



Università degli Studi di Cagliari

DOTTORATO DI RICERCA

Difesa e Conservazione del suolo, Vulnerabilità ambientale e Protezione Idrogeologica

Ciclo XXII

Settore/i scientifico disciplinari di afferenza

GEO/05

TITOLO TESI

Descrizione del comportamento reologico ed idraulico dei fenomeni di colata detritica legati ad attività torrentizia per trasporto in massa (*mud-debris-flow*), in ambiente mediterraneo. Applicazione al caso di studio offerto dall'evento del 6 dicembre 2004 a Villagrande Strisaili.

Presentata da: Ing. Luca Demurtas

Coordinatore Dottorato: Prof. Felice Di Gregorio

Relatore: Prof. Gabriele Uras

Esame finale anno 2010

INDICE

INTRODUZIONE	3
INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E CARATTERISTICHE GENERALI DEL TERRITORIO	7
ANALISI STORICA DEI FENOMENI DI DISSESTO	12
CENNI SULL'EVOLUZIONE STORICA DEL CENTRO URBANO DI VILLAGRANDE STRISAILI	12
L'ALLUVIONE DEL 1899	15
PIANO DI ASSETTO IDROGEOLOGICO	16
CARATTERISTICHE VEGETAZIONALI E FORESTALI	17
VIABILITÀ RURALE NEL BACINO IDROGRAFICO	20
TERRAZZAMENTI ANTROPICI E COLTIVAZIONI	20
SITUAZIONE FORESTALE DI DISSESTO DEL BACINO IDROGRAFICO GENERALE A MONTE DELL'ABITATO SUCCESSIVAMENTE ALL'EVENTO DEL 6 DICEMBRE 2004	20
ANALISI GEOLOGICA	22
INQUADRAMENTO GEOLOGICO GENERALE DEL BACINO	22
CARATTERI GEOMORFOLOGICI GENERALI DEL BACINO DEL RIO S'ARRESCOTTU	25
INQUADRAMENTO TETTONICO DELL'AREA	28
CARATTERISTICHE DELL'AMMASSO ROCCIOSO	28
CIRCOLAZIONE IDRICA SUPERFICIALE E SOTTERRANEA	29
ANALISI DELLA COLATA DETRITICA DEL 6 DICEMBRE 2004	30
ANALISI DEI MATERIALI PRESENTI IN ALVEO.....	41
ANALISI REOLOGICHE SPERIMENTALI SUI CAMPIONI PRELEVATI SUCCESSIVAMENTE ALL'EVENTO DEL 6 DICEMBRE 2004	44
ESPERIMENTI REOLOGICI EFFETTUATI SUI CAMPIONI	51
RISULTATI FINALI	69
ANALISI IDROLOGICHE	81
ASPETTI CLIMATICI E PLUVIOMETRICI.....	81
PARAMETRI DI FORMA	81
CALCOLO DEL TEMPO DI CORRIVAZIONE.....	82
CALCOLO DEL NUMERO DI CURVA ADIMENSIONALE CN	85
DESCRIZIONE DEL MODELLO NUMERICO UTILIZZATO.....	87
PLUVIOMETRIA DELLA ZONA DI INTERESSE.....	88
RICOSTRUZIONE DELL'EVENTO 6-7 DICEMBRE 2004.....	88
RISULTATI DELLA SIMULAZIONE EFFETTUATA SULLO IETOGRAMMA REGISTRATO A VILLANOVA STRISAILI	90
RISULTATI DELLA SIMULAZIONE EFFETTUATA SULLO IETOGRAMMA REGISTRATO A VILLAGRANDE STRISAILI	92
ANALISI TOPOGRAFICHE	93
ANALISI IDRAULICA 1: MODELLAZIONE DEI FENOMENI DI COLATA DETRITICA CON METODI CINEMATICI MONODIMENSIONALI	96
DESCRIZIONE DEL MODELLO NUMERICO UTILIZZATO.....	96
DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO.....	99
APPLICAZIONE DEL MODELLO AL CASO IN STUDIO	99
CALIBRAZIONE DEL MODELLO	100
ANALISI IDRAULICA 2: MODELLAZIONE DEI FENOMENI DI COLATA DETRITICA CON METODI BIDIMENSIONALI TENENDO CONTO DELLA REOLOGIA DELLE ANALISI SPERIMENTALI	103
CODICE DI CALCOLO UTILIZZATO.....	103
ASPETTI TEORICI DELLA MODELLAZIONE.....	104
CRITERI DI STABILITÀ NUMERICA	106
COSTRUZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO.....	107
GRIGLIA DI CELLE QUADRATE.....	108
DEFLUSSO SUPERFICIALE	108
DEFLUSSO NEL CANALE	109
INTERFACCIA CANALE – AREA DI ESONDAZIONE	110
STRUTTURE IDRAULICHE	110

STRADE.....	110
ARGINI.....	111
RIDUZIONE DELLE AREE DELLE CELLE DEL RETICOLO.....	112
SIMULAZIONE DELLA COLATA DI DETRITO.....	112
DETERMINAZIONE DEL DEBRISGRAMMA.....	113
DEFINIZIONE DEL DEBRISGRAMMA DELL'EVENTO PER IL RIO S'ARRESCOTTU.....	116
COEFFICIENTI DI SCABREZZA.....	119
PORTATE DI RIFERIMENTO.....	120
IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO BIDIMENSIONALE.....	120
PRESENTAZIONE DEI RISULTATI PER IL MODELLO BIDIMENSIONALE.....	122
CONFRONTO DEI RISULTATI E CONCLUSIONI.....	125
ALLEGATO 1: CARTA GEOMORFOLOGICA DEL BACINO DEL RIO S'ARRESCOTTU.....	135
ALLEGATO 2: PLANIMETRIA CON UBICAZIONE DELLE SEZIONI DI VERIFICA IDRAULICA....	137
ALLEGATO 3: PLANIMETRIA DELL'EVENTO 2004;DATI PER LA CALIBRAZIONE DEL MODELLO	139
BIBLIOGRAFIA.....	141

INTRODUZIONE

Da sempre i maggiori insediamenti abitativi sono sorti lungo le aree fluviali, poiché l'uomo ha riconosciuto nell'acqua un importante mezzo di sostentamento e una grande risorsa da rispettare e da preservare. Inoltre, l'uomo, ha sempre avuto rispetto delle aree golenali dei corsi d'acqua, sfruttandole per l'uso agricolo ma, allo stesso tempo, avendo la cura di fortificare i versanti con muretti a secco e creare delle reti di drenaggio rurali, nonché riconoscendo e mantenendo intatte le superfici inondabili dei fiumi, consapevole della loro potenza distruttiva negli eventi di piena.

