra le due masse rocciose da essa divise; il processo di formazione e sviluppo di una faglia è noto con il termine di fagliazione. La formazione di una faglia è caratteristica di quelle rocce di tipo fragile; la fragilità è la proprietà di alcuni materiali di rompersi bruscamente senza che avvengano precedentemente deformazioni e snervamenti. Di solito tale comportamento fragile si ha in condizioni di bassa temperatura e pressione, quindi a basse profondità [7].

La superficie lungo cui si è verificata la frattura, che risulta essere una linea di debolezza, si chiama superficie di faglia o piano di faglia (figura 20). Le rocce in prossimità del piano di faglia risultano essere intensamente fratturate: si parla in questo caso di rocce di faglia quali le cataclasiti o le miloniti.

L'entità dello spostamento tra le due parti separate della faglia può anche essere microscopica, ma nella pratica si interpretano come faglie solo gli spostamenti visibili, che possono arrivare ad un ordine di grandezza di chilometri; la fessura apertasi viene riempita da materiali detritici di differenti dimensioni.

Le rocce di faglia sono, come detto, rocce frantumate da movimenti tettonici; questi movimenti avvengono a causa dell'accumulo di tensioni lungo il piano di faglia finché queste non superano la resistenza a rottura della roccia, con la liberazione di energia sotto forma di onde sismiche. I due blocchi contrapposti si muovono con la formazione tra di essi di detriti spigolosi.



Figura 20: Esempio di faglia

La cataclasite è una roccia che si genera tramite un processo di fratturazione delle rocce situate lungo lineamenti tettonici, i cui frammenti possono essere di dimensioni osservabili a occhio nudo oppure microscopici. Tale processo di fratturazione porta alla rottura della roccia madre in un insieme di grani che sono successivamente cementati dai fluidi circolanti nel sistema di fratture: il risultato è

una roccia di grana fine coerente, che a volte presenta tenacità maggiore della roccia madre da cui deriva (figura 21).

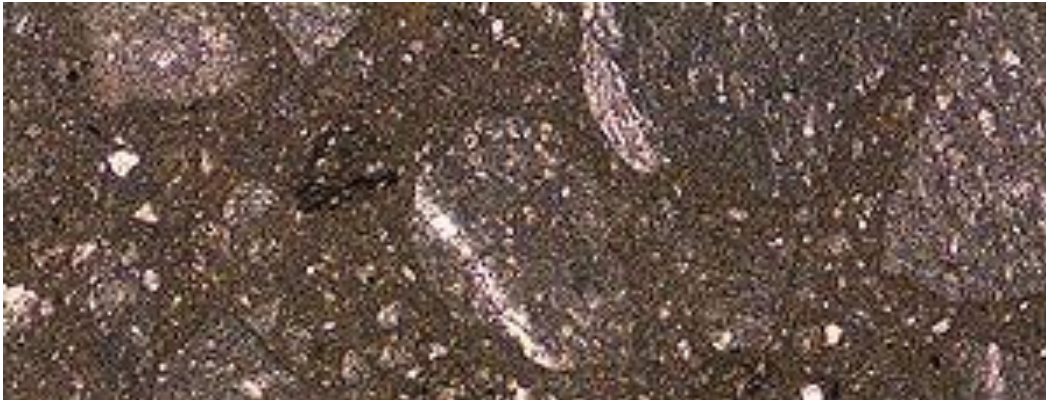


Figura 21: Sezione di cataclasite

La milonite invece, è una roccia metamorfica, che ha quindi subito modificazioni nella composizione mineralogica o nella struttura a seguito di mutamenti di temperatura e pressione; gli atomi dei minerali si dispongono in modo da formare nuovi reticoli cristallini. Gli interstizi che si formano dal compattamento di tali nuovi frammenti subiscono un processo di riempimento e rimineralizzazione che funge da cementante per i vari aggregati. Le nuove rocce hanno una struttura scistosa nella quale si ha un orientamento dei cristallini in piani paralleli, che conferiscono loro una divisibilità in lastre (figura 22). Il calore formatosi a causa dell'attrito lungo il piano di faglia genera rocce di colore nero.



Figura 22: Sezione di milonite

3.2 Fasi di lavoro

Come base di partenza per un'analisi del versante è necessaria una sua ricostruzione, ottenuta con la seguente procedura. L'ordine temporale è stato variato in funzione delle condizioni meteorologiche riscontrate, essendo operazioni da svolgersi direttamente in sito:

1. sopralluogo, per prendere atto della condizione esistente;
2. rilievo con stazione totale e tecnica fotogrammetrica;
3. prima acquisizione immagini;
4. rilievo granulometrico;
5. seconda acquisizione immagini.

3.2.1 Operazione di sopralluogo

Come nella maggior parte dei lavori che si svolgono, la prima cosa da fare, che potrebbe sembrare banale e non necessaria, consiste nell'ispezionare il luogo da analizzare e, di conseguenza, scegliere la metodologia migliore da adottare in base agli scopi ed obiettivi dello studio.

Durante tale uscita di sopralluogo, avvenuta in data 11 luglio 2010, si è presa visione dell'intero bacino, valutando quale delle possibili faglie laterali sarebbe stata oggetto dello studio a piccola scala; dopo un'analisi e varie considerazioni la scelta è ricaduta come già noto sulla Valle del Piscino. Inoltre, vista la complessità del versante da restituire, assimilabile ad un oggetto tridimensionale, si è deciso di utilizzare la tecnica della fotogrammetria.

3.3 Ricostruzione del versante

La ricostruzione del versante utilizzata per determinare possibili spostamenti tra epoche differenti, è stata realizzata mediante l'uso della tecnica fotogrammetrica, con acquisizioni di fotogrammi da più punti di stazione.

La fase di acquisizione, condotta appoggiandosi su di una rete topografica creata con stazione totale, ha permesso di eseguire un rilevamento caratterizzato da buona precisione ed affidabilità.

L'integrazione di un rilievo fotogrammetrico con un rilievo topografico ha consentito di fissare un orientamento, analizzando esclusivamente lo spostamento dei clasti.

3.3.1 Cenni sulla fotogrammetria

La fotogrammetria si divide fundamentalmente in "aerea" e "terrestre" (più correttamente *close range*, ossia da vicino).

Negli ultimi tempi si è implementato l'utilizzo di immagini rilevate da satellite, ma le precisioni migliori non sono disponibili per uso civile (si parla di precisioni dell'ordine di 0,6m per uso civile e di 0,2m per uso militare); è facile intuire come tale tecnica fotogrammetrica sia versatile, a meno di un fattore di scala.

Attualmente presso il laboratorio PROMETEO del Politecnico di Milano (sede di Lecco) è in fase di sviluppo un prototipo per il posizionamento della fotocamera su elicottero radiocomandato, per il monitoraggio e il rilievo delle guglie del Duomo di Milano.

Per il seguente lavoro si sono utilizzate le tecniche proprie della fotogrammetria terrestre, sia per la migliore accuratezza raggiungibile nei risultati, sia per la leggerezza della strumentazione da adottare in ambiente montano.

3.3.2 Basi teoriche

La fotogrammetria è una tecnica semplice quanto efficace: mediante l'acquisizione di immagini digitali è possibile, a posteriori, rielaborare il blocco fotografico per estrapolare informazioni metriche senza alcun contatto diretto con l'oggetto da rilevare (tecnica non invasiva). In dettaglio è possibile determinare la posizione nello spazio di un punto da una coppia di immagini; occorrono minimo due fotogrammi poiché l'acquisizione comporta la riduzione dello spazio 3D a una immagine 2D, perdendo dunque un'informazione [8].

Questo è comparabile alla naturale visione umana, in grado di percepire la profondità elaborando simultaneamente una coppia di immagini.

Una volta ricostruito il modello digitale 3D, è successivamente possibile conoscere orientamento, posizione e forma di ogni punto di interesse nel momento in cui le foto sono state scattate. In merito alla precisione, le comuni camere digitali sono affette da distorsioni: queste sono state studiate e modellate da ricercatori ed esperti del settore al fine di poterle eliminare lavorando su immagini digitali corrette.

Un rilievo fotogrammetrico vede dunque i seguenti passi:

1. calibrazione della fotocamera;
 - acquisizione immagini;
 - stima dei parametri di calibrazione;
2. costruzione del modello digitale;
 - acquisizione immagini;
 - ricostruzione della posizione delle camere al momento della presa (stima dei parametri di orientamento esterno);
 - ricerca dei punti omologhi sulle immagini del blocco fotografico;
 - ricostruzione 3D del modello digitale.

La ricostruzione del modello digitale si effettua, una volta noti i parametri di calibrazione ed acquisite le immagini per l'oggetto del rilievo, ricercando i punti omologhi sulle immagini del blocco acquisito. Per il presente lavoro la fotogrammetria ha consentito di ricostruire la posizione dei punti di interesse, rappresentanti i clasti sul versante; il lavoro è stato effettuato in differenti epoche al fine di stimare eventuali spostamenti dei clasti.

3.3.3 Rete topografica

La rete topografica è stata costruita al fine di creare una rete di inquadramento per il rilievo fotogrammetrico.

I vertici della poligonale sono stati scelti in modo che da ognuno di essi fosse possibile una visione d'insieme del versante, con il vincolo della intervisibilità, così da permettere la costruzione della rete.

La costruzione della poligonale è stata svolta in data 15 luglio 2010 durante una giornata di buone condizioni meteorologiche. La rete risulta essere composta da 7 capisaldi nominati: 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700.

Da ogni caposaldo, dopo la messa in stazione dello strumento, si sono collimate la stazione precedente e quella successiva, per poter orientare la poligonale; i punti di stazione vengono materializzati sul terreno mediante l'utilizzo di chiodi, per una più facile individuazione del punto stesso nelle campagne successive, nonché per una veloce operazione di centramento dello strumento.

Dalle stazioni 200, 300, 500, 600, 700, si sono collimati 6 punti di riferimento sul versante (1, 2, 3, 4, 5, 6), quali un muretto o affioramenti rocciosi, considerati come fissi, ben visibili e di facile individuazione da tutte le stazioni. Tali punti devono essere al di fuori della parte centrale del versante, in modo che non siano soggetti a spostamenti relativi. La rete topografica materializzata e compensata, relativamente alla prima epoca, è mostrata nella sottostante immagine (figura 23).

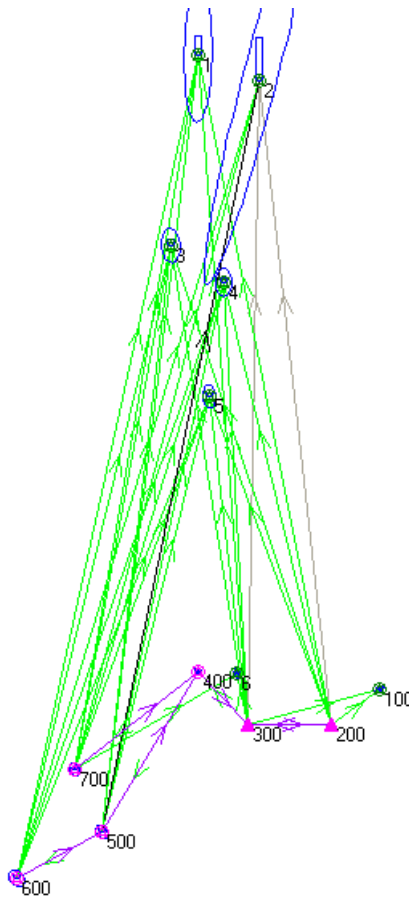


Figura 23: Rete topografica

3.3.4 Acquisizione del blocco fotogrammetrico

Sono state svolte in totale due campagne operative per l'acquisizione dei fotogrammi nei giorni 15 luglio 2010 e 3 agosto 2010.

Durante l'uscita del 15 luglio 2010, basandosi sui punti d'appoggio della poligonale costruita con stazione totale e da alcuni punti detti "volanti" (collocati a metà distanza tra due stazioni consecutive), è stato acquisito il blocco fotogrammetrico relativo alla prima epoca.

Per ogni stazione si è garantito un minimo di due o più immagini, con diversa prospettiva, al fine di scegliere nella fase di elaborazione quelle migliori.

Di importanza fondamentale sono le condizioni atmosferiche; quella ottimale è rappresentata da:

- cielo sereno;
- assenza di vento;
- illuminazione ideale.

Per quest'ultimo motivo le operazioni di acquisizione sul campo si sono svolte durante le prime ore del mattino, al fine di avere un'illuminazione diretta sul versante.

Per ogni punto di stazione si è registrato il numero del fotogramma e l'altezza strumentale.

La camera di presa è montata sul supporto ("trespolo") (figura 24).

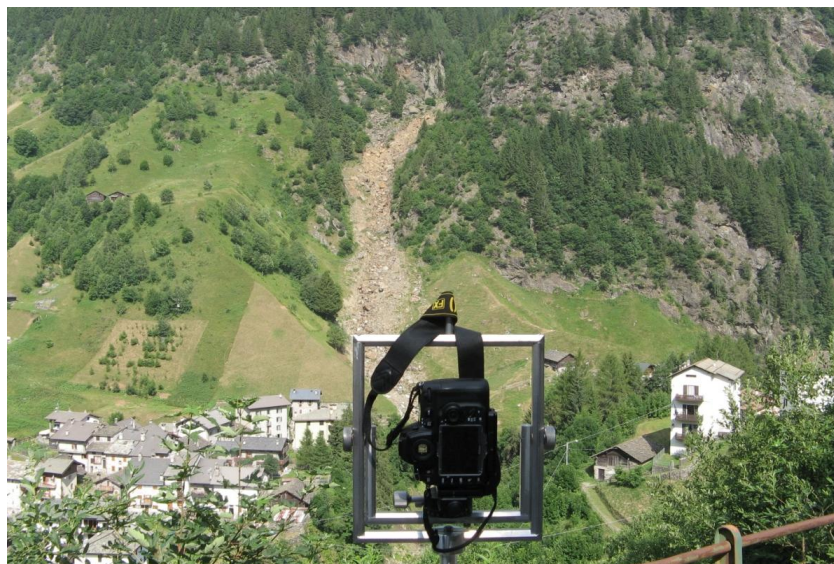


Figura 24: Camera per la presa dei fotogrammi

La figura sottostante mostra la posizione dei vari centri di presa dei fotogrammi rispetto al versante.

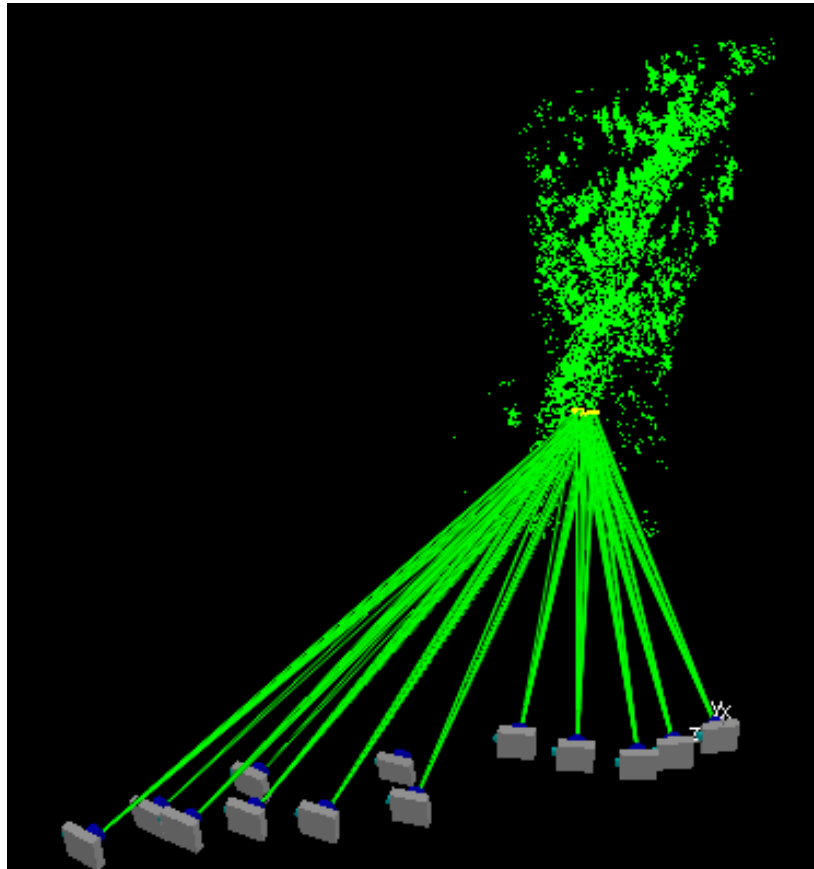


Figura 25: Visione dei centri di presa dei fotogrammi rispetto al versante

A seguito della costruzione del modello tridimensionale si è ottenuta una precisione media di 12/13cm sulla profondità e di 3/4cm lungo la direzione verticale.

In merito alle precisioni ottenute, quella relativa alla profondità è attendibile, in quanto in fotogrammetria le imprecisioni maggiori si hanno lungo la direzione uscente dall'asse della camera; inoltre la posizione dei centri di presa non era ottimale.

3.4 Studio degli spostamenti

Uno degli scopi del presente lavoro è l'analisi dei movimenti dei clasti sul versante del Piscino durante il periodo di studio, in particolare tra il 15 luglio 2010 e il 3 agosto 2010.

Dal confronto dei modelli ottenuti per differenti epoche si individuano gli spostamenti del materiale superficiale, tramite l'utilizzo di un algoritmo creato in ambiente Matlab.

3.4.1 Matlab

Matlab (acronimo di *Matrix Laboratory*) è uno tra i tanti programmi commerciali che forniscono sofisticati strumenti di calcolo che permettono di eseguire operazioni matematiche basilari: manipolare matrici, visualizzare funzioni, creare interfacce utente e interfacce con altri programmi.

Il programma eccelle nel calcolo numerico, specie nell'uso delle matrici e nella grafica e viene oggi utilizzato in molti campi.

Attualmente il programma è in grado di gestire e manipolare le immagini digitali; sfruttando tali potenzialità si è implementato l'algoritmo per lo studio degli spostamenti dei corpi di frana.

3.4.2 Struttura dell'algoritmo

L'algoritmo utilizzato consiste in una serie di passaggi che consentono l'elaborazione delle immagini nella fase post-acquisizione.

In dettaglio si è studiata la posizione, in termini di coordinate, dei punti di interesse per essere confrontata in differenti epoche: è così possibile studiare i vettori spostamento per i punti anzidetti.

Questo consente di studiare il movimento di un corpo frana nonché un'eventuale e possibile installazione di strumentazione fissa per un costante monitoraggio.

Dalla sovrapposizione di due immagini che appartengono ad epoche differenti, acquisite dal medesimo punto di stazione, è possibile visualizzare cromaticamente tramite mappatura le aree che hanno subito movimento.

Le basi per creare l'algoritmo da usarsi in questo specifico lavoro sono elencate di seguito:

- di ogni immagine inserita si specifica il nome ed il tipo di formato del file:

```
%foto1 = imread(name_1,file_type)
%foto1 = imread('SNC00073.jpg','jpg')

%foto2 = imread(name_2,file_type)
%foto2 = imread('SNC00074.jpg','jpg')
```

- si trasformano entrambe le immagini nella scala di grigi:

```
%foto1_g = rgb2gray(foto1)

%foto2_g = rgb2gray(foto2)
```

- le immagini vengono allineate attraverso punti di controllo, ossia punti appartenenti ad entrambe le immagini al di fuori della zona di possibile movimento e considerati fissi. Nel caso in esame del versante del Piscino, si sono scelti come punti di controllo spigoli di tetti, punti su pali, su affioramenti rocciosi, o su tutto ciò che è parso non soggetto ad uno spostamento. Tali punti sono materializzati sulle foto come dei pixel. Questa operazione è risultata la fase più importante nell'utilizzo del programma, in quanto la precisione dei risultati è strettamente legata alla cura con cui si identificano i punti fissi sulle immagini.

La scelta dei punti può essere eseguita in due modi differenti:

1. identificando il punto di controllo su un'immagine e successivamente sulla corrispondente in altra epoca (operazione non automatica);
2. identificando il punto di controllo su un'immagine e automaticamente il programma lo posiziona sulla seconda foto, (operazione semi automatica).

Più aumenta il numero di punti scelti come controllo più aumenta la precisione poi dei risultati.

```
% scelta dei punti di controllo ... end
```

- si sceglie la trasformazione da far eseguire al programma perché i punti di controllo coincidano nelle immagini; in questo caso si utilizza una funzione di forma bicubica:

```
% scelgo trasformazione
info = imfinfo([name_1 '.' file_type]);
foto2_reg = imtransform(foto2, TFORM, 'bicubic', ...
```

- alle immagini sovrapposte, ottenute dal passaggio precedente, il programma applica alle zone non coincidenti un colore (rosso), che successivamente vengono mostrate a video. Le zone individuate sono quelle che nell'arco di tempo tra le due acquisizioni sono state interessate da spostamenti del materiale granulare di copertura.

L'immagine ottenuta può inoltre essere salvata in archivio per un confronto in epoche future.

```
% avere rosso nelle zone di movimento
Foto_rgb(:, :, 1) = foto2_g
subplot(3, 2, 5)
im3 = imshow(Foto_rgb)

% salvo i punti per una successiva elaborazione
figureim4 = imshow(Foto_rgb)
```

In maniera sintetica i passaggi dell'algoritmo si riassumono come segue:

- attribuzione di un nome alle immagini;
- conversione di ogni immagine in monocromia (una di colore verde l'altra di colore giallo);
- scelta dei punti di controllo;
- sovrapposizione delle immagini;
- output dei risultati.

3.4.3 Risultati ottenuti e discussione

Durante i due rilievi di campagna del 15 luglio 2010 e del 3 agosto 2010 le immagini sono state scattate da tutti i capisaldi della poligonale topografica e da punti “volanti”.

Il tempo trascorso tra le due campagne è di 3 settimane, arco di tempo ridotto affinché si possano rilevare importanti differenze, ma influenzato da consistenti piogge che hanno caratterizzato l’arco di tempo stesso.

Si è scelto di utilizzare le immagini ottenute dalla stazione 700 della poligonale (figura 23), in quanto posizione ottimale per la visione del versante.

Le immagini riferite alla prima ed alla seconda epoca (in ordine partendo da sinistra del 15 luglio 2010 e del 3 agosto 2010) sono riportate in figura 26.



Figura 26: Immagini provenienti dalle acquisizioni del 15 Luglio e del 3 Agosto

Come spiegato nel paragrafo 3.4.2 le immagini in scala di grigi e successivamente colorate (una verde e l’altra gialla) sono state sovrapposte.

L’output a schermo della risultante sovrapposizione ha permesso di identificare le zone che hanno subito nell’arco di tempo intercorso tra le due campagne dei cambiamenti (figura 27).

I risultati ottenuti sono di tipo qualitativo: viene infatti determinata la presenza di spostamenti, ma allo stato attuale non è prevista una valutazione analitica dell'entità di tali spostamenti.

Il risultato ottenuto a valle del processo, mostrato nella figura 27, è ingrandito nella figura 28 al fine di visualizzare le aree interessate da spostamento di materiale superficiale.

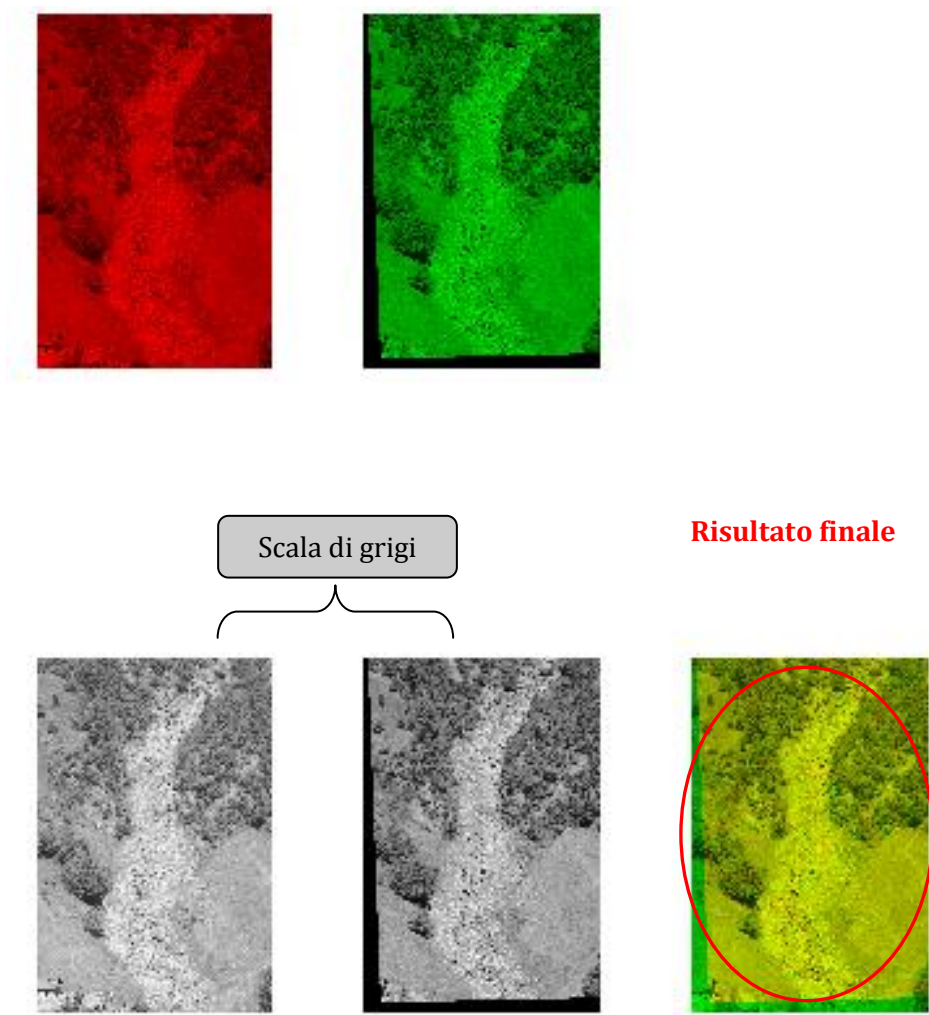


Figura 27: Fasi di elaborazione delle immagini e risultato finale



Figura 28: Possibili spostamenti avvenuti

Le zone di colore rosso sono quelle che hanno subito delle modifiche tra le due epoche di acquisizione.

Una considerazione importante riguarda l'illuminazione non perfettamente coincidente nei differenti momenti di acquisizione: questo si riflette nella presenza di ombre che vengono interpretate come zone interessate da spostamento (falsi positivi).

Questo sarebbe risolvibile se l'acquisizione nelle differenti epoche fosse fatta nelle medesime condizioni ambientali, possibilmente quelle ottimali precedentemente indicate.

Questi falsi positivi si notano chiaramente nell'intorno di alberi e di massi la cui dimensione risulta preponderante rispetto alle dimensioni dei clasti.

Scartando i falsi positivi dall'immagine si nota chiaramente come la zona a monte non sembri aver subito alcuno spostamento (tutto coincide perfettamente nelle epoche confrontate), mentre nella parte medio-bassa sono segnalate, in colore rosso, due zone per le quali si è avuto spostamento di materiale (confermato dallo studio separato di tali immagini).

L'accuratezza del risultato è legata ai punti di controllo: più essi saranno precisi migliori saranno le precisioni durante la fase di analisi.

Si è inoltre cercato di posizionare i punti di controllo in modo uniforme sull'intero versante.

Una considerazione negativa riguarda il fatto che l'algoritmo lavora su immagini bidimensionali, mentre sarebbe possibile creare un modello tridimensionale, geometricamente corretto, in grado di fornire sia mappe cromatiche sia analisi numeriche per gli spostamenti individuati dal confronto tra epoche differenti.

CAPITOLO 4_ Analisi granulometrica

In questo capitolo si affronta la parte del lavoro dedicata all'analisi granulometrica del versante, che può essere vista come una caratterizzazione in termini statistici di una miscela di particelle di sedimento.

Si discuteranno le varie fasi di tale analisi:

- la raccolta dati;
- la scelta della migliore metodologia di campionamento;
- la costruzione dei diagrammi di frequenza;
- la costruzione delle curve granulometriche;
- i risultati ottenuti e la loro discussione.

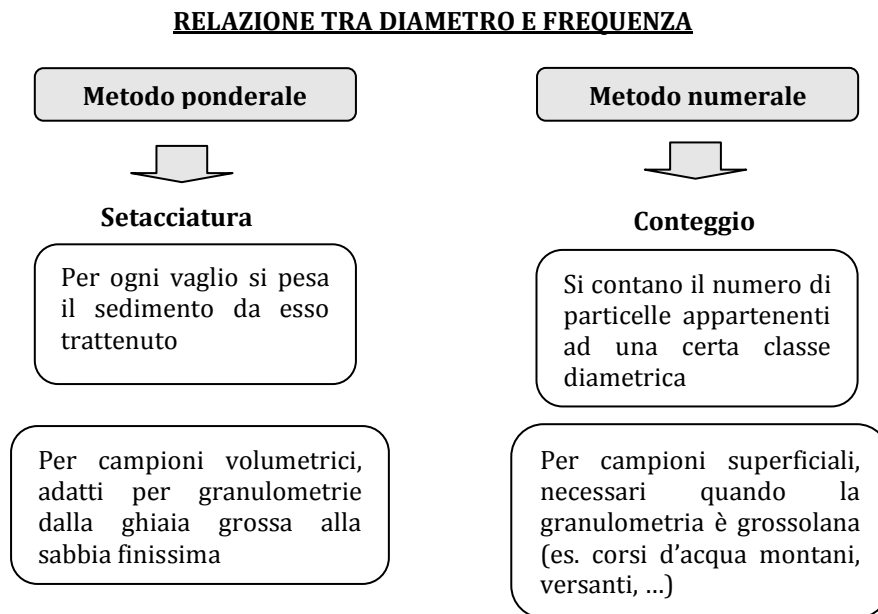
Si tratterà di andare ad individuare le dimensioni del materiale granulare di copertura superficiale, della sua volumetria, e di trovare una relazione tra la modalità di distribuzione del materiale lungo il versante e la pendenza dello stesso, individuando le zone di sedimentazione rilevanti e quali tra esse potrebbero dar inizio ad eventi franosi.

4.1 Tecnologie di campionamento

Con il campionamento delle superfici si stimano le caratteristiche dei grani soggetti ad un possibile flusso all'interno di un canale [9]. In letteratura si trovano svariati metodi per il campionamento di materiale granulare, che dipendono dal tipo di campione: volumetrico oppure superficiale; per il primo si utilizzerà un metodo ponderale, mentre per il secondo un metodo numerale.

I risultati ottenuti da un'analisi ponderale o numerale possono essere poi rappresentati sia in termini di frequenza in peso, sia di frequenza in base al numero.

I concetti base delle due metodologie sono rappresentati nello schema sottostante:



Facendo un piccolo accenno ai possibili flussi di materiale di matrice ghiaiosa, a seguito di considerazioni in campo (Wolman & Kellerhals e Bray) e di analisi in laboratorio (Displas & Parker), è stato mostrato come questi abbiano uno spessore del materiale superficiale maggiore rispetto a quello del materiale costituente il substrato. Il rapporto tra il diametro medio del materiale superficiale e quello del materiale del substrato, per la comune ghiaia, risulta essere compreso tra 1,5 e 3,0. Comunemente in natura risulta essere nell'intervallo tra 2,0 e 2,5.

Esistono diverse procedure per campionare ed analizzare il materiale ricoprente il letto di un fiume o di un versante o una qualsiasi altra superficie, in funzione delle dimensioni del materiale costituente il campione.

Tradizionalmente l'analisi con setaccio è considerata come la tipologia per il campionamento standard. Tale metodologia consiste nella rimozione di un volume predeterminato di materiale, seguita da un'operazione di setacciatura e da un'interpretazione dei risultati ottenuti in termini di distribuzione di frequenza in peso. Questa procedura è adatta per analizzare materiale del substrato che possiede dimensioni minori. Per il campionamento del materiale superficiale si usano altre tecnologie come: quella areale, quella della griglia e quella lineare; va ricordato come non esistano ben definiti criteri di equivalenza tra le diverse metodologie, e questo costituisce un'importante limitazione [10].

Campionamento areale

Il campionamento areale è costituito dai grani posizionati sulla superficie che sono esposti ad un possibile flusso all'interno di una determinata zona. Il campione viene acquisito su una fotografia, che visualizza appunto l'area oggetto di studio; le pietre vengono rimosse da tale zona e marcate manualmente usando un adesivo o uno spray che le identifica nell'area prima e dopo la loro rimozione. Il volume del campione dipende dalla dimensione normale al letto della particella. Il principale svantaggio del campionamento areale è che richiede normalmente che la zona da campionare sia asciutta.

Operativamente una volta individuata la zona da analizzare e scattata la foto, la si importa in un programma da disegno capace di misurare le aree, e si misura l'area corrispettiva di ogni pietra presente sulla foto (figura 29).

Nota l'area di ogni singolo elemento si riescono a calcolare i rispettivi diametri.

Come risultati, oltre al diametro dei vari elementi componenti il campione, si può avere anche la loro frequenza in termini di numero di campioni ed in termini di percentuale di area superata o percentuale in volume.



Figura 29: Campionamento areale

Campionamento con griglia

Il campionamento con griglia è la tecnica più utilizzata soprattutto quando si ha a che fare con particelle aventi un diametro maggiore di 8mm. Si procede posizionando una griglia di opportune dimensioni, di solito quadrata, sulla superficie da analizzare, prendendo in considerazione i grani che si trovano al di sotto dei nodi della griglia; il volume in questo caso dipende da tutte e tre le dimensioni dei vari grani che costituiscono il campione (figura 30).

La griglia è di facile e veloce preparazione, è costituita da un bordo di forma quadrata in legno o altro materiale rigido, con all'interno dei cordini perpendicolari tra loro, in modo appunto da formare delle maglie quadrate.

Operativamente in sito è una tecnica speditiva, il suo limite è che può essere usata per indagare zone di limitata estensione, caratterizzate da materiale con diametri non eccessivamente elevati.

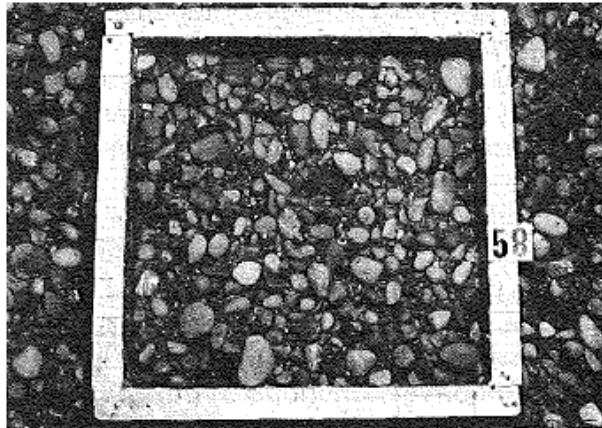


Figura 30: Campionamento con griglia

Campionamento lineare

Il campionamento lineare prevede la raccolta di tutti i grani situati lungo una linea predeterminata (figura 31). In questo caso il volume del campione dipende dagli assi maggiore e minore delle particelle normali alla linea.

Come il campionamento con griglia, anche questa tipologia non è adatta per particelle di piccole dimensioni.



Figura 31: Campionamento lineare

I principali problemi che si possono riscontrare durante un campionamento sono:

- la difficoltà operativa nel raccogliere i campioni;
- la scelta del luogo dove effettuare il campionamento;
- ottenere un campione rappresentativo dell'intera zona da analizzare.

La precisione statistica del campione raccolto è in funzione del diametro, del numero di particelle raccolte, del peso del campione e del numero di campionamenti necessari per la rappresentazione il più fedele possibile della zona oggetto dello studio.

In alcuni casi la raccolta del campione, e quindi dei suoi dati, può risultare particolarmente complicata; il materiale di minor dimensione situato tra particelle di grosse dimensioni è difficile da raggiungere, e lo stesso vale per i massi di grandi dimensioni, dei quali risulta difficoltosa la misurazione.

4.1.1 Scelta e considerazioni sulla tecnologia utilizzata

Analizzate le varie metodologie per il campionamento granulometrico, si è passati alla scelta di quale tra quelle proposte risultasse essere la migliore, sia in termini di risultati, che di logica, che di tempistica. Tale scelta è ricaduta sul campionamento lineare in quanto, viste le non piccole dimensioni del versante, era necessaria una tecnica capace di coprire il versante sia per la lunghezza che per la larghezza. Inoltre l'applicazione di tale metodologia in sito non pareva presentare grandi limitazioni, sia in termini di accessibilità, in quanto si poteva risalire il versante per buona parte, sia per il fatto che il materiale necessario per condurre il campionamento era di facile reperibilità.

Posizionata una linea guida, lungo la quale raccogliere i dati relativi ai vari grani, si è scelto il "passo", ossia la distanza entro la quale considerare le caratteristiche geometriche del grano incontrato. Tale scelta deve essere ponderata in base alle caratteristiche dell'oggetto da analizzare, nonché della precisione che si vuole raggiungere.

La scelta di un "passo piccolo", comporta che lungo la predeterminata sezione i grani presi in considerazione siano ravvicinati, con un aumento della grandezza del campione, ma una migliore ricostruzione granulometrica del versante. Inoltre il

considerare le dimensioni del grano incontrato, in base al considerato passo, può causare una stima per difetto della granulometria, identificata dal diametro medio di riferimento (D_{50}). Per chiarire il concetto di quest'ultima considerazione, si può portare come esempio il fatto che se incontriamo un sedimento con valori degli assi piccoli, questo porterà ad una sottostima del diametro rappresentativo per quella sezione, nonché del volume potenzialmente movimentabile sul versante.

4.2 Granulometria del versante

La granulometria del materiale ricoprente la superficie della Valle del Piscino, costituisce un dato di fondamentale importanza nel processo di ricostruzione di un possibile evento franoso, nonché di un conseguente fenomeno di trasporto solido in alveo a seguito di processi di strisciamento, saltelli o ribaltamento, dovuti proprio alla forza della corrente del corso d'acqua (figura 32).

I passi principali dell'analisi granulometrica sono riassumibili come:

- campionamento del versante;
- calcolo dei diametri equivalenti (D_{eq});
- suddivisione del campione in base ai diametri equivalenti;
- determinazione delle frequenze relative;
- costruzione delle curve granulometriche;
- calcolo dei parametri della distribuzione;
- calcolo del volume di materiale instabile.

Vista la totale assenza di informazioni riguardo la granulometria del versante, dovuta soprattutto al fatto che non sono stati svolti prima d'ora approfonditi studi su tale parte del bacino, si è cercato di eseguire un'analisi granulometrica del versante in grado di descrivere nel modo più fedele possibile il materiale presente.

Come accennato, a causa della mancanza di materiale sia cartaceo che informatico, si è fatto a volte uso di considerazioni apprese durante le diverse uscite in sito.