Alcuni fenomeni di particolare azione distruttiva sono quelli identificati col nome di "colate detritiche" (*debris flow*), miscugli naturali di acqua e detriti in elevata concentrazione che si formano generalmente a seguito di piogge intense o di lunga durata e che si propagano lungo le aste torrentizie dei bacini montani.

Nei centri urbani montani, l'espansione urbanistica degli ultimi decenni, ha portato ad una veloce e incontrollata antropizzazione delle aree di pertinenza fluviale con l'edificazione di agglomerati urbani, centri residenziali, commerciali e artigianali e con la conseguente necessità di domare i fiumi, rettificandoli e imprigionandoli con argini di solido cemento, ma dimenticando l'antica cultura dei nostri avi sul rispetto e la manutenzione di queste aree, anche a causa del progressivo abbandono delle campagne.

Questa situazione è stata forse aggravata dal clima siccitoso che ha caratterizzato gli ultimi tempi che ci ha fatto assistere ad un aumento dei fenomeni di piena repentini e improvvisi, i quali sempre più spesso trovano l'uomo impreparato e stupito davanti ad eventi che chiama calamità, dimenticandone invece il carattere naturale.

È strano notare come allo sviluppo tecnologico, all'aumento delle conoscenze e al miglioramento delle scienze, corrisponda una decadenza degli antichi saperi e del *know-how* che i nostri antenati avevano sviluppato nella loro cultura millenaria. Infatti, in corrispondenza dei centri abitati, le attività antropiche costruite nei pressi dei torrenti hanno frequentemente comportato la necessità di costringere i corsi d'acqua a defluire in alvei fissi che ne impediscono le naturali divagazioni. È proprio in tali circostanze che eventi quali le piene torrentizie e le colate detritiche vengono a costituire un rischio altissimo per le strutture e le attività umane. Gli effetti distruttivi indotti dall'alta capacità erosiva e dalla elevata energia del materiale trasportato, dovuti anche all'estrema rapidità con cui si evolvono, caratterizzano infatti questi fenomeni, creando situazioni di rischio anche lontano dagli alvei.

Nonostante questi fenomeni siano particolarmente attivi nell'arco alpino e in tutti quei rilievi di recente formazione che presentano una forte energia e importanti acclività, anche nelle aree mediterranee sono particolarmente frequenti e si mostrano con delle conformazioni particolari che dipendono dalla geomorfologia dei luoghi, dalle caratteristiche fisiche reologiche

dei materiali costituenti le miscele e dalle condizioni atmosferiche tipiche della zona (Palacios et alii 2003, Demurtas et alii, 2007).

In questa ricerca sono state studiate le caratteristiche degli eventi che si presentano in queste aree prendendo spunto da un evento verificatosi a Villagrande Strisaili, centro abitato situato sulle pendici del Gennargentu, nella Sardegna centro orientale. L'evento preso in considerazione si è manifestato in una forma particolarmente distruttiva, causando ingentissimi danni alle strutture e provocando inoltre la morte di due persone.

Attraverso analisi dirette condotte sul campo, è stato da subito chiaro come gli eventi esaminati fossero nettamente diversi da quelli che, ad esempio, si sviluppano in ambiente Alpino, dove la granulometria, la composizione e lo spessore dei detriti origine di eventi di colata detritica, sono completamente differenti da quelli esaminati in questo lavoro di ricerca (Tropeano et alii 1998, Turconi et alii, 2003, Govi 1984, Pica 1978, Falciai et alii 1996, Takahashi et alii 1991, Tropeano 1991, Tropeano 1990)

Il metodo di studio proposto mira quindi principalmente alla comprensione degli eventi parossistici di tipo colata detritica *debris flow*, mediante una metodologia di analisi complessa, caratterizzata dall'osservazione dei fenomeni sotto diversi punti di vista e composta da cinque distinte fasi principali di analisi:

- 1) Analisi storica dei fenomeni pregressi della zona in esame ed in aree limitrofe e affini.

La raccolta di dati storici effettuata su archivi e memorie storiche, permette di individuare eventuali eventi pregressi occorsi nel territorio in esame, utili alla definizione delle tipologie di processo più frequenti e delle caratteristiche degli stessi, in funzione dell'areale interessato, della frequenza e della dinamica di movimento, utili per una conoscenza più dettagliata del bacino idrografico e al fine di collocarli in modo adeguato sul territorio secondo un'opportuna corrispondenza spazio temporale.

- 2) Analisi del fenomeno dal punto di vista geologico, geomorfologico e ambientale.

Questa prima fase di analisi consiste nella acquisizione dei parametri fisici dell'area in esame, che rappresentano le cause predisponenti e determinanti i fenomeni di trasporto solido torrentizio, individuate sulla base degli aspetti litologici, morfologici e strutturali del bacino idrografico. Tali aspetti sono legati principalmente alle caratteristiche composizionali, tessiturali, strutturali, stratigrafiche e d'alterazione dei materiali presenti nell'area, nonché alle caratteristiche geometriche dei versanti e degli alvei, che determinano la dinamica dei processi morfologici e l'evoluzione del rilievo e del reticolo idrografico.

L'acquisizione dei fattori geologico-geomorfologici e climatici predisponenti lo sviluppo dei fenomeni franosi risulta fondamentale inoltre per la valutazione dei potenziali volumi detritici mobilizzabili in corrispondenza di eventi parossistici, in termini di magnitudo. Infatti il rilievo di superficie consente una stima dei volumi dei depositi di accumulo interessanti il bacino idrografico, suscettibili al movimento, pervenendo ad una stima del bilancio di massa dell'evento considerato. L'analisi di tali aspetti è inoltre necessaria per evidenziare le tracce morfologiche e gli effetti di eventuali eventi pregressi come canali di deflusso preferenziali e

fenomeni di ruscellamento e di erosione, indicazioni indispensabili per la corretta calibrazione del modello.

3) Analisi quantitativa dei dati reologici, idrologici, e topografici.

- Attraverso lo studio idrologico del bacino è possibile ricostruire la risposta dello stesso in termini di afflussi meteorici, mediante la valutazione quantitativa del deflusso superficiale in termini di portata liquida di picco.

- L'analisi topografica, effettuata mediante rilievo topografico di dettaglio, consente di definire numericamente le quote altimetriche del canale di deflusso oltreché la geometria della zona di innesco e dell'impluvio.

- L'Analisi reologica permette di caratterizzare le proprietà plastiche del fluido che compone la colata.

Tali proprietà sono determinanti per lo sviluppo della cinematica dell'onda di deflusso e vengono condotte generalmente sulla matrice del fluido che porta in sospensione i clasti più grossolani.

4) Simulazione numerica del fenomeno attraverso i dati di input ottenuti dalle precedenti fasi conoscitive.

La raccolta dei dati ottenuti mediante le fasi di acquisizione dei valori numerici relativi alle caratteristiche geologiche, morfologiche, topografiche, idrologiche e reologiche del bacino idrografico in esame rappresenta l'input dei modelli fisici e numerici del flusso della colata. Questi codici, basati e studiati attraverso l'applicazione di diverse teorie scientifiche, possono essere monodimensionali o bidimensionali, e considerano in vario modo il parametro reologico dei materiali.

5) Calibrazione mediante *back analysis* e verifica della simulazione attraverso la ricostruzione di un fenomeno pregresso noto.

Attraverso la calibrazione dei modelli di simulazione dell'evento di colata detritica mediante *back analysis*, effettuata sui valori massimi di portata di picco e su determinati parametri caratteristici dell'area indagata per un evento noto verificatosi in passato, vengono restituite dal codice di calcolo le caratteristiche della colata tratto per tratto. La calibrazione del modello cinematico della colata detritica simulata, viene verificata, nel caso preso in esame, mediante l'evento occorso nel bacino imbrifero del rio S'Arrescottu il 6 dicembre 2004, del quale sono stati rilevati i parametri fisici nell'immediato post-evento.

Attraverso questa fase di studio, gli obiettivi che si intendono perseguire sono fondamentalmente di due tipi:

1) Obiettivi diretti

consentono di verificare i parametri di input in modo tale da avere un chiaro riscontro e accertare così le principali caratteristiche dei fenomeni in esame, confrontandoli con gli studi realizzati in altri tipi di ambiente e definendone così le eventuali differenze e peculiarità, ove presenti.

2) Obiettivi indiretti

permettono di poter utilizzare il modello, una volta arrivati alla sua definizione, per successive simulazioni, volte a definire l'evoluzione per eventi attesi, in modo da poter essere usati in fase di progettazione di opere di difesa per la mitigazione del pericolo da essi derivati, e per una corretta pianificazione territoriale.

Gli esperimenti condotti sugli aspetti reologici delle colate, necessari alla caratterizzazione delle proprietà reologiche del materiale al variare della granulometria e del contenuto d'acqua della colata stessa, sono stati portati avanti attraverso numerose analisi sui campioni prelevati nell'immediato post-evento del dicembre 2004 lungo il torrente S'Arrescottu; tale tipo di analisi è stata la parte più complessa dello studio, anche a causa della scarsità di studi in letteratura riguardanti metodologie certe sull'argomento. Per ovviare ciò, le analisi effettuate sono state eseguite utilizzando reometri tradizionali ed altre apparecchiature sofisticate presenti nei laboratori dell'Università Boden Kulture di Vienna, sviluppate e testate attraverso studi su colate ottenute con dei polimeri dalle caratteristiche fisiche regolari e poi sperimentati su campioni di colate detritiche reali.

In questo studio di ricerca si è cercato di porre per la prima volta in correlazione le proprietà reologiche, calcolate attraverso esperimenti su campioni di diversa granulometria, e il variare volumetrico del contenuto d'acqua. Questi risultati sono stati infine verificati attraverso i dati ottenuti da due simulazioni numeriche effettuate con due codici di calcolo: uno monodimensionale, basato sulla teoria dell'onda cinematica di Arattano e Savage (Arattano & Savage 1992), che non tiene conto dei parametri reologici dei materiali e calibrato in funzione dell'evento noto del 2004, ed un altro bidimensionale sviluppato dal Prof. O'Brien (O'Brien et alii 1993, O'Brien et alii 2006), che tiene invece conto dei parametri reologici misurati, i quali sono stati successivamente confrontati e verificati attraverso il riscontro degli output ottenuti in termini di velocità, portate di picco e volumi messi in gioco dalla colata detritica studiata.

INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E CARATTERISTICHE GENERALI DEL TERRITORIO

Il bacino imbrifero del rio S'arrescottu, torrente del versante centro-orientale della Sardegna e principale tributario del rio Sa Teula, che a sua volta confluisce nel rio Girasole, è situato nell'alta Ogliastra e ricade interamente nel territorio comunale di Villagrande Strisaili.