Figura 32: Granulometria presente sul versante

4.2.1 Classificazione dei sedimenti

Un sedimento è un materiale solido accumulato sulla superficie terrestre (litosfera), derivato dall'azione di fenomeni che agiscono nell'atmosfera, nell'idrosfera e nella biosfera (venti, variazioni di temperatura, precipitazioni meteoriche, circolazione delle acque superficiali e sotterranee, spostamenti di masse d'acqua, azione di agenti chimici, azione degli organismi viventi).

La classificazione di tali sedimenti è molto complessa: ne esistono in base alla composizione, alla tessitura, alla genesi e ai meccanismi deposizionali.

Per l'analisi che si intende fare nel presente lavoro i sedimenti vengono suddivisi in base alla loro dimensione, considerando il rispettivo diametro.

Sapendo che esiste una grande varietà di scala tra gli elementi più fini come le argille (ordine del micron, 10^{-3} mm) ed i massi di grosse dimensioni (ordine del metro, 10^3 mm), le classi diametriche possono essere assegnate con una progressione aritmetica (2-3mm, 3-4mm, 4-5mm, ...) oppure, in molti casi la distribuzione di frequenza dei sedimenti tende ad essere rappresentata come una funzione log-normale. Le distribuzioni di tipo logaritmico sono più difficili da trattare matematicamente, per cui per rendere più facile l'analisi delle curve di frequenza si

adotta una progressione geometrica di passo 2 (2-4mm, 4-8mm, 8-16mm, 16-32mm, ...), in cui i diametri raddoppiano ad ogni superiore: è il caso della Scala di Wentworth (1922) (tabella 11).

Nel caso si abbia come partenza una scala log-normale, per trasformarla in una normale si introduce una scala aritmetica espressa tramite l'indice ϕ (*phi*), detta scala del *phi* di Krumbein (1934) con la seguente formulazione:

$$\phi = -\log_2 D / D_0$$

Con:

- ϕ : *phi* di Krumbein;
- D: diametro della particella [mm];
- D_0 : diametro di riferimento posto uguale a 1mm, per rendere l'equazione dimensionalmente consistente.

Per classificare i sedimenti, solitamente si usa la letteratura dell'American Geophysical Union (AGU), che adotta la Scala di Wentworth; il valore di diametro pari a 2 (D= 2mm) separa convenzionalmente il sedimento fine (sabbia, limo, argilla) da quello grossolano (ghiaia, ciottoli e massi).

Si noti come la variazione in termini aritmetici all'interno di una classe vari a seconda della classe stessa: da -1 a -2 significa da 2 a 4mm (una differenza poco percettibile), da -10 a -11 vuol dire da 1.025 a 2.048mm (cioè da 1 a 2m, una differenza rilevante).

Questo rende consigliabile analizzare un campione che presenti pezzature grossolane, allo scopo di non raggruppare in poche classi elementi molto diversi diametricamente, con relativa diversa importanza dal punto di vista idraulico ed ambientale. Infatti, si ricorda come il volume e quindi il peso di una particella, varino con il cubo del diametro, quindi se questo raddoppia il volume diventa 8 volte maggiore.

Per il campionamento del materiale ricoprente la Valle del Piscino si è deciso di utilizzare la classificazione di Udden-Wentworth (tabella 11), in quanto è sembrata un buon compromesso tra il numero di classi (9 è sembrato ragionevole) e l'accuratezza voluta per i risultati.

Tipo di sedimento	Indice: $-\phi$ $2^{-\phi}$	Classe diametrica D[mm]
Massi molto grossi	$2^{12}-2^{11,5}$	4.096-2.896
Massi molto grossi	$2^{11,5}-2^{11}$	2.896-2.048
Massi grossi	$2^{11}-2^{10,5}$	2.048-1.448
Massi grossi	$2^{10,5}-2^{10}$	1.448-1.024
Massi medi	$2^{10}-2^{9,5}$	1.024-724
Massi medi	$2^{9,5}-2^9$	724-512
Massi piccoli	$2^9-2^{8,5}$	512-362
Massi piccoli	$2^{8,5}-2^8$	362-256
Ciottoli grossi	$2^8-2^{7,5}$	256-181
Ciottoli grossi	$2^{7,5}-2^7$	181-128
Ciottoli piccoli	$2^7-2^{6,5}$	128-90
Ciottoli piccoli	$2^{6,5}-2^6$	90-64
Ghiaia molto grossa	2^6-2^5	64-32
Ghiaia grossa	2^5-2^4	32-16
Ghiaia media	2^4-2^3	16-8
Ghiaia fine	2^3-2^2	8-4
Ghiaia molto fine	2^2-2^1	4-2
Sabbia molto grossa	$2^1-2^{0,5}$	2-1,4
Sabbia grossa	$2^{0,5}-2^{-1}$	1,4-0,5
Sabbia da medio a fine	$2^{-1}-2^{-4}$	0,5-0,06
Limo	$2^{-4}-2^{-8}$	0,06-0,004
Argilla	$2^{-8}-2^{-12}$	0,004-0,002

Tabella 11: Classificazione dell'American Geophysical Union

4.2.2 Rappresentazione grafica dell'analisi granulometrica

La granulometria è una proprietà che identifica le singole particelle che compongono una roccia sedimentaria, un terreno o un suolo in base alle dimensioni; la classificazione granulometrica prescinde dalla natura chimica o chimico mineralogica delle particelle e prende in considerazione esclusivamente la loro dimensione, secondo la quale vengono suddivise in classi granulometriche.

I dati ottenuti dal campionamento e successivamente suddivisi secondo la classificazione di Wentworth per una più semplice ed immediata lettura vengono rappresentati con la costruzione di istogrammi di frequenza e curve

granulometriche (figura 33). Tali curve possono rappresentare la frequenza assoluta o relativa degli elementi costituenti ogni singola classe granulometrica. Si veda il grafico sottostante per uno schematico uso delle due curve.

CURVE GRANULOMETRICHE

Curva di frequenza relativa

Per ogni classe diametrica, esprime la sua percentuale rispetto al totale del campione. Ha un andamento di solito a campana, ma può presentare più valori modali (picchi), indicativi della presenza contemporanea di diverse frazioni granulometriche tra loro disgiunte. In termini analitici, rappresenta la derivata della curva di frequenza cumulata.

Curva di frequenza cumulata

Rappresenta la percentuale, riferito al totale del campione, dei sedimenti più fine (detto passante) relativamente ad ogni classe diametrica. È in sostanza l'integrale della curva di frequenza relativa, in termini discreti. È una curva crescente, terminante a 100, con punti di flessi in corrispondenza dei valori modali. Da essa si ricavano i diametri percentili.

Curva di frequenza cumulata

Curva (istogramma) di frequenza relativa

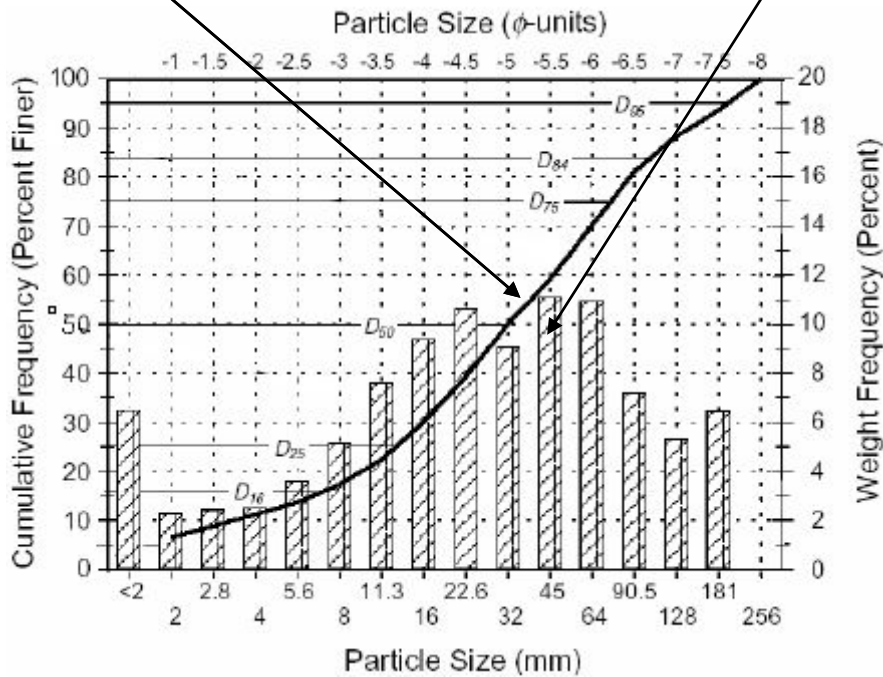


Figura 33: Curve granulometriche

Istogrammi di frequenza relativa

Noto il numero complessivo di sedimenti costituenti il campione, noti i sedimenti appartenenti a ciascuna classe, si può costruire un istogramma di frequenza relativa, con in ordinata la percentuale di materiale appartenente ad una certa classe granulometrica ed in ascissa la classe corrispondente. Inoltre partendo da tale istogramma, se si uniscono i punti medi delle classi granulometriche, si ottiene la curva di frequenza relativa.

Dalla suddivisione di Wentworth, nota la numerosità del campione rispetto al numero totale degli elementi costituenti il campione stesso, si riescono ad ottenere istogrammi a barre, con in ordinata la percentuale di frequenza ed in ascissa le dimensioni delle classi.

L'istogramma a barre è un metodo di rappresentazione dei dati, nel quale le superfici delle singole barre sono proporzionali al valore delle singole classi granulometriche; in teoria diminuendo l'intervallo delle classi, per assurdo è possibile farlo fino all'infinito, si ottiene proprio la curva di frequenza, che è la rappresentazione continua e reale della distribuzione granulometrica.

Curve granulometriche

Le percentuali dei frammenti delle varie dimensioni si distribuiscono secondo curve ben distinte chiamate curve granulometriche. Tali curve sono diagrammi sperimentali ottenuti tramite campionamenti, setacciature (per frazioni granulometriche grossolane) o sedimentazione (per frazioni granulometriche fini)

In ordinata si trova la "percentuale passante", ossia la percentuale di materiale più fine della maglia del setaccio che passa attraverso la maglia stessa, mentre in ascissa il diametro, cioè la larghezza minima della maglia del setaccio in caso di maglia rettangolare, o diametro in caso di fori circolari.

La curva granulometrica ha una forma crescente terminante al valore di 100, ossia al 100%, perché ad ogni classe granulometrica corrisponde in ordinata un valore percentuale del passante uguale alla somma tra il valore percentuale di quella classe e quello delle altre a granulometria minore.

Sulla curva di frequenza cumulata, i diametri associati ad una certa percentuale di passante vengono definiti diametri percentili e si indicano come D_{16} , D_{50} , D_{90} , dove il numero indica la percentuale considerata. I percentili si possono calcolare per via

grafica (solo approssimativamente) o più correttamente tramite equazioni matematiche.

Dall'analisi delle curve granulometriche possono essere ricavati alcuni parametri come indicatori dell'uniformità od eterogeneità del campione, ossia quanto una miscela si presenti formata da particelle di dimensioni equivalenti.

4.2.3 Parametri della distribuzione granulometrica

Dal momento che non si riscontrano mai granulometrie perfettamente uniformi, non basta solo un diametro per caratterizzarle ma si fa uso di altri parametri di solito statistici come [11]:

- **la mediana**: è il centro della distribuzione cumulata, ed è data dal diametro che la divide in due parti realmente equivalenti, ovvero il diametro relativo al 50% del passante in peso, il cosiddetto D_{50} , che risulta essere il parametro più usato;
- **la moda** (o valore modale), data dalla classe che presenta la frequenza relativa maggiore;
- **la deviazione standard**, data dalla formula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{D_{84}}{D_{16}}}$$

Con:

- D_{84} : diametro corrispondente al passaggio in peso dell'84% del campione;
- D_{16} : diametro corrispondente al passaggio in peso dell'16% del campione.

Tale parametro fornisce un'indicazione numerica della dispersione dei dati (valori dei diametri) rispetto al valore atteso, identificato dalla media aritmetica.

Se tale valore risulta essere uguale all'unità significa che la curva è uniforme (campione uniforme), se invece risulta essere maggiore di 1 la curva tende all'eterogeneità (campione eterogeneo);

- **il coefficiente di uniformità**, definito come il rapporto tra il diametro delle particelle corrispondenti al 60% di passante ed il diametro delle particelle per cui si ha il 10% di passante; tale coefficiente assume un valore pari a 1 nel caso di terreno perfettamente uniforme e valori via via crescenti all'aumentare dell'eterogeneità. Il calcolo di tale coefficiente è dato dall'equazione:

$$U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Con:

- D_{60} : diametro corrispondente al passaggio in peso dell'60% del campione;
- D_{10} : diametro corrispondente al passaggio in peso dell'10% del campione;
- **il grado di sfericità** delle particelle, ossia il grado di approssimazione di ogni singolo clasto ad un profilo sferico. Granuli arrotondati dotati di un alto grado di sfericità esprimono un grado di maturità maggiore, a seguito dei fenomeni di smussamento subiti nel corso della loro storia. Tale grado di sfericità è calcolato attraverso:

$$\lambda = \frac{V_{eq}}{V_{max}}$$

Con:

- V_{eq} : volume equivalente della particella, ottenuto dalla formula per il calcolo del volume di un'ellisse, essendo noti l'asse maggiore a e minore b del grano, ed avendo assimilato il clasto ad un'ellisse;

$$V_{eq} = \frac{4\pi ab^2}{3}$$

- V_{max} : volume della sfera circoscritta alla particella;

$$V_{max} = \frac{4\pi r^3}{3}$$

Si può quindi dire che dall'analisi delle curve granulometriche è possibile determinare il tipo ed il grado di assortimento delle particelle, cioè quanto le

particelle che compongono il campione (terreno, versante, ...) presentano eterogeneità di dimensioni.

4.3 Fasi operative

In questo paragrafo si analizza la parte del lavoro pratico, ossia direttamente in loco e successivamente in ufficio, con le operazioni e metodologie impiegate, ed un accenno alla strumentazione utilizzata.

Si inizia con il campionamento dei clasti attraverso il campionamento lineare, per poi passare alla costruzione degli istogrammi di frequenza e delle curve granulometriche, per concludere con il calcolo del volume di materiale movimentabile ed una rigorosa analisi dei risultati ottenuti.

4.2.1 Campionamento del versante

Per il campionamento del versante come spiegato nel paragrafo 4.1.1 si è utilizzata la metodologia del campionamento lineare, che operativamente è risultata essere non difficile concettualmente, ma abbastanza lunga come tempistica a causa principalmente delle dimensioni del versante.

La strumentazione necessaria per tale operazione comprende solamente due bindelle, una lunga almeno 20 metri, tale cioè da coprire l'intera larghezza del versante, e di un block notes sul quale annotare il valore dei due assi (maggiore a e minore b) del grano considerato.

Inoltre è importante scattare una foto del versante per individuare la posizione delle varie sezioni analizzate.

Per la sicurezza di coloro che hanno dovuto svolgere le operazioni di campionamento (essendo il materiale instabile ed il versante, soprattutto nella parte alta, di elevata pendenza) si è scelto di effettuare l'uscita in una giornata con assenza di precipitazioni e con suolo asciutto. Tale uscita è avvenuta il 31 luglio 2010.

Una volta giunti in loco ai piedi del versante, dopo una rapida analisi, si è deciso di procedere come segue:

- recarsi il più in alto possibile sul versante, per ottenere la ricostruzione più completa possibile;
- posizionare una prima bindella in modo perpendicolare al possibile corso del flusso d'acqua, identificando così la linea guida;
- stabilire il passo con il quale considerare i grani, misurare ed annotare il valore degli assi maggiore e minore procedendo per tutta la lunghezza della sezione;
- individuare la sezione successiva verso valle e ripetere le operazioni del punto precedente, procedendo in tale modo fino al fondo del versante.

Si è scelto un passo di 50cm, ossia posizionata la bindella come indicatrice della linea sulla quale eseguire le misurazioni, ogni 50cm si è individuato il grano che ricadeva in quel punto, misurandone l'asse maggiore a e quello minore b (figura 34).

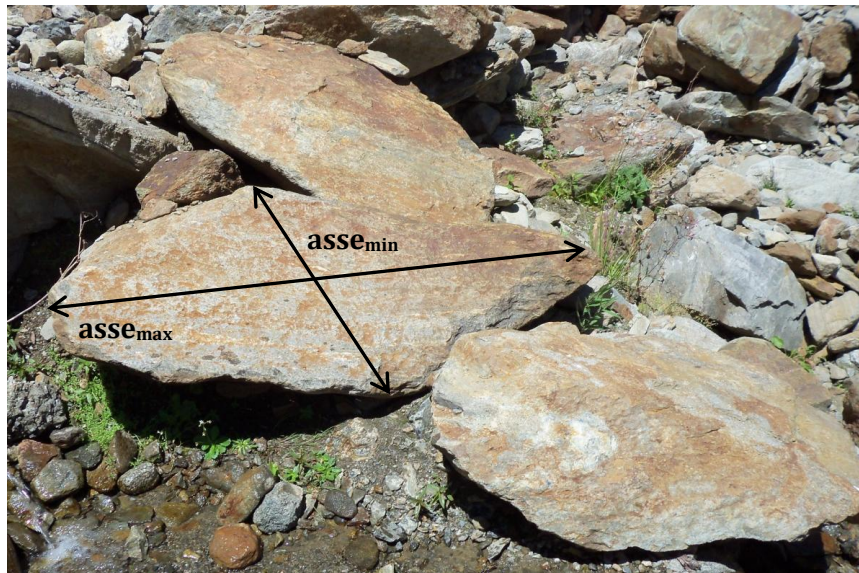


Figura 34: Assi minore e maggiore misurati sul grano

Inoltre si è dovuta stabilire anche la distanza tra le varie sezioni; si è stabilito un valore pari a 10m. Vista la lunghezza del versante alla fine si sono eseguite 20 sezioni, la prima in corrispondenza del punto più alto raggiungibile a piedi, e l'ultima 10m al di sotto del ponticello in cemento, situato quasi a valle del versante (figura 35).



Figura 35: Posizione delle 20 sezioni

Le sezioni dalla 1 alla 5 registrano la presenza di materiale detritico di diversa granulometria con qualche arbusto, e sono delimitate lateralmente da affioramenti rocciosi (figura 36).

Le prime due sezioni sono inoltre caratterizzate dalla presenza di materiale depositato di recente, a seguito dei fenomeni di *rock fall* dalla soprastante parete rocciosa.

Dalla sezione 5 in poi, si ha solo la presenza di materiale detritico, sempre di varia dimensione, ma delimitato lateralmente non più da affioramenti rocciosi, ma da prato e materiale granulare di piccole dimensioni.

Nel periodo del rilievo si è notata la formazione di un flusso d'acqua lungo il versante solo a partire dalla sezione 9.

Questo porta a dedurre che durante intense precipitazioni o nel periodo primaverile (disgelo della neve) si potrebbe riscontrare la presenza di acqua fin dalle prime sezioni, con un conseguente aumento della probabilità di movimentazione del materiale da parte del flusso d'acqua stesso.

Per quanto riguarda la larghezza della sezione, si è presa in considerazione quella parte del versante che potrebbe essere coinvolta dall'azione di un flusso d'acqua; tale valore della larghezza varia tra i 20m per le prime otto sezioni, per poi diminuire fino a toccare in corrispondenza della sezione 17 i 10m.

Al di sotto del ponticello è stato possibile eseguire una sola sezione, la numero 20, in quanto da tale punto in poi si ha un brusco aumento della pendenza del versante, unito alla presenza d'acqua, con l'impossibilità di eseguire ulteriori sezioni (figura 37).

In totale si è riusciti a coprire una lunghezza di versante pari a circa 200m, che può considerarsi un buon risultato visto che in totale è lungo circa 300m.

Quindi, si può pensare che a seguito dell'analisi dei dati raccolti si potrà avere una buona ricostruzione in termini di granulometria del materiale presente.

Le diverse sezioni sono state poste ad una distanza di 10m; per decidere il posizionamento di tali sezioni, in alternativa si poteva individuare le zone omogenee lungo il versante e diminuire il passo tra le sezioni in tali zone, ma la mancanza di esperienza non ha permesso di riconoscerle ad occhio nudo. Dai risultati si vedrà come il materiale risulta essere distribuito in modo abbastanza omogeneo per tutta la lunghezza del versante.

Per ogni sezione è stato misurato e quindi annotato il valore dell'asse maggiore e minore del grano considerato; tale valore risulta variare da un minimo di 3cm ad un massimo di 6m.



Figura 36: Affioramenti rocciosi laterali



Figura 37: Versante al di sotto del ponticello in cemento

4.2.2 Attribuzione delle classi granulometriche e calcolo delle frequenze relative

Una volta annotati i dati relativi ai vari grani incontrati per le 20 sezioni con un passo costante per tutte pari a 50cm, la successiva operazione consiste nell’analizzare tali dati ed ottenere la curva granulometrica per ogni sezione. In seguito si procederà al calcolo di un possibile volume del materiale potenzialmente movimentabile.

Per esperienza, sappiamo che le particelle sono sempre di forma irregolare, e per l’attribuzione della classe di appartenenza della classificazione di Upper-Wentworth, è necessario il calcolo di un diametro definito come “diametro equivalente” (D_{eq}), ottenuto dalla media aritmetica tra l’asse maggiore a ed il minore b della particella, tramite la formula:

$$D_{eq} = (asse_{max} + asse_{min})/2$$

Con:

- D_{eq} : diametro equivalente della particella [mm];
- $asse_{max}$: asse maggiore misurato [mm];
- $asse_{min}$: asse minore misurato [mm].

Ad ogni diametro equivalente calcolato, dopo aver ordinato i valori in modo crescente, si è attribuita la corrispettiva classe di appartenenza, utilizzando la suddivisione granulometrica di Upper-Wentworth, tramite la quale si sono identificate 9 classi (tabella 12). Inoltre per ogni classe è stata calcolata la media dei diametri equivalenti ($D_{eq,medio}$), per un più comodo utilizzo nel rappresentare le classi sull’intero versante (Grafico 1).

D_{eq} [mm]	Classe	Legenda classi
22,6-32	1	Ghiaia grossa
32-64	2	Ghiaia molto grossa
64-128	3	Ciottoli piccoli
128-256	4	Ciottoli grossi
256-512	5	Massi piccoli
512-1024	6	Massi medi
1024-2048	7	Massi grandi
2048-4096	8	Massi molto grandi
> 4096	9	Massi molto grandi

Tabella 12: Identificazione delle classi granulometriche

CAPITOLO 4_ Analisi granulometrica

Classe - D_{eq} medio [mm]									
sezioni	classe								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	30	50	90	191	391	725	1263	0	0
2	30	0	88	184	378	705	1469	4000	0
3	0	50	108	175	391	639	1125	0	4950
4	0	0	125	0	388	739	1512	0	6000
5	30	0	90	194	402	754	1488	2500	0
6	30	0	100	197	395	725	1614	0	0
7	0	0	100	191	338	734	1433	0	4350
8	0	50	88	185	339	734	1494	2300	0
9	0	0	105	0	413	606	1700	0	5000
10	30	50	100	150	425	825	0	2750	0
11	30	0	0	235	375	765	1550	2250	0
12	30	0	75	175	338	746	1513	2250	0
13	30	0	75	192	342	700	1194	0	0
14	30	50	106	0	348	638	1431	0	0
15	0	50	100	175	442	694	1475	0	0
16	30	0	106	169	375	600	0	2500	0
17	0	0	0	0	438	825	1305	0	0
18	30	0	0	158	366	737	0	0	0
19	30	0	81	175	325	718	1025	0	0
20	0	0	100	183	401	706	1650	3000	0

Tabella 13: D_{eq} medio – classi delle sezioni

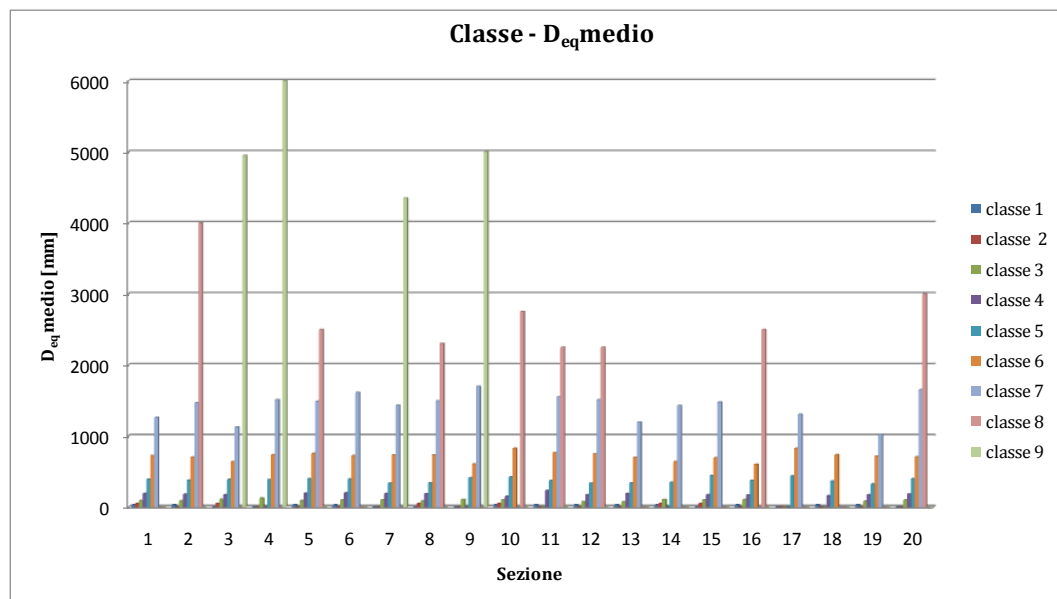


Grafico 1: Classe - D_{eq} medio delle sezioni

Stabilita la classe di appartenenza di ogni elemento tramite il valore del diametro equivalente, è stata calcolata e rappresentata la frequenza assoluta e relativa di tali classi, quest'ultima ottenuta con l'equazione:

$$F_{ass} : N_{tot} = x : 100$$

Con:

- F_{ass} : frequenza assoluta di ogni classe granulometrica, che corrisponde al numero di elementi in ogni suddivisione;
- N_{tot} : numero totale degli elementi ottenuta come somma di tutti gli elementi delle 20 sezioni;
- x : incognita, corrispondente alla frequenza relativa (F_{rel}) delle singole classi granulometriche, espressa in percentuale.

Si ricorda come il valore percentuale corrispondente alla somma delle frequenze relative debba essere uguale obbligatoriamente a 100, e come la frequenza relativa possa essere rappresentata graficamente attraverso un grafico a torta o un istogramma.

Tale operazione di calcolo delle frequenze è stata eseguita sia per le 20 sezioni di campionamento (Allegato A) sia per l'intero versante.

Per l'intero versante i valori di frequenza delle classi granulometriche, rappresentati da un istogramma e grafico a torta, vengono sotto riportati (tabella 14; grafici 2 e 3). Inoltre, sempre nei riguardi dell'intero versante, si riportano i valori relativi al numero di clasti appartenenti alle 9 classi granulometriche lungo le sezioni (tabella 15; grafico 4).

CAPITOLO 4_ Analisi granulometrica

CONFRONTO TRA SEZIONI: Classe - F_{rel}									
sezioni	classe								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	7	7	7	17	28	21	14	3	9
2	3	4	6	21	27	27	12	9	5
3	4	4	13	4	35	26	9	4	4
4	5	5	5	17	32	42	16	5	6
5	5	5	13	27	13	26	17	6	
6	11	13	5	31	23	9	32	5	
7	14		8	19	15	31	12	5	
8	9		8	32	27	23	15	7	
9	5		31	28	25	25	13		
10	10		11	5	16	26	6		
11	9		5	26	22	28	19		
12	4		9	13	19	33	17		
13			18	20	13	26	18		
14			13	13	27	27	13		
15			20	25	20	27	45		
16			17	20	15	30	4		
17			7		18	36	7		
18					35	43			
19					21	29			
20					33	27			
N°	86	38	194	319	464	563	269	43	24
N° _{tot}	2000								
F_{rel} [%]	4	2	10	16	23	28	13	2	1

Tabella 14: Classe - F_{rel} delle classi per ogni sezione e sull'intero versante

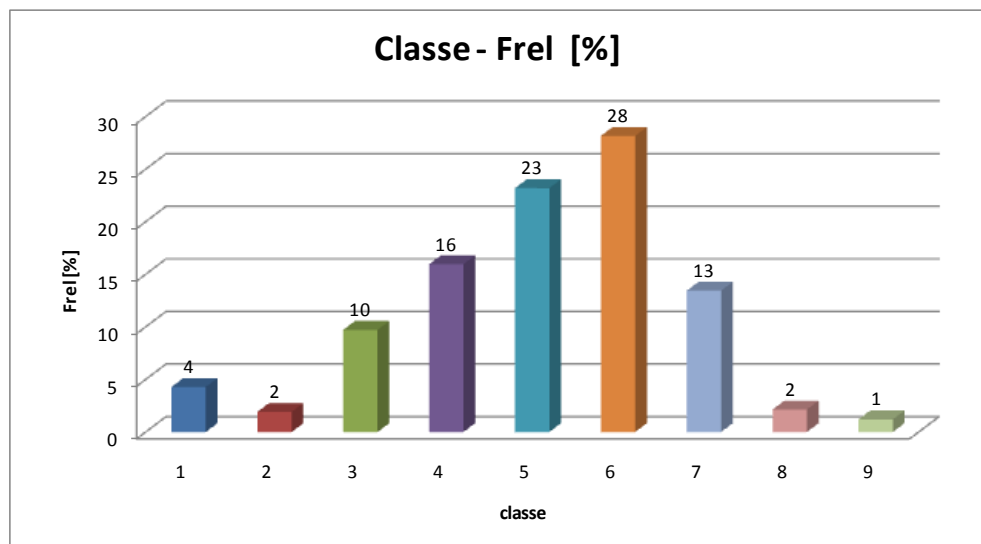


Grafico 2: F_{rel} - Classi sul versante

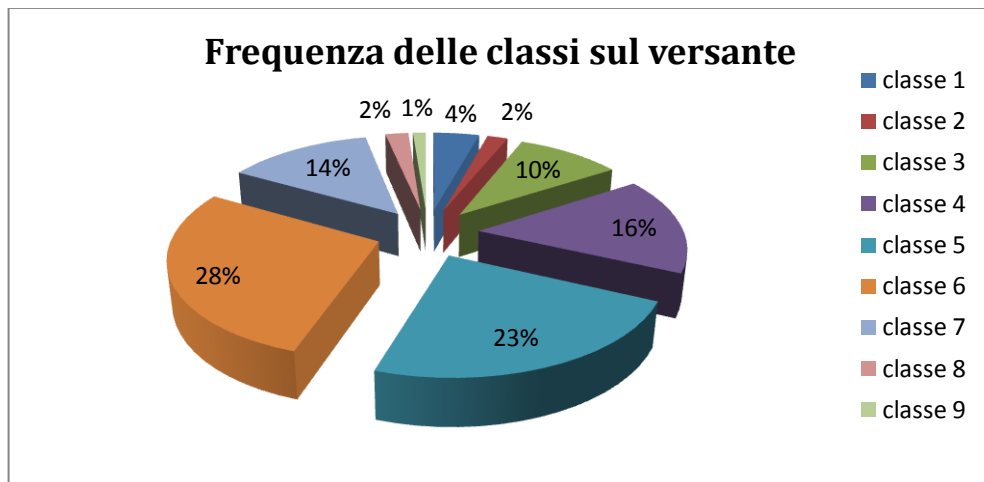


Grafico 3: F_{rel} - Classi sul versante

CONFRONTO TRA SEZIONI: Classe - N° [%]									
sezioni	classe								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	7	7	7	17	28	21	14	0	0
2	3	0	6	21	27	27	12	3	0
3	0	4	13	4	35	26	9	0	9
4	0	0	5	0	32	42	16	0	5
5	4	0	13	17	13	26	17	9	0
6	5	0	5	27	23	9	32	0	0
7	0	0	8	31	15	31	12	0	4
8	0	4	8	19	27	23	15	4	0
9	0	0	31	0	25	25	13	0	6
10	5	5	11	32	16	26	0	5	0
11	11	0	0	28	22	28	6	6	0
12	14	0	5	5	19	33	19	5	0
13	9	0	9	26	13	26	17	0	0
14	5	5	18	0	27	27	18	0	0
15	0	13	13	13	20	27	13	0	0
16	10	0	20	20	15	30	0	5	0
17	0	0	0	0	18	36	45	0	0
18	9	0	0	13	35	43	0	0	0
19	4	0	17	25	21	29	4	0	0
20	0	0	7	20	33	27	7	7	0

Tabella 15: Numero di clasti per classe delle 20 sezioni

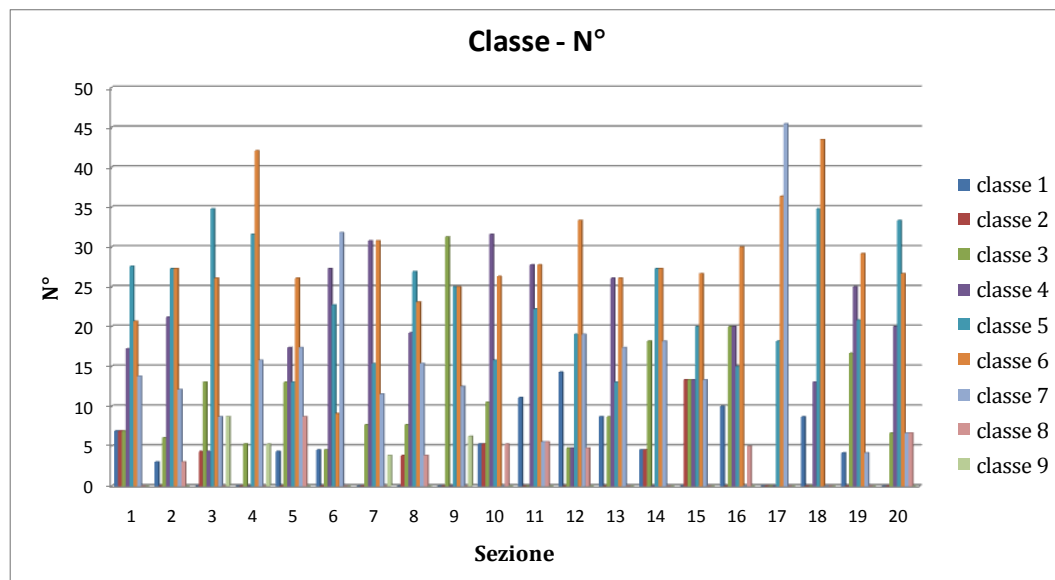


Grafico 4: Numero di clasti per classe granulometrica lungo il versante

Dai grafici ottenuti si evidenzia sull'intero versante una buona presenza di materiale appartenente alle classi granulometriche 3 ($F_{rel}= 10\%$), 4 ($F_{rel}= 16\%$) e 7 ($F_{rel}= 13\%$), ed un picco in corrispondenza delle classi 5 ($F_{rel}= 23\%$) e 6 ($F_{rel}= 28\%$) ossia con diametro tra i 256mm e 1.024mm, che si concentrano tra le sezioni 3 e 9. Per quanto riguarda le prime due classi, che corrispondono a materiale di piccole dimensioni, diametro tra 22,6mm e 64mm, la loro presenza è modesta, infatti si vede come la somma delle loro frequenze relative raggiunga un valore solo del 6%.

Le classi granulometriche maggiori (la 8 e la 9) hanno una somma delle frequenze ancora più bassa, del 3%; inoltre, mentre la classe 8 è presente su tutto il versante in modo più o meno marcato, la classe 9 vede la sua presenza solamente tra le sezioni 3 e 9, solo nella parte più a monte.

4.2.3 Costruzione delle curve granulometriche

Una volta suddiviso il campione di materiale nelle rispettive classi granulometriche, per le 20 sezioni si sono costruite le relative curve granulometriche. Questo al fine di ottenere i valori di alcuni diametri da utilizzare per il calcolo dei parametri indici della omogeneità del campione.

La costruzione delle curve avviene facendo un'importante considerazione iniziale sull'intero versante, infatti dall'istogramma delle frequenze relative delle 9 classi

granulometriche (grafico 2) si evince come risultino poco significative le classi 8 e 9; la loro somma in termini di frequenza è solo del 3% e quindi non verranno considerate. Le curve costruite considerano solo le prime sette classi della classificazione di Wentworth, ossia considerano particelle aventi un D_{eq} (diametro equivalente) tra 22,6mm e 2.048mm.

A seguito di questa considerazione si ha che il 100% del passante in peso risulta essere pari ad un diametro di 2.048mm (estremo superiore della classe 7).

Inoltre il considerare tutte le classi granulometriche porterebbe ad una sovrastima del diametro rappresentativo della sezione che è uno dei parametri statistici rappresentativi maggiormente utilizzati. Il diametro rappresentativo corrisponde a quel valore del diametro per il quale si ha il passaggio in peso del 50% del campione (D_{50}), che coincide anche con la mediana della curva.

Per ogni sezione si è costruita la rispettiva curva granulometrica: partendo dal valore del diametro equivalente (D_{eq}) si è calcolato il volume della rispettiva particella attraverso la formula del volume di una sfera (avendo considerato come ipotesi di partenza che i grani potessero essere considerati come elementi sferici) espressa come:

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \frac{D_{eq}^3}{2}$$

Avendo stabilito un peso specifico di 20 KN/m³, facendo il prodotto tra tale peso specifico ed il volume dei clasti si è ottenuto il rispettivo volume in peso che, diviso per la somma di tutti i pesi degli elementi appartenenti ad una sezione e moltiplicato per 100, fornisce il valore percentuale in peso delle rispettive particelle rispetto al peso totale del campione.

Sommando poi i pesi dei grani appartenenti alla medesima classe granulometrica si sono ottenute le frequenze assolute e relative delle classi. Dal peso della prima classe, sommandole di volta in volta quello delle successive, si è ottenuta la frequenza cumulata e quindi la rispettiva curva granulometrica. Le rispettive curve granulometriche relative alle sezioni vengono riportate nell'Allegato A.

Dalla curva granulometrica si è inserita la rispettiva linea di tendenza (polinomiale del secondo ordine) ed il fattore al quadrato R indice di quanto la linea di tendenza si discosta dalla curva (più tale valore risulta essere pari all'unità più c'è correlazione tra linea di tendenza e curva granulometrica).