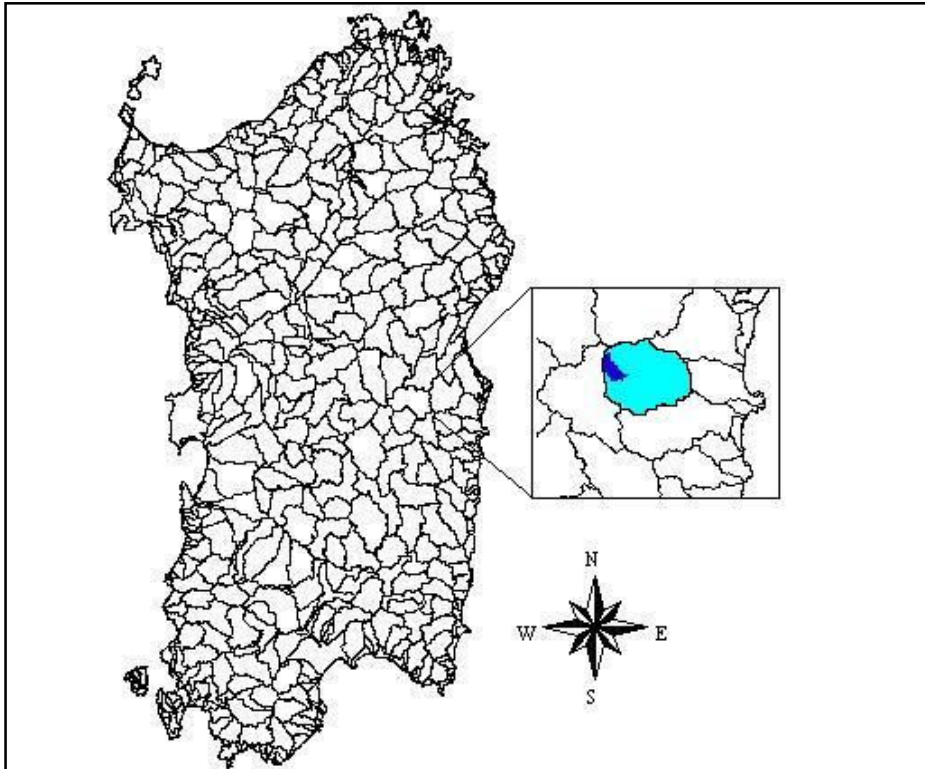


Figura 1 - Bacino del rio Sa Teula con in evidenza la sua parte montana

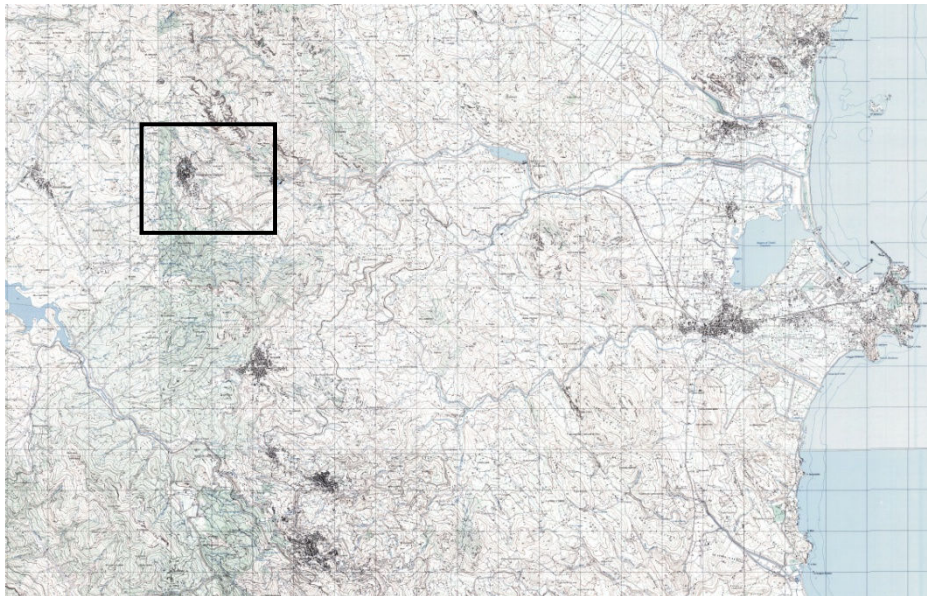


Figura 2 – Inquadramento geografico dell'abitato di Villagrande Strisaili su carta I.G.M.

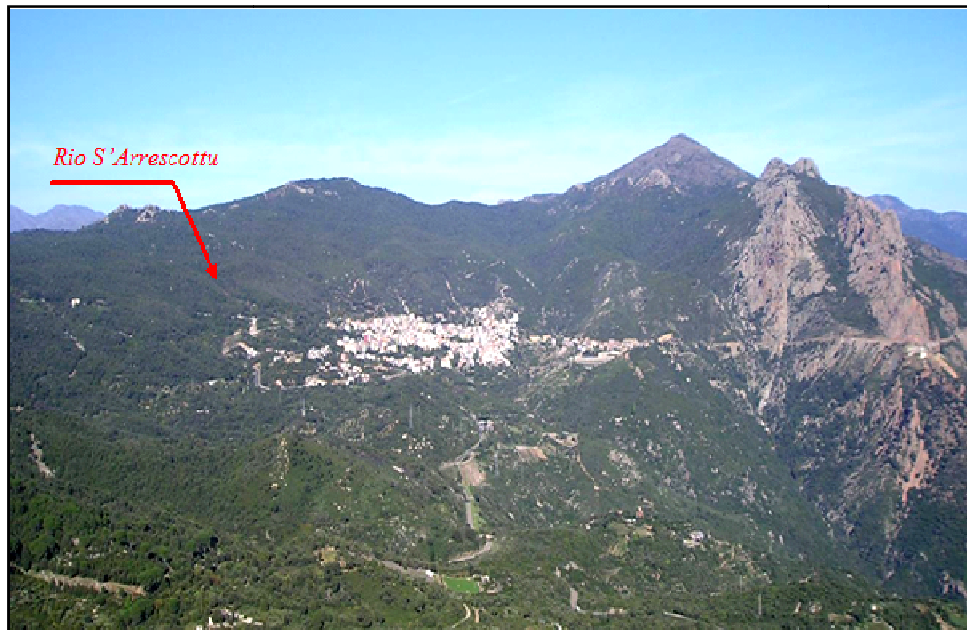


Figura 3 - Panoramica dell'abitato di Villagrande Strisaili

Il concentrico di Villagrande Strisaili è situato lungo i versanti orientali dei monti Orguda (1361m s.l.m.), e Suana (1181m s.l.m.) in prossimità della testata del bacino imbrifero del rio Sa Teula.

Il comune di Villagrande Strisaili confina a Nord con i comuni di Fonni, Orgosolo e Talana, a Est con i comuni di Lotzorai, Girasole e Tortoli, a Sud con il comune di Arzana e a Ovest con il comune di Desulo. Il versante su cui sorge il concentrico di Villagrande è solcato da cinque rii che attraversano l'abitato stesso: Serra 'e Scova, Figu Niedda, Bau 'e Porcos, Bau Argili e S'Arrescottu, tributari del Sa Teula, e presenta una esposizione prevalentemente Est- Nord-Est a quote comprese tra 700-1200 m s.l.m.. La porzione a Ovest dell'area, che parte dalla località Nuarci e comprende le località Sarominis, Niecrobu e Tennorie, si presenta per piccoli tratti a morfologia pianeggiante alternandosi ad aree con pendenze che si mantengono intorno al 30-35%.

Il rio S'Arrescottu, in particolare, presenta un bacino di superficie pari a circa 0.79 km², estendendosi da quota 1005 m s.l.m., fino alla quota 560 in corrispondenza della confluenza nel rio Sa Teula. La direzione di sviluppo è W-E e presenta, in destra idrografica, un rio tributario che si immette nell'asta principale subito a monte dell'abitato.

Nonostante la natura prevalentemente rocciosa che caratterizza i pendii e la consistente presenza di vegetazione di alto fusto, le condizioni orografiche, per le forti acclività che caratterizzano i versanti, con valori medi che raggiungono il 30%, evidenziano la naturale predisposizione del bacino verso fenomeni di instabilità e di erosione dei terreni.

L'equilibrio del reticolo idrografico è legato soprattutto alla stabilità dei versanti e ad una copertura forestale adeguata, in grado di svolgere efficientemente la funzione di protezione idrogeologica.

Le aree oggetto di studio sono individuate cartograficamente nella sezione n°531 Sez. I “Tortoli” e n° 531 Sez. IV “Villanova Strisaili” della cartografia I.G.M 1:25.000 nuova serie e nella sezione n° 531.020 - 531.030 della C.T.R .numerica della RAS in scala 1:10.000.

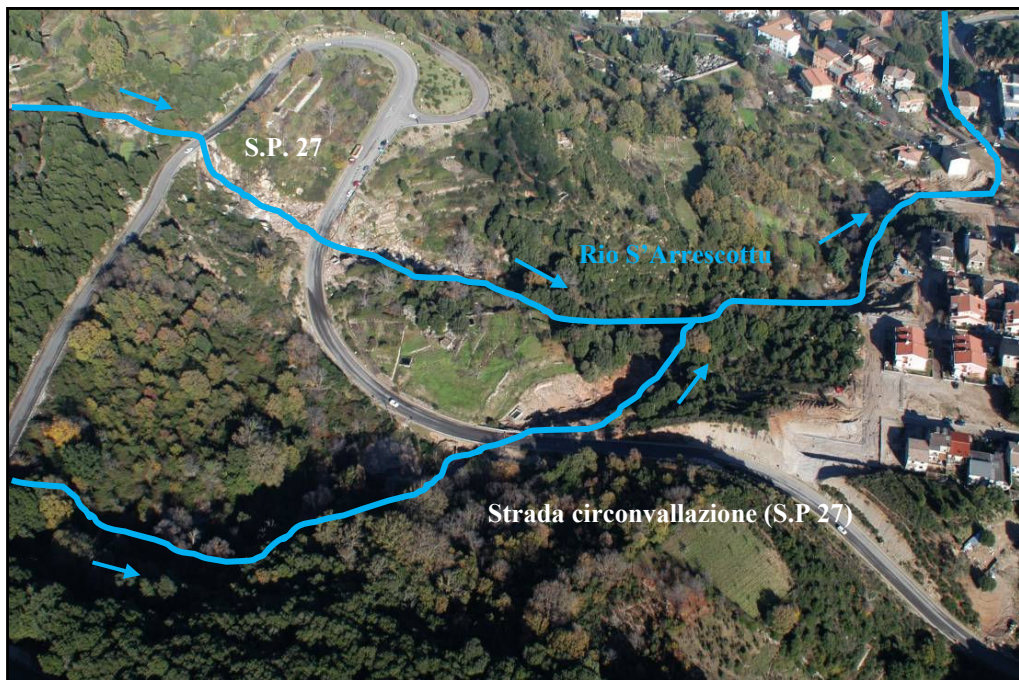


Figura 4 – Vista da elicottero dell’interferenza del Rio S’Arrescottu con la S.P. 27 (dicembre 2004)



Figura 5 - Vista da elicottero dell’interferenza del Rio S’Arrescottu con il centro abitato di Villagrande, in corrispondenza della via Roma (dicembre 2004)

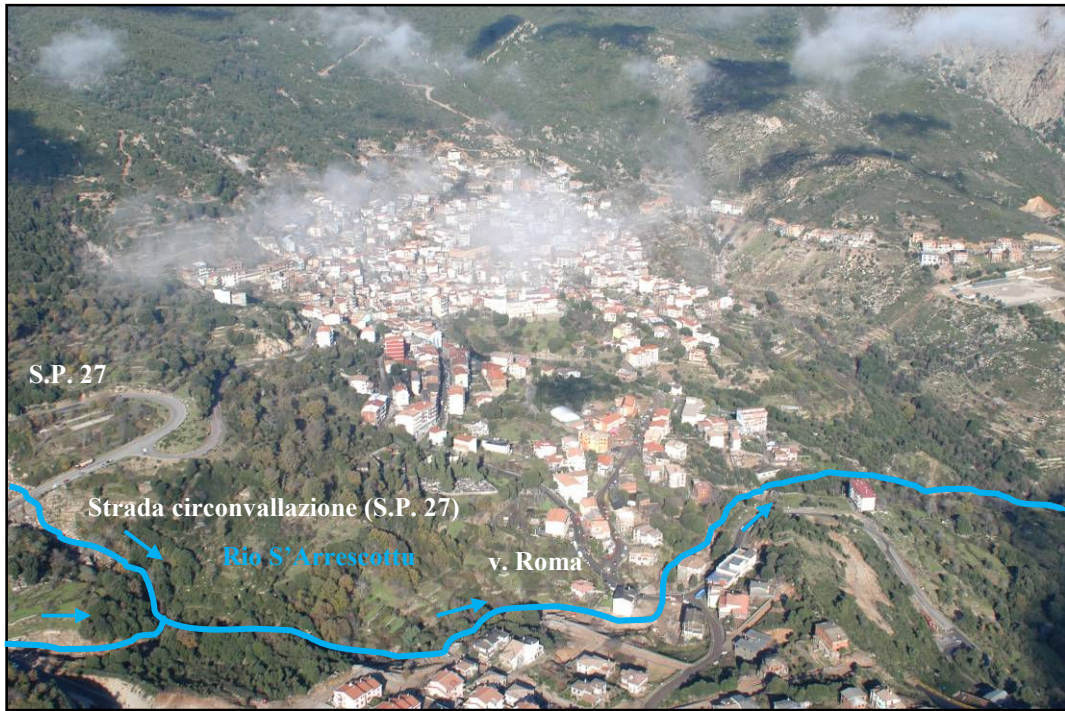


Figura 6 - Vista da elicottero dell'interferenza del Rio S'Arrescottu con la parte meridionale del centro abitato di Villagrande (dicembre 2004)