Risolvendo l'equazione di secondo grado, avente come incognita il diametro corrispondente ad un determinato valore del passante, si sono calcolati oltre al D_{50} anche il D_{10} , D_{16} , D_{60} ed il D_{84} , da utilizzare per ottenere il fattore di uniformità (U) e della deviazione standard (σ), che danno un'idea del grado di omogeneità del campione come spiegato nel capitolo 4.1.3, nonché del grado di sfericità (λ) (tabella 16; grafico 5).

sezione	D_{50} [m]	U	σ	λ
1	1,376	2,32	2,19	0,00083
2	1,353	2,29	1,48	0,00082
3	1,211	3,55	1,84	0,00085
4	1,544	2,39	1,51	0,0008
5	1,547	1,98	1,39	0,00082
6	1,646	1,62	1,28	0,0008
7	1,430	2,51	1,54	0,00079
8	1,609	1,90	1,37	0,00084
9	1,488	1,82	1,34	0,00064
10	1,026	1,63	1,29	0,00081
11	1,290	3,21	1,75	0,00083
12	1,564	1,95	1,39	0,00086
13	1,333	2,31	1,48	0,00088
14	1,689	1,80	1,34	0,00081
15	1,436	2,15	1,44	0,00085
16	0,952	1,75	1,33	0,00086
17	1,638	1,89	1,37	0,00075
18	0,843	3,54	2,09	0,00085
19	0,879	3,56	1,99	0,00078
20	1,382	2,63	1,57	0,00078

Tabella 16: Parametri rappresentativi delle curve granulometriche

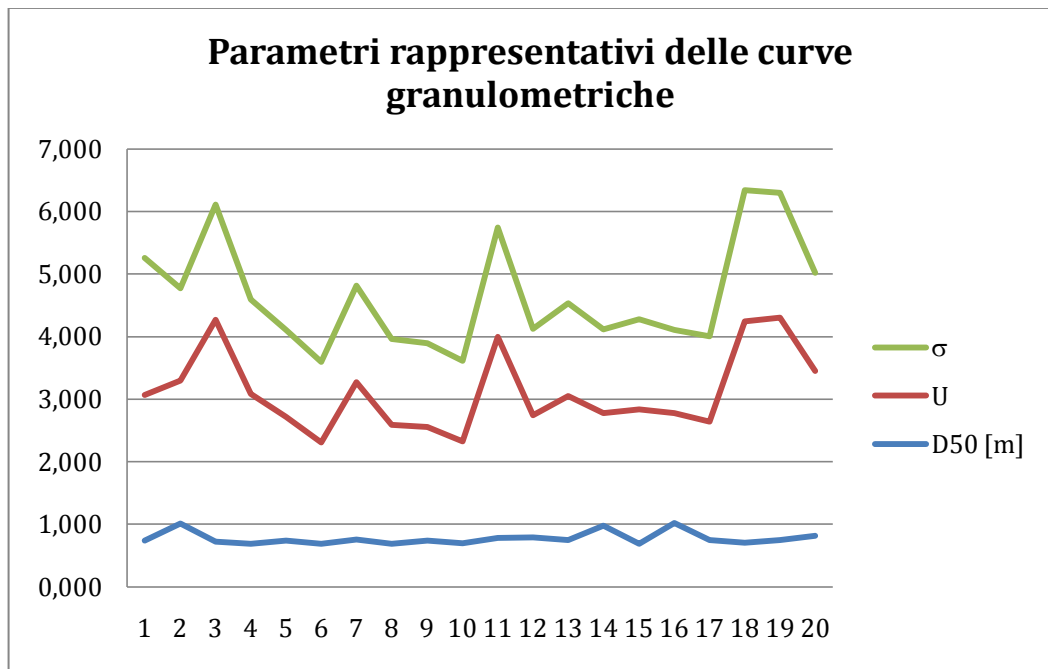


Grafico 5: Andamento dei parametri rappresentativi delle curve granulometriche

Dal grafico si osserva come i valori del D_{50} tendono, seppur con minima intensità, a diminuire procedendo verso valle, variando tra un massimo di 1,646m in corrispondenza della sezione 6, ed un minimo di circa 85cm per la sezione 18, con un valore medio di 1,3m.

La deviazione standard (σ) ed il fattore di uniformità (U) assumono entrambi valori maggiori dell'unità, con media di 2,34 per il fattore di uniformità e 1,55 per la deviazione standard. Tali risultati portano al fatto che il materiale granulometrico che ricopre il versante del Piscino risulta essere abbastanza eterogeneo.

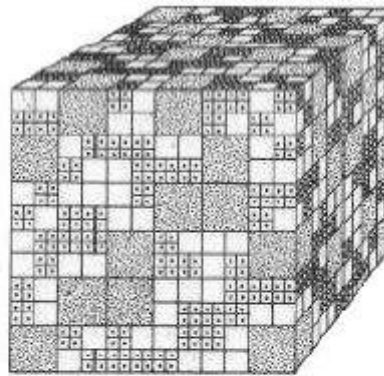
4.3 Calcolo volume materiale movimentabile

Per ottenere un valore volumetrico delle varie classi granulometriche sul versante è necessario convertire i dati ottenuti dell'analisi granulometrica (frequenze in termini di peso o in numero di grani) in un modello volumetrico.

L'analisi verrà eseguita utilizzando il modello del cubo di Kellerhals e Bray, e quello del cubo modificato; quest'ultimo tiene anche conto dei vuoti presenti all'interno dei clasti [12].

4.3.1 Modello del cubo di Kellerhals e Bray

Tale modello offerto da Kellerhals a Bray nel 1971 considera un cubo costituito da cubi di tre differenti dimensioni, posizionati ordinatamente e disposti in modo casuale. La dimensione del cubo maggiore risulta essere due volte quella del cubo intermedio e quattro volte quella della dimensione del cubo minore, i cui volumi di ogni dimensioni occupano 1/3 del volume totale (figura 38).






Particle	Linear Size D	Weight W	Total No In Sample Volume	Total No In Sample Surface
	1	1	4608	192
	2	8	576	48
	4	64	72	12

Figura 38: Modello cubico di Kellerhals e Bray

La formulazione su cui si basa tale modello che permette la conversione tra la distribuzione areale in peso e quella volumetrica in peso è data dalla seguente espressione:

$$p(V - W)_i = C p(A - W)_i D^{-1}_i$$

Con:

- $p(V-W)_i$ = percentuale in peso del volume della classe i-esima;
- $p(A-W)_i$ = percentuale in peso dell'area della classe i-esima ottenuta dall'analisi di un campionamento areale;
- D_i = dimensione geometrica principale (nel presente lavoro la si considera pari al valore del diametro maggiore delle classi granulometriche);
- C= costante.

Tale procedura per il calcolo in percentuale rispetto al peso della volumetria di un campione è applicata nel caso in cui la metodologia utilizzata per il campionamento sia di tipo areale; nel caso si siano effettuate tecnologie di campionamento con griglia o lineare, tale formula viene modificata.

Nel caso di campionamento lineare come nel caso della Valle del Piscino, assume la seguente formulazione:

$$p(V - W)_i = C p(L - W)_i D_i^{-2}$$

$$p(V - W)_i = C p(L - N)_i D_i$$

$p(V-W)_i$ e $p(L-N)_i$ rappresentano le percentuali delle i -esime classi granulometriche ottenute dal campionamento lineare, rispetto al peso e rispetto al numero.

A seguito di esperimenti è stato osservato che tale modello porta ad ottenere distribuzioni con segmento fine più importante rispetto al reale.

Un altro aspetto negativo del modello del cubo di Kellerhals e Bray è che non tiene in considerazione i vuoti, e quindi alcuni esperti hanno messo in evidenza tale difetto affermando che per questa ragione il modello non risulta essere valido e che i risultati ottenuti non sono affidabili.

4.3.2 Applicazione del cubo di Kellerhals e Bray

Nel caso studio della Valle del Piscino per il calcolo di un possibile volume del materiale movimentabile, a seguito del campionamento lineare, si è ottenuta per ogni classe granulometrica (classificazione di Wentworth) la frequenza percentuale rispetto al numero totale di elementi, cioè $p(L-N)_i$.

L'equazione del cubo di Kellerhals e Bray viene quindi modificata in:

$$p(V - W)_i = C p(L - N)_i D_i$$

Tale formulazione prende in considerazione come D_i il valore maggiore del diametro della i -esima classe (trasformato in metri), come $p(L-N)$ le frequenze relative (F_{rel} [%]) delle 9 classi granulometriche ottenute sull'intero versante nel paragrafo 4.2.2, e con C il coefficiente ottenuto tramite:

$$= \int_{D_{i \min}}^{D_{i \max}} p(V - W)_i D_i dD_i = C \int_{D_{i \min}}^{D_{i \max}} p(A - W)_i dD_i = E_V[D_i]$$

Dove $E[D_i]$ corrisponde alla media aritmetica dei diametri costituenti tutto il campione complessivo delle 20 sezioni che risulta pari a:

$$E[D_i] = 1,183 \text{ m}$$

Applicando l'equazione vista all'inizio del paragrafo si ottiene la percentuale in peso del volume delle singole classi i -esime $p(V-W)_i$, i cui risultati vengono riportati nella tabella sottostante:

Classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p(L-N)_i	4	2	10	16	23	28	13	2	1
D_i [m]	0,032	0,064	0,128	0,256	0,512	1,024	2,048	4,096	6
C [m]	1,183								
p(V-W)_i	0,162	0,145	1,472	4,833	14,050	34,129	32,575	10,377	8,540

Tabella 17: Modello del cubo di Kellerhals e Bray

Il limite superiore dell'ultima classe granulometrica (classe 9) secondo la classificazione utilizzata di Wentworth non è fissata. Dai dati ricavati in sito si è vista la presenza di elementi con un diametro fino a 6m, quindi si è attribuito proprio tale valore come limite superiore della classe 9. Tale assunzione può essere vista non corretta dal momento che la classificazione di Wentworth è un tipo di suddivisione geometrica di passo 2, quindi la classe 9 dovrebbe avere come estremo inferiore 4.096mm e come estremo superiore 8.192mm (=4.096x2), ma ai fini operativi avrebbe "pesato" troppo, visto che si hanno pochi elementi appartenenti a tale classe, una frequenza relativa dell'1% (24 clasti rispetto ad un totale di 2.000).

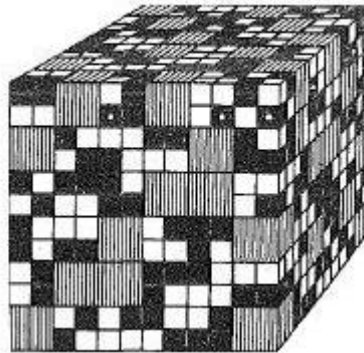
L'approssimazione effettuata ai fini pratici è stata accettata.

Nell'ultima riga della tabella vengono riportati i valori della percentuale in peso delle i -esime classi $p(V-W)_i$, la cui somma dovrebbe essere pari al valore 100 (100%). Questo però non risulta essere corretto: infatti si ottiene un valore somma del 106%. Tale errore del 6% può essere dovuto all'approssimazione dell'estremo superiore della classe granulometrica 9 e al fatto che tale metodo, come affermato già da vari autori, non offre risultati attendibili.

4.3.3 Modello e applicazione del cubo modificato di Displas e Sutherland

Il modello del cubo di Kellerhals e Bray non considera i vuoti, e per tale ed altre considerazioni è considerato da alcuni autori non affidabile in termini di risultati; nel 1988 viene proposto un nuovo modello cubico dagli autori Displas e Sutherland che riprende e corregge il precedente.

In questo nuovo modello viene preso in considerazione un cubo formato da cubi di due dimensioni, non più tre come in quello di Kellerhals e Bray, ai quali si affiancano altri cubi corrispondenti alla dimensione minore di quelli proposti nelle due metodologie che stanno a rappresentare i vuoti (figura 39).






Particle	Linear Size, D	Weight W	Total No. in Sample Volume	Total No. in Sample Surface
	1	1	576	48 (Voids)
	1	1	576	48
	2	8	72	12

Figura 39: Modello del cubo modificato

Per il calcolo del volume in peso $p(V-W)$ si ha quindi una nuova formulazione che modifica la precedente, espressa come:

$$p(V - W)_i = C p(A - W)_i f_1(D_i) f_2(D_i)$$

dove:

- $f_1(D_i) = D_i^{-1}$;
- $f_2(D_i) = D_i^{0,53}$, formulazione ottenuta da risultati sperimentali.

Considerando sempre D_i estremo superiore della i -esima classe si calcolano i valori di f_1 e f_2 .

La formulazione di base del modello del cubo modificato si basa sulla percentuale in peso dell'area della classe i -esima $p(A-W)_i$, che però nel caso del versante del Piscino non si ha, in quanto è stata utilizzata la metodologia di campionamento di tipo lineare e non areale. Quindi il calcolo di tale parametro viene effettuato partendo dal modello del cubo, applicando la seguente formulazione:

$$p(A - W)_i = \frac{p(V - W)_i}{C \cdot D^{-1}}$$

per poi poter applicare la formulazione proposta da Displas e Sutherland, ed ottenere la percentuale di volume in peso delle i -esime classi granulometriche (tabella 18).

classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D_i [m]	0,032	0,064	0,128	0,256	0,512	1,024	2,048	4,096	6
$f_1(D_i)$	31,25	15,625	7,813	3,906	1,953	0,977	0,488	0,244	0,167
$f_2(D_i)$	0,161	0,233	0,336	0,486	0,701	1,013	1,462	2,111	2,585
C	1,183								
$p(A-W)$	0,004	0,008	0,159	1,045	6,079	29,534	56,378	35,920	43,299
$p(V-W)$	0,026	0,034	0,495	2,347	9,854	34,561	47,631	21,909	22,073

Tabella 18: Modello del cubo modificato

La somma percentuale dei volumi in peso delle 9 classi deve essere anche per questo modello pari a 100, cosa che però non si è verificata avendo ottenuto un valore di 139, pari ad un errore del 40%. Tale discrepanza può essere imputata al fatto che la formulazione del modello del cubo modificato è stata tarata per dati granulometrici provenienti da un campionamento areale e non lineare come nel caso in esame. Inoltre non esistono collegamenti che permettano di passare da una tipologia di campionamento all'altra.

Si può quindi trarre la conclusione che il modello del cubo modificato, che fornirebbe risultati migliori, in quanto considera anche i vuoti delle particelle, non può essere utilizzato per tutte le tipologie di campionamento, ma solo per quella areale.

4.4. Utilizzo di PhotoModelerScanner

PhotoModelerScanner è un potente programma di restituzione 3D che consente la rappresentazione di oggetti, utilizzando come input semplici fotografie dell'oggetto di interesse, realizzate da un qualsiasi tipo di camera e scattate da diverse angolazioni; offre quindi la possibilità di ricavare oggetti 3D da immagini bidimensionali attraverso un algoritmo di generazione [13].

I fotogrammi vengono importati direttamente da un hard disk se acquisiti con una camera digitale o fotocamera (eventualmente con uno scanner ad elevata risoluzione se acquisiti da pellicola).

L'algoritmo di generazione del modello tridimensionale si basa sulla corrispondenza di punti principali, individuati sulle immagini scattate da diverse angolazioni. Questa corrispondenza permette di individuare univocamente non solo gli spigoli degli oggetti, ma soprattutto le superfici che acquisiscono i materiali; inoltre gli eventuali errori di distorsione o di scelta del posizionamento vengono corretti ed ottimizzati automaticamente dal programma, per assicurare la coerenza del modello finale.

La prima fase è quella di input, ossia di importazione delle immagini, ed è utilizzata per correggere eventuali errori e per effettuare la ricostruzione tridimensionale; si selezionano le immagini da importare e si inseriscono le informazioni relative al tipo di camera usata per l'acquisizione (parametri di calibrazione). Vengono poi attivati vari comandi che permettono proprio la costruzione di superfici e volumi e come risultato finale si ottiene la visualizzazione del modello.

Per lo scopo del seguente lavoro, ossia la determinazione di pendenze su un versante, si è utilizzato lo strumento "punto", che evidenzia sulla fotografia i dettagli richiesti nel modello 3D (punti comuni a tutte le foto) e la funzione zoom per accrescere la precisione e la facilità del lavoro.

Il programma processa i dati immessi producendo un accurato modello 3D avvalendosi di un algoritmo avanzatissimo, che valuta i dati disponibili, ricrea la struttura e minimizza gli errori.

Inoltre osserva e manipola le coordinate cartesiane (x, y, z) nella *Point Table*, ossia un'apposita tabella usata come archivio dati, come le coordinate dei punti ed altre informazioni.

La precisione di PhotoModelerScanner dipende da numerosi fattori: la risoluzione e il numero di fotografie, l'angolo fra le stesse, il numero di punti referenziati e la fotocamera utilizzata.

La tempistica per completare una serie di misure e produrre il modello dipende dalla complessità del progetto, dal tipo di fotocamera utilizzata e dalla velocità del computer usato. Alcune tipologie di lavori richiedono solo dieci minuti di tempo per l'elaborazione, mentre quelli più complessi richiedono da alcune ore ad alcuni giorni di lavorazione (come ad esempio nel caso di lavori estremamente difficili e dettagliati).

4.4.1 Calcolo delle pendenze del versante

Il versante oggetto di studio ha uno sviluppo complessivo di circa 300m.

È stato suddiviso, ai fini del campionamento, in 20 sezioni distanti 10m l'una dall'altra, con pendenza media dei versanti dell'intero bacino del Tartano pari a circa 35°.

A seguito dell'analisi granulometrica delle 20 sezioni individuate lungo il corpo di frana, con la costruzione delle rispettive curve granulometriche, si è eseguito un confronto tra i valori dei diametri rappresentativi delle sezioni (D_{50}) e la pendenza del versante, per stabilire le zone di maggior deposito e quelle che potrebbero essere considerate come zone critiche, per le quali potrebbero esserci fenomeni franosi o di flusso.

Le pendenze, considerati i tratti tra le sezioni 1-2, 2-3, 3-4, etc., sono state valutate per mezzo del software fotogrammetrico commerciale PhotoModelerScanner.

In questa sezione si è affrontato il problema del calcolo delle pendenze tra le varie sezioni, in modo tale da poter eseguire un confronto con la granulometria.

4.4.2 Applicazione alla Valle del Piscino

Attraverso il software commerciale presentato si sono ottenute dal calcolo le coordinate cartesiane dei particolari dell'immagine, che nel caso in esame sono i punti in comune tra le diverse foto acquisite.

Si sono inseriti 7 fotogrammi acquisiti in data 15 luglio 2010: l'elaborazione ha portato alla ricostruzione digitale del versante e alla visione di punti in comune tra le foto (figura 40).

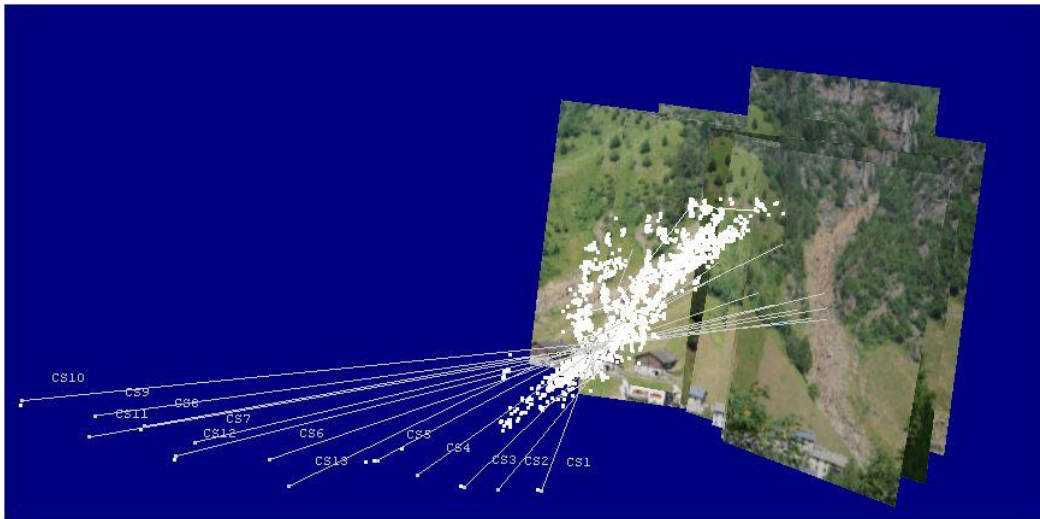


Figura 40: Ricostruzione del versante con PhotoModelerScanner

Per il calcolo del valore delle pendenze tra le sezioni, da confrontare con il rispettivo diametro medio rappresentativo (D_{50}), si è considerata una sola immagine in quanto i punti evidenziati dal programma sono punti comuni a tutti i fotogrammi (figura 41).

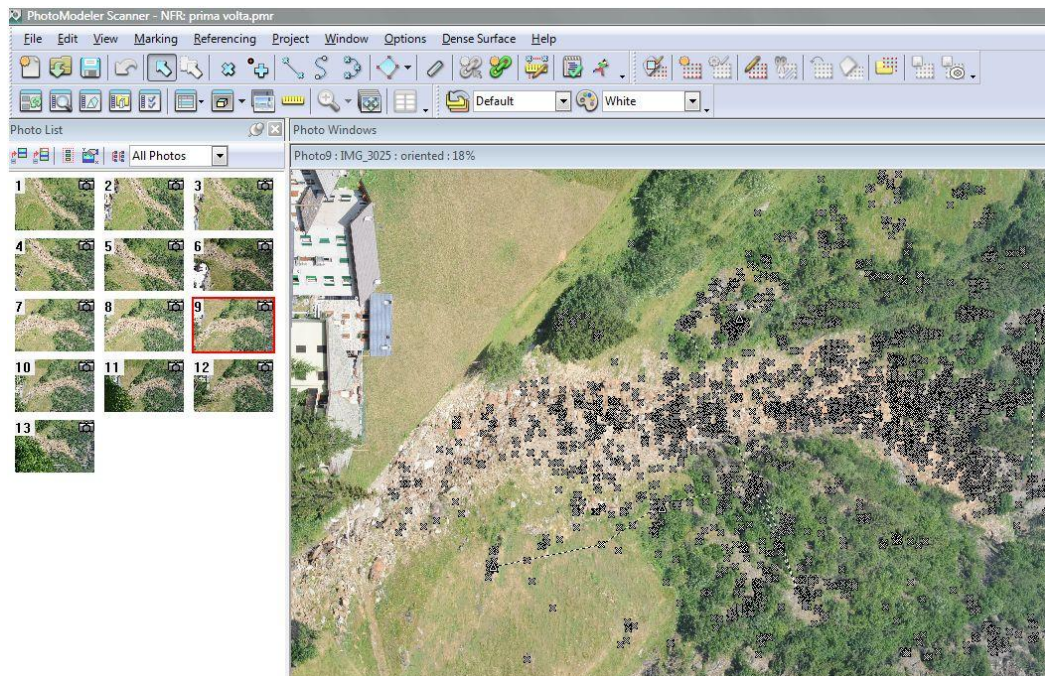


Figura 41: Visione dei punti comuni con PhotoModelerScanner

Si è cercato di prendere in considerazione un'immagine rappresentativa del versante, che ne consentisse una visione integrale; per ragioni pratiche questo non è

stato possibile a causa del diverso posizionamento dei centri di presa rispetto al versante stesso; si è allora fatto ricorso a due immagini (la numero 3.017 e la numero 3.021), senza inficiare negativamente i risultati, essendo, come spiegato, i punti considerati gli stessi su ogni fotogramma.

Preso in considerazione l'immagine con evidenziata la nuvola di punti comuni, indicati sullo schermo attraverso una piccola croce (figura 41), con l'utilizzo di una foto riportante la posizione delle sezioni si sono individuati i punti estremi delle sezioni, uno circa all'inizio ed uno circa alla fine delle sezioni stesse (i punti vengono automaticamente numerati dal software).

Stabiliti i punti da prendere in considerazione per il calcolo delle pendenze ed la corrispondente numerazione, si sono riportate su un foglio di calcolo le coordinate x, y e z dei punti (tabella 19).

Sezione	punto	X	Y	Z
1	sinistra 11466	-44,602511	413,772937	62,0539804
	destra 11662	-35,260125	414,560943	60,4032168
2	sinistra 11387	-42,695922	396,675145	50,1337565
	destra 11482	-40,05212	403,001708	50,0948043
3	sinistra 12277	-43,843568	389,777683	43,2814032
	destra 11601	-17,120845	353,971841	35,8533816
4	sinistra 11135	-44,750403	374,845366	33,1526969
	destra 11418	-33,456919	374,538197	29,9217073
5	sinistra 10926	-45,756009	359,382546	24,3734706
	destra 11378	-16,942204	326,607627	10,0103724
6	sinistra 10757	-43,879359	341,450047	14,1468986
	destra 11012	-36,738778	343,904428	11,077127
7	sinistra 12505	-47,400406	327,973264	7,95054283
	destra 10782	-30,058098	312,440723	3,44881612
8	sinistra 12099	-53,435485	313,172729	1,55291705
	destra 10375	-46,066852	314,782648	-1,7957313
9	sinistra 10140	-52,806567	305,199513	-2,5030055
	destra 12819	-48,429293	306,779787	-5,2223483
10	sinistra 10100	-53,065752	299,024317	-6,4436101
	destra 12416	-49,663074	298,25066	-8,4479343
11	sinistra 30005	-56,912665	293,760805	-7,8475065
	destra 40061	-50,500227	293,96435	-11,395854

12	sinistra	61556	-55,270682	282,357674	-12,889728
	destra	20011	-46,243887	281,755635	-13,953982
13	sinistra	50791	-56,633751	274,088591	-14,375837
	destra	71006	-44,402289	274,781111	-15,921959
14	sinistra	72693	-55,415942	258,181664	-19,427868
	destra	60374	-41,668479	240,257575	-24,458047
15	sinistra	61789	-56,424688	242,795058	-23,994886
	destra	50026	-51,512355	245,819663	-24,221473
16	sinistra	50028	-50,588852	242,227527	-25,441105
	destra	60403	-41,668479	240,257575	-24,458047
17	sinistra	60214	-48,420651	227,224558	-31,656377
	destra	60426	-40,273449	228,640722	-28,714222
18	sinistra	60224	-48,103649	222,946164	-33,267681
	destra	60394	-41,395464	220,922989	-31,910198
19	sinistra	-			
	destra	-			
20	sinistra	-			
	destra	-			

Tabella 19: Coordinate dei punti utilizzati per il calcolo delle pendenze

Dalla tabella 19 si nota come per le ultime due sezioni (19 e 20) non compaiano i valori in quanto in nessuna delle fotografie acquisite compaiono punti nei pressi di tali sezioni.

Si è cercato di porre rimedio a questa mancanza utilizzando informazioni visive apprese durante le varie campagne operative in sito; si è visto che il tratto 19-20 possiede una forte pendenza, mentre il tratto 18-19 ha pendenza simile al suo precedente.

Il calcolo delle pendenze tra le varie sezione una volta note le coordinate cartesiane dei punti estremi delle sezioni, indicati come punto di sinistra (iniziale) e punto di destra (finale), è stato svolto calcolando l'inclinazione di destra e sinistra tra due sezioni consecutive.

A titolo di esempio si riportano le formule usate per il calcolo della pendenza del tratto 1-2 ossia tra la sezione 1 e la sezione 2:

$$Inc_{sin} = \frac{(Z_{s1} - Z_{s2})}{\sqrt{(X_{s1} - X_{s2})^2 + (Y_{s1} - Y_{s2})^2}}$$

$$Inc_{dex} = \frac{(Z_{d1} - Z_{d2})}{\sqrt{(X_{d1} - X_{d2})^2 + (Y_{d1} - Y_{d2})^2}}$$

I valori ottenuti in radianti sono stati trasformati in gradi, per avere un'idea più pratica e visiva dell'entità delle inclinazioni.

Inoltre di ogni tratto si hanno due valori delle inclinazioni (destra e sinistra), il che non è significativo; quindi da tali valori è stata calcolata la media aritmetica, ottenendo il valore reale delle pendenze dei tratti (tabella 20).

tratto	Inc _{sin}	Inc _{dex}	Inc _{sin}	Inc _{dex}	Inc _{media}
	RAD		GRADI		GRADI
1-2	0,69288457	0,82380584	39,6993615	47,2005976	43,45
2-3	0,97998751	0,2631095	56,1491485	15,0750636	35,61
2-4	0,67706038	0,22584079	38,792702	12,9397243	25,87
4-5	0,56656674	0,39276018	32,4618828	22,5035006	27,48
5-6	0,56718409	-0,0405788	32,4972545	-2,324994	15,09
6-7	0,44484781	0,23716082	25,487902	13,5883138	19,54
7-8	0,40025989	0,32415474	22,9332025	18,5726983	20,75
8-9	0,50711825	0,41065489	29,0557356	23,5287921	26,29
9-10	0,63757296	0,37428904	36,53024	21,4451821	28,99
10-11	0,21533953	0,67499892	12,3380465	38,6745894	25,51
11-12	0,43766464	0,19785366	25,0763366	11,3361794	18,21
12-13	0,17732572	0,27281632	10,1600153	15,631224	12,90
13-14	0,31667275	0,24648259	18,1440119	14,1224119	16,13
14-15	0,29618194	-0,0209235	16,9699754	-1,198831	7,89
15-16	0,24665324	0,02092355	14,1321895	1,19883101	7,67
16-17	0,41001	0,36376582	23,4918424	20,8422465	22,17
17-18	0,37558454	0,40980005	21,5194091	23,4798132	22,50

Tabella 20: Inclinazione tra le sezioni

Dai valori delle pendenze è stato rappresentato l'andamento altimetrico del versante, prendendo in considerazione sia le pendenze di sinistra e destra sia la media.

Si è proceduto nel modo seguente:

- dai valori delle quote della prima sezione si è calcolata la media
 - ✓ esempio per la sezione 1:

$$Z_{sin1} = 62,053 \text{ m}$$

$$Z_{dex1} = 60,403 \text{ m}$$

$$Z_{media1} = \frac{(Z_{sin1} + Z_{dex1})}{2} = 62,229 \text{ m}$$

- sapendo la distanza tra le sezioni (10m), dalla quota dei punti delle sezioni si è sottratta la pendenza trovata per il tratto 1-2 moltiplicato per la distanza (10m), ottenendo così le quote della sezione 2 (Z_{sin2} , Z_{dex2} , e Z_{media2})

$$Z_{sin2} = Z_{sin1} - (10 \cdot Inc_{sin1})$$

$$Z_{dex2} = Z_{dex1} - (10 \cdot Inc_{dex1})$$

$$Z_{media2} = Z_{media1} - (10 \cdot Inc_{media1})$$

- procedendo in questo modo per tutte le sezioni considerate si è ottenuto l'andamento del versante, nel tratto coperto dalle 20 sezioni, in funzione delle pendenze.

Si riportano di seguito i valori ed i diagrammi ottenuti (tabella 21; grafico 6):

Sezioni	Z _{sin} [m]	Z _{media} [m]	Z _{dex} [m]
1	62,054	61,229	60,403
2	55,125	53,645	52,165
3	45,325	47,430	49,534
4	38,555	42,915	47,276
5	32,889	38,119	43,348
6	27,217	35,485	43,754
7	22,769	32,075	41,382
8	18,766	28,453	38,141
9	13,695	23,865	34,034

10	7,319	18,805	30,291
11	5,166	14,354	23,541
12	0,789	11,176	21,563
13	0,789	11,176	18,835
14	-0,984	11,176	16,370
15	-0,984	11,176	16,579
16	-4,151	11,176	16,370
17	-4,151	11,176	12,732
18	-	-	-
19	-	-	-
20	-	-	-

Tabella 21: Quote delle sezioni

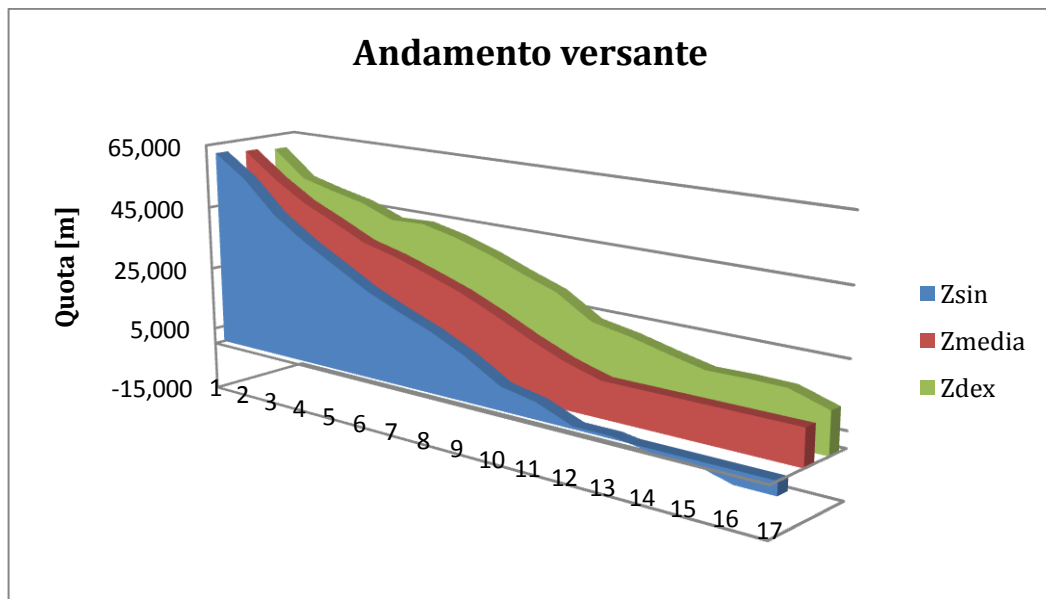


Grafico 6: Andamento del versante in funzione delle pendenze

La ricostruzione del versante in funzione delle pendenze è stata possibile considerando solo le prime 17 sezioni, in quanto non si avevano a disposizione in PhotoModeler punti sulle sezioni 18, 19 e 20, quindi le loro coordinate cartesiane da elaborare. Per i tratti 17-18, 18-19 e 19-20 non è stata quindi possibile una loro rappresentazione sul versante. A tale mancanza si è ovviato avvalendosi delle informazioni apprese direttamente in sito, se pur approssimative. Per il tratto 18-19 si può presupporre abbia una pendenza simile al tratto precedente, intorno ai 22°;

per il tratto 19-20 la pendenza aumenta di molto con un valore prossimo anche ai 40°.

4.4.3 Relazione tra pendenza e D_{50}

Noti il valore della pendenza e del diametro rappresentativo D_{50} delle sezioni, si è mostrato su un unico grafico il loro andamento per cercare di trarre alcune considerazioni (grafico 7); entrambi i parametri sono già stati calcolati tramite l'utilizzo del programma PhotoModelerScanner ed a seguito dell'analisi granulometrica (tabella 22)

sezione	d_{50} [m]	tratto	pendenza [gradi]
1	0,743		
2	1,009	1-2	43,45
3	0,726	2-3	35,61
4	0,692	3-4	25,87
5	0,735	4-5	27,48
6	0,692	5-6	15,09
7	0,758	6-7	19,54
8	0,684	7-8	20,75
9	0,738	8-9	26,29
10	0,695	9-10	28,99
11	0,785	10-11	25,51
12	0,789	11-12	18,21
13	0,747	12-13	12,90
14	0,978	13-14	16,13
15	0,686	14-15	7,89
16	1,022	15-16	7,67
17	0,749	16-17	22,17
18	0,707	17-18	22,50
19	0,746	-	-
20	0,820	-	-

Tabella 22: Relazione tra D_{50} e pendenza

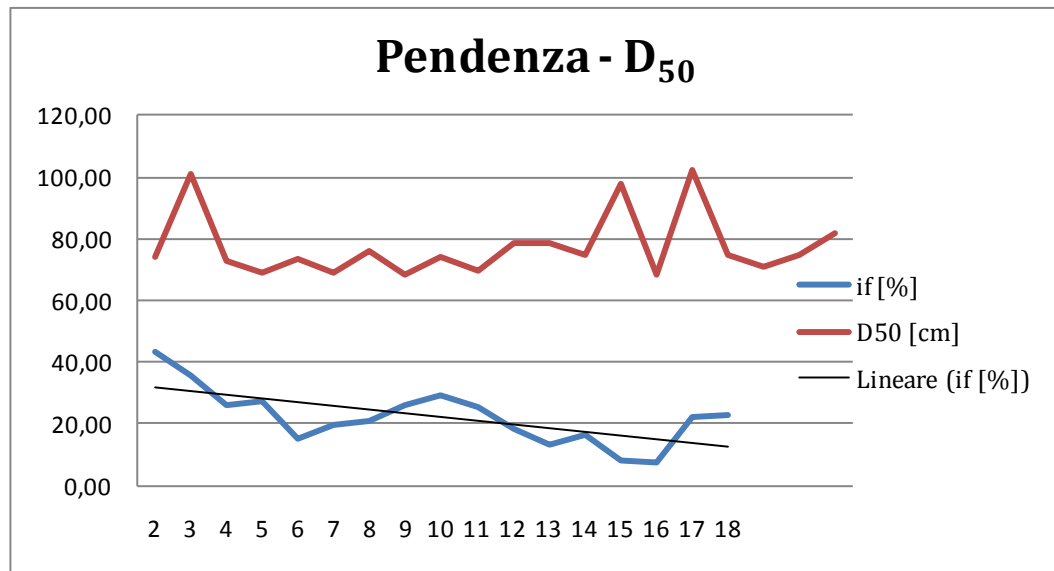


Grafico 7: Pendenza - D₅₀

Osservando i valori delle pendenze risulta evidente come ci siano alti valori per i tratti a monte e via via diminuiscono in modo abbastanza costante procedendo verso valle. In modo visivo si sono attribuiti ai valori delle pendenze dei colori, ognuno con un *range* di valori (tabella 23); anche agli ultimi due tratti è stato attribuito un colore a seguito delle considerazioni precedentemente fatte.

Pendenza	Range	Colore
Bassa	< 10°	Verde
Moderata	10°-20°	Giallo
Rilevante	20°-30°	Arancione
Forte	> 30°	Rosso

Tabella 23: Range delle pendenze

Dai valori rappresentativi del D₅₀ non si osservano valori molto differenti tra le sezioni, tranne che per le sezioni 2 e 16 dove si registrano i valori maggiori nell'ordine del metro circa (D₅₀₍₂₎= 1,009m, D₅₀₍₁₆₎= 1,022m). Per la sezione 1 si ipotizza che il materiale presente provenga dalla soprastante parete rocciosa soggetta a fenomeni di *rock fall*: il materiale distaccatosi a seguito dell'impatto con il versante e del suo rotolamento subisce una diminuzione di dimensione e giunge in prossimità della prima sezione.

La sezione 16 presenta materiale di notevoli dimensioni, e si trova a valle dei due tratti aventi i più bassi valori di pendenza, intorno ai 7°: può quindi essere considerata come una zona di accumulo.