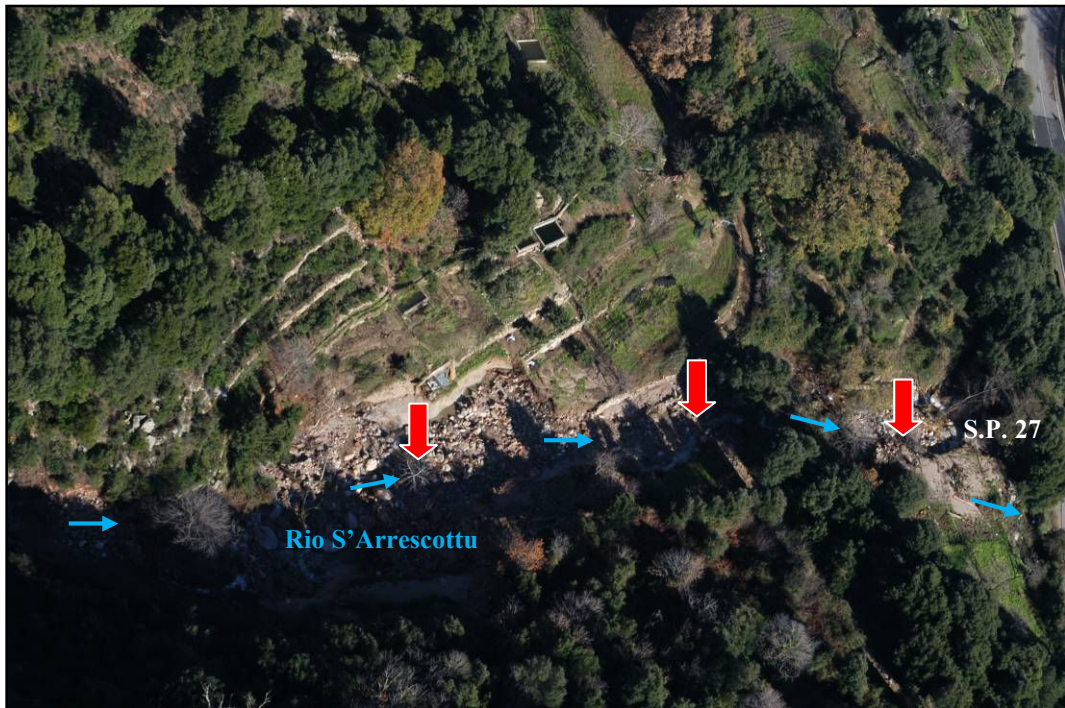


Figura 7 - Vista da elicottero dei fenomeni erosivi lungo il rio S'Arrescottu a monte del primo ponte della S.P. 27 (dicembre 2004)



Figura 8 - Vista da elicottero dei fenomeni erosivi e di deposito lungo il rio S'Arrescottu nel tratto tra i due attraversamenti lungo la S.P. 27 per Tortoli (dicembre 2004)

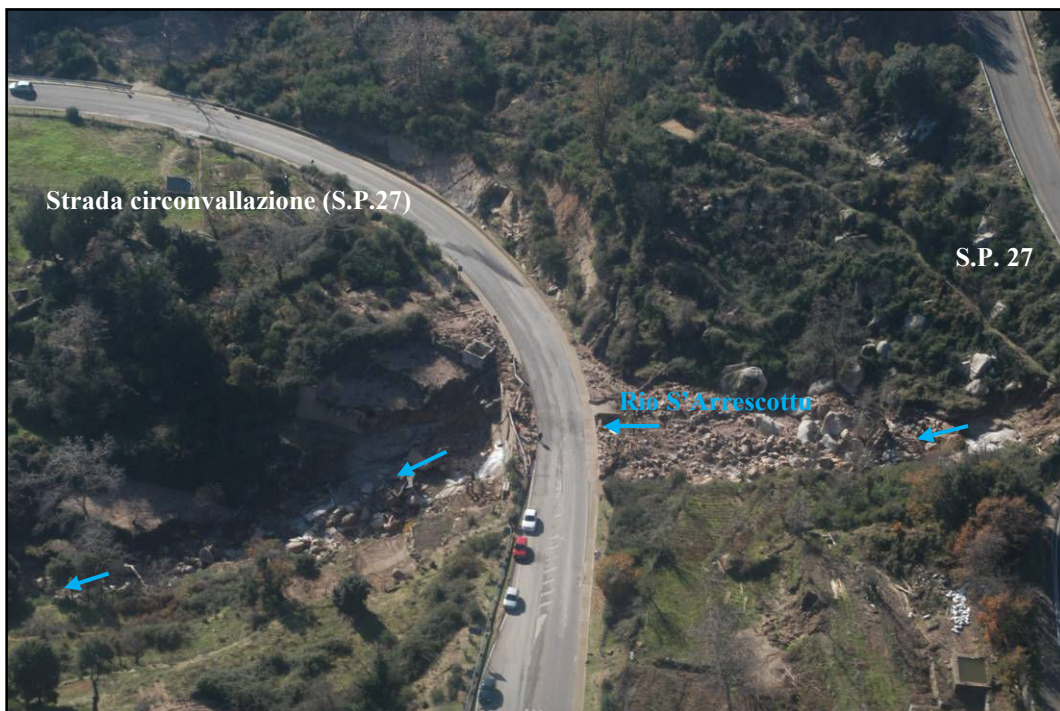


Figura 9 - Vista da elicottero dei fenomeni torrentizi lungo il rio S'Arrescottu con ostruzione e sormonto dell'attraversamento della circonvallazione S.P. 27 (dicembre 2004)