Come conclusione, si sono rappresentati su di un unico grafico i valori delle pendenze, dei D_{50} , dei coefficienti di sfericità (λ), di uniformità (U) e della deviazione standard (σ) (tabella 24; grafico 8).

sezione	d_{50} [m]	U	σ	λ	tratto	pendenza [gradi]
1	0,743	2,324	2,188	0,00083		
2	1,009	2,286	1,476	0,00082	1-2	43,45
3	0,726	3,546	1,841	0,00085	2-3	35,61
4	0,692	2,390	1,508	0,00080	3-4	25,87
5	0,735	1,979	1,393	0,00082	4-5	27,48
6	0,692	1,618	1,283	0,00080	5-6	15,09
7	0,758	2,511	1,545	0,00079	6-7	19,54
8	0,684	1,903	1,371	0,00084	7-8	20,75
9	0,738	1,815	1,343	0,00064	8-9	26,29
10	0,695	1,631	1,288	0,00081	9-10	28,99
11	0,785	3,210	1,749	0,00083	10-11	25,51
12	0,789	1,951	1,386	0,00086	11-12	18,21
13	0,747	2,306	1,482	0,00088	12-13	12,90
14	0,978	1,798	1,341	0,00081	13-14	16,13
15	0,686	2,148	1,439	0,00085	14-15	7,89
16	1,022	1,754	1,327	0,00086	15-16	7,67
17	1,022	1,888	1,366	0,00075	16-17	22,17
18	0,707	3,539	2,092	0,00085	17-18	22,50
19	0,746	3,561	1,988	0,00078	-	-
20	0,820	2,629	1,572	0,00078	-	-

Tabella 24: Parametri conclusivi

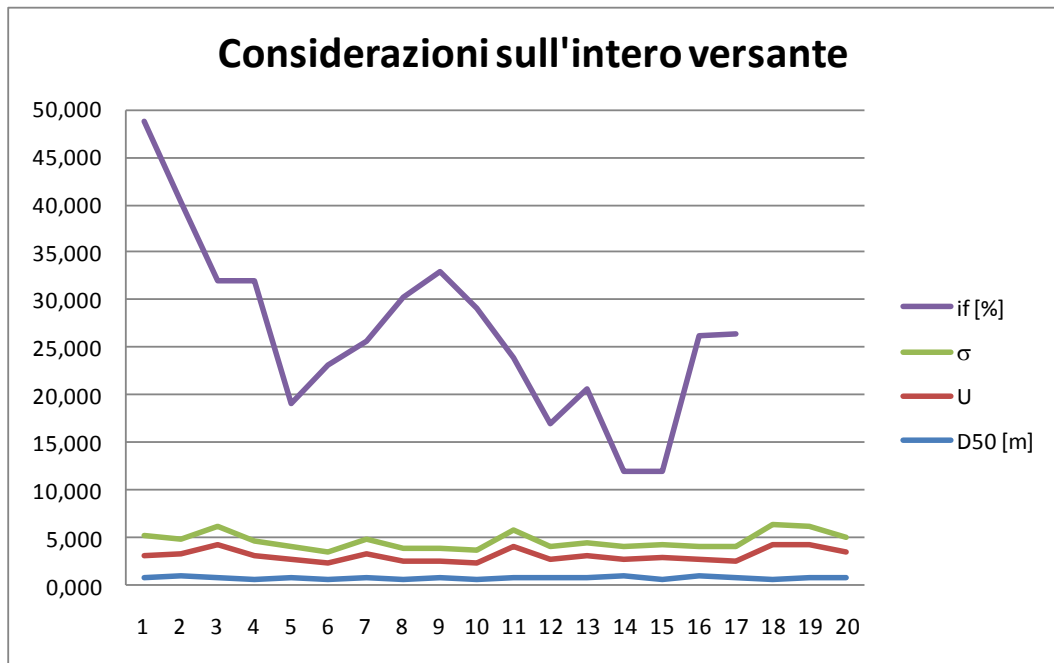


Grafico 8: Confronto tra i parametri sull'intero versante

CAPITOLO 5_ Portate di incipiente movimento e portate di piena su bacini di piccole dimensioni

Si affronta in questo capitolo lo studio delle portate in grado di generare incipiente movimento del materiale depositato sulla Valle del Piscino.

Tali valori teorici saranno poi confrontati con lo studio delle portate idrauliche dovute alle precipitazioni: questo fornirà un grado di conoscenza delle possibili aree soggette a trascinamento.

L'idraulica dedicata allo studio dei canali a pelo libero fornisce differenti formulazioni che modellano l'incipiente movimento, nonché la successiva movimentazione dei clasti lungo la direzione dell'alveo.

Le portate di pioggia sono valutate, sotto l'aspetto idrologico del bacino, rifacendosi al modello di Nash, che considera gli afflussi del bacino sulla base statistica dei dati pluviometrici registrati in passato e i deflussi sulla base dei differenti tempi di ritorno.

5.1 Principi di trasporto solido

Per applicare le basi teoriche dell'idraulica fluviale, il versante è stato considerato come ipotetico alveo con presenza di materiale granulare incoerente, soggetto a possibile trasporto solido di fondo [6].

Si calcolano le portate di un possibile corso d'acqua generate da intense piogge; in seguito si calcola per quali diametri delle particelle può avvenire movimento e si confrontano tali valori coi risultati ottenuti dall'analisi granulometrica (vedi Capitolo4).

La dimensione rappresentativa delle particelle presa in considerazione è definita dal diametro rappresentativo D_{50} per le 20 sezioni in studio.

La geometria di un alveo ricoperto da materiale incoerente non può essere considerata fissa nel tempo: i fenomeni erosivi e le spinte idrodinamiche compiono una continua variazione morfologica con sollevamento, trasporto e deposito di materiale verso valle.

Da un punto di vista fenomenologico, il moto di fondo delle particelle solide, a causa delle forze esercitate dalla corrente, può essere inquadrato con diversi schemi concettuali.

In ogni caso si deve valutare la stabilità della particella in relazione alle forze attive di trascinamento della corrente e alle forze resistive; queste ultime sono dovute al peso immerso della particella medesima ed, eventualmente, al conseguente attrito sul fondo.

A parità di ogni altro parametro, all'aumentare della velocità le azioni fluidodinamiche riescono a vincere le azioni stabilizzanti, mettendo in movimento la particella.

Le condizioni di flusso in cui la particella si trova al limite del movimento vengono indicate come "critiche" o di incipiente movimento: è questa la condizione di interesse per la stima di materiale di trasporto [16].

Esiste un valore minimo del diametro delle particelle (d) al di sotto del quale i clasti vengono trasportati dalla corrente; bisogna inoltre considerare che la presenza di particelle di elevate dimensioni tende a "proteggere" quelle più piccole e, viceversa, una particella grossa, isolata fra particelle di dimensioni minori, espone più superficie alla spinta dell'acqua che nel caso di granulometria uniforme.

5.1.1 Calcolo delle portate di incipiente movimento

In letteratura esistono diverse metodologie per il calcolo della condizione critica in funzione dei dati disponibili e dell'eccedenza fra un parametro caratteristico della corrente e la corrispondente soglia di incipiente movimento.

Nel caso in esame, visti i dati a disposizione, si è presa in considerazione la formulazione di Schoklitsch (1962) che permette il calcolo delle condizioni di moto incipiente in un corso d'acqua montano.

Tale formulazione è tarata per corsi d'acqua ad elevata pendenza: il parametro dominante risulta essere la portata, che, secondo molti autori, risulta di facile misurazione.

L'equazione di Schoklitsch utilizza un fattore rappresentativo della portata liquida critica (q_{cr}) di norma adimensionalizzata come [17]:

$$q_{cr}^* = \frac{q_{cr}}{d\sqrt{g d}}$$

Con:

- q_{cr} : portata critica di incipiente movimento per unità di lunghezza [$m^2 s^{-1}$];
- d : diametro delle particelle solide [m];
- g : accelerazione gravitazionale [$m s^{-2}$].

A seguito di osservazioni sperimentali è risultato come la portata critica adimensionale dipenda principalmente dalla pendenza del fondo del canale.

Secondo Graf (1983) la portata critica adimensionalizzata in funzione della pendenza può essere espressa attraverso l'equazione:

$$q_{cr}^* = 0,1 \cdot i_f^{-1,12}$$

Dove i_f è la pendenza del fondo del corso d'acqua.

5.1.2 Applicazione al Versante del Piscino

Dalle formulazioni di Schoklitsch e Graf, nota la granulometria del versante identificata dal diametro D_{50} delle sezioni, si è valutata la portata comportante movimento di materiale.

Per la rappresentazione granulometrica del materiale detritico, si è preso in considerazione il valore del diametro rappresentativo D_{50} , ottenuto dalle curve granulometriche delle 20 sezioni in cui il versante è stato suddiviso per il campionamento. La costruzione di tali curve granulometriche è stata eseguita con la stessa procedura illustrata nel paragrafo 4.2.3; con la differenza che in questo caso si sono considerate per la loro costruzione solo le classi granulometriche maggiormente rappresentative del versante, ossia quelle con la maggiore frequenza.

Vengono quindi considerate solo le classi 3, 4, 5 e 6 della classificazione di Wentworth, con diametri tra i 64mm e i 1.024mm. La classe 7, seppur presente con una frequenza relativa del 13%, non è stata considerata, per non portare ad una sovrastima del valore del diametro rappresentativo.

Dalle inclinazioni dei vari tratti delle sezioni, precedentemente calcolati grazie all'approccio fotogrammetrico (paragrafo 4.4.1), si è calcolato il parametro adimensionalizzato q_{cr}^* , e successivamente il q_{cr} : tale valore corrisponde alla portata di incipiente movimento.

Il risultato ottenuto ha carattere puntuale e per poterlo riferire all'intera sezione deve essere moltiplicato per l'intera lunghezza.

Si sono seguiti i seguenti passaggi:

1. calcolo del q_{cr}^* utilizzando il valore delle pendenze (i_f) come:

$$q_{cr}^* = 0,1 \cdot i_f^{-1,12}$$

2. calcolo della q_{cr} utilizzando oltre ai parametri già visti anche la lunghezza della sezione (l):

$$q_{cr} = q_{cr}^* \cdot d \cdot \sqrt{g \cdot d} \cdot l$$

I risultati ottenuti vengono riportati in tabella 25.

sezione	l [m]	D ₅₀ [m]	tratto	I _f [%]	q _{cr} [*]	q _{cr} [mc/s]	q _{cr} [l/s]
1	17,00	0,743					
2	20,00	1,009	1-2	96,6	0,000598	0,038	0,598
3	19,00	0,726	2-3	79,1	0,000748	0,028	0,748
4	19,00	0,692	3-4	57,5	0,00107	0,037	1,070
5	19,50	0,735	4-5	61,1	0,001	0,039	1,000
6	18,50	0,692	5-6	33,5	0,001957	0,065	1,957
7	20,00	0,758	6-7	43,4	0,001465	0,061	1,465
8	20,00	0,684	7-8	46,1	0,001369	0,049	1,369
9	14,00	0,738	8-9	58,4	0,00105	0,029	1,050
10	13,00	0,695	9-10	64,4	0,000942	0,022	0,942
11	11,50	0,785	10-11	56,7	0,001087	0,027	1,087
12	16,00	0,789	11-12	40,5	0,001585	0,056	1,585
13	15,50	0,747	12-13	28,7	0,002333	0,073	2,333

14	14,00	0,978	13-14	35,9	0,001815	0,077	1,815
15	10,00	0,686	14-15	17,5	0,004047	0,072	4,047
16	11,50	1,022	15-16	17,0	0,004177	0,156	4,177
17	10,00	0,749	16-17	49,3	0,001272	0,026	1,272
18	14,00	0,707	17-18	50,0	0,001251	0,033	1,251
19	14,00	0,746	-				
20	10,00	0,820	-				

Tabella 25: Calcolo delle portate di incipiente movimento

Si mostrano i valori dei diametri rappresentativi (D_{50}), delle portate di incipiente movimento (q_{cr}) e delle pendenze (i) (grafico 9).

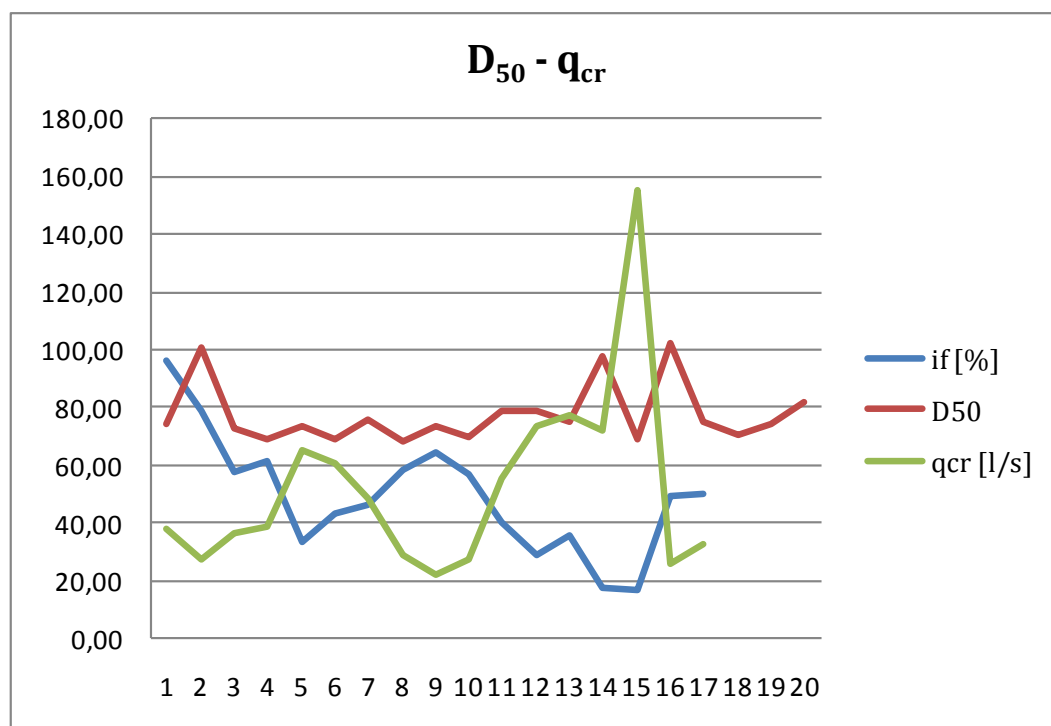


Grafico 9: D_{50} - portata critica

Dal grafico i valori del D_{50} risultano essere dello stesso ordine di grandezza, mantenendosi abbastanza costanti, mentre confrontando i valori delle portate con quelli dell'inclinazione si nota come siano maggiori in corrispondenza dei tratti di minor pendenza.

A parità di granulometria considerata, il valore della portata di incipiente movimento aumenterà con il diminuire della pendenza: portata ed inclinazione sono inversamente proporzionali.

Tale considerazione è in accordo con quanto affermato dalla teoria del trasporto solido di fondo.

5.2 Portate di piena derivanti da eventi meteorici

Si sono calcolate le portate dovute alle piogge per poterle confrontare con quelle che provocano l'incipiente movimento dei grani e, di conseguenza, stimare, in termini di tempo di ritorno, ogni quanto il materiale viene trasportato a valle.

Di particolare interesse è la valutazione delle portate di piena che possono defluire dal bacino idrografico del Piscino, stimando il rischio idrogeologico connesso al possibile fenomeno di *debris flow*.

Le procedure adottabili per stima della portata di piena in un corso d'acqua si differenziano in relazione alla disponibilità di serie storiche di dati idrologici rappresentativi [18].

Il caso più favorevole si ha quando nella sezione di interesse sono disponibili valori di portata misurati per un periodo di osservazione sufficientemente lungo; in queste condizioni l'analisi statistica diretta di frequenza delle piene consente di determinare le stime richieste.

Poiché tale situazione si verifica raramente, in ragione del modesto numero di stazioni di misura esistenti e del ridotto periodo di osservazione disponibile per alcune di esse, nella maggior parte dei casi si è nelle condizioni di dover stimare i valori delle portate di piena con metodi indiretti.

Tra i metodi indiretti si ricordano quelli di trasformazione afflussi-deflussi noti nell'idrologia che permettono il calcolo di deflusso dovute alle piogge.

5.2.1 Modelli afflussi-deflussi

Gli effetti delle caratteristiche del bacino sulla formazione di un deflusso sono legate principalmente al fenomeno del ritardo e dell'invaso [19].

Il ritardo è sostanzialmente legato alla grandezza del bacino: comporta che afflussi provenienti dalla superficie del bacino in punti distanti rispetto alla sezione di chiusura, impieghino un certo tempo per raggiungerla sotto forma di deflusso; l'entità del ritardo dipende dalle caratteristiche geomorfologiche, dalla vegetazione e dalle condizioni di umidità dei suoli.

Il fenomeno dell'invaso è legato all'attitudine del bacino di immagazzinare l'acqua e rilasciarla successivamente: dipende dalle caratteristiche fisiche del bacino e da quelle delle particelle che lo costituiscono.

L'insieme dei processi che concorrono alla formazione degli afflussi meteorici in deflussi possono essere rappresentati mediante un diagramma a blocchi, schematizzante il ciclo idrologico (figura 42).

Dall'osservazione dei processi idrologici, che determinano portate in ingresso e in uscita da ciascun blocco, si conferma la seguente equazione di continuità: la differenza, in un assegnato intervallo di tempo, tra il volume di acqua che si infiltra nel suolo (Q_i) e quello che vi esce (Q_o), deve eguagliare la variazione del volume di acqua accumulatosi al suo interno (ΔV).

Analiticamente:

$$Q_i - Q_o = \Delta V$$

La fase di "uscita" dell'acqua dal suolo avviene a seguito di scorrimento ipodermico, ricarica degli acquiferi profondi ed evaporazione dal suolo.

Il fenomeno afflussi-deflussi potrebbe essere descritto matematicamente come segue: maggiore il numero di variabili considerate, migliori e attendibili i risultati a seguito di un'accurata analisi.

Stante la complessità di un tale modello, che risulterebbe eccessivamente oneroso rispetto alle stime desiderate, si fa riferimento a modelli concettuali, che schematizzano in via semplificata il comportamento del bacino idrografico o di sottobacini, col vantaggio di ridurre enormemente il numero di parametri da stimare, riducendo di significato fisico i parametri che vi compaiono.

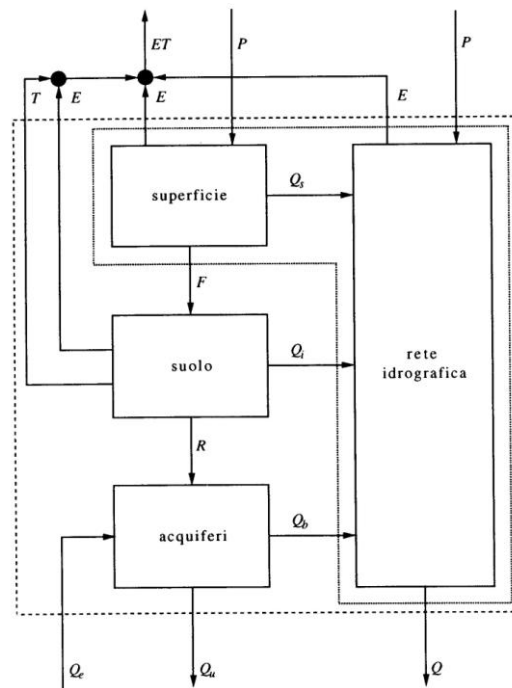


Figura 42: Schematizzazione del fenomeno di afflusso - deflusso

I modelli più semplici sono i modelli di piena, il cui obiettivo è la modellazione del deflusso di pioggia trasformando un idrogramma in ingresso in un idrogramma in uscita.

I modelli di piena proposti in letteratura hanno in comune la stazionarietà e la linearità e servono per simulare l'effetto del bacino sulla pioggia netta fino alla sezione di chiusura del bacino stesso.

L'input è costituito dalle piogge nette, ovvero da ciò che resta delle piogge dopo la sottrazione operata dalle perdite idrologiche.

Si possono avere:

- modelli distribuiti, in cui tutte le grandezze sono variabili nello spazio e nel tempo;
- modelli globali, nei quali le grandezze risultano essere variabili solo rispetto al tempo.

5.2.2 Scelta del modello di Nash

Scopo dell'applicazione di tali modelli è il calcolo della portata di piena partendo dallo ietogramma in ingresso, ottenuto dallo studio dei dati pluviometrici, per il bacino di interesse.

Viene utilizzato un modello per la trasformazione afflussi-deflussi di tipo globale, ipotizzando che:

1. tutte le grandezze sono considerate variabili solo nel tempo e non nello spazio;
2. la risposta del bacino è lineare e stazionaria;
3. bastano pochi parametri a rappresentare la risposta del bacino;
4. tali parametri devono comunque essere in grado di rappresentare in modo concettuale i principali fenomeni fisici che caratterizzano la risposta del bacino.

Tra i modelli globali presenti in letteratura è stato deciso di utilizzare il modello di Nash: tale modello schematizza il bacino come costituito da n serbatoi lineari posizionati in serie, i cui parametri di base sono il numero e la costante d'invaso dei serbatoi.

Il modello parte dal calcolo del tempo di risposta del bacino, o tempo di corrivazione t_r , espresso in ore, che per bacini naturali è espresso dalla formula di Giandotti:

$$t_r = \frac{4 \cdot \sqrt{A} + 1,5 \cdot L}{0,8 \cdot \sqrt{(H_m - H_0)}}$$

Con:

- A: area del bacino [km²];
- H_m : altezza media del bacino [m];
- H_0 : altezza della sezione di chiusura del bacino [m];
- L: lunghezza dell'asta principale [km].

Mentre la costante d'invaso k è data da:

$$k = \frac{0,5 \cdot t_c}{(N - 1)}$$

Con:

- t_c : tempo di corrivazione [ore];
- N : numero di invasi.

Il calcolo della portata di pioggia, come accennato, è basato sull'analisi dei dati pluviometrici per il bacino in esame: dai valori massimi registrati si calcolano i parametri del modello in funzione del tempo di ritorno considerato.

I parametri, statisticamente calcolabili, sono forniti dall'Autorità di Bacino del Fiume Po di Parma che ha redatto il "Piano di stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI), interventi sulla rete idrografica e sui versanti" [20]: all'interno di esso il bacino del Po è mappato in zone, ognuna delle quali identificata con un codice alfanumerico; per ogni zona vengono riportati i parametri tipici a e n , per differenti periodi di ritorno: 20 anni, 100 anni, 200 anni e 500 anni.

I parametri vengono utilizzati per il calcolo del tempo critico (θ_{cr}) e della rispettiva intensità di pioggia (i), attraverso le equazioni:

$$\theta_{cr} = k \cdot c(n)$$

$$i = a \cdot \theta_{cr}^{(n-1)}$$

Con $c(n)$ una funzione per il calcolo del tempo critico che massimizza la portata.

La pioggia che giunge al suolo (pioggia lorda), viene trasformata in pioggia netta attraverso il modello CN (Curve Number), sviluppato per il servizio e la conservazione del suolo dal Dipartimento dell'Agricoltura; tale modello descrive il fenomeno di infiltrazione sotto l'ipotesi semplificativa del reale comportamento fisico.

$$p_n = \frac{(p_t - I_a)^2}{p_t - I_a + S}$$

Con:

- S : volume massimo che può essere trattenuto dal terreno come funzione della sua permeabilità, espressa dal CN;
- I_a : astrazione iniziale dovuta al fenomeno di intercettazione ed infiltrazione;
- p_t : pioggia totale in arrivo sul bacino.

Con S e I_a calcolati come:

$$S = 254 \cdot \left(\frac{100}{CN} - 1 \right)$$

$$I_a = 0,2 \cdot S$$

Il CN rappresenta l'attitudine di una porzione di territorio a produrre deflusso, e può essere calcolato in modo indiretto sulla base delle caratteristiche geopedologiche e vegetazionali del bacino stesso: il CN può variare tra zero e 100 e sarà proporzionale alla capacità del suolo di produrre deflusso (per esempio i laghi hanno sempre CN uguale a 100 perché tutta la precipitazione caduta su un lago si trasforma in deflusso). I valori di CN vengono ricavati da tabelle ed adattamenti in letteratura.

Dalla pioggia netta si ricava un valore di portata per mezzo della trasformazione afflussi-deflussi, in cui la portata è espressa dall'integrale di convoluzione:

$$q(t) = \int_0^t p_n IUH(t - \tau) d\tau$$

Dove

$$IUH = \frac{1}{k \cdot T(N)} \cdot \left(\frac{t}{k} \right)^{N-1}$$

L'IUH (Idrogramma Unitario Istantaneo) rappresenta l'idrogramma di risposta di un bacino a una pioggia netta impulsiva di volume unitario. Fisicamente può essere interpretato come la probabilità che una particella, precipitata all'istante iniziale in un punto qualsiasi del bacino, attraversi la sezione di chiusura al tempo t .

Considerando un istogramma rettangolare a costante intensità di pioggia, si ottiene il rispettivo idrogramma delle portate, dal quale ricavare il valore di portata massimo raggiungibile, in funzione dell'intensità di pioggia e dei rispettivi tempi di ritorno.

5.2.3 Applicazione e risultati del modello

Il calcolo delle portate nette, sulla base dei dati a disposizione, è stata svolta per vari i tempi di ritorno 20 anni, 100 anni, 200 anni e 500 anni.

Il calcolo dei dati di input per il modello, quali l'area, la lunghezza dell'asta principale e le quote media e di chiusura del bacino, sono stati misurati utilizzando il software ArcMap e risultano:

- $A = 0,5 \text{ km}^2$;
- $L = 1,6 \text{ km}$;
- $H_m = 1.400 \text{ m s.l.m.}$;
- $H_0 = 1.164 \text{ m s.l.m.}$

Con tali valori si è potuto calcolare il tempo di corrivazione:

$$t_c = 0,425 \text{ ore}$$

Avendo stabilito un numero di invasi lineari pari a 2 ($N=2$), la costante di invaso k è risultata pari a:

$$k = 0,273$$

Per l'attribuzione del parametro CN si fa riferimento alla letteratura di Hoggan e Ranzi (tabelle 26) per i quattro tipi idrologici di suolo (A, B, C e D):

- A: elevata infiltrazione per suoli con strati sabbiosi o di loess profondi, a siltosi aggregati (diametro 0,002mm-0,05 mm);
- B: infiltrazione moderata, per suoli con tessitura da moderatamente fine a moderatamente grossolana, quali limi sabbiosi;
- C: infiltrazione lenta, per suoli con tessitura fine, quali argille limose, deboli strati di limo sabbioso, suoli con debole contenuto organico;
- D: infiltrazione molto lenta, per argille plastiche e compatte.

USO DEL SUOLO	CN			
	TIPO A	TIPO B	TIPO C	TIPO D
Aree non classificate	60	60	60	60
Faggeti	35	60	73	79
Castagneti	35	60	73	79
Querceti	35	60	73	79
Conifere + Latifoglie	35	60	73	79
Conifere	35	60	73	79

Rimboschimenti affermati	35	60	73	79
Rimboschimenti recenti	43	65	76	82
Latifoglie miste	35	60	73	79
Pioppeti	43	65	76	82
Arbusteti	35	56	70	77
Pascoli	49	69	79	84
Seminativi e prati avvicendati	64	75	83	85
Seminativi con prevalenza di melograno	62	75	82	85
Risaie	90	90	90	90
Prati permanenti	30	58	71	78
Vigneti, Frutteti e Nocciolieti	70	79	84	88
Incolti	68	79	86	89
Rupi e pascoli rupestri, letto di fiumi, calanchi, frane, etc.	68	79	86	89
Misto prati permanenti + Seminativi mais, grano	64	75	83	85
Misto Seminativi e prati avvicendati + Prati permanenti	64	75	83	85
Misto Prati permanenti + Vigneti, Frutteti e Nocciolieti	64	75	83	85
Lagni	100	100	100	100
Aree urbanizzate	77	85	90	92

Tabella 26: Calcolo del coefficiente CN

Si sceglie di considerare un valore di CN di 60.

I parametri di taratura del modello a e n , sono stati presi dal PAI, e per diversi periodi di ritorno:

	a	n
T_r=20 anni	30,25	0,383
T_r=100 anni	38,87	0,370
T_r=200 anni	42,56	0,365
T_r=500 anni	47,43	0,361

Dalle equazioni viste nel paragrafo precedente i valori di S e I_a , costanti per tutti i diversi tempi di ritorno sono risultati pari a:

$$S = 93,95 \text{ mm}$$

$$I_a = 18,79 \text{ mm}$$

In base a tali parametri e con le formulazioni già viste si sono ottenuti i seguenti valori di intensità di pioggia (i), durata critica (θ), portate (Q), ed i rispettivi istogrammi ed ideogrammi (tabella 27).

	θ_{cr} [ore]	i [mm/ora]	Q_{max} [m ³ /s]
T=20	0,5973577	41,570833	0,18109695
T=100	0,5888717	54,262715	0,60478080
T=200	0,5855661	59,784820	0,84702195
T=500	0,5829830	66,957468	1,20082885

Tabella 27: Tempo critico, intensità di pioggia e portate, massime

5.3 Confronto tra le portate di incipiente movimento e quelle di deflusso

I valori delle portate di incipiente movimento, che portano al movimento di una certa granulometria di materiale, ottenute nel paragrafo 5.1.2, vengono confrontati con quelli provenienti dal deflusso superficiale delle piogge ottenuti nel paragrafo 5.2.3.

Questo confronto porterà a stabilire se le precipitazioni gravanti sul sottobacino del Piscina siano in grado di movimentarne il materiale granulare di copertura superficiale e con quale periodo di ritorno.

Ogni valore massimo di deflusso superficiale delle piogge, ossia la portata massima per differenti periodi di ritorno (20 anni, 100 anni, 200 anni e 500 anni), è stata relazionata alle portate di incipiente movimento (q_{cr}) (tabella 28).

CAPITOLO 5_ Portate di incipiente movimento ed intensità di pioggia

sezione	q _{cr} [mc/s]	Q _{max} (T= 20 anni) [mc/S]	Q _{max} (T= 100 anni) [mc/S]	Q _{max} (T= 200 anni) [mc/S]	Q _{max} (T= 500 anni) [mc/S]
1	0,000829	0,181096954	0,604780787	0,847021951	1,200828853
2	0,001645	0,181096954	0,604780787	0,847021951	1,200828853
3	0,002542	0,181096954	0,604780787	0,847021951	1,200828853
4	0,003197	0,181096954	0,604780787	0,847021951	1,200828853
5	0,00408	0,181096954	0,604780787	0,847021951	1,200828853
6	0,004802	0,181096954	0,604780787	0,847021951	1,200828853
7	0,005497	0,181096954	0,604780787	0,847021951	1,200828853
8	0,006706	0,181096954	0,604780787	0,847021951	1,200828853
9	0,005719	0,181096954	0,604780787	0,847021951	1,200828853
10	0,008079	0,181096954	0,604780787	0,847021951	1,200828853
11	0,009113	0,181096954	0,604780787	0,847021951	1,200828853
12	0,01032	0,181096954	0,604780787	0,847021951	1,200828853
13	0,0114	0,181096954	0,604780787	0,847021951	1,200828853
14	0,011405	0,181096954	0,604780787	0,847021951	1,200828853
15	0,012727	0,181096954	0,604780787	0,847021951	1,200828853
16	0,013823	0,181096954	0,604780787	0,847021951	1,200828853
17	0,012732	0,181096954	0,604780787	0,847021951	1,200828853

Tabella 28: Confronto fra portate di incipiente movimento e portate di deflusso superficiale

Dalla tabella 28, si nota come il valore delle portate dei deflussi, per i diversi tempi di ritorno considerati, risulti essere maggiore dei valori relativi alle portate di incipiente movimento per la granulometria considerata; la quale risulta avere una media di 77,5cm.

Si evince come il materiale granulare coprente la Valle del Piscino possa, secondo l'analisi svolta, raggiungere il fondo del versante stesso in un periodo di ritorno pari a 20 anni.

L'ingente quantitativo di materiale che può riversarsi lungo il versante, può giungere fino ai suoi piedi e fermarsi, oppure andare a riversarsi nell'alveo del torrente Tartano, ostruendone il normale flusso e provocando il fenomeno di trasporto solido in alveo e le possibili conseguenti inondazioni.

A seguito di tale affermazione, e a conclusione dell'intero lavoro, risulta evidente come il rischio idrogeologico in tale parte del bacino risulti essere di rilevante problematicità.

Conclusioni finali

Il rischio idrogeologico è strettamente connesso alla natura del territorio e si presenta principalmente sotto diverse tipologie: frane, esondazioni, dissesti morfologici di carattere torrentizio e trasporto di massa lungo le conoidi.

Fra queste tipologie un ruolo fondamentale viene rappresentato dai sedimenti, dalla loro presenza, dalle loro dimensioni e dalla loro tendenza alla mobilità, soprattutto in un ambiente montano, data la particolare morfologia del territorio e la presenza di un ingente quantitativo di materiale detritico.

Lo studio dell'erosione dai versanti è un argomento complesso, in quanto le variabili in gioco (geometrie e diametri dei sedimenti, pendenza e morfologia del versante) hanno un elevato campo di variazione. Non esistono criteri assoluti per il calcolo di tale erosione dai versanti, ma solo di formulazioni e modelli, i cui vari parametri vengono opportunamente calibrati.

Il lavoro svolto si può dividere in due parti principali: un'analisi a grande scala, a scala di bacino e un'analisi a piccola scala, considerando un lineamento tettonico del bacino stesso.

Per quanto riguarda l'area di indagine, la scelta è ricaduta sul bacino del Tartano, ubicato nella provincia di Sondrio, sul versante Valsassinese delle Alpi Orobie, con una lunghezza complessiva di 15km. L'omonimo fiume è un affluente di sinistra del fiume Adda, e vi confluisce poco a monte del centro abitato di Talamona.

Dal punto di vista morfologico la Valle risulta essere di origine glaciale, e successivamente incisa dall'azione delle acque fluviali, con scarpate rocciose alte 200m, e versanti con pendenze superiori ai 35°.

Sul bacino, che ha una superficie di 56km², affiorano rocce metamorfiche appartenenti alla formazione degli Gneiss di Morbegno, ed è ricoperto da depositi superficiali di origine glaciale a loro volta ricoperti da detriti di versante, a testimoniare l'intenso dissesto idrogeologico in atto sul bacino.

Il reticolo idrografico è costituito nella parte superiore da due rami, il Val lunga, con lunghezza pari a 4.355m, ed il Val Corta lungo 1.915m, che confluiscono in località Biorca nelle vicinanze dell'abitato di Tartano. Da tale punto in poi il torrente scorre incanalato fino alla stretta di Colombera, sotto l'abitato di Campo di Tartano, dove è sbarrato dalla diga di Campo, considerata sezione di interesse per la stima del materiale trasportato verso valle dal fiume stesso. A valle della diga, scorre ai piedi

di versanti con notevoli pendenze, fino a formare un'ampia conoide a monte della confluenza con l'Adda.

A seguito di studi da parte della Comunità Montana della Valtellina di Morbegno e della Regione Lombardia, è stato possibile suddividere e quantificare le zone del bacino interessate da varie tipologie di dissesto. Si è riscontrata la presenza di:

- aree ad elevata instabilità: 1,53km² (per esempio il versante della Pruna e della Foppa dell'Orso);
- aree potenzialmente instabili: 7,12km²;
- tratte dell'asta principale in erosione attiva: 6.187m;
- tratte degli affluenti con erosione attiva: 5.750m.

Inizialmente il lavoro si è concentrato sulla perdita di sedimenti dai versanti, a scala di bacino, per determinare la volumetria dei sedimenti potenzialmente instabili sui versanti.

Tra le diverse formulazioni proposte in letteratura si è scelto l'utilizzo dei modelli di Gavrilovic, USLE e RUSLE: modelli empirici, basati esclusivamente su equazioni matematiche, tarate su differenti bacini.

Gavrilovic ha fornito un valore di discarica del materiale eroso a livello di bacino, attraverso l'utilizzo di coefficienti che prendono in considerazione le caratteristiche fisiche della zona in esame ed altri che descrivono la copertura e la resistenza del suolo e la tipologia e l'estensione dell'erosione.

USLE e RUSLE invece sono stati tarati per analizzare singole parti del terreno e, a partire dai risultati per queste parti, forniscono il risultato di perdita di suolo media annua per tutta la zona considerata.

I risultati ottenuti dall'applicazione dei modelli sono stati poi confrontati tra loro, con i dati ricavati direttamente in sito ed infine con quelli di un precedente lavoro mettendo in evidenza le diversità operative e concettuali.

E' proprio su quest'ultimo motivo che fonda le basi questo lavoro: si è cercato di eliminare, per quanto possibile, la soggettività legata alla discrezione dell'operatore che esegue la stima di scegliere i parametri. Infatti l'innovazione apportatavi sta proprio nel metodo di stima: l'attribuzione dei coefficienti viene fatta pesando il valore dell'area a cui si riferiscono, sull'intera area del bacino.

I risultati ottenuti risultano per questo motivo più accurati e precisi.

Si evince, come il più accurato sia risultato essere quello di Gavrilovic, avvicinandosi maggiormente alla realtà del fenomeno erosivo in esame, che quindi fornisce risultati molto vicini a quelli ricavati direttamente sul bacino del Tartano. L'affidabilità del risultato è dovuta sia al fatto che il modello è stato concepito per un'analisi a livello di bacino, sia perché i parametri su cui si basa sono stati tarati su zone simili a quella considerata (Balcani e Alpi Svizzere).

L'applicazione dei modelli di calcolo, ed il calcolo dei suoi parametri, è stata possibile utilizzando la cartografia disponibile, ed, in particolare, il modello digitale del terreno DEM da cartografia in scala 1:10.000, elaborata attraverso il programma ArcMap. Inoltre di fondamentale importanza sono state le precise informazioni sul territorio in esame per quanto riguarda la composizione e la destinazione d'uso.

Una volta conclusa questa prima fase si è proseguito con l'analizzare una delle faglie laterali attive del bacino, essendo la Valle del Tartano intensamente tettonizzata. La scelta di quale tra i vari lineamenti tettonici analizzare è ricaduta sulla Valle del Piscino.

La valle del Piscino è ubicata poco più a valle della confluenza tra il Val Lunga ed il Val Corta, nei pressi dell'Abitato di Biorca, posizionata sulla sinistra idrografica, con una pendenza media di 35°, tipico valore di tutte le valli del Tartano.

Tale valle di dimensioni modeste, circa 300m di lunghezza e 20m di larghezza, è ricoperta per la sua totalità da materiale granulare di differenti dimensioni potenzialmente instabili, che potrebbero provocare eventi franosi del materiale stesso.

La parte più a monte vede la presenza di materiale distaccatosi dalla soprastante parete a seguito di fenomeni di *debris flow*.

Si è analizzato il versante dal punto di vista dei possibili spostamenti avvenuti durante il periodo di studio, dal 15 luglio 2010 al 3 agosto 2010, attraverso l'acquisizione di immagini con la tecnica fotogrammetrica. Le foto analizzate da un algoritmo implementato in ambiente Matlab hanno portato al seguente risultato: non si sono registrati spostamenti di materiale nella parte più a monte del versante, mentre la parte a valle vede due modesti cambiamenti, non stimati però quantitativamente. In questa fase la problematica è dovuta all'illuminazione del versante durante la fase di acquisizione del blocco fotogrammetrico, che ha portato a dei "falsi positivi", ossia dei "falsi spostamenti".

Il versante è stato analizzato rispetto alla volumetria del materiale instabile e alla rispettiva granulometria; a seguito della mancanza di informazioni sulle dimensioni dei clasti è stata condotta un'analisi granulometrica.

L'analisi granulometrica parte da una fase di campionamento, che in base al tipo di campione da analizzare si divide in: areale, con griglia e lineare.

Per la Valle del Piscino si è deciso di utilizzare la metodologia lineare, cioè quella che era in grado di coprire l'intera estensione del versante, sia lungo la lunghezza sia lungo la larghezza.

Il campionamento lineare prevede la raccolta di tutti i grani situati lungo una linea predeterminata. In questo caso il volume del campione dipende dagli assi maggiore e minore delle particelle normali alla linea. L'operazione di campionamento si è svolta in data 31 luglio 2010, stabilendo in primo luogo la distanza in base alla quale considerare il clasto incontrato lungo la linea guida ed in secondo luogo la distanza tra le sezioni, attraverso le quali riuscire a coprire l'intero versante. In totale si sono eseguite 20 sezioni distanti l'una dall'altra 10m. I clasti considerati distavano 50cm.

Dalla misura degli assi dei grani si è ottenuto il rispettivo diametro equivalente, avendo ipotizzato la particella di forma sferica.

Per un'analisi delle dimensioni delle particelle, utilizzando la classificazione di Wentworth che suddivide le particelle in 9 classi granulometriche, si è attribuito a ciascun clasto la classe di appartenenza. Per ogni sezione e rispetto all'intero versante, si sono ottenute le frequenze relative delle classi granulometriche, con la costruzione degli istogrammi rappresentativi.

Si è evidenziato come la maggior parte del materiale granulare di copertura presenti un diametro tra i 64mm e i 2.048mm, con una significativa percentuale di materiale con diametro tra i 256mm e i 1.024mm.

Di ogni sezione è stata costruita la rispettiva curva granulometrica, dalla quale si ottengono alcuni parametri utilizzati per il calcolo dell'omogeneità del materiale lungo il versante. Si sono calcolati: il diametro rappresentativo (D_{50}), la deviazione standard (σ), il coefficiente di sfericità (λ) ed il fattore di uniformità (U). Tali parametri, ricavabili da formule matematiche, sulla base di diversi valori dei diametri della curva granulometrica in funzione della percentuale passante, assumono valori pari all'unità nel caso di campione uniforme.

Dai dati ottenuti dalle curve granulometriche delle 20 sezioni, si è osservato come i valori del diametro rappresentativo tendano a diminuire procedendo verso valle, seppur in minima entità: si ha un massimo di 1,646m in corrispondenza della

sezione 6 ed un minimo di 85cm in corrispondenza della sezione 18. Inoltre il materiale granulometrico è risultato essere abbastanza omogeneo.

Dalla frequenza delle classi granulometriche sull'intero versante, il calcolo della percentuale in peso di volume delle classi è stato eseguito prima con il modello del cubo di Kellerhals e Bray e successivamente con quello del cubo modificato di Displas e Sutherland. In termini di risultati il modello del cubo modificato, dovrebbe fornire risultati migliori, in quanto considera i vuoti delle particelle.

Entrambi i modelli si basano su formulazioni matematiche, i cui fattori dipendono dalla metodologia con la quale è stato eseguito il campionamento: se areale, con griglia o lineare.

In entrambi i modelli si sono ottenuti degli errori: nel caso del modello del cubo solo del 6%, mentre per il cubo modificato del 40%. Il primo errore è dovuto essenzialmente all'approssimazione effettuata per la classe granulometrica 9; il secondo, oltre che all'approssimazione, anche al fatto che tale modello è tarato solo per campionamenti di tipo areale. Si ricorda infatti come non esistano formulazioni per il passaggio tra le diverse tecnologie di campionamento.

Si è proceduto con il confronto tra i diametri rappresentativi delle 20 sezioni (D_{50}) e le pendenze tra le stesse sezioni.

Tali pendenze, calcolate tramite l'utilizzo del programma PhotoModelerScanner, sono risultate di alti valori, caratteristica di tutti i versanti del Tartano. Le pendenze variano tra un massimo di $43,45^\circ$ ed un minimo, ma solo per due sezioni consecutive, di circa 7° . Osservando i valori delle pendenze risulta evidente come ci siano alti valori per i tratti a monte che via via diminuiscono in modo abbastanza costante procedendo verso valle. Inoltre non si notano zone di rilevante accumulo di materiale, ma solo materiale di maggiore granulometria, dell'ordine del metro, a monte delle due sezioni di minor pendenza.

Nota la granulometria del versante, identificata tramite il D_{50} delle 20 sezioni, e basandosi sui principi dell'idraulica fluviale, si è calcolata la portata di incipiente movimento per le differenti granulometrie: la portata cosiddetta critica.

Tale calcolo è stato possibile utilizzando le formulazioni proposte da Schoklitsch e da Graf, che permettono il calcolo della portata critica solo in funzione del diametro delle particelle e della pendenza del versante sulle quali si trovano tali particelle. Il valore del diametro rappresentativo avviene a seguito delle costruzioni delle curve granulometriche considerando solo le classi dalla 3 alla 6 della classificazione di Wentworth, ossia con dimensioni delle particelle tra i 64mm e i 1.024mm. Le

pendenze risultano invece essere quelle già ottenute con PhotoModelerScanner. Tali portate di incipiente movimento tendono ad aumentare procedendo verso valle, ossia con il diminuire della pendenza; con un valore medio di $0,052\text{m}^3/\text{s}$, ossia 52l/s . Inoltre, vista la rilevante pendenza del versante stesso, il materiale si trova già di per sé in condizioni instabili: quindi è sufficiente anche un valore non elevato di spinta (spinta esercitata dal flusso formatosi lungo il versante) per movimentare il materiale.

I valori delle portate di incipiente movimento sono state infine confrontate con i valori delle portate ottenute dal deflusso superficiale delle piogge, per differenti tempi di ritorno (20 anni, 100 anni, 200 anni e 500 anni). Il calcolo di queste ultime portate è stato effettuato attraverso un modello di afflussi-deflussi, più precisamente il modello di Nash. Tale modello considera dati morfologici del bacino e parametri calibrati in funzione dei dati di pioggia registrati in base al tempo di ritorno, e ha come ipotesi di base quella che tutte le grandezze sono considerate variabili solo nel tempo e non nello spazio. Tali parametri di calibrazione, di solito calcolati su base statistica, per una più veloce ed efficace operatività, si sono ricavati dal “Piano di stralcio per l’Assetto Idrogeologico (PAI), interventi sulla rete idrografica e sui versanti” redatto dall’Autorità di Bacino del Fiume Po.

L’input del modello è costituito dalle piogge nette, ovvero da ciò che resta delle piogge dopo la sottrazione operata dalle perdite idrologiche, calcolate in funzione di tipo e copertura del suolo in base a tabelle fornite normalmente in letteratura.

Infatti, la pioggia che giunge al suolo (pioggia lorda), viene trasformata in pioggia netta attraverso il modello CN (Curve Number), sviluppato per il servizio e la conservazione del suolo dal Dipartimento dell’Agricoltura; tale modello descrive il fenomeno di infiltrazione sotto l’ipotesi semplificativa del reale comportamento fisico.

Dalla pioggia netta si ricava un valore di portata per mezzo della trasformazione afflussi-deflussi, con il rispettivo idrogramma ed il valore di picco della portata.

Ogni valore massimo di deflusso superficiale delle piogge, ossia la portata massima per differenti periodi di ritorno (20 anni, 100 anni, 200 anni e 500 anni), è stata relazionata alle portate di incipiente movimento. Il valore delle portate provenienti dai deflussi risulta essere maggiore di quello relativo alle portate di incipiente movimento, con la conseguenza che il materiale del Piscina può raggiungere il fondo del versante stesso in un tempo che consideriamo abbastanza breve, ossia ogni 20 anni.

CONCLUSIONI

Risulta evidente come tale versante sia estremamente soggetto a erosione, cioè movimento del materiale di copertura granulare, con un alto fattore legato al rischio idrogeologico. Per questo motivo, visti i dati ottenuti, si dovrà, in un futuro non molto lontano, provvedere alla messa in sicurezza del versante, impedendo il movimento del materiale, sia ai fini della sicurezza dei danni provocati direttamente dal possibile crollo del materiale, sia per i danni connessi ad una possibile esondazione del Tartano a causa dell'ostruzione del suo normale defluire.

Appendice A

Nell'appendice A sono mostrati dati, risultati e diagrammi riguardanti la parte dedicata all'analisi granulometrica del versante, come spiegato nel Capitolo 2.

Delle 20 sezioni in cui è stato diviso il versante per il campionamento, si sono riportati in primo luogo i valori dei diametri equivalenti delle particelle ordinate in modo crescente e la rispettiva attribuzione della classe di appartenenza secondo la classificazione di Wentworth.

A.1 Valori ottenuti dal campionamento con transetto

Si è già descritto all'interno del paragrafo 4.1 come alla base dell'analisi granulometrica ci sia il campionamento del versante ottenuto tramite la tecnica del transetto.

Dai valori misurati dei due assi tramite la media aritmetica si è ottenuto il valore del diametro equivalente medio dei grani (D_{eq}); in questo paragrafo si riportano tali valori.

Sezione 1					Sezione 2				
passo	asse _{max}	asse _{min}	D_{eq} [cm]	D_{eq} [mm]	passo	asse _{max}	asse _{min}	D_{eq} [cm]	D_{eq} [mm]
0	58	23	40,5	405	0	120	41	80,5	805
0,5	5	5	5	50	0,5	16	13	14,5	145
1	80	70	75	750	1	52	52	52	520
1,5	3	3	3	30	1,5	70	55	62,5	625
2	60	50	55	550	2	28	25	26,5	265
2,5	10	10	10	100	2,5	47	33	40	400
3	42	27	34,5	345	3	30	18	24	240
3,5	38	30	34	340	3,5	20	37	28,5	285
4	18	11	14,5	145	4	42	76	59	590
4,5	55	50	52,5	525	4,5	20	15	17,5	175
5	25	15	20	200	5	88	30	59	590
5,5	3	3	3	30	5,5	25	10	17,5	175
6	28	20	24	240	6	100	80	90	900
6,5	8	8	8	80	6,5	-	-	-	-
7	61	26	43,5	435	7	10	10	10	100
7,5	5	5	5	50	7,5	25	10	17,5	175
8	75	40	57,5	575	8	15	15	15	150
8,5	160	120	140	1400	8,5	56	44	50	500
9	-	-	-	-	9	145	105	125	1250
9,5	-	-	-	-	9,5	50	25	37,5	375
10	-	-	-	-	10	3	3	3	30
10,5	48	30	39	390	10,5	45	30	37,5	375
11	110	100	105	1050	11	400	400	400	4000
11,5	-	-	-	-	11,5	-	-	-	-
12	-	-	-	-	12	-	-	-	-
12,5	150	90	120	1200	12,5	-	-	-	-
13	25	13	19	190	13	-	-	-	-
13,5	40	35	37,5	375	13,5	10	5	7,5	75
14	20	16	18	180	14	40	30	35	350
14,50	50	45	47,5	475	14,5	105	85	95	950
15,00	30	30	30	300	15	70	58	64	640
15,50	160	120	140	1400	15,5	200	130	165	1650

APPENDICE A

16	-	-	-	-
16,5	110	80	95	950
17	120	80	100	1000

16	65	20	42,5	425
16,5	170	135	152,5	1525
17	-	-	-	-
17,5	-	-	-	-
18	100	45	72,5	725
18,5	25	20	22,5	225
19	150	140	145	1450
19,5	-	-	-	-
20	45	40	42,5	425

Sezione 3

passo	asse _{max}	asse _{min}	D _{eq} [cm]	D _{eq} [mm]
0	39	35	37	370
0,5	80	65	72,5	725
1	50	35	42,5	425
1,5	18	7	12,5	125
2	5	5	5	50
2,5	20	15	17,5	175
3	120	100	110	1100
3,5	-	-	-	-
4	35	35	35	350
4,5	80	45	62,5	625
5	40	40	40	400
5,5	10	10	10	100
6	50	80	65	650
6,5	700	450	575	5750
7	-	-	-	-
7,5	-	-	-	-
8	-	-	-	-
8,5	-	-	-	-
9	-	-	-	-
9,5	-	-	-	-
10	-	-	-	-
10,5	-	-	-	-
11	140	90	115	1150
11,5	-	-	-	-
12	44	25	34,5	345
12,5	70	58	64	640
13	45	30	37,5	375
13,5	30	23	26,5	265
14	10	10	10	100
14,50	60	40	50	500
15,00	60	40	50	500
15,50	69	40	54,5	545
16	450	380	415	4150
16,5	-	-	-	-
17	-	-	-	-
17,5	-	-	-	-
18	-	-	-	-
18,5	70	60	65	650

Sezione 4

passo	asse _{max}	asse _{min}	D _{eq} [cm]	D _{eq} [mm]
0	50	45	47,5	475
0,5	45	45	45	450
1	30	25	27,5	275
1,5	33	23	28	280
2	15	10	12,5	125
2,5	120	40	80	800
3	-	-	-	-
3,5	50	35	42,5	425
4	95	35	65	650
4,5	700	500	600	6000
5	-	-	-	-
5,5	-	-	-	-
6	-	-	-	-
6,5	-	-	-	-
7	-	-	-	-
7,5	-	-	-	-
8	-	-	-	-
8,5	-	-	-	-
9	-	-	-	-
9,5	-	-	-	-
10	80	80	80	800
10,5	-	-	-	-
11	-	-	-	-
11,5	80	70	75	750
12	65	45	55	550
12,5	207	100	153,5	1535
13	-	-	-	-
13,5	88	45	66,5	665
14	80	80	80	800
14,5	-	-	-	-
15	170	150	160	1600
15,5	-	-	-	-
16	-	-	-	-
16,5	180	100	140	1400
17	-	-	-	-
17,5	55	30	42,5	425
18	100	80	90	900
18,5	-	-	-	-
19	150	140	145	1450
19,5	-	-	-	-
20	45	40	42,5	425

Sezione 5

passo	asse _{max}	asse _{min}	D _{eq} [cm]	D _{eq} [mm]
0	20	10	15	150
0,5	70	60	65	650
1	25	20	22,5	225
1,5	50	35	42,5	425
2	140	100	120	1200
2,5	-	-	-	-
3	250	250	250	2500
3,5	-	-	-	-
4	-	-	-	-
4,5	-	-	-	-
5	-	-	-	-
5,5	80	30	55	550
6	200	150	175	1750
6,5	7	7	7	70
7	20	20	20	200

Sezione 6

passo	asse _{max}	asse _{min}	D _{eq} [cm]	D _{eq} [mm]
0	20	20	20	200
0,5	10	10	10	100
1	150	100	125	1250
1,5	-	-	-	-
2	-	-	-	-
2,5	-	-	-	-
3	3	3	3	30
3,5	25	25	25	250
4	200	150	175	1750
4,5	-	-	-	-
5	-	-	-	-
5,5	-	-	-	-
6	-	-	-	-
6,5	150	150	150	1500
7	-	-	-	-

APPENDICE A

7,5	20	20	20	200	7,5	-	-	-	-
8	3	3	3	30	8	150	115	132,5	1325
8,5	190	140	165	1650	8,5	-	-	-	-
9	-	-	-	-	9	-	-	-	-
9,5	-	-	-	-	9,5	200	95	147,5	1475
10	115	65	90	900	10	-	-	-	-
10,5	-	-	-	-	10,5	90	90	90	900
11	275	225	250	2500	11	-	-	-	-
11,5	-	-	-	-	11,5	300	100	200	2000
12	-	-	-	-	12	-	-	-	-
12,5	-	-	-	-	12,5	70	40	55	550
13	180	90	135	1350	13	60	35	47,5	475
13,5	-	-	-	-	13,5	55	30	42,5	425
14	-	-	-	-	14	30	16	23	230
14,50	60	30	45	450	14,5	250	150	200	2000
15,00	43	23	33	330	15	-	-	-	-
15,50	115	80	97,5	975	15,5	-	-	-	-
16	-	-	-	-	16	20	20	20	200
16,5	-	-	-	-	16,5	15	15	15	150
17	80	70	75	750	17	15	15	15	150
17,5	-	-	-	-	17,5	60	40	50	500
18	86	54	70	700	18	35	20	27,5	275
18,5	10	10	10	100	18,5	35	25	30	300
19	10	10	10	100	19	150	140	145	1450
					19,5	-	-	-	-
					20	45	40	42,5	425

Sezione 7

passo	asse _{max}	asse _{min}	D _{eq} [cm]	D _{eq} [mm]
0	70	50	60	600
0,5	20	10	15	150
1	10	10	10	100
1,5	10	10	10	100
2	25	20	22,5	225
2,5	210	100	155	1550
3	-	-	-	-
3,5	170	100	135	1350
4	-	-	-	-
4,5	150	130	140	1400
5	-	-	-	-
5,5	-	-	-	-
6	-	-	-	-
6,5	85	40	62,5	625
7	100	60	80	800
7,5	-	-	-	-
8	90	70	80	800
8,5	60	50	55	550
9	20	15	17,5	175
9,5	70	50	60	600
10	35	25	30	300
10,5	450	420	435	4350
11	-	-	-	-
11,5	-	-	-	-
12	-	-	-	-
12,5	-	-	-	-
13	-	-	-	-
13,5	-	-	-	-
14	-	-	-	-
14,50	30	20	25	250
15,00	20	15	17,5	175
15,50	125	65	95	950
16	-	-	-	-
16,5	30	25	27,5	275
17	30	15	22,5	225
17,5	115	75	95	950
18	-	-	-	-
18,5	20	15	17,5	175
19	55	35	45	450
19,5	35	30	32,5	325
20	15	15	15	150

Sezione 8

passo	asse _{max}	asse _{min}	D _{eq} [cm]	D _{eq} [mm]
0	10	10	10	100
0,5	50	30	40	400
1	40	30	35	350
1,5	120	75	97,5	975
2	15	15	15	150
2,5	250	210	230	2300
3	-	-	-	-
3,5	-	-	-	-
4	-	-	-	-
4,5	-	-	-	-
5	35	30	32,5	325
5,5	20	20	20	200
6	80	70	75	750
6,5	50	35	42,5	425
7	66	60	63	630
7,5	-	-	-	-
8	135	70	102,5	1025
8,5	-	-	-	-
9	-	-	-	-
9,5	55	50	52,5	525
10	35	30	32,5	325
10,5	35	20	27,5	275
11	105	75	90	900
11,5	-	-	-	-
12	220	130	175	1750
12,5	-	-	-	-
13	-	-	-	-
13,5	20	15	17,5	175
14	20	15	17,5	175
14,5	30	25	27,5	275
15	65	60	62,5	625
15,5	135	115	125	1250
16	-	-	-	-
16,5	10	5	7,5	75
17	20	25	22,5	225
17,5	200	190	195	1950
18	-	-	-	-
18,5	-	-	-	-
19	-	-	-	-
19,5	-	-	-	-
20	5	5	5	50

Sezione 9

Sezione 10

APPENDICE A

passo	asse _{max}	asse _{min}	D _{eq} [cm]	D _{eq} [mm]	passo	asse _{max}	asse _{min}	D _{eq} [cm]	D _{eq} [mm]
0	70	35	52,5	525	0	100	65	82,5	825
0,5	10	10	10	100	0,50	-	-	-	-
1	40	30	35	350	1,00	-	-	-	-
1,5	15	5	10	100	1,50	70	70	70	700
2	100	60	80	800	2,00	65	50	57,5	575
2,5	-	-	-	-	2,50	-	-	-	-
3	300	80	190	1900	3,00	50	35	42,5	425
3,5	-	-	-	-	3,50	95	65	80	800
4	40	20	30	300	4,00	-	-	-	-
4,5	10	10	10	100	4,50	15	5	10	100
5	70	30	50	500	5,00	5	5	5	50
5,5	60	40	50	500	5,50	20	10	15	150
6	200	100	150	1500	6,00	15	5	10	100
6,5	-	-	-	-	6,50	20	20	20	200
7	-	-	-	-	7,00	80	40	60	600
7,5	-	-	-	-	7,50	-	-	-	-
8	65	50	57,5	575	8,00	25	20	22,5	225
8,5	55	50	52,5	525	8,50	15	15	15	150
9	15	10	12,5	125	9,00	35	30	32,5	325
9,5	10	10	10	100	9,50	15	15	15	150
10	600	400	500	5000	10,00	3	3	3	30
10,5	-	-	-	-	10,50	40	30	35	350
11	-	-	-	-	11,00	30	20	25	250
11,5	-	-	-	-	11,50	300	250	275	2750
12	-	-	-	-	12,00	-	-	-	-
12,5	-	-	-	-	12,50	-	-	-	-
13	-	-	-	-	13,00	-	-	-	-
13,5	-	-	-	-					
14	-	-	-	-					

Sezione 11

passo	asse _{max}	asse _{min}	D _{eq} [cm]	D _{eq} [mm]
0	20	15	17,5	175
0,50	15	15	15	150
1,00	50	40	45	450
1,50	75	60	67,5	675
2,00	-	-	-	-
2,50	250	200	225	2250
3,00	-	-	-	-
3,50	-	-	-	-
4,00	-	-	-	-
4,50	65	40	52,5	525
5,00	250	60	155	1550
5,50	90	85	87,5	875
6,00	-	-	-	-
6,50	40	30	35	350
7,00	30	25	27,5	275
7,50	20	10	15	150
8,00	90	70	80	800
8,50	120	70	95	950
9,00	-	-	-	-
9,50	55	50	52,5	525
10,00	20	15	17,5	175
10,50	45	40	42,5	425
11,00	3	3	3	30
11,50	3	3	3	30

Sezione 12

passo	asse _{max}	asse _{min}	D _{eq} [cm]	D _{eq} [mm]
0	200	150	175	1750
0,50	-	-	-	-
1,00	-	-	-	-
1,50	-	-	-	-
2,00	-	-	-	-
2,50	105	90	97,5	975
3,00	80	75	77,5	775
3,50	3	3	3	30
4,00	125	100	112,5	1125
4,50	-	-	-	-
5,00	150	85	117,5	1175
5,50	3	3	3	30
6,00	300	150	225	2250
6,50	-	-	-	-
7,00	-	-	-	-
7,50	-	-	-	-
8,00	65	45	55	550
8,50	200	200	200	2000
9,00	-	-	-	-
9,50	-	-	-	-
10,00	-	-	-	-
10,50	35	30	32,5	325
11,00	3	3	3	30
11,50	80	65	72,5	725
12,00	-	-	-	-
12,50	70	60	65	650
13,00	35	25	30	300
13,50	20	15	17,5	175
14,00	65	45	55	550
14,50	35	30	32,5	325
15,00	45	35	40	400
15,50	10	5	7,5	75
16,00	130	70	100	1000

Sezione 13

passo	asse _{max}	asse _{min}	D _{eq} [cm]	D _{eq} [mm]
0	70	65	67,5	675

Sezione 14

passo	asse _{max}	asse _{min}	D _{eq} [cm]	D _{eq} [mm]
0	200	80	140	1400

APPENDICE A

0,50	-	-	-	-	0,50	-	-	-	-
1,00	10	5	7,5	75	1,00	55	50	52,5	525
1,50	125	90	107,5	1075	1,50	40	15	27,5	275
2,00	-	-	-	-	2,00	85	50	67,5	675
2,50	20	15	17,5	175	2,50	135	110	122,5	1225
3,00	75	50	62,5	625	3,00	-	-	-	-
3,50	125	120	122,5	1225	3,50	45	30	37,5	375
4,00	-	-	-	-	4,00	40	21	30,5	305
4,50	-	-	-	-	4,50	50	50	50	500
5,00	60	55	57,5	575	5,00	10	10	10	100
5,50	120	100	110	1100	5,50	3	3	3	30
6,00	-	-	-	-	6,00	5	5	5	50
6,50	-	-	-	-	6,50	150	100	125	1250
7,00	95	90	92,5	925	7,00	-	-	-	-
7,50	-	-	-	-	7,50	60	45	52,5	525
8,00	20	15	17,5	175	8,00	70	50	60	600
8,50	10	5	7,5	75	8,50	-	-	-	-
9,00	20	20	20	200	9,00	80	70	75	750
9,50	35	30	32,5	325	9,50	-	-	-	-
10,00	35	30	32,5	325	10,00	30	27	28,5	285
10,50	20	15	17,5	175	10,50	60	90	75	750
11,00	70	50	60	600	11,00	220	150	185	1850
11,50	-	-	-	-	11,50	-	-	-	-
12,00	20	15	17,5	175	12,00	-	-	-	-
12,50	30	20	25	250	12,50	10	10	10	100
13,00	110	50	80	800	13,00	15	10	12,5	125
13,50	40	35	37,5	375	13,50	10	10	10	100
14,00	3	3	3	30	14,00	40	30	35	350
14,50	3	3	3	30	14,50	35	30	32,5	325
15,00	140	135	137,5	1375	15,00	45	35	40	400
15,50	-	-	-	-	15,50	10	5	7,5	75
					16,00	130	70	100	1000

Sezione 15

passo	asse _{max}	asse _{min}	D _{eq} [cm]	D _{eq} [mm]
0	80	70	75	750
0,5	-	-	-	-
1	170	135	152,5	1525
1,5	-	-	-	-
2	-	-	-	-
2,5	185	100	142,5	1425
3	40	35	37,5	375
3,5	80	65	72,5	725
4	-	-	-	-
4,5	20	15	17,5	175
5	70	20	45	450
5,5	10	5	7,5	75
6	5	5	5	50
6,5	5	5	5	50
7	95	60	77,5	775
7,5	-	-	-	-
8	55	50	52,5	525
8,5	15	10	12,5	125
9	60	50	55	550
9,5	20	15	17,5	175
10	35	30	32,5	325

Sezione 16

passo	asse _{max}	asse _{min}	D _{eq} [cm]	D _{eq} [mm]
0	60	50	55	550
0,5	-	-	-	-
1	65	60	62,5	625
1,5	45	25	35	350
2	70	40	55	550
2,5	20	15	17,5	175
3	3	3	3	30
3,5	20	15	17,5	175
4	15	10	12,5	125
4,5	30	25	27,5	275
5	15	15	15	150
5,5	15	10	12,5	125
6	60	40	50	500
6,5	3	3	3	30
7	20	15	17,5	175
7,5	70	65	67,5	675
8	10	5	7,5	75
8,5	10	10	10	100
9	80	50	65	650
9,5	60	50	55	550
10	350	150	250	2500
10,5	-	-	-	-
11	-	-	-	-
11,5	-	-	-	-

Sezione 17

passo	asse _{max}	asse _{min}	D _{eq} [cm]	D _{eq} [mm]
0	220	140	180	1800
0,5	-	-	-	-
1	-	-	-	-
1,5	150	115	132,5	1325
2	-	-	-	-
2,5	-	-	-	-
3	125	80	102,5	1025
3,5	-	-	-	-
4	-	-	-	-

Sezione 18

passo	asse _{max}	asse _{min}	D _{eq} [cm]	D _{eq} [mm]
0	115	85	100	1000
0,5	-	-	-	-
1	-	-	-	-
1,5	90	60	75	750
2	65	50	57,5	575
2,5	108	70	89	890
3	90	50	70	700
3,5	-	-	-	-
4	20	15	17,5	175

APPENDICE A

4,5	120	80	100	1000	4,5	30	25	27,5	275
5	-	-	-	-	5	90	60	75	750
5,5	110	100	105	1050	5,5	-	-	-	-
6	85	80	82,5	825	6	55	40	47,5	475
6,5	-	-	-	-	6,5	75	70	72,5	725
7	115	45	80	800	7	-	-	-	-
7,5	-	-	-	-	7,5	80	80	80	800
8	170	95	132,5	1325	8	30	30	30	300
8,5	-	-	-	-	8,5	40	35	37,5	375
9	75	60	67,5	675	9	45	30	37,5	375
9,5	65	35	50	500	9,5	65	65	65	650
10	40	35	37,5	375	10	-	-	-	-
					10,5	40	30	35	350
					11	70	35	52,5	525
					11,5	35	35	35	350
					12	20	10	15	150
					12,5	20	10	15	150
					13	3	3	3	30
					13,5	3	3	3	30
					14	45	40	42,5	425

Sezione 19

passo	asse _{max}	asse _{min}	D _{eq} [cm]	D _{eq} [mm]
0	115	65	90	900
0,5	-	-	-	-
1	-	-	-	-
1,5	80	60	70	700
2	120	60	90	900
2,5	-	-	-	-
3	55	55	55	550
3,5	20	15	17,5	175
4	3	3	3	30
4,5	10	10	10	100
5	15	15	15	150
5,5	10	5	7,5	75
6	10	5	7,5	75
6,5	10	5	7,5	75
7	40	30	35	350
7,5	60	60	60	600
8	80	65	72,5	725
8,5	-	-	-	-
9	30	25	27,5	275
9,5	40	30	35	350
10	30	30	30	300
10,5	15	15	15	150
11	70	60	65	650
11,5	25	20	22,5	225
12	20	15	17,5	175
12,5	20	15	17,5	175
13	40	30	35	350
13,5	105	100	102,5	1025
14	-	-	-	-

Sezione 20

passo	asse _{max}	asse _{min}	D _{eq} [cm]	D _{eq} [mm]
0	-	-	-	-
0,5	-	-	-	-
1	-	-	-	-
1,5	95	55	75	750
2	350	250	300	3000
2,5	-	-	-	-
3	-	-	-	-
3,5	55	45	50	500
4	60	20	40	400
4,5	60	45	52,5	525
5	80	70	75	750
5,5	60	35	47,5	475
6	100	60	80	800
6,5	40	26	33	330
7	15	15	15	150
7,5	30	20	25	250
8	10	10	10	100
8,5	15	15	15	150
9	30	30	30	300
9,5	200	130	165	1650
10	-	-	-	-

A.2 Frequenze e curve granulometriche

Dal diametro equivalente dei vari granuli delle rispettive sezioni si è passati alla classificazione di Wentworth, individuando 9 classi granulometriche, che ricordiamo qui di seguito:

D _{eq} [mm]	Classe	Legenda classi
22,6-32	1	Ghiaia grossa

APPENDICE A

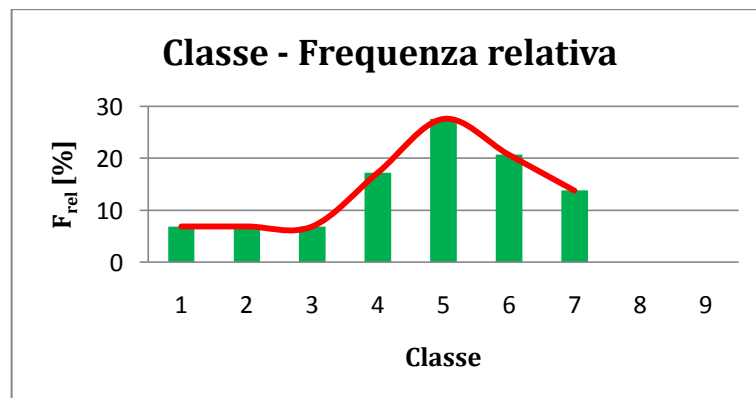
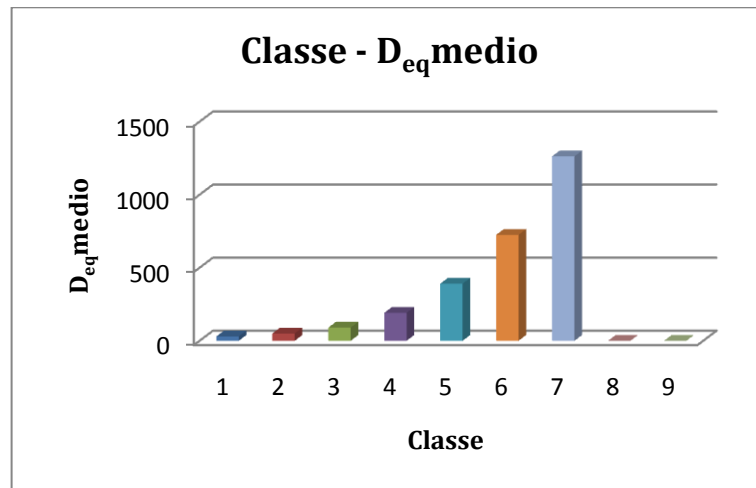
32-64	2	Ghiaia molto grossa
64-128	3	Ciottoli piccoli
128-256	4	Ciottoli grossi
256-512	5	Massi piccoli
512-1024	6	Massi medi
1024-2048	7	Massi grandi
2048-4096	8	Massi molto grandi
> 4096	9	Massi molto grandi

Con tali classi, come spiegato nel paragrafo 4.2.2, si è costruito per ogni sezione il diagramma delle frequenze relative delle classi e la rispettiva curva granulometrica. Per le curve granulometriche si sono considerate solo le prime 6 classi, per non avere una sovrastima del volume medio rappresentativo (D_{50}) e quindi della volumetria possibilmente movimentabile. Inoltre la frequenza relativa viene rappresentata sia attraverso un istogramma a barre che un grafico a dispersione che ne indica l'andamento.

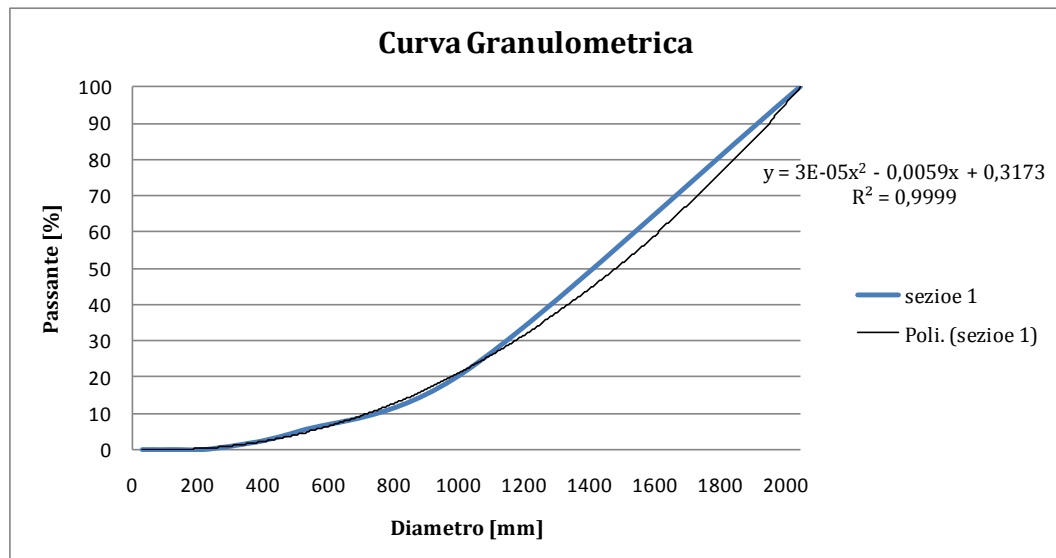
Di seguito vengono riportati i diagrammi e i dati input per la loro costruzione, sempre di tutte e 20 le sezioni.