ANALISI STORICA DEI FENOMENI DI DISSESTO

CENNI SULL'EVOLUZIONE STORICA DEL CENTRO URBANO DI VILLAGRANDE STRISAILI

Le prime notizie scritte, sino ad ora accertate su Villagrande Strisaili, risalgono al 1258: è infatti nel registro delle rendite pisane della seconda metà del secolo XIII, custodito nell'archivio storico di Barcellona, che si può leggere che "villa Strisaili de Montibus scripti iudicatus Ogliastri" deve pagare "decem denarorium aquilorum minorum" al "Comuni Pisano" (Artizzu 1958) anche se, secondo alcune teorie (Paulis 1987), il toponimo Strisaili potrebbe essere addirittura di origine nuragica o comunque pre-romana. Stando comunque a quelle che sono le tradizioni orali (Cannas & Rubiu 1977) il centro urbano nascerebbe proprio nella località Monte 'e Peddes -Santu Jaccu da alcuni insediamenti pastorali e proprio a questi si dovrebbe l'etimologia del termine Strisaili, da "is" (i) "tres" (tre) "ailes-ailis" (logudorese-campidanese: ricovero per capretti (Wagner 1960)).

Questo parrebbe essere verosimile in quanto nelle prime cartografie del paese e cioè quelle dell' "Archivio del Real Corpo di Stato Maggiore" anche meglio conosciute come "Archivio La Marmora", conservate nell'archivio di stato di Cagliari e risalenti al 1840-1845, Villagrande Strisaili risulta ancora essere concentrata per lo più in queste località pur lasciando già intravedere le nuove vie di espansione del centro abitato.

Infatti, nella seconda metà dell'Ottocento, in seguito ad un forte incremento demografico, il paese si espanse tenendo fortemente conto della morfologia del terreno, spostandosi sempre più lontano dal corso dei torrenti di cui si aveva un certo timore, come dimostrano i toponimi interessati da questa espansione Cuccureddu e Cuccuròne (logudorese-campidanese: sommità di monte (Wagner 1960)).



Figura 10 _Carta del 1840 tratta dall'Archivio del Real Corpo di Stato Maggiore.

È sicuramente in epoca più recente, quando la demografia ha subito un ulteriore forte incremento, che si è resa necessaria un'occupazione più intensiva del territorio ed un più importante avvicinamento al corso dei torrenti.

Sino al 1960, anno in cui è stata redatta una carta 1:1000 rappresentante la situazione catastale del centro urbano, l'urbanizzazione interessava ancora gli areali esterni alle aree golenali, mantenendo ancora un forte rispetto per i torrenti, tanto che le uniche costruzioni limitrofe ai fiumi erano i due molini del paese e quindi due costruzioni industriali.

Questa carta è stata usata anche per la realizzazione del "Piano di Fabbricazione" nel quale appare chiaramente delimitata una fascia di rispetto dei corsi d'acqua principali, sicuramente dovuta anche al fatto che con D.P.R. del 27/03/1965 n° 689 Villagrande Strisaili è stato inserito nell'elenco dei centri abitati da consolidare in base alla legge 445 del 09/07/1908.

Successivamente, con gli articoli 2 e 13 della legge 64/1974 per Villagrande è stata prevista anche la richiesta del parere del Genio Civile per la realizzazione di nuove opere e per l'approvazione degli strumenti urbanistici generali e particolari, come per tutti i comuni dichiarati dissestati.

Quindi, appare chiaro come solo in epoca recente siano sorte delle abitazioni civili nei pressi dei fiumi, come emerge anche dalla prima aereofotogrammetria realizzata nel 1975 ed usata per la proposta di redazione del Piano Urbanistico Comunale del 1991, e dall'ultima fotogrammetria effettuata in scala 1:1000 nel 2003.

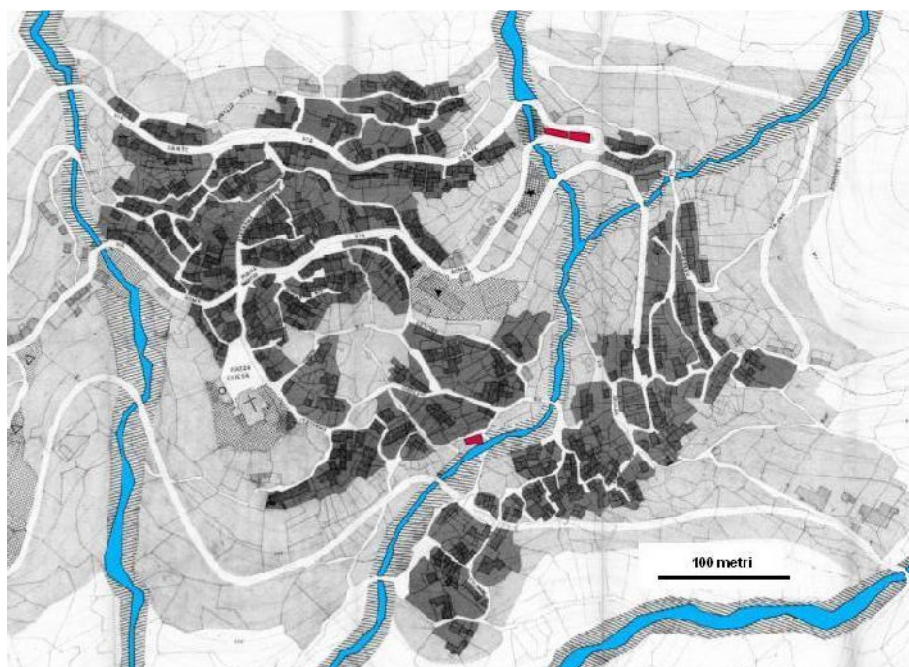


Figura 11 - Immagine tratta da una carta 1:1000 degli anni '60 con evidenziate le fasce di rispetto dei fiumi (grigio rigato) e le costruzioni limitrofe ai torrenti (rosso)