A.2.1 Sezione 1

Sezione 1									
Range D_{eq} [mm]	22.6-32	32-64	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048	2048-4096	>4096
Classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D_{eq} [mm]	30	50	100	145	405	750	1400		
	30	50	80	200	405	550	1050		
				240	340	525	1200		
				190	435	575	1400		
				180	390	950			
					375	1000			
					475				
					300				
D_{eq} medio [mm]	30	50	90	191	391	725	1263	0	0
F_{ass}	2	2	2	5	8	6	4	0	0
N° tot	29								
F_{rel}	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0	0
F_{rel} [%]	7	7	7	17	28	21	14	0	0

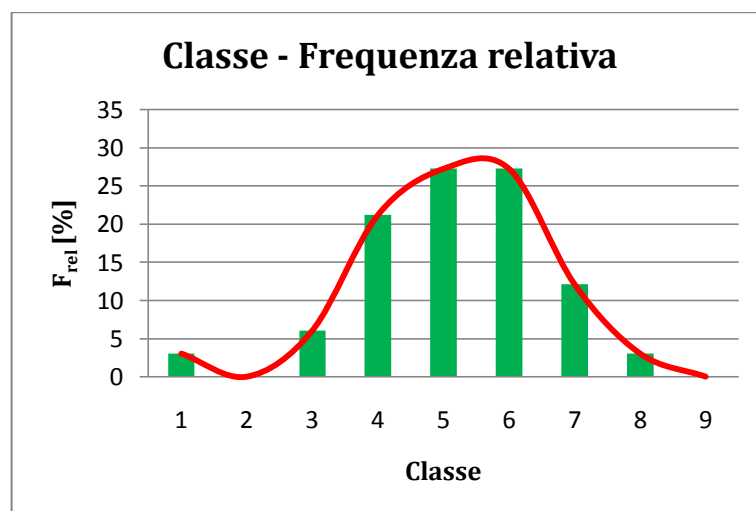
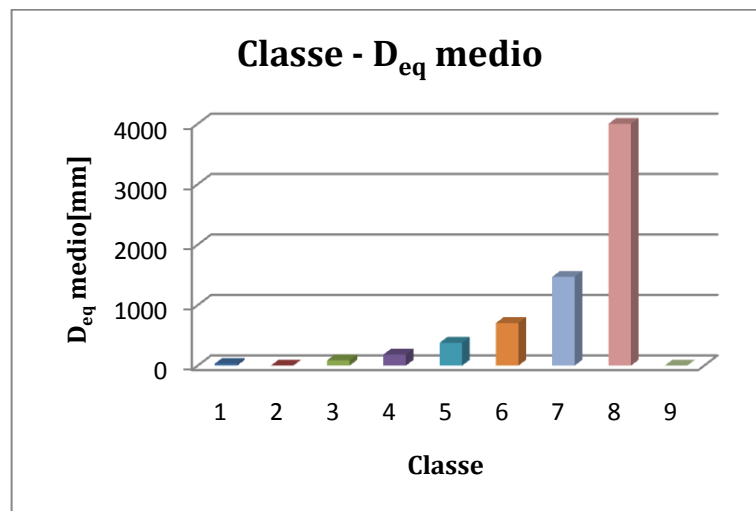


Sezione 1: Curva granulometrica							
classe	1	2	3	4	5	6	7
range [m]	22.6-32	32-64	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048
D _{max} mag	32	64	128	256	512	1024	2048
Passante	0,0005	0,0028	0,017	0,3682	5,0503	21,70	100
D ₁₀ [mm]	646						
D ₁₆ [mm]	805						
D ₅₀ [mm]	1376						
D ₆₀ [mm]	1501						
D ₈₄ [mm]	1762						
U	2,32						
σ	2,19						

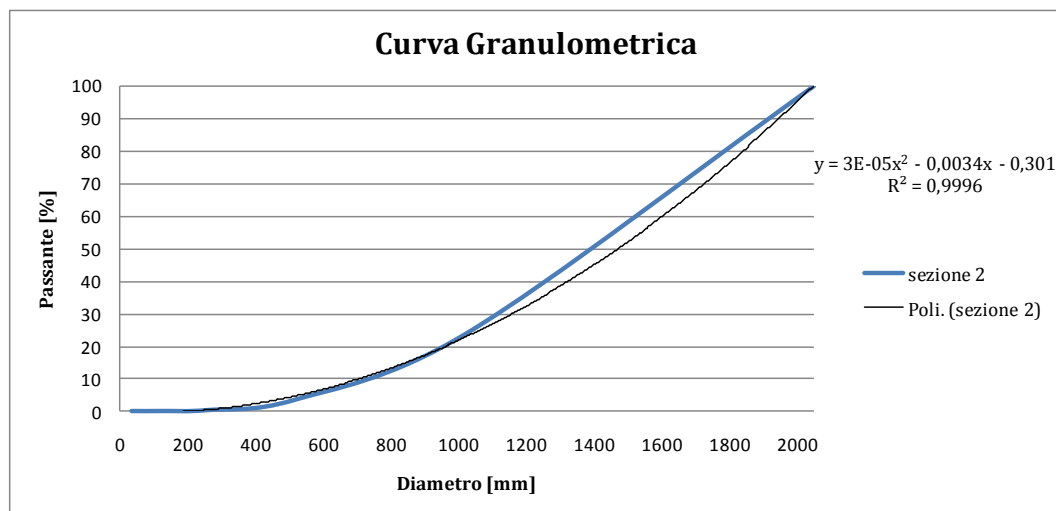


A.2.2 Sezione 2

Sezione 2									
Range D_{eq} [mm]	22.6-32	32-64	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048	2048-4096	>4096
Classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D_{eq} [mm]	classe 1	classe 2	classe 3	classe 4	classe 5	classe 6	classe 7	classe 8	classe 9
	30	0	100	145	265	805	1250	4000	0
			75	240	400	520	1650		
				175	285	625	1525		
				175	500	590	1450		
				175	375	590			
				150	375	900			
				225	350	950			
					425	640			
					425	725			
D_{eq} medio [mm]	30	0	88	184	378	705	1469	4000	0
F_{ass}	1	0	2	7	9	9	4	1	0
N° tot	33								
F_{rel}	0,03	0,00	0,06	0,21	0,27	0,27	0,12	0,03	0,00
F_{rel} [%]	3	0	6	21	27	27	12	3	0

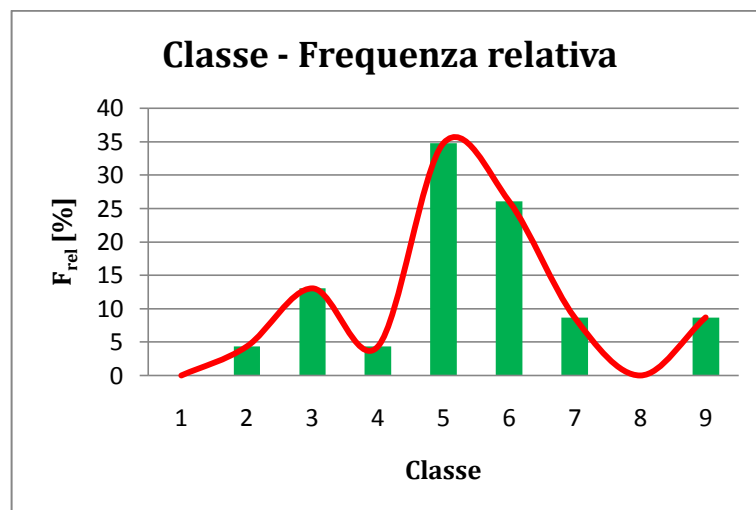
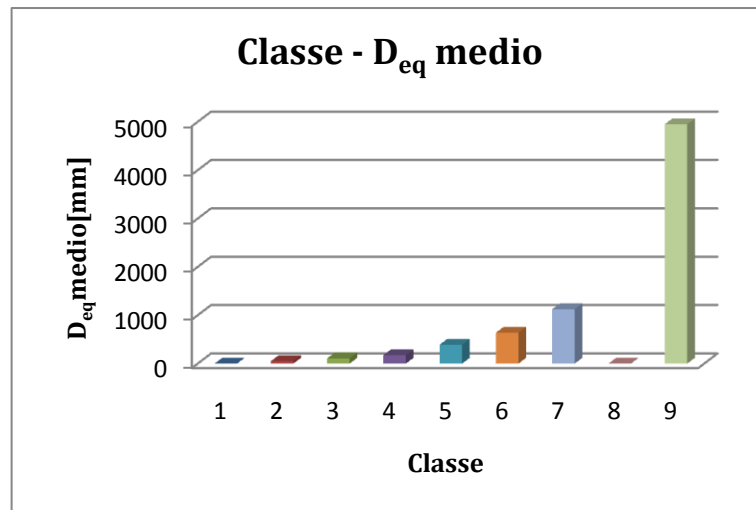


Sezione 2: Curva granulometrica						
classe	1	3	4	5	6	7
range [mm]	22.6-32	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048
D _{max} maglio	32	128	256	512	1024	2048
Passante [%]	0,0001573	0,00843889	0,28636	3,388657	24,04659	100
D ₁₀ [mm]	645					
D ₁₆ [mm]	796					
D ₅₀ [mm]	1353					
D ₆₀ [mm]	1476					
D ₈₄ [mm]	1734					
U	2,29					
σ	1,48					



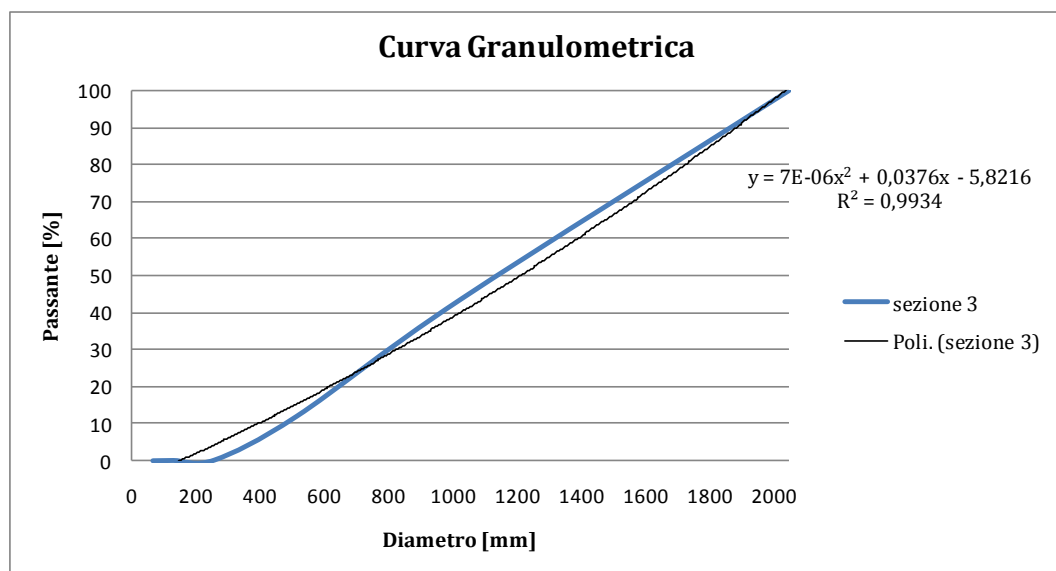
A.2.3 Sezione 3

Sezione 3									
Range D_{eq} [mm]	22.6-32	32-64	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048	2048-4096	>4096
Classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D_{eq} [mm]	0	50	125	175	370	725	1150	0	4150
			100		425	625	1100		5750
			100		350	650			
					345	640			
					375	545			
					265	650			
					500				
					500				
D_{eq} medio [mm]	0	50	108	175	391	639	1125	0	4950
F_{ass}	0	1	3	1	8	6	2	0	2
N° tot	23								
F_{rel}	0,00	0,04	0,13	0,04	0,35	0,26	0,09	0,00	0,09
F_{rel} [%]	0	4	13	4	35	26	9	0	9



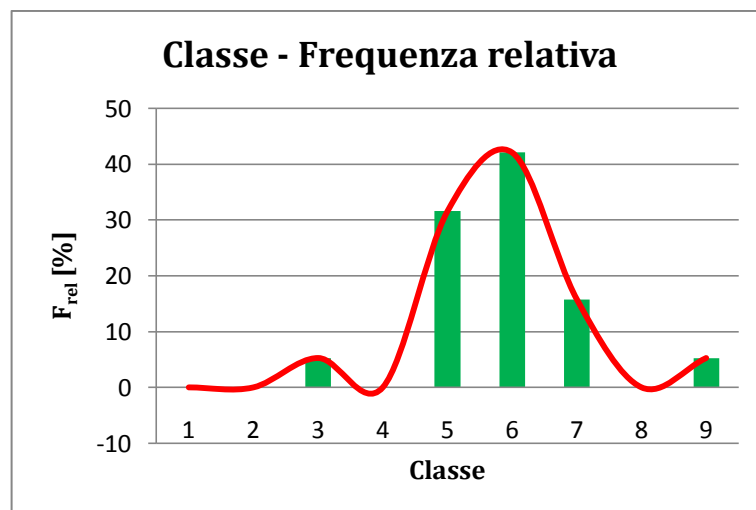
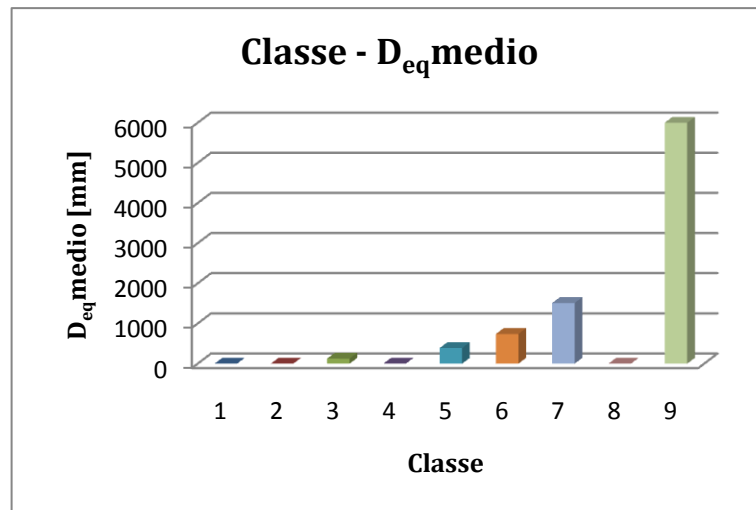
APPENDICE A

Sezione 3: Curva granulometrica							
classe	1	2	3	4	5	6	7
range [mm]	22.6-32	32-64	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048
D _{max} maglio	32	64	128	256	512	1024	2048
Passante [%]	0	0,00567	0,0838	0,18984	11,9905	43,6031	100
D ₁₀ [mm]	392						
D ₁₆ [mm]	528						
D ₅₀ [mm]	1211						
D ₆₀ [mm]	1391						
D ₈₄ [mm]	1791						
U	3,55						
σ	1,84						



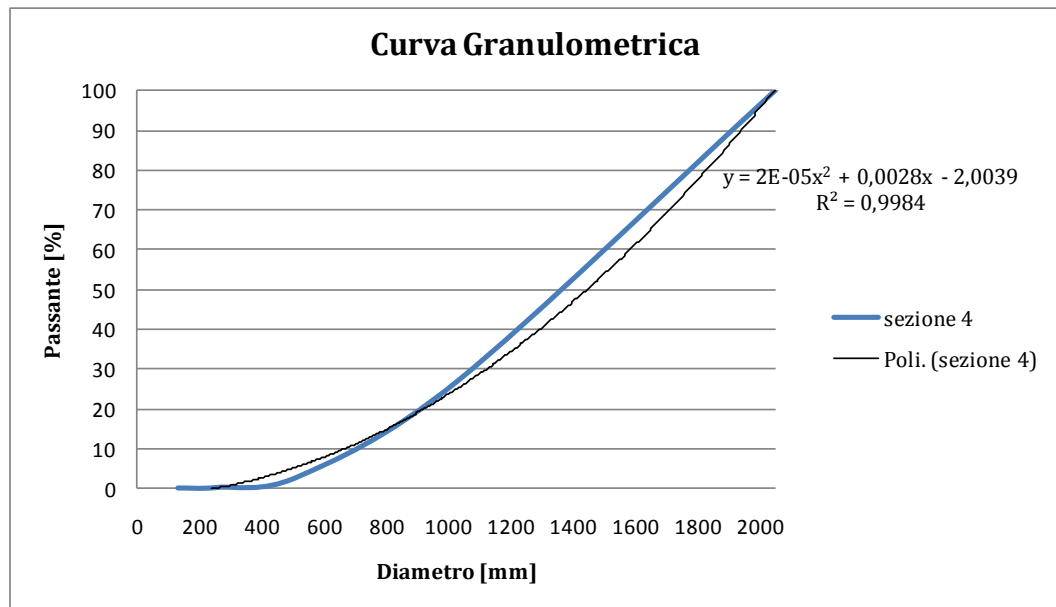
A.2.4 Sezione 4

Sezione 4									
Range D_{eq} [mm]	22.6-32	32-64	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048	2048-4096	>4096
Classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D_{eq} [mm]	0	0	125	0	475	800	1535	0	6000
					450	650	1600		
					275	800	1400		
					280	750			
					425	550			
					425	665			
						800			
						900			
D_{eq_medio} [mm]	0	0	125	0	388	739	1512	0	6000
F_{ass}	0	0	1	0	6	8	3	0	1
N° tot	19								
F_{rel}	0,00	0,00	0,05	0,00	0,32	0,42	0,16	0,00	0,05
F_{rel} [%]	0	0	5	0	32	42	16	0	5



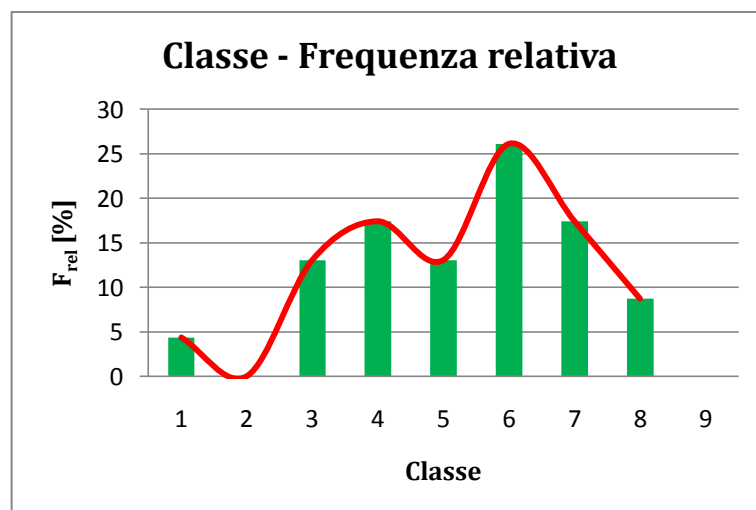
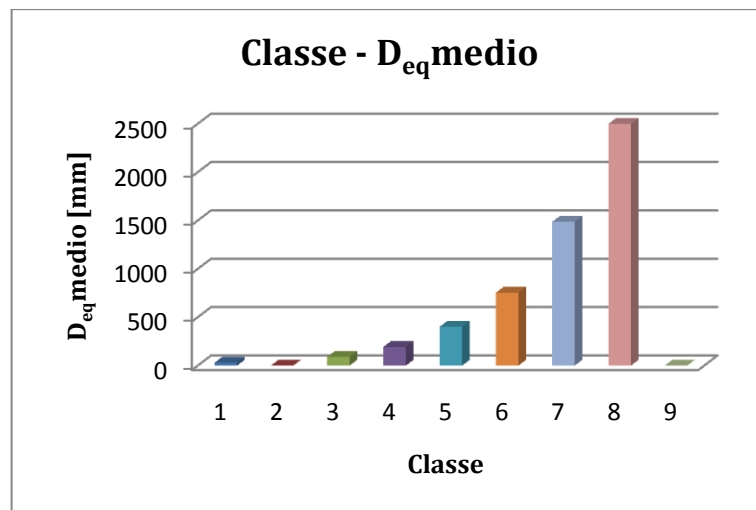
APPENDICE A

Sezione 4: Curva granulometrica							
classe	1	2	3	4	5	6	7
range [mm]	22.6-32	32-64	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048
D _{max} maglio	32	64	128	256	512	1024	2048
Passante [%]	0	0	0,01368186	0,1593663	2,77774	26,7489	100
D ₁₀ [mm]	708						
D ₁₆ [mm]	881						
D ₅₀ [mm]	1544						
D ₆₀ [mm]	1692						
D ₈₄ [mm]	2005						
U	2,39						
σ	1,51						

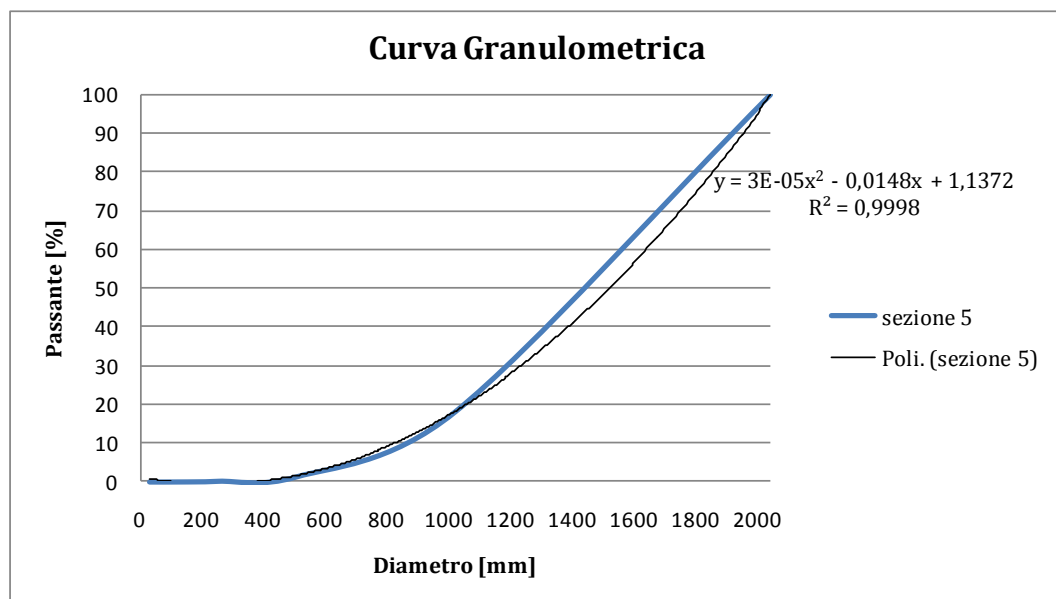


A.2.5 Sezione 5

Sezione 5									
Range D_{eq} [mm]	22.6-32	32-64	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048	2048-4096	>4096
Classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D_{eq} [mm]	30	0	70	150	425	650	1200	2500	0
			100	225	450	550	1750	2500	
			100	200	330	900	1650		
				200		975	1350		
						750			
						700			
$D_{eq, medio}$ [mm]	30	0	90	194	402	754	1488	2500	0
F_{ass}	1	0	3	4	3	6	4	2	0
N° tot	23								
F_{rel}	0,04	0,00	0,13	0,17	0,13	0,26	0,17	0,09	0,00
F_{rel} [%]	4	0	13	17	13	26	17	9	0

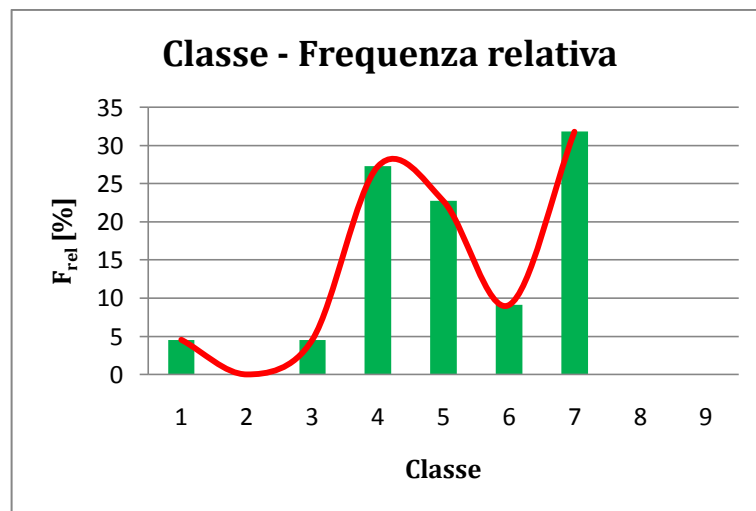
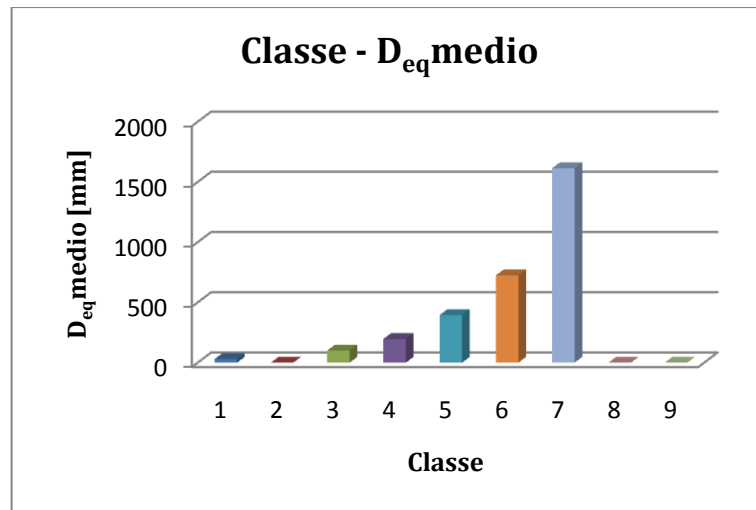


Sezione 5: Curva granulometrica						
classe	1	3	4	5	6	7
range [mm]	22.6-32	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048
D _{max} maglio	32	128	256	512	1024	2048
Passante [%]	0,00016	0,01383	0,19334	1,38263	18,08025	100
D ₁₀ [mm]	844					
D ₁₆ [mm]	993					
D ₅₀ [mm]	1547					
D ₆₀ [mm]	1669					
D ₈₄ [mm]	1927					
U	1,98					
σ	1,39					



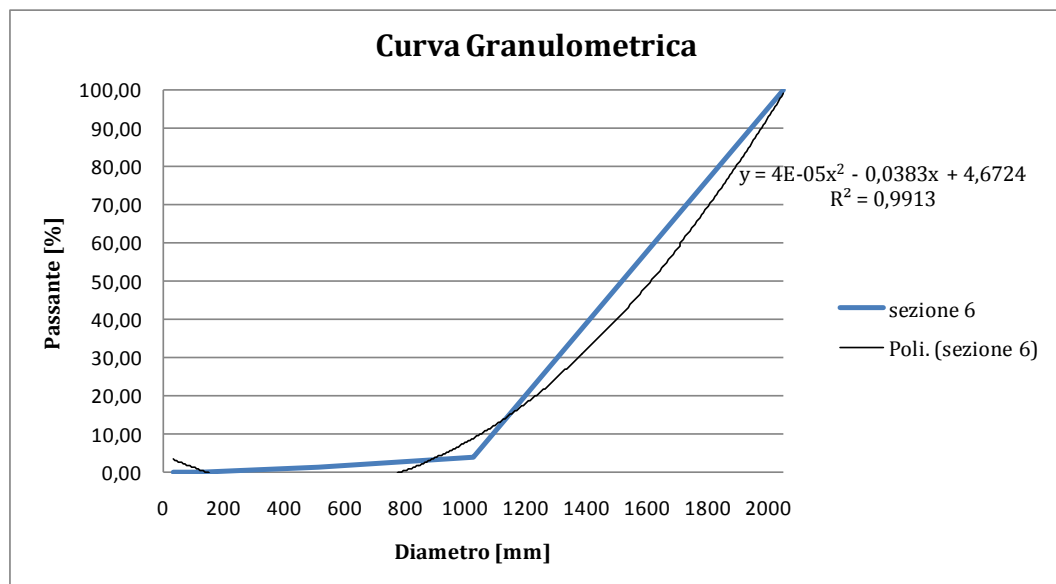
A.2.6 Sezione 6

Sezione 6									
Range D_{eq} [mm]	22.6-32	32-64	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048	2048-4096	>4096
Classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D_{eq} [mm]	30	0	100	200	475	900	1250	0	0
				250	425	550	1750		
				230	500		1500		
				200	275		1325		
				150	300		1475		
				150			2000		
							2000		
D_{eq} medio [mm]	30	0	100	197	395	725	1614	0	0
F_{ass}	1	0	1	6	5	2	7	0	0
N° tot	22								
F_{rel}	0,05	0,00	0,05	0,27	0,23	0,09	0,32	0,00	0,00
F_{rel} [%]	5	0	5	27	23	9	32	0	0



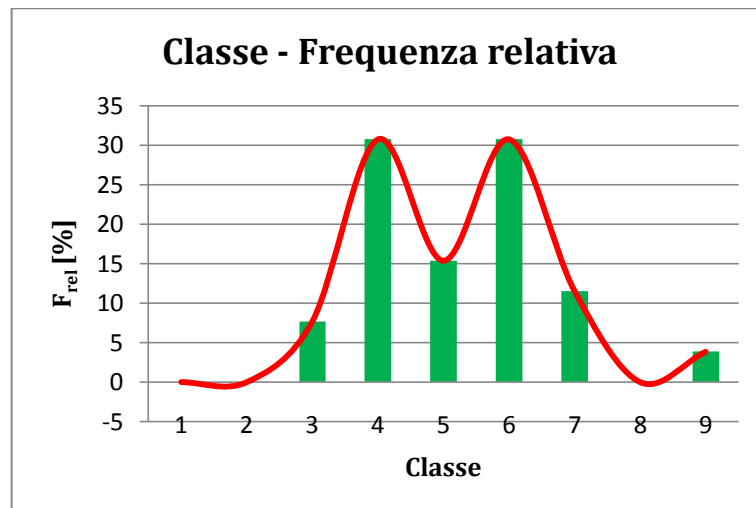
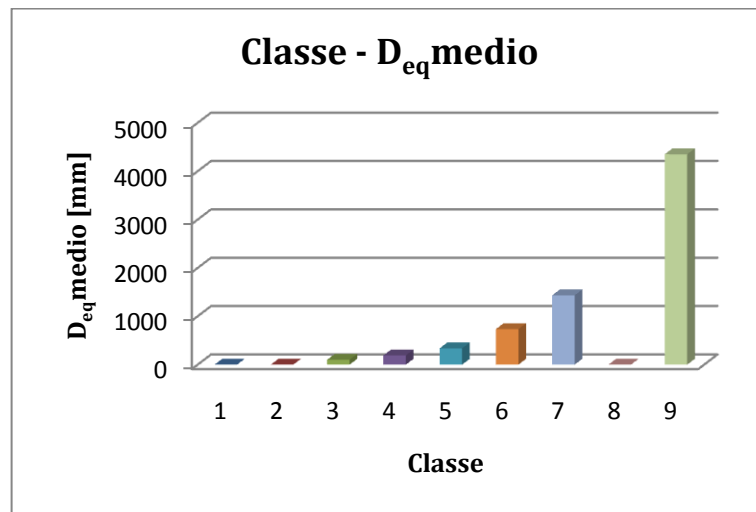
APPENDICE A

Sezione 6: Curva granulometrica						
classe	1	3	4	5	6	7
range [mm]	22.6-32	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048
D _{max} maglio	32	128	256	512	1024	2048
Passante [%]	0,00	0,003	0,15	1,22	3,88851	100
D ₁₀ [mm]	1081					
D ₁₆ [mm]	1195					
D ₅₀ [mm]	1646					
D ₆₀ [mm]	1749					
D ₈₄ [mm]	1966					
U	1,62					
σ	1,28					

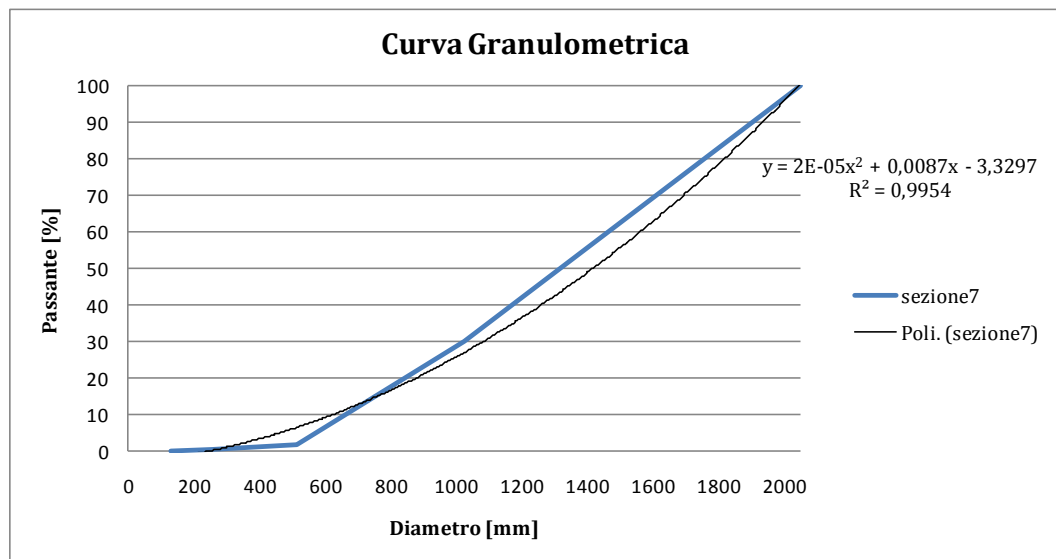


A.2.7 Sezione 7

Sezione 7									
Range D_{eq} [mm]	22.6-32	32-64	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048	2048-4096	>4096
Classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D_{eq} [mm]	0	0	100	150	300	600	1550	0	4350
			100	225	275	625	1350		
				175	450	800	1400		
				250	325	800			
				175		550			
				225		600			
				175		950			
				150		950			
D_{eq} medio [mm]	0	0	100	191	338	734	1433	0	4350
F_{ass}	0	0	2	8	4	8	3	0	1
N° tot	26								
F_{rel}	0,00	0,00	0,08	0,31	0,15	0,31	0,12	0,00	0,04
F_{rel} [%]	0	0	8	31	15	31	12	0	4

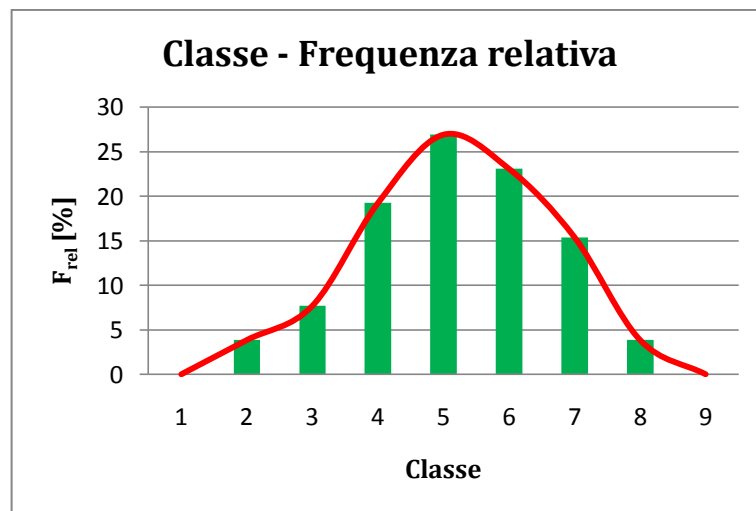
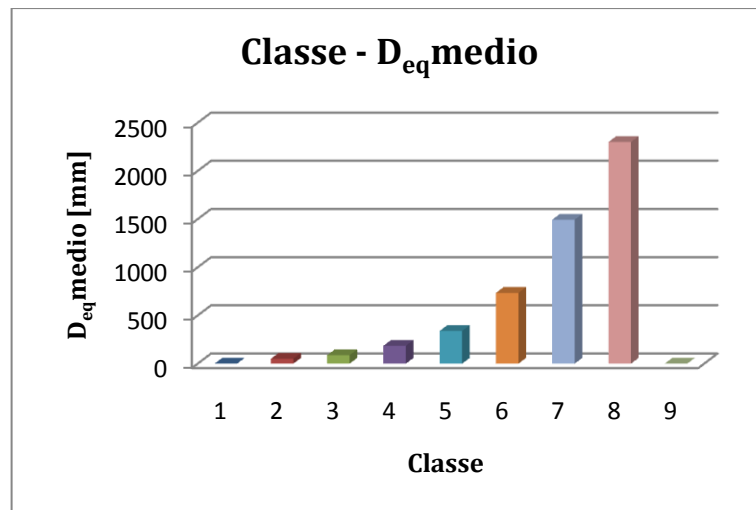


Sezione 7: Curva granulometrica					
classe	3	4	5	6	7
range [mm]	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048
D_{max} maglio	128	256	512	1024	2048
Passante [%]	0,0156912	0,49611	1,85536	29,9525	100
D₁₀ [mm]	627				
D₁₆ [mm]	789				
D₅₀ [mm]	1430				
D₆₀ [mm]	1575				
D₈₄ [mm]	1883				
U	2,51				
σ	1,54				

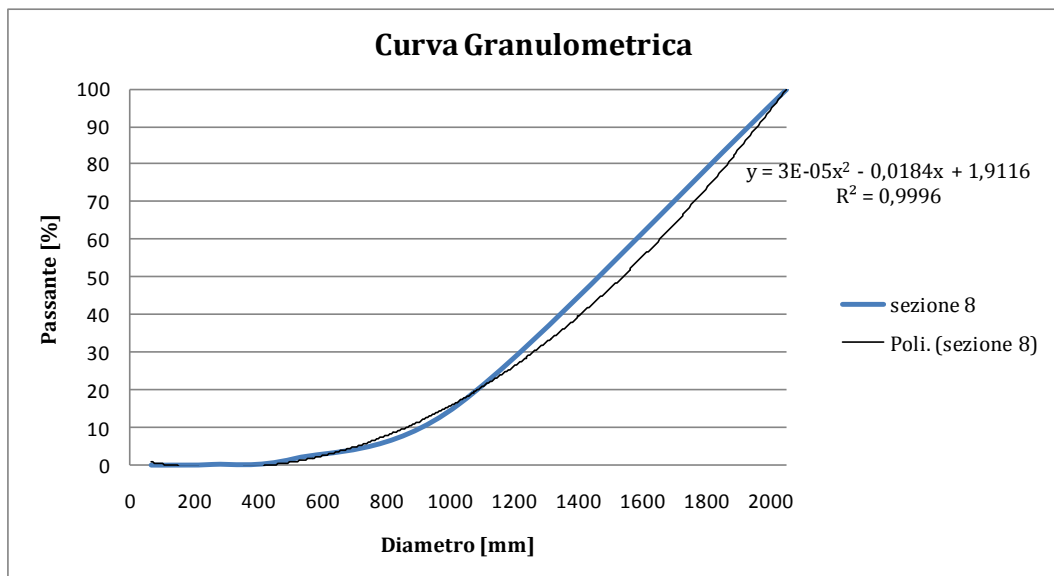


A.2.8 Sezione 8

Sezione 8									
Range D_{eq} [mm]	22.6-32	32-64	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048	2048-4096	>4096
Classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D_{eq} [mm]	0	50	100	150	400	975	1025	2300	0
			75	200	350	750	1750		
				175	325	630	1250		
				175	425	525	1950		
				225	325	900			
					275	625			
					275				
D_{eq} medio [mm]	0	50	88	185	339	734	1494	2300	0
F_{ass}	0	1	2	5	7	6	4	1	0
N° tot	26								
F_{rel}	0,00	0,04	0,08	0,19	0,27	0,23	0,15	0,04	0,00
F_{rel} [%]	0	4	8	19	27	23	15	4	0

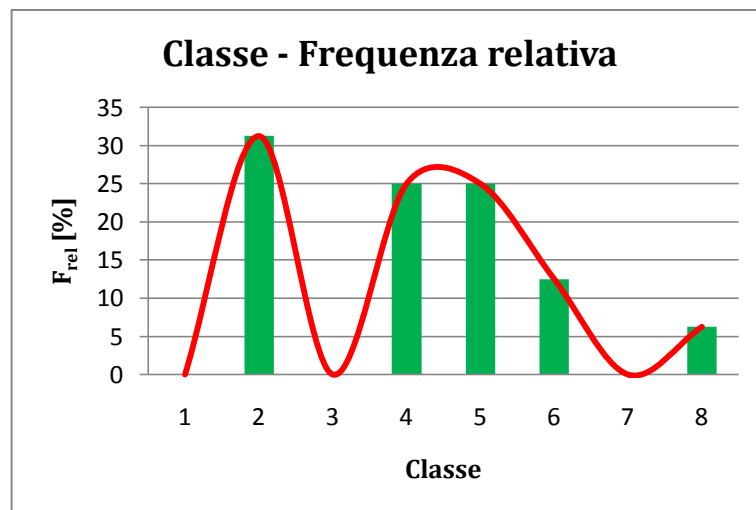
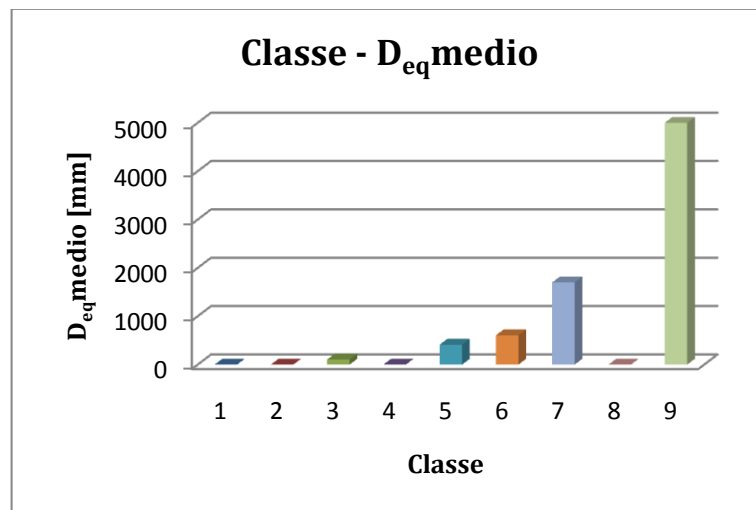


Sezione 8: Curva granulometrica						
classe	2	3	4	5	6	7
range [mm]	32-64	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048
D _{max} maglio	64	128	256	512	1024	2048
Passante [%]	0,00066	0,00821	0,18584	1,74496	16,15691	100
D ₁₀ [mm]	910					
D ₁₆ [mm]	1057					
D ₅₀ [mm]	1609					
D ₆₀ [mm]	1732					
D ₈₄ [mm]	1989					
U	1,90					
σ	1,37					

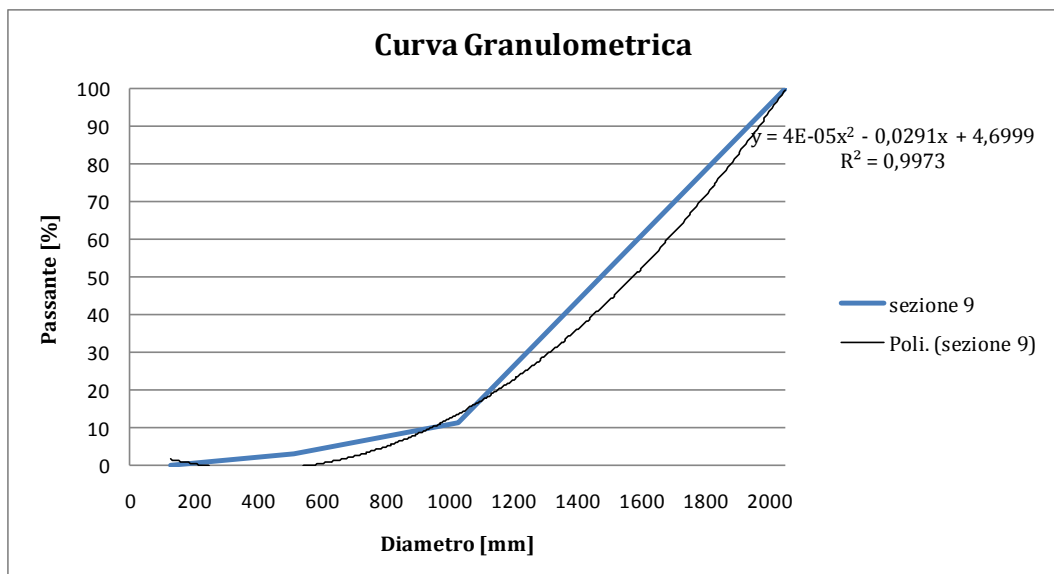


A.2.9 Sezione 9

Sezione 9									
Range D_{eq} [mm]	22.6-32	32-64	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048	2048-4096	>4096
Classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D_{eq} [mm]	0	0	100	0	350	525	1900	0	5000
			100		300	800	1500		
			100		500	575			
			125		500	525			
			100						
$D_{eq,medio}$ [mm]	0	0	105	0	413	606	1700	0	5000
F_{ass}	0	0	5	0	4	4	2	0	1
N° tot	16								
F_{rel}	0,00	0,00	0,31	0,00	0,25	0,25	0,13	0,00	0,06
F_{rel} [%]	0	0	31	0	25	25	13	0	6

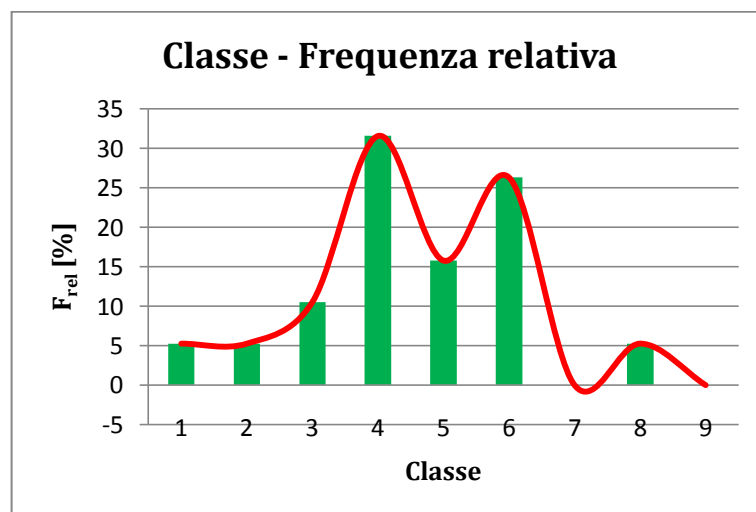
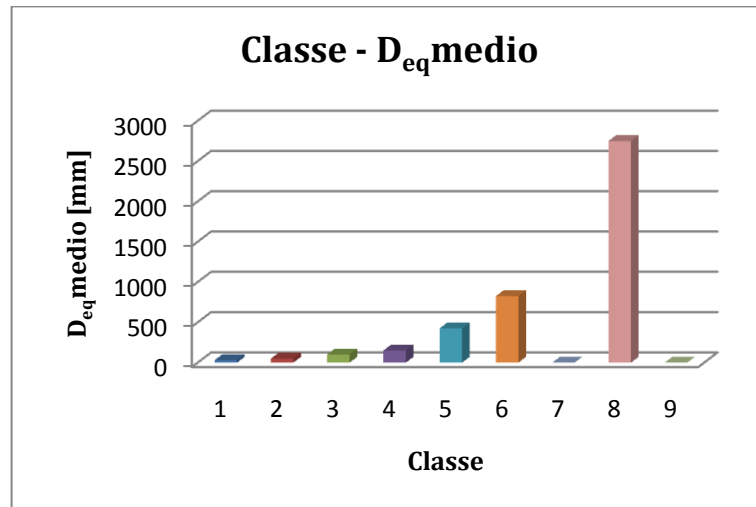


Sezione 9: Curva granulometrica				
classe	3	5	6	7
range [mm]	64-128	256-512	512-1024	1024-2048
D _{max} maglio	128	512	1024	2048
Passante [%]	0,05154	2,82069	11,40425	100
D ₁₀ [mm]	878			
D ₁₆ [mm]	1008			
D ₅₀ [mm]	1488			
D ₆₀ [mm]	1595			
D ₈₄ [mm]	1818			
U	1,82			
s	1,34			



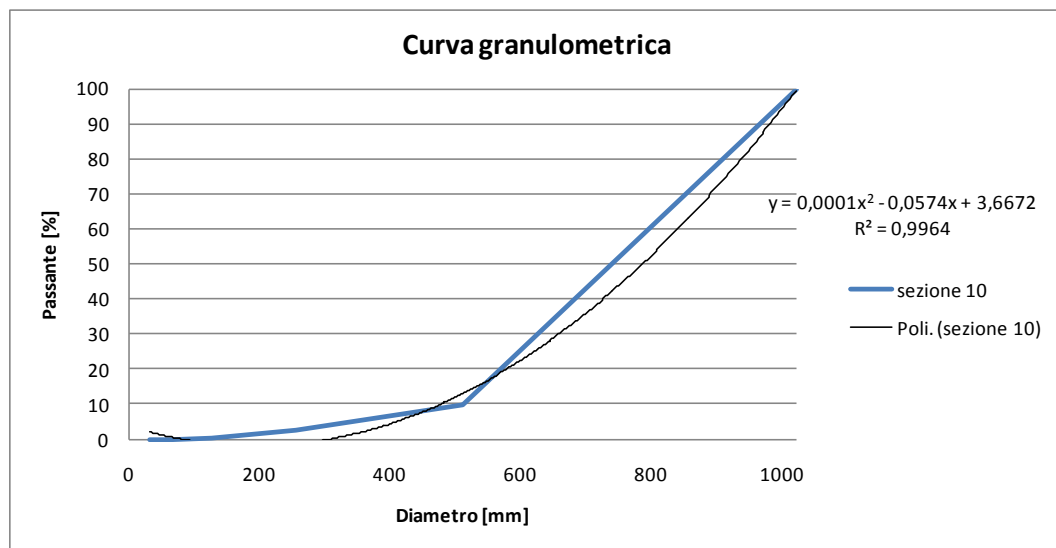
A.2.10 Sezione 10

Sezione 10									
Range D_{eq} [mm]	22.6-32	32-64	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048	2048-4096	>4096
Classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D_{eq} [mm]	30	50	100	150	425	825	0	2750	0
			100	200	325	700			
				225	350	575			
				150		800			
				150		600			
				250					
D_{eq} medio [mm]	30	50	100	150	425	825	0	2750	0
F_{ass}	1	1	2	6	3	5	0	1	0
N° tot	19								
F_{rel}	0,05	0,05	0,11	0,32	0,16	0,26	0,00	0,05	0,00
F_{rel} [%]	5	5	11	32	16	26	0	5	0



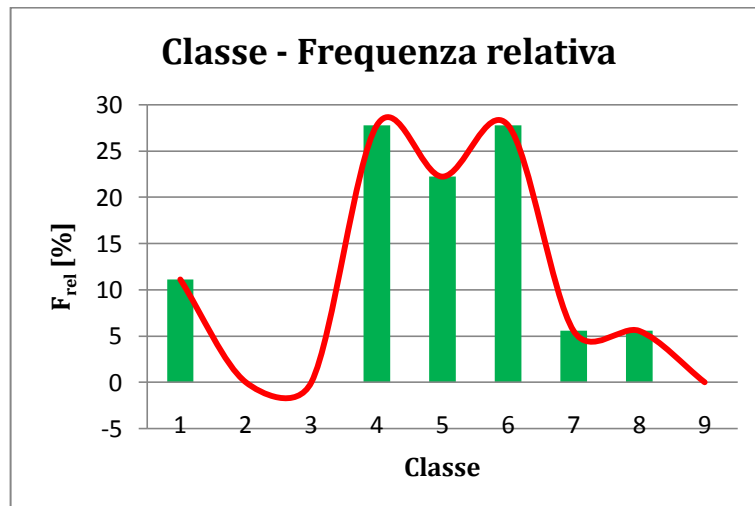
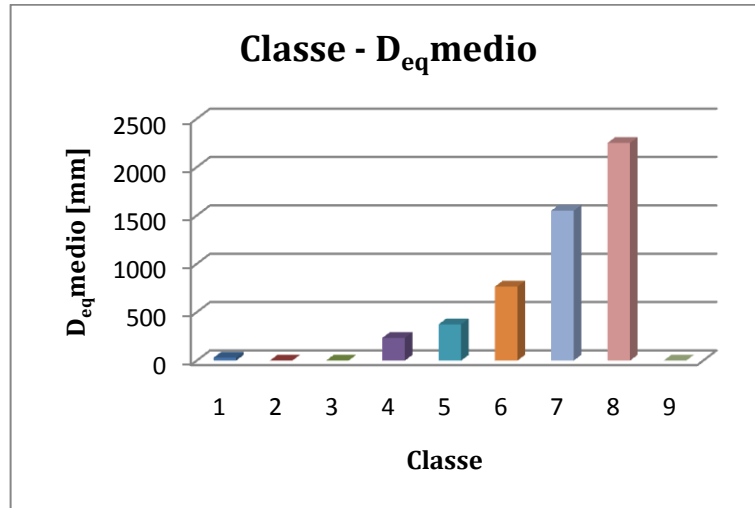
APPENDICE A

Sezione 10: Curva granulometrica						
classe	1	2	3	4	5	6
range [mm]	22.6-32	32-64	64-128	128-256	256-512	512-1024
D _{max} maglio	32	64	128	256	512	1024
Passante [%]	0,001334067	0,0075103	0,10633008	2,3367233	9,944302	100
D ₁₀ [mm]	669					
D ₁₆ [mm]	741					
D ₅₀ [mm]	1026					
D ₆₀ [mm]	1091					
D ₈₄ [mm]	1228					
U	1,63					
σ	1,29					

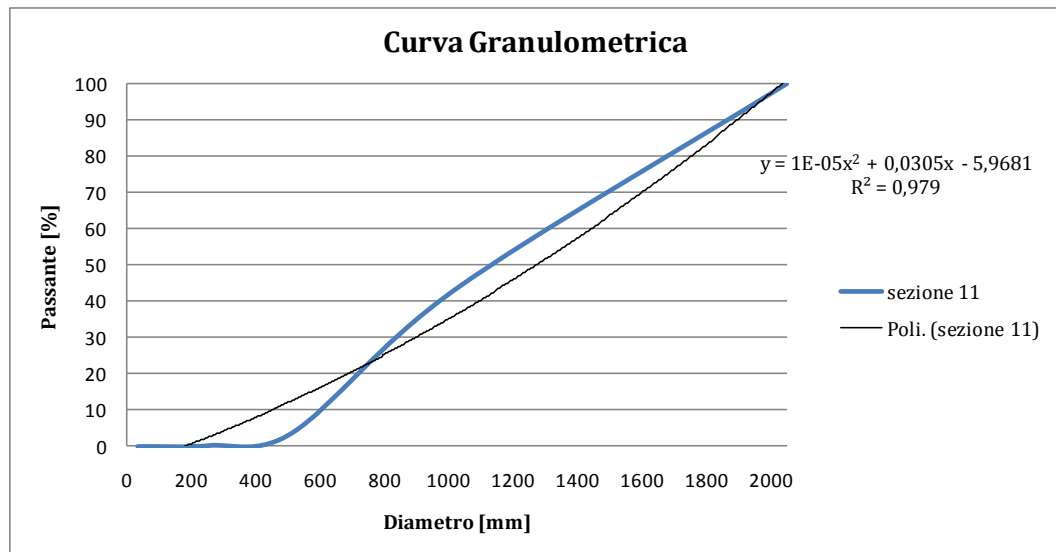


A.2.11 Sezione 11

Sezione 11									
Range D_{eq} [mm]	22.6-32	32-64	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048	2048-4096	>4096
Classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D_{eq} [mm]	30	0	0	175	450	675	1550	2250	0
	30			150	350	875			
				525	275	800			
				150	425	950			
				175		525			
D_{eq} medio [mm]	30	0	0	235	375	765	1550	2250	0
F_{ass}	2	0	0	5	4	5	1	1	0
N° tot	18								
F_{rel}	0,11	0,00	0,00	0,28	0,22	0,28	0,06	0,06	0,00
F_{rel} [%]	11	0	0	28	22	28	6	6	0

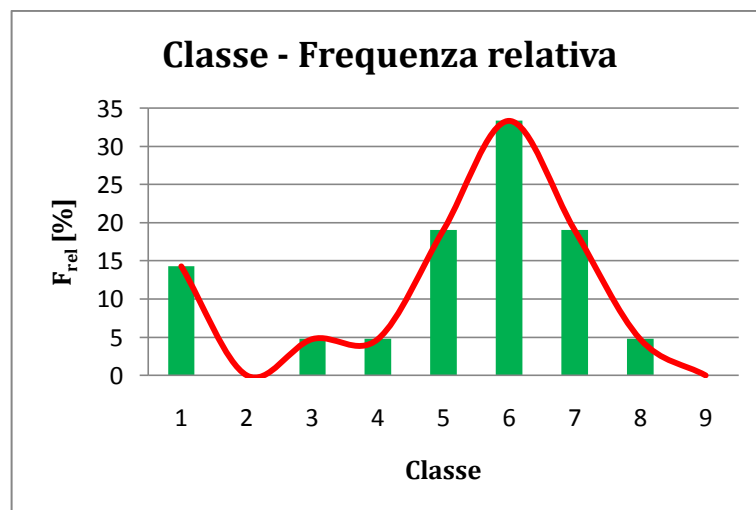
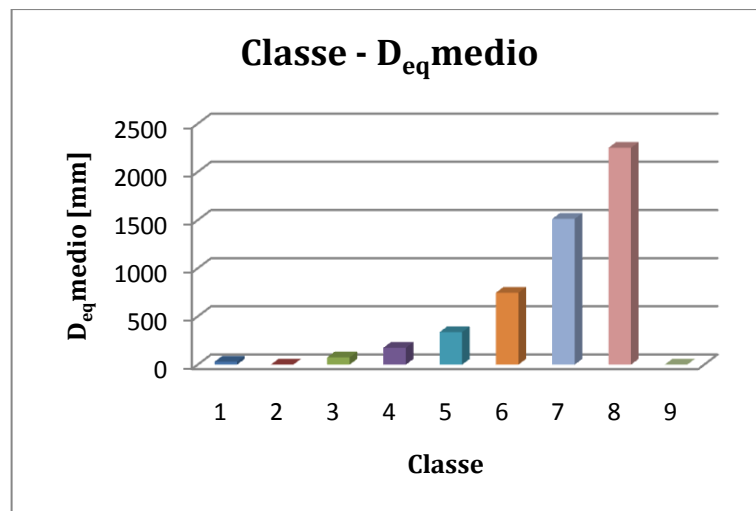


Sezione 11: Curva granulometrica					
classe	1	4	5	6	7
range [mm]	22.6-32	128-256	256-512	512-1024	1024-2048
D_{max} maglio	32	256	512	1024	2048
Passante [%]	0,000817	0,26513	3,76876	43,65628	100
D₁₀ [mm]	456				
D₁₆ [mm]	602				
D₅₀ [mm]	1290				
D₆₀ [mm]	1462				
D₈₄ [mm]	1840				
U	3,21				
σ	1,75				



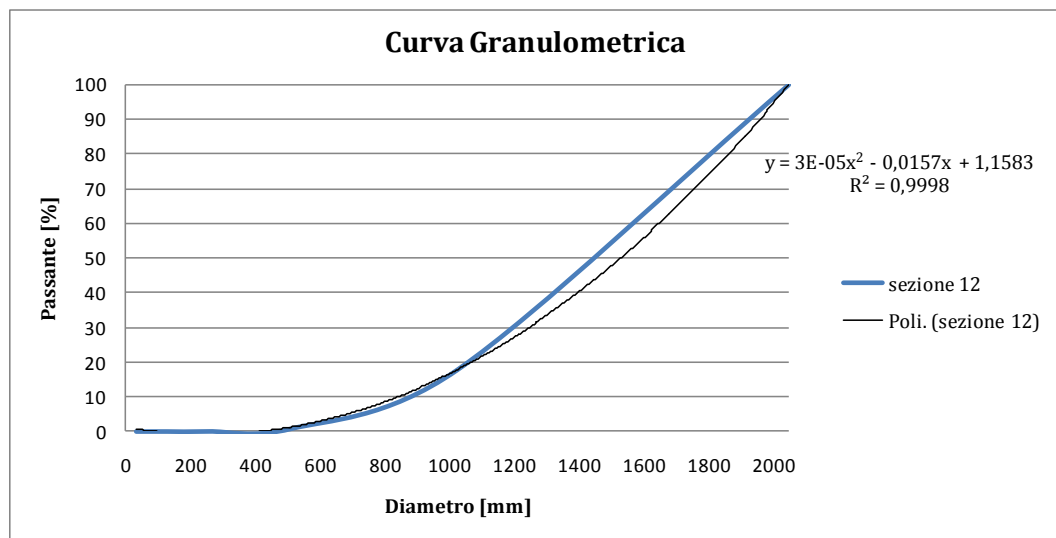
A.2.12 Sezione 12

Sezione 12									
Range D_{eq} [mm]	22.6-32	32-64	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048	2048-4096	>4096
Classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D_{eq} [mm]	30	0	75	175	325	975	1750	2250	0
	30				300	775	1125		
	30				325	550	1175		
					400	725	2000		
						650			
						550			
						1000			
D_{eq} medio [mm]	30	0	75	175	338	746	1513	2250	0
F_{ass}	3	0	1	1	4	7	4	1	0
N° tot	21								
F_{rel}	0,14	0,00	0,05	0,05	0,19	0,33	0,19	0,05	0,00
F_{rel} [%]	14	0	5	5	19	33	19	5	0



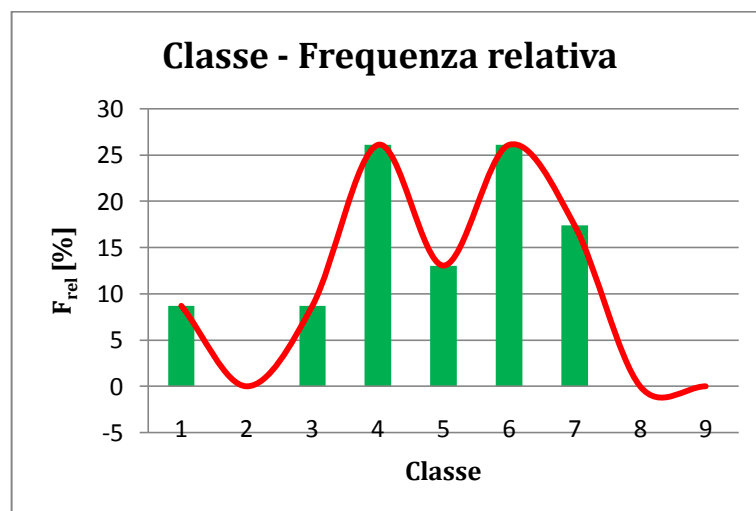
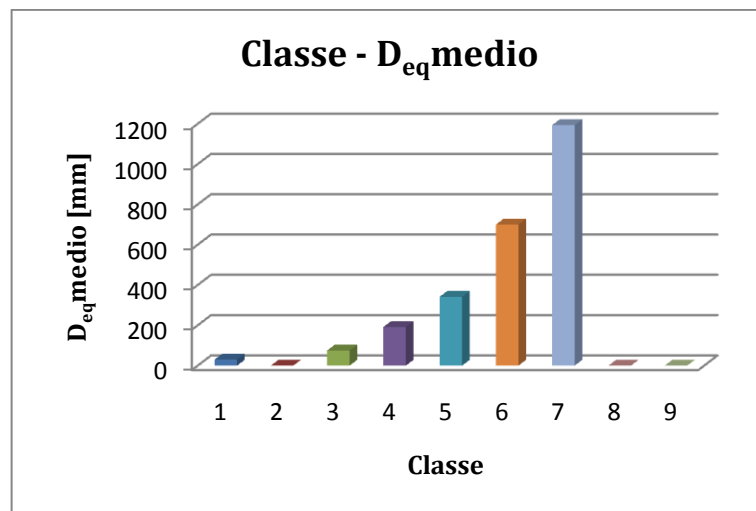
APPENDICE A

Sezione 12: Curva granulometrica						
classe	1	3	4	5	6	7
range [mm]	22.6-32	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048
D _{max} maglio	32	128	256	512	1024	2048
Passante [%]	0,00040598	0,0025205	0,02938	0,82959	17,77446	100
D ₁₀ [mm]	864					
D ₁₆ [mm]	1012					
D ₅₀ [mm]	1564					
D ₆₀ [mm]	1686					
D ₈₄ [mm]	1944					
U	1,95					
σ	1,39					



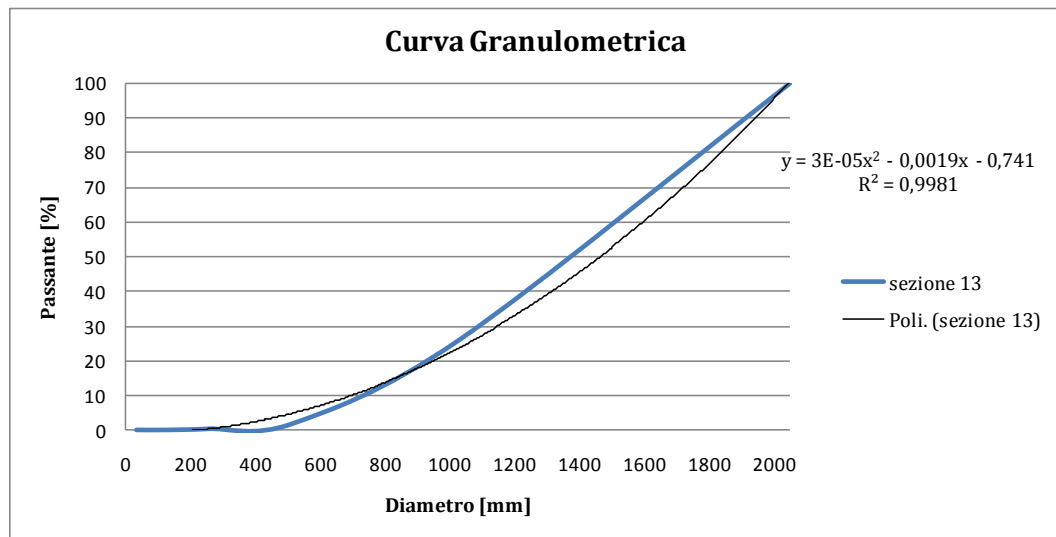
A.2.13 Sezione 13

Sezione 13									
Range D_{eq} [mm]	22.6-32	32-64	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048	2048-4096	>4096
Classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D_{eq} [mm]	30	0	75	175	325	675	1075	0	0
	30		75	175	325	625	1225		
				200	375	575	1100		
				175		925	1375		
				175		600			
				250		800			
D_{eq} medio [mm]	30	0	75	192	342	700	1194	0	0
F_{ass}	2	0	2	6	3	6	4	0	0
N° tot	23								
F_{rel}	0,09	0,00	0,09	0,26	0,13	0,26	0,17	0,00	0,00
F_{rel} [%]	9	0	9	26	13	26	17	0	0



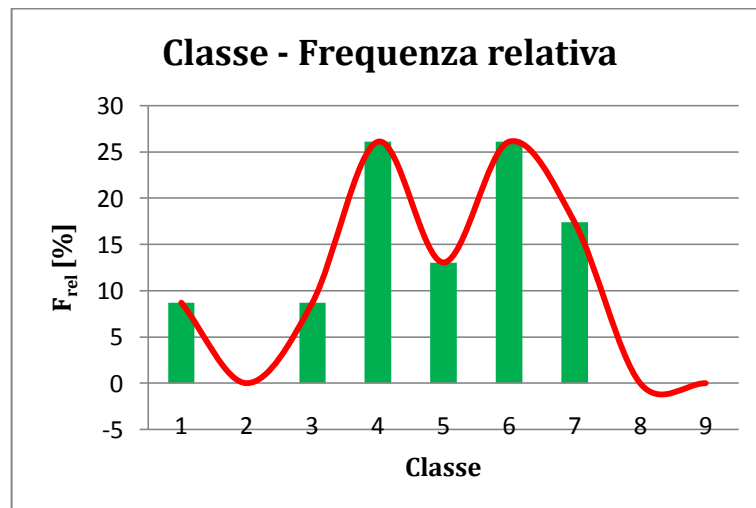
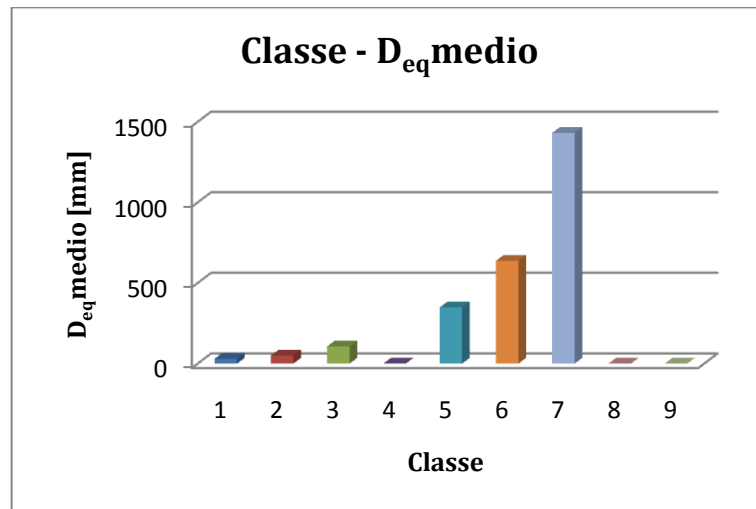
APPENDICE A

Sezione 13: Curva granulometrica						
classe	1	3	4	5	6	7
range [mm]	22.6-32	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048
D _{max} maglio	32	128	256	512	1024	2048
Passante [%]	0,000572	0,00504	0,32136	1,772827	25,72732	100
D ₁₀ [mm]	631					
D ₁₆ [mm]	779					
D ₅₀ [mm]	1333					
D ₆₀ [mm]	1455					
D ₈₄ [mm]	1713					
U	2,31					
σ	1,48					

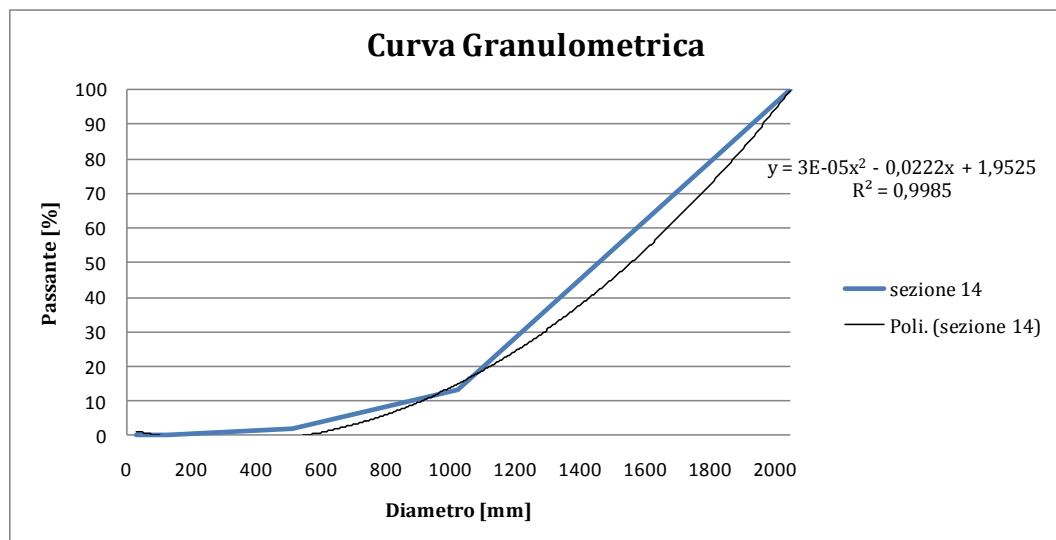


A.2.14 Sezione 14

Sezione 14									
Range D_{eq} [mm]	22.6-32	32-64	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048	2048-4096	>4096
Classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D_{eq} [mm]	30	50	100	0	275	525	1400	0	0
			100		375	675	1225		
			125		305	525	1250		
			100		500	600	1850		
					285	750			
					350	750			
D_{eq} medio [mm]	30	50	106	0	348	638	1431	0	0
F_{ass}	1	1	4	0	6	6	4	0	0
N° tot	22								
F_{rel}	0,05	0,05	0,18	0,00	0,27	0,27	0,18	0,00	0,00
F_{rel} [%]	5	5	18	0	27	27	18	0	0

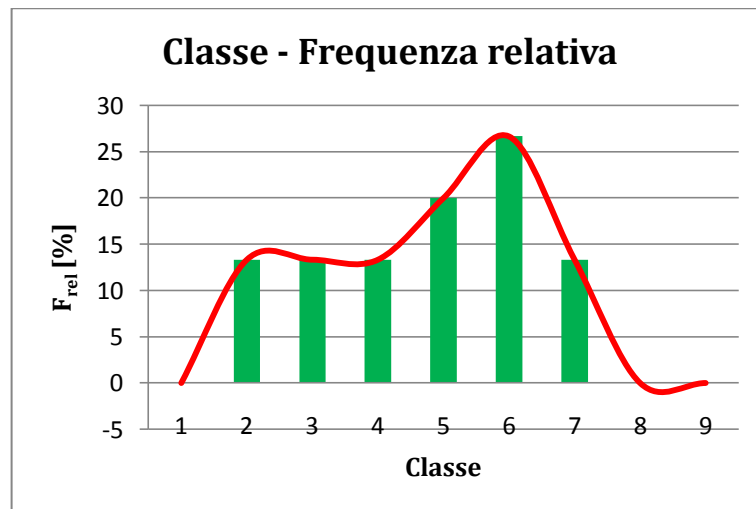
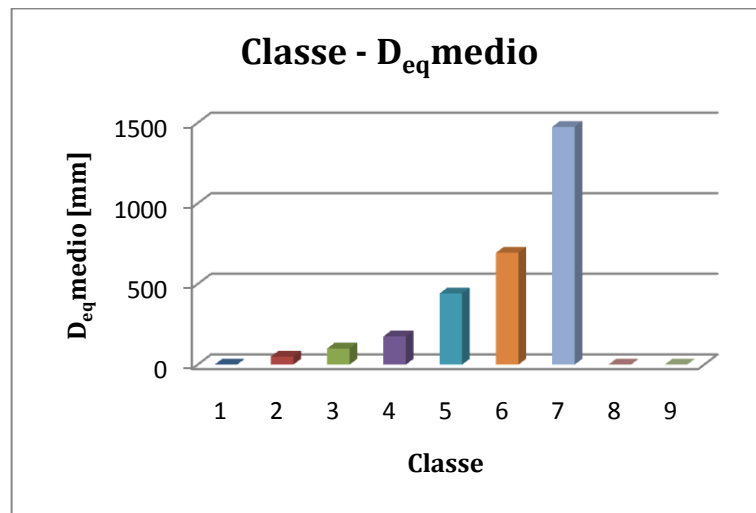


Sezione 14: Curva granulometrica					
classe	1	3	5	6	7
range [mm]	22.6-32	64-128	256-512	512-1024	1024-2048
D_{max} maglio	32	128	512	1024	2048
Passante [%]	0,00102552	0,03444347	2,010782	13,18829	100
D₁₀ [mm]	1007				
D₁₆ [mm]	1148				
D₅₀ [mm]	1689				
D₆₀ [mm]	1809				
D₈₄ [mm]	2065				
U	1,80				
σ	1,34				



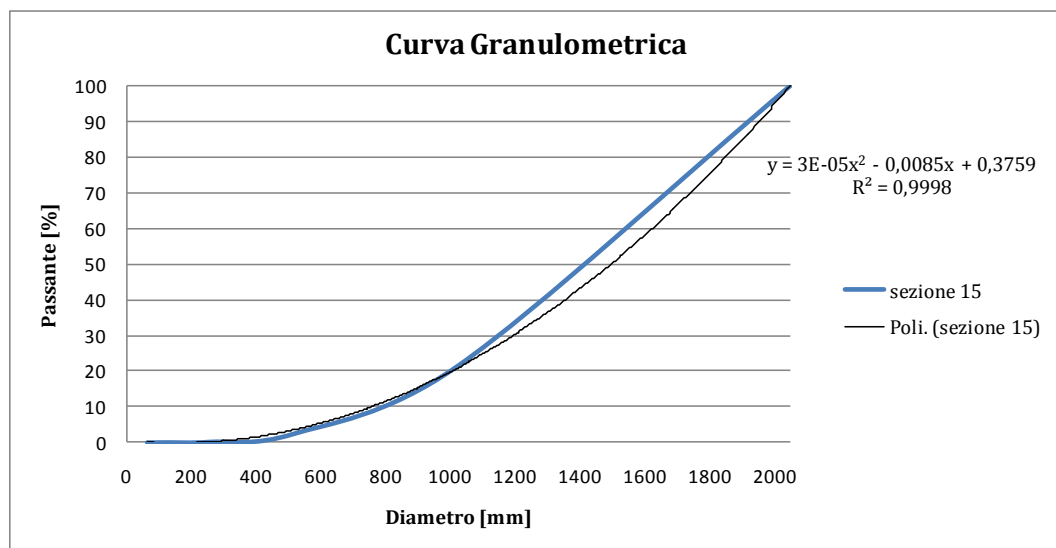
A.2.15 Sezione 15

Sezione 15									
Range D_{eq} [mm]	22.6-32	32-64	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048	2048-4096	>4096
Classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D_{eq} [mm]	0	50	75	175	450	750	1525	0	0
		50	125	175	550	725	1425		
					325	775			
						525			
$D_{eq,medio}$ [mm]	0	50	100	175	442	694	1475	0	0
F_{ass}	0	2	2	2	3	4	2	0	0
N° tot	15								
F_{rel}	0,00	0,13	0,13	0,13	0,20	0,27	0,13	0,00	0,00
F_{rel} [%]	0	13	13	13	20	27	13	0	0



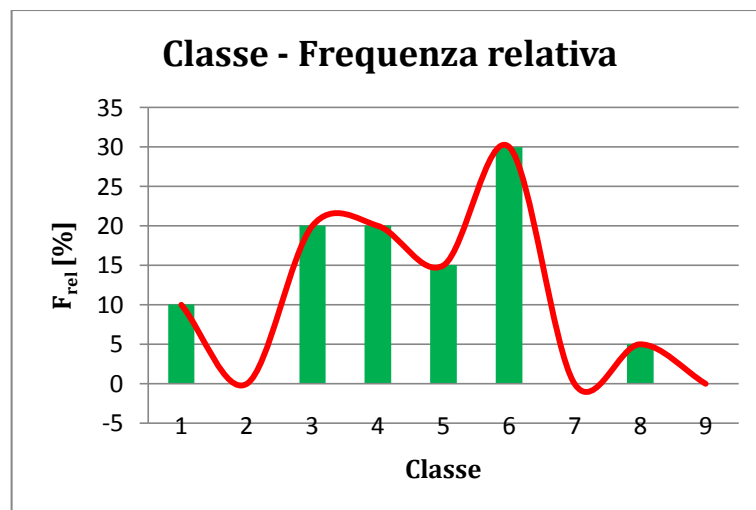
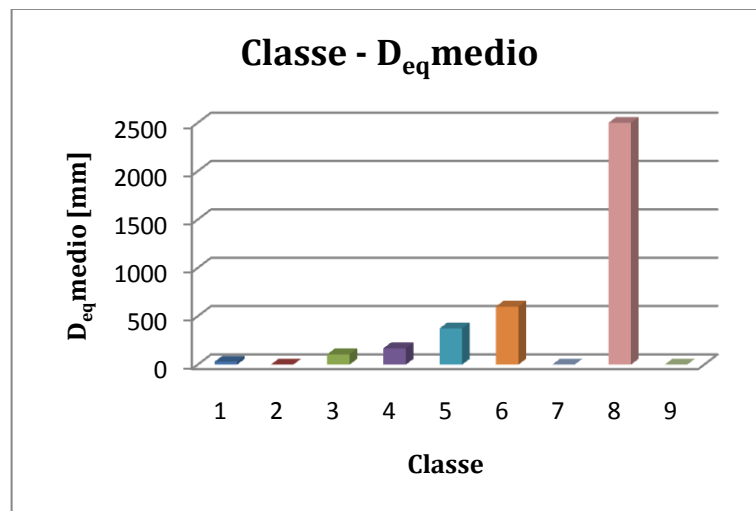
APPENDICE A

Sezione 15: Curva granulometrica						
classe	2	3	4	5	6	7
range [mm]	32-64	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048
D _{max} maglio	64	128	256	512	1024	2048
Passante [%]	0,0030446	0,0319683	0,162505	2,3325424	21,568501	100
D ₁₀ [mm]	726					
D ₁₆ [mm]	877					
D ₅₀ [mm]	1436					
D ₆₀ [mm]	1559					
D ₈₄ [mm]	1817					
U	2,15					
σ	1,44					

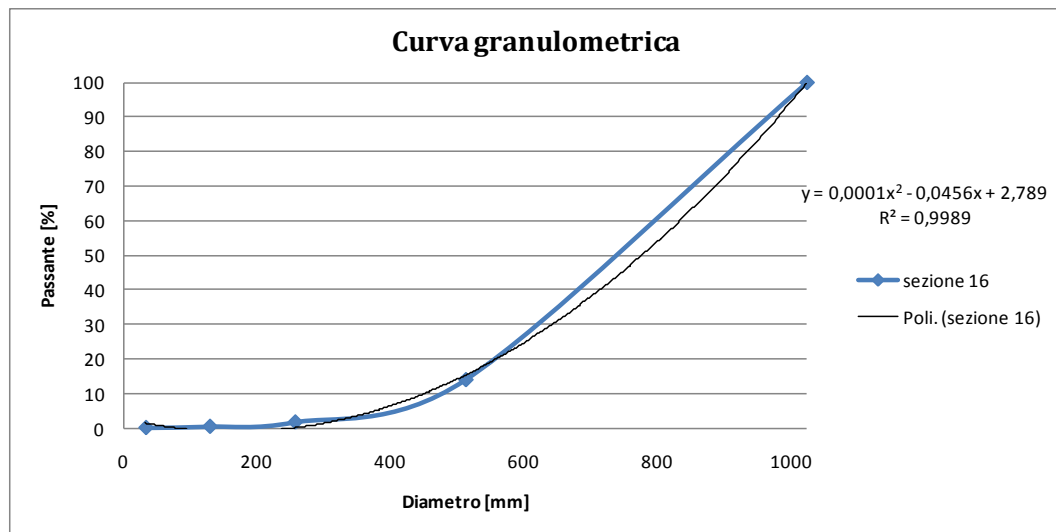


A.2.16 Sezione 16

Sezione 16									
Range D_{eq} [mm]	22.6-32	32-64	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048	2048-4096	>4096
Classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D_{eq} [mm]	30	0	125	175	350	550	0	2500	0
	30		125	175	275	625			
			75	150	500	550			
			100	175		675			
						650			
						550			
D_{eq} medio [mm]	30	0	106	169	375	600	0	2500	0
F_{ass}	2	0	4	4	3	6	0	1	0
N° tot	20								
F_{rel}	0,10	0,00	0,20	0,20	0,15	0,30	0,00	0,05	0,00
F_{rel} [%]	10	0	20	20	15	30	0	5	0

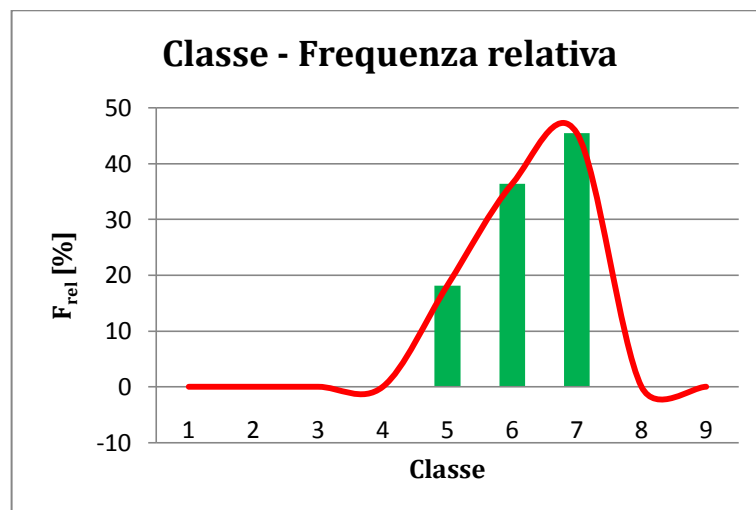
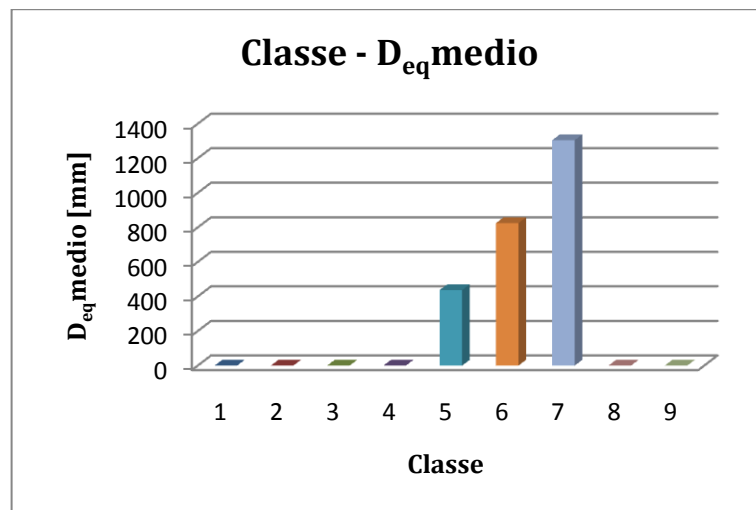


Sezione 16: Curva granulometrica					
classe	1	3	4	5	6
range [mm]	22.6-32	64-128	128-256	256-512	512-1024
D_{max} maglio	32	128	256	512	1024
Passante [%]	0,003508898	0,34972831	1,6137845	13,87361	100
D₁₀ [mm]	580				
D₁₆ [mm]	657				
D₅₀ [mm]	952				
D₆₀ [mm]	1018				
D₈₄ [mm]	1158				
U	1,75				
σ	1,33				

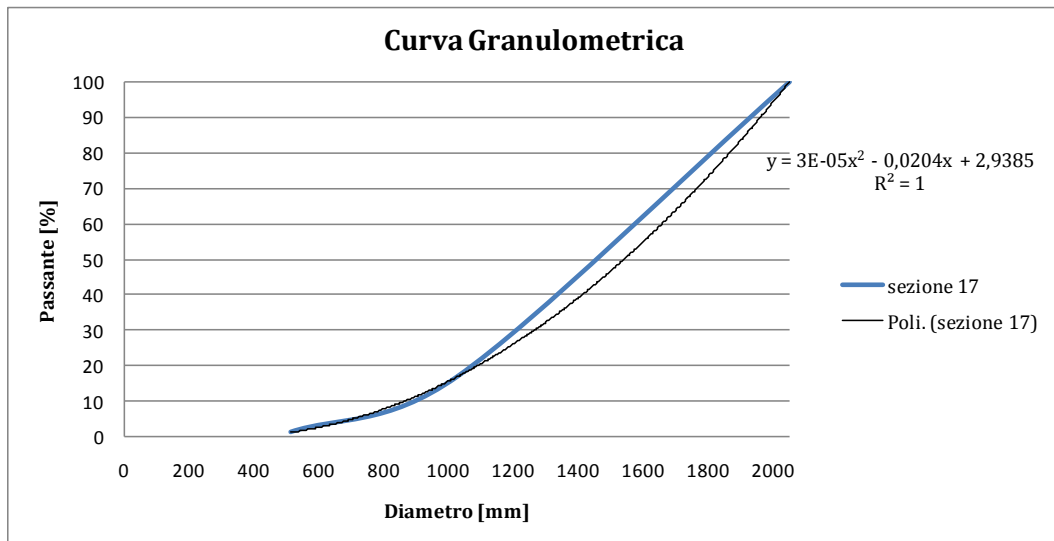


A.2.17 Sezione 17

Sezione 17									
Range D_{eq} [mm]	22.6-32	32-64	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048	2048-4096	>4096
Classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D_{eq} [mm]	0	0	0	0	500	1000	1800	0	0
					375	825	1325		
						800	1025		
						675	1050		
							1325		
D_{eq} medio [mm]	0	0	0	0	438	825	1305	0	0
F_{ass}	0	0	0	0	2	4	5	0	0
N° tot	11								
F_{rel}	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18	0,36	0,45	0,00	0,00
F_{rel} [%]	0	0	0	0	18	36	45	0	0

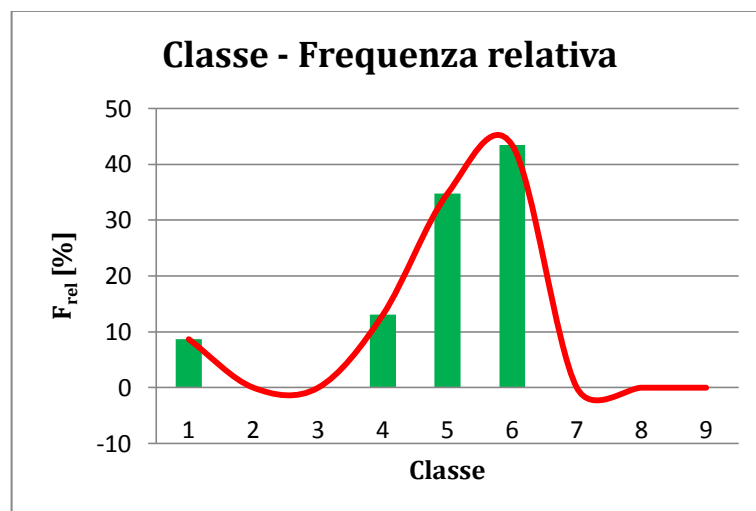
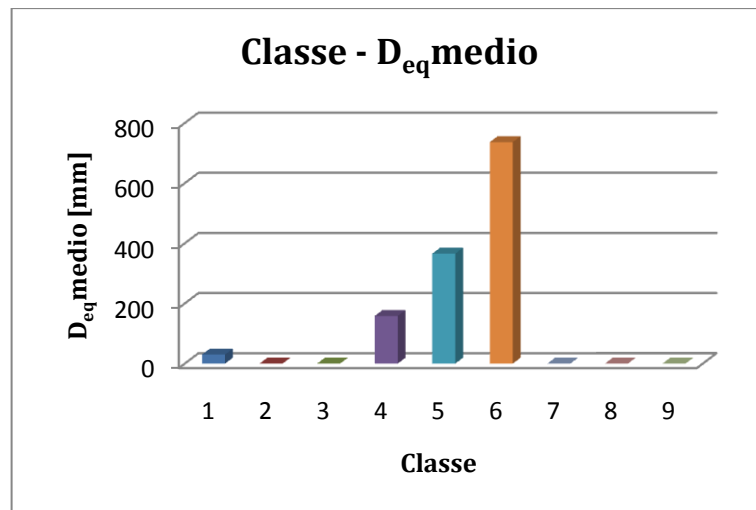


Sezione 17: Curva granulometrica			
classe	5	6	7
range [mm]	256-512	512-1024	1024-2048
D_{max} maglio	512	1024	2048
Passante [%]	1,163356768	16,7485533	100
D₁₀ [mm]	932		
D₁₆ [mm]	1082		
D₅₀ [mm]	1638		
D₆₀ [mm]	1760		
D₈₄ [mm]	2019		
U	1,89		
σ	1,37		

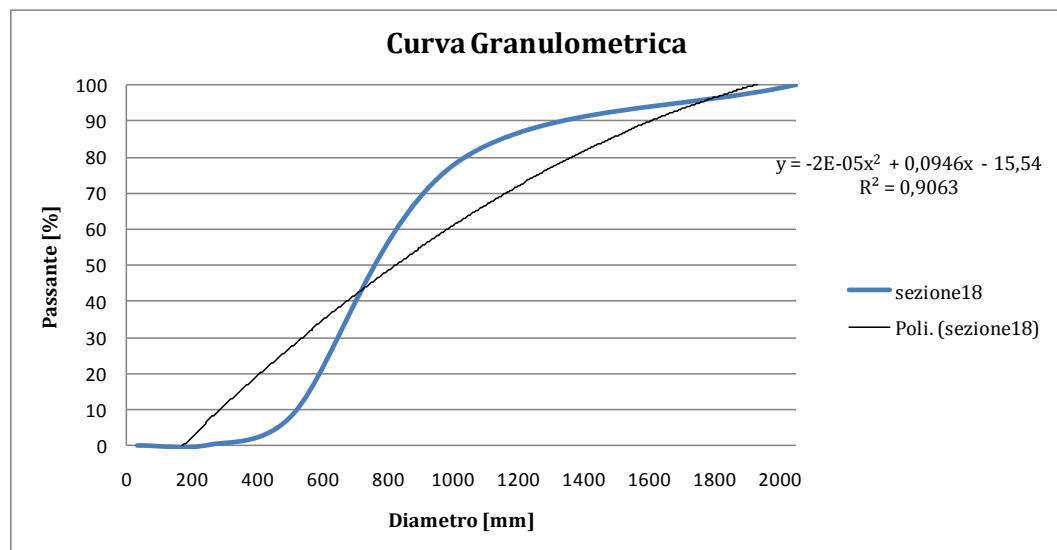


A.2.18 Sezione 18

Sezione 18									
Range D_{eq} [mm]	22.6-32	32-64	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048	2048-4096	>4096
Classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D_{eq} [mm]	30	0	0	175	275	1000	0	0	0
	30			150	475	750			
				150	300	575			
					375	890			
					375	700			
					350	750			
					350	725			
					425	800			
						650			
						525			
$D_{eq,medio}$ [mm]	30	0	0	158	366	737	0	0	0
F_{ass}	2	0	0	3	8	10	0	0	0
N° tot	23								
F_{rel}	0,09	0,00	0,00	0,13	0,35	0,43	0,00	0,00	0,00
F_{rel} [%]	9	0	0	13	35	43	0	0	0

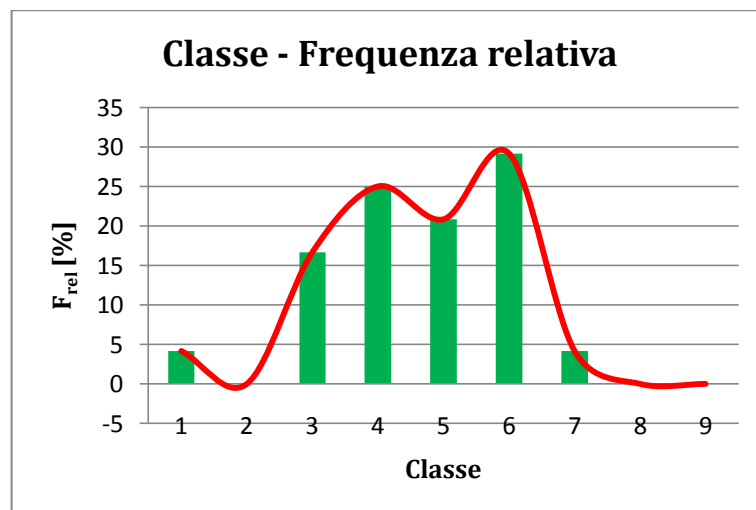
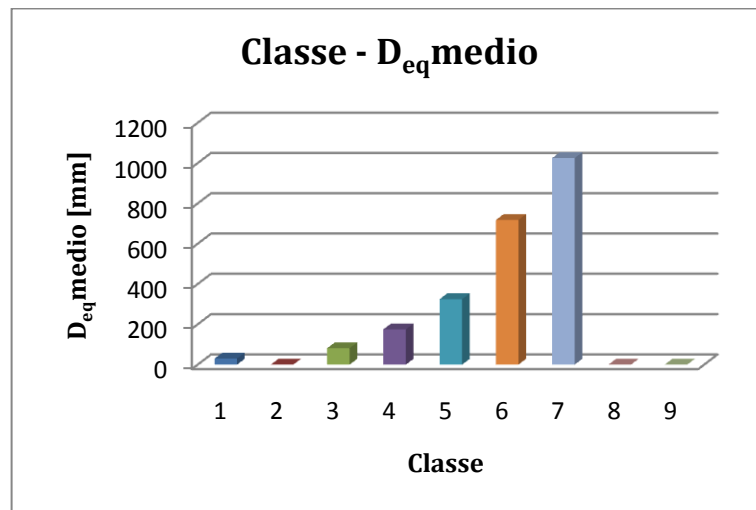


Sezione 18: Curva granulometrica					
classe	1	4	5	6	7
range [mm]	22.6-32	128-256	256-512	512-1024	1024-2048
D_{max} maglio	32	256	512	1024	2048
Passante [%]	0,001118163	0,25186355	9,0098336	79,29328	100
D₁₀ [mm]	287				
D₁₆ [mm]	361				
D₅₀ [mm]	843				
D₆₀ [mm]	1017				
D₈₄ [mm]	1580				
U	3,54				
s	2,09				



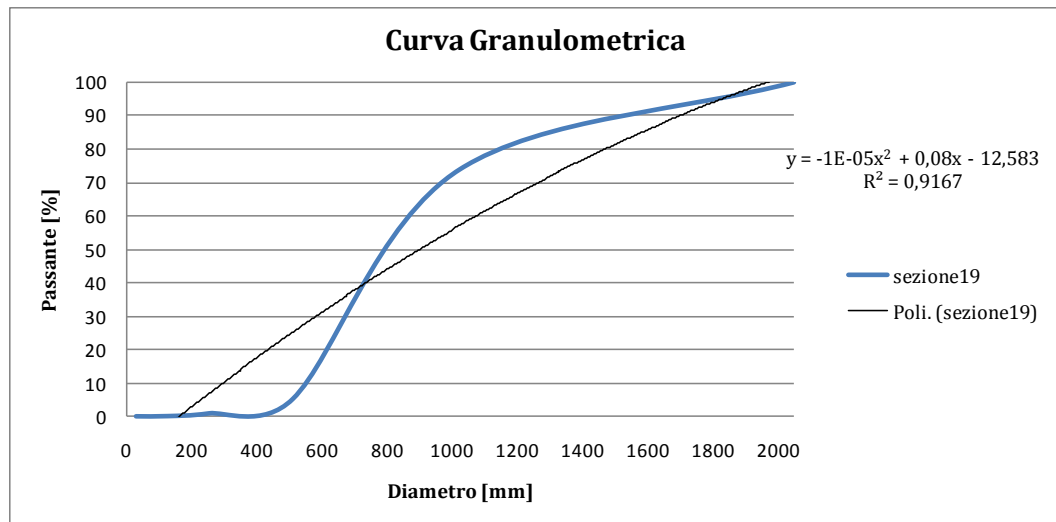
A.2.19 Sezione 19

Sezione 19									
Range D_{eq} [mm]	22.6-32	32-64	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048	2048-4096	>4096
Classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D_{eq} [mm]	30	0	100	175	350	900	1025	0	0
			75	150	275	700			
			75	150	350	900			
			75	225	300	550			
				175	350	600			
				175		725			
						650			
Deqmedio [mm]	30	0	81	175	325	718	1025	0	0
N°	1	0	4	6	5	7	1	0	0
N° tot	24								
N° / N°tot	0,04	0,00	0,17	0,25	0,21	0,29	0,04	0,00	0,00
N° [%]	4	0	17	25	21	29	4	0	0
	4	0	17	25	21	29	4	0	0



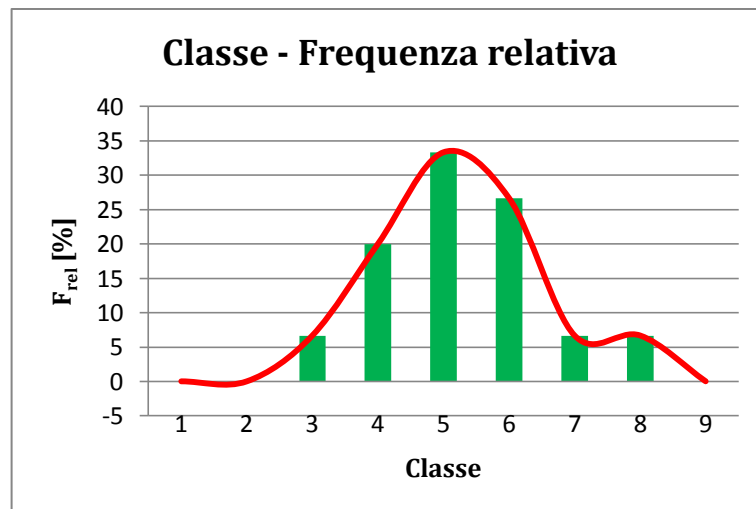
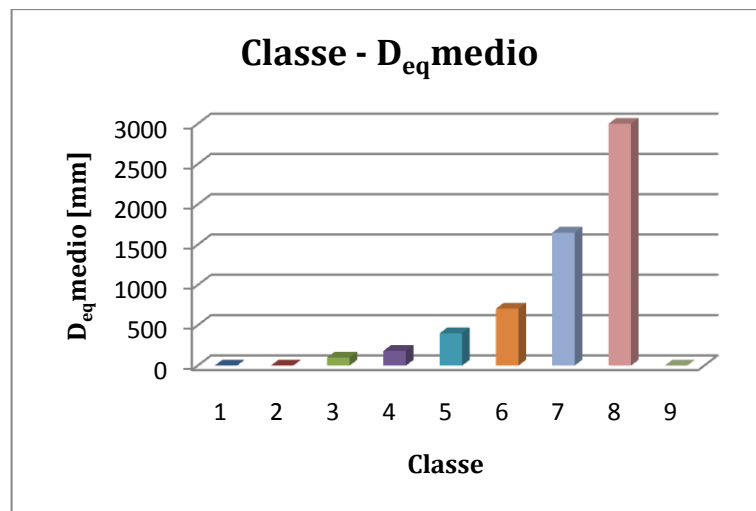
APPENDICE A

Sezione 19: Curva granulometrica						
classe	1	3	4	5	6	7
range [mm]	22.6-32	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048
D _{max} maglio	32	128	256	512	1024	2048
Passante [%]	0,000653927	0,05552626	0,8842878	5,15714	73,918232	100
D ₁₀ [mm]	293					
D ₁₆ [mm]	375					
D ₅₀ [mm]	879					
D ₆₀ [mm]	1043					
D ₈₄ [mm]	1482					
U	3,56					
s	1,99					



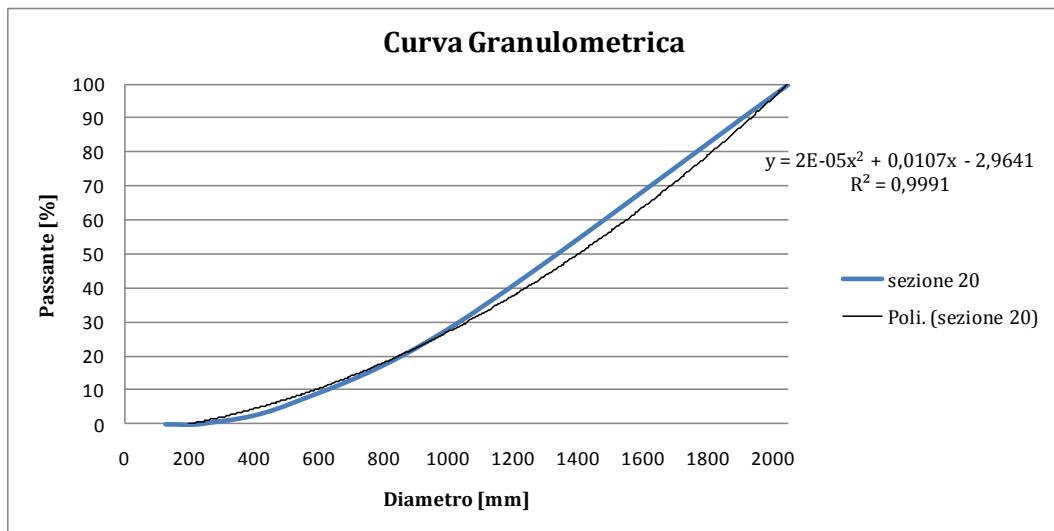
A.2.20 Sezione 20

Sezione 19									
Range D_{eq} [mm]	22.6-32	32-64	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048	2048-4096	>4096
Classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D_{eq} [mm]	0	0	100	150	500	750	1650	3000	0
				250	400	525			
				150	475	750			
					330	800			
					300				
Deqmedio [mm]	0	0	100	183	401	706	1650	3000	0
N°	0	0	1	3	5	4	1	1	0
N° tot	15								
N° / N°tot	0,00	0,00	0,07	0,20	0,33	0,27	0,07	0,07	0,00
N° [%]	0	0	7	20	33	27	7	7	0



APPENDICE A

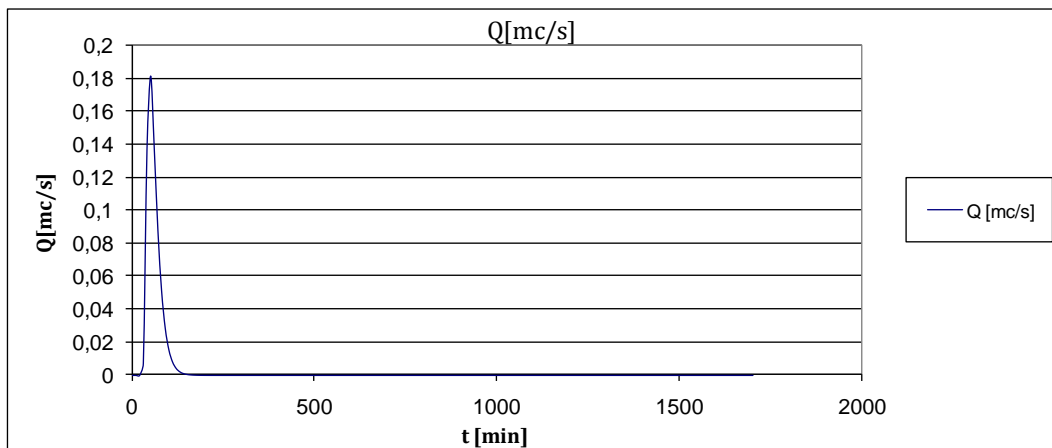
Sezione 20: Curva granulometrica					
classe	3	4	5	6	7
range [mm]	64-128	128-256	256-512	512-1024	1024-2048
D _{max} maglio	128	256	512	1024	2048
Passante [%]	0,0156861	0,366663	5,9996887	29,535979	100
D ₁₀ [mm]	581				
D ₁₆ [mm]	742				
D ₅₀ [mm]	1382				
D ₆₀ [mm]	1527				
D ₈₄ [mm]	1835				
U	2,63				
σ	1,57				



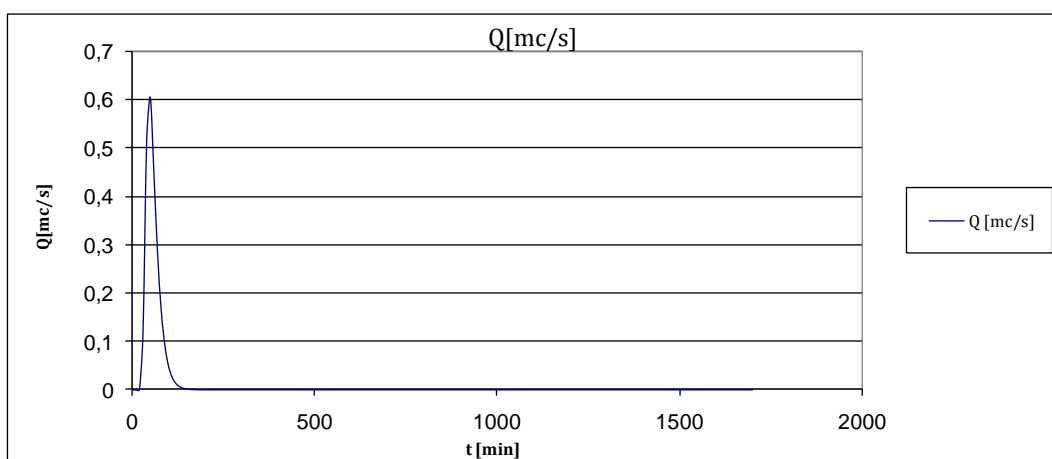
A.3 Idrogrammi delle portate dei deflussi superficiali

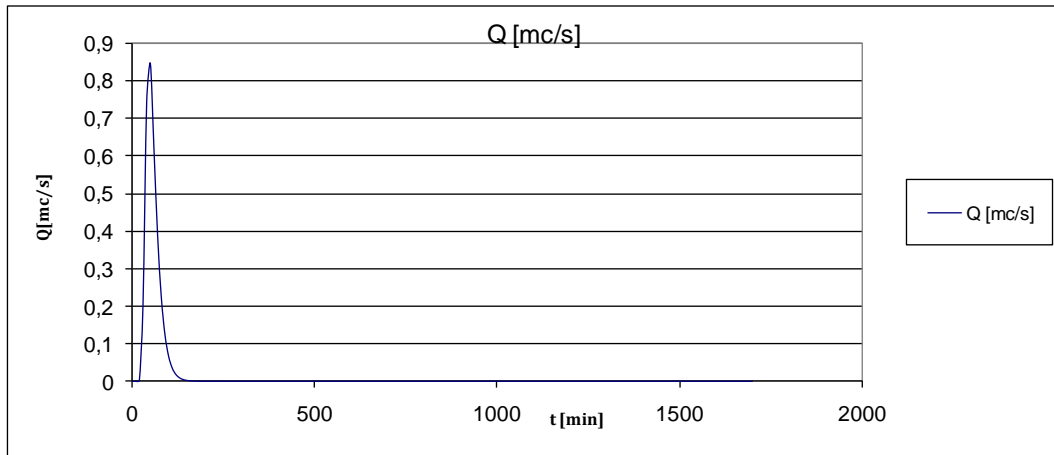
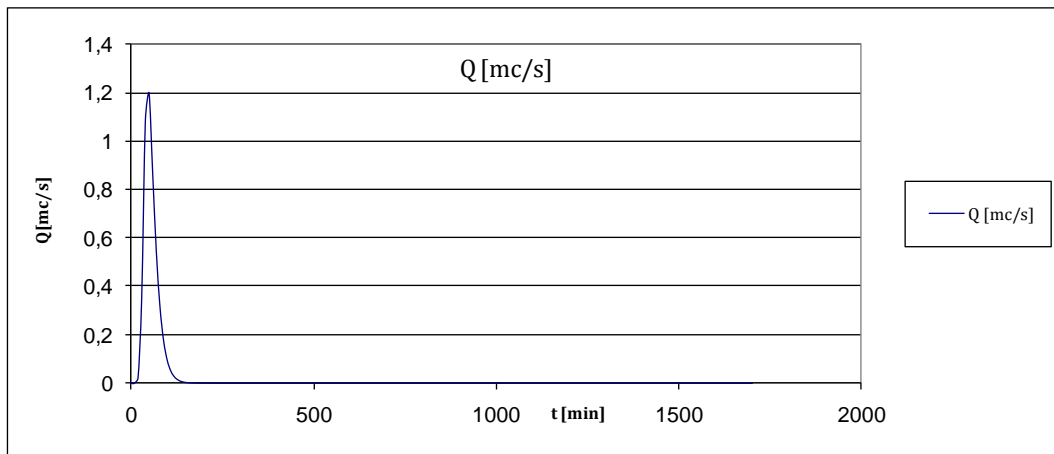
Si riportano gli idrogrammi ottenuti dal modello afflussi-deflussi di Nash, per differenti periodi di ritorno: 20 anni, 100 anni, 200 anni e 500 anni.

A.3.1 $T_r= 20$ anni



A.3.2 $T_r= 100$ anni



A.3.3. $T_r = 200$ anni**A.3.4. $T_r = 500$ anni**

Lista dei simboli

B.1 Modellazione della perdita dei sedimenti dai versanti

B.1.1 Modello di Gavrilovic

A: area del bacino

O: perimetro del bacino

D: altezza media del bacino

I: pendenza media del bacino

t: temperatura media annuale del bacino

T: coefficiente di temperatura

H: precipitazione media annuale

R: coefficiente di ritenzione dei sedimenti

Z: coefficiente di erosione

C: fattore di copertura del suolo

l: lunghezza d'asta principale del corso d'acqua

l_i: lunghezza d'asta secondaria del corso d'acqua (lunghezza degli affluenti)

Ξ: coefficiente di copertura del suolo

Π: coefficiente di resistenza del suolo

Φ: coefficiente di tipologia ed estensione dell'erosione

G: discarica media annuale di sedimenti

W: produzione media annuale di sedimento dovuto all'erosione superficiale

B.1.2 Modello di USLE

E: perdita di suolo medio annua

R: fattore di erodibilità di pioggia e deflusso

L: fattore di lunghezza del versante

K: fattore di erodibilità del suolo

S: fattore di pendenza del versante

A: area del bacino

L_{CH}: lunghezza asta principale

λ : lunghezza libera della pendice

m: coefficiente empirico

θ : pendenza del bacino

C: fattore di copertura vegetale ed uso del suolo

C_i: stadio relativo alle varie fasi di sviluppo delle colture

R_i: pioggia media relativa alle varie fasi di sviluppo delle colture

P: fattore tecniche sistematorie

D_g: media geometrica dei sedimenti delle particelle di suolo

f_i: valore % della frazione di particelle di suolo delle classi i-esime

m_i: media aritmetica del diametro delle particelle della i-esima classe

B.1.3 Modello di RUSLE

E: perdita di suolo medio annua

R: fattore di erodibilità di pioggia e deflusso

C: fattore di copertura vegetale ed uso del suolo

P: fattore tecniche sistematorie

λ : lunghezza libera della pendice

θ : pendenza del bacino

m: coefficiente empirico

LS: fattore che unisce i parametri L e S di USLE in un unico valore

B.2 Analisi granulometrica

B.2.1 Costruzione delle curve granulometriche

D_{eq}: diametro equivalente del grano

asse_{max}: asse maggiore del grano

asse_{min}: asse minore del grano

F_{ass}: frequenza assoluta

F_{rel}: frequenza relativa delle classi granulometriche

N_{tot}: numero totale dei vari grani

V: volume del grano

D₅₀: diametro corrispondente al passaggio in peso del 50% del campione

D₁₀: diametro corrispondente al passaggio in peso del 10% del campione

D₁₆: diametro corrispondente al passaggio in peso del 16% del campione

D₆₀: diametro corrispondente al passaggio in peso del 60% del campione

D₈₄: diametro corrispondente al passaggio in peso del 84% del campione

U: coefficiente di uniformità

σ: deviazione standard

B.2.2 Modello del cubo di Kellerhals e Bray e del cubo modificato di Displas e Sutherland

p(V-W)_i: percentuale in peso del volume delle diverse classi granulometriche

p(A-W)_i: percentuale in peso dell'area delle diverse classi granulometriche

p(L-N)_i: percentuale delle classi granulometriche rispetto al numero dal campionamento lineare

C: costante

B.3 Portate di incipiente movimento e trasporto solido

B.3.1 Calcolo delle portate di incipiente movimento

q_{cr}*: portata adimensionale

q_{cr}: portata di incipiente movimento

i_r: pendenza del tratto

l: lunghezza della sezione

d: diametro medio della particella

g: accelerazione gravitazionale

B.3.2 Calcolo delle portate di pioggia

A: area del bacino

L: lunghezza dell'asta principale

H_m: quota media del bacino

H₀: quota della sezione di chiusura

T_c: tempo di corrivazione

k: costante lineare d'invaso

N: numero di invasi lineari

CN: curve number

IUH: idrogramma unitario istantaneo

S: volume massimo che può essere trattenuto dal terreno come funzione della sua permeabilità

I_a: astrazione iniziale dovuta al fenomeno di intercettazione ed infiltrazione

θ_{cr}: durata critica della pioggia

i: intensità

p_n: pioggia netta

Q: portata di deflusso superficiale

Bibliografia

[1] Matteo Mandelli, Laura Longoni, Monica Papini, Fabio Rancoroni, Alessio Radice; *Modellazione del trasporto di sedimenti sul bacino del Tartano (Valtellina)*; *Geingegneria Ambientale e Mineraria*, Anno XLVI, n. 2, agosto 2009.

[2] Vincenzo Bagarello, Vito Ferro; *Erosione e conservazione del suolo*; Copyright 2006 The McGraw-Hill Companies, S.r.l.

[3] Jens M. Turowski, Elowyn M. Yager, Alexander Badoux, Dieter Rickenmann and Peter Molnar; *The impact of exceptional events on erosion, bedload transport and channel stability in a step-pool channel*; *Earth surface processes and landform* (2009).

[4] Francesco Ballio, Laura Longoni, Matteo Mandelli; *Bilancio di sedimenti a scala di bacino: applicazione alla Val Tartano*; Politecnico di Milano, Facoltà di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale, anno accademico 2006/2007.

[5] F. Ballio, D. Brambilla, E. Giorgetti, L. Longoni, M. Papini & A. Radice; *Evaluation of sediment yield from valley slopes: a case study*; Politecnico di Milano, Dept. I.I.A.R., Milan, Italy.

[6] Martha M. Bakker, Gerard Govers, Anne van Doorn, Fabien Quetier, Dimitris Chouvardas, Mark Rounsevell; *The response of erosion and sediment export to land-use change in four areas of Europe: The importance of landscape pattern*; ScienceDirect, *Geomorphology* 1998.

[7] Renée; Heilbronner, Nynke Keulen; *Grain size and grain shape analysis of fault rocks*; Geological Institute, Department of Environmental Sciences, Basel University, Bernoullistr. 32, Switzerland.

- [8] Ambrogio Maria Manzino, Emiliano Grigiolo, Simone Prosari; *Fotogrammetria: cartografia numerica di un quartiere di Villata*; Politecnico di Torino, II Facoltà di Ingegneria, anno accademico 2004/2005.
- [9] Mario Lenzi; *Analisi granulometrica di un corso d'acqua*; Corso di aggiornamento professionale (2005), Sezione II: Riqualificazione degli ambiti fluviali ed ingegneria naturalistica.
- [10] Kristin Bunte, Steven R. Abt; *Sampling Surface and Subsurface Particle-Size Distributions in Wadable Gravel – and Cobble – Bed Streams for Analyses in Sediment Transport, Hydraulics, and Streambed Monitoring*; United States Department of Agriculture.
- [11] Paola Gattinoni, Monica Papini, Laura Scesi; *Geologia Applicata*; Milano: CEA, 2001.
- [12] Panayiotis Diplas, Alex J. Sutherland; *Sampling Techniques for Gravel Sized Sediments*; Civil Engineering Department of the University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- [13] Ambrogio Maria Manzino, Sara Bottini, Laura Nifantani, Bruno Bolzani, Giorgio Dago; *Rilievo fotogrammetrico terrestre del portale e parte della lunetta della Basilica di S. Andrea presso Vercelli*; ; Politecnico di Torino, II Facoltà di Ingegneria, anno accademico 2001/2002.
- [14] 14S.C. Stover, D.R. Montgomery; *Channel change and flooding, Skokomish River, Washington*, Department of Geological Sciences, University of Washington, Seattle, USA.
- [15] Vincenzo D'Agostino e Vinicio Carraro; *Conoscere il sistema fiume nell'ambiente alpino*; Università degli Studi di Padova, Dip.to territorio e sistemi agro-forestali; Pubblicazione del Corso di Cultura in Ecologia.

[16] Francesco Ballio, Silvio Franzetti, Alberto Guadagnini; *Corso di idraulica II: trasporto solido*.

[17] Aronne Armanini; *Principi di Idraulica Fluviale*; Cosenza: BIOS, 1999.

[18] Paolo Martinis; *Statistica degli Estremi*.

[19] Michele Di Lazzaro; *Modelli lineari della risposta idrologica*; Corso di Idrologia Applicata 2008-2009.

[20] Autorità di Bacino del Fiume Po; *Piano stralcio per l'Aspetto idrogeologico (PAI)*; Interventi sulla rete idrografica e sui versanti, Allegato 3 (2001).

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano:

l'ing. Laura Longoni per la competenza con cui a seguito l'intero progetto, l'ing. Alessio Radice per la presenza e le sue idee innovative, l'ing Luigi Barazzetti per l'aiuto nell'aspetto topografico-fotogrammetrico e non da meno l'ing. Davide Brambilla per la sempre disponibilità e le capacità organizzative.