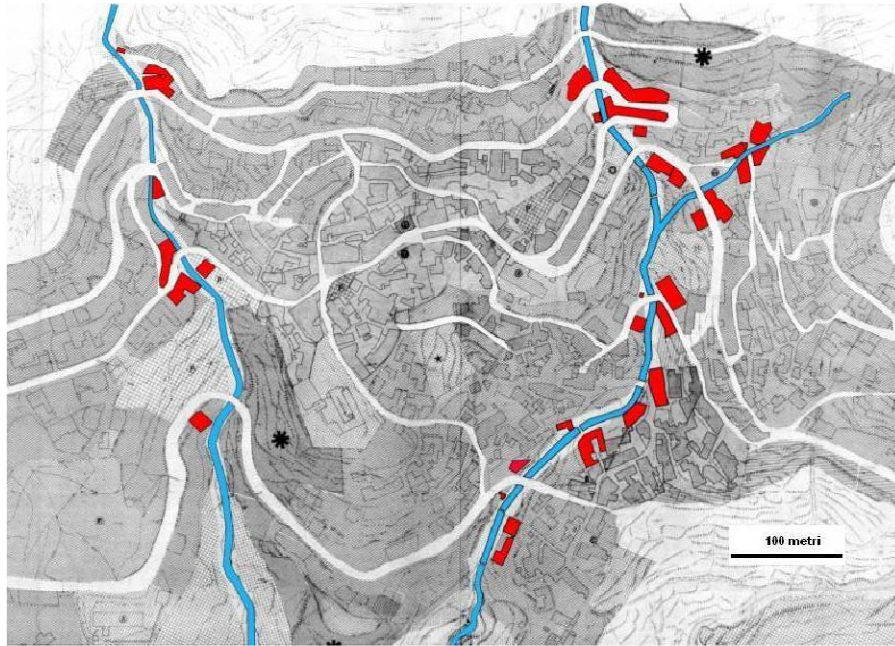


Figura 12 - Immagine tratta dalla prima aereofotogrammetria degli anni '70, 1:1000, con evidenziate le nuove costruzioni (rosse)



Figura 13 - Immagine di una carta 1:1000 del 2000 che rappresenta la situazione attuale

L'ALLUVIONE DEL 1899

L'evento del 6 dicembre 2004 non rappresenta l'unico evento alluvionale di particolare gravità che abbia interessato l'abitato di Villagrande Strisaili; in effetti, dall'analisi storica è stato possibile ricostruire gli effetti di un evento alluvionale di entità analoga, avvenuto alla fine del 1800. In tale circostanza sembra non si lamentarono vittime, forse grazie anche alla minore interferenza delle strutture antropiche con i rii che attraversano l'abitato.

Dalla relazione sul progetto di restauro della strada comunale obbligatoria da Villanova alla nazionale Lanusei-Nuoro, si legge:

“Era la notte dal 20 al 21 ottobre 1899 che verso la mezzanotte si sentì rumoreggiare in una maniera sorda, come il preannuncio di un uragano, e già una massa di nubi nere intercettava, a intervalli, la luce della luna, di quando in quando un pallido chiarore rompeva l'oscurità rendendola più triste e intensa, e già un vento furioso agitava le cime degli alberi producendo un rumore metallico, e turbini di polvere che accecavano si innalzavano nell'aria con vortici a spira che avvolgevano quanto incontravano; quando circa una mezzora dopo si scatenò un impetuoso temporale che riempì gli animi di 1300 abitanti in una spaventosa trepidazione. La pioggia che veniva giù, era a catinelle accompagnata da forti raffiche di vento e da scariche elettriche continue. Tutto ciò fece subito temere che per questo piccolo paese le conseguenze sarebbero state terribili. Intanto quest'ira di Dio infuriò sempre più fino alle tre e mezza del mattino, ingrossando torrenti che straripando, e giungendo ad altezze considerevoli asportavano quanto incontravano. All'alba del 21 si vide quanto danno quell'ira funesta aveva cagionato, case abbattute, orti, giardini scomparsi, strumenti rurali e carri travolti a valle insieme ad alberi secolari, in tutte le strade interne i ciottolati sveltiti(?) danneggiati con fossi dell'altezza di due metri e ingombre di massi di granito e di sassi grossissimi, e le comunicazioni dei due rioni dell'abitato, rotte o intercettate(?)

Fù per fortuna o per grazia di Dio che nessuna vittima si ebbe a lamentare.....?

Tra i danneggiamenti di questo nubifragio vi è da comprendere la strada comunale obbligatoria che partendo dall'abitato di Villagrande va dopo la lunghezza di mt 4317,27 a raggiungere la strada nazionale che da Cagliari e Lanusei va a Nuoro”.

Di questi eventi nella zona e nelle zone limitrofe ne sono accaduti diversi come dimostrato anche da una ricerca storica condotta sui principali quotidiani della Sardegna (Demurtas et alii 2007) a dimostrazione che l'area in esame è soggetta ad un regime di precipitazioni di forte intensità, sovente di breve durata, direttamente responsabile di eventi di piena improvvisi e violenti con conseguenze catastrofiche sul territorio.

PIANO DI ASSETTO IDROGEOLOGICO

Nell'ambito dell'aggiornamento al Piano di Assetto Idrogeologico del 2006, sub-bacino 6 sud-orientale comune di Villagrande Strisaili, sulla base degli studi del "Piano di coordinamento degli interventi necessari al riassetto idrogeologico delle aree colpite dagli eventi alluvionali", sono state perimetrare le aree a rischio di frana e a rischio idraulico, con valutazione dell'entità del rischio: R1 danni marginali al patrimonio ambientale sociale ed economico, fino a R4 danni gravi agli edifici con possibilità di perdite di vite umane.

Dalla cartografia del P.A.I., si evidenzia che il rischio maggiore all'interno dell'abitato di Villagrande Strisaili, connesso alla dinamica torrentizia del rio S'Arrescottu (R4), si localizza in corrispondenza delle strutture di attraversamento della S.P. 27, della tombatura di via Roma e degli edifici posti a margine del rio a valle dell'attraversamento di via Roma.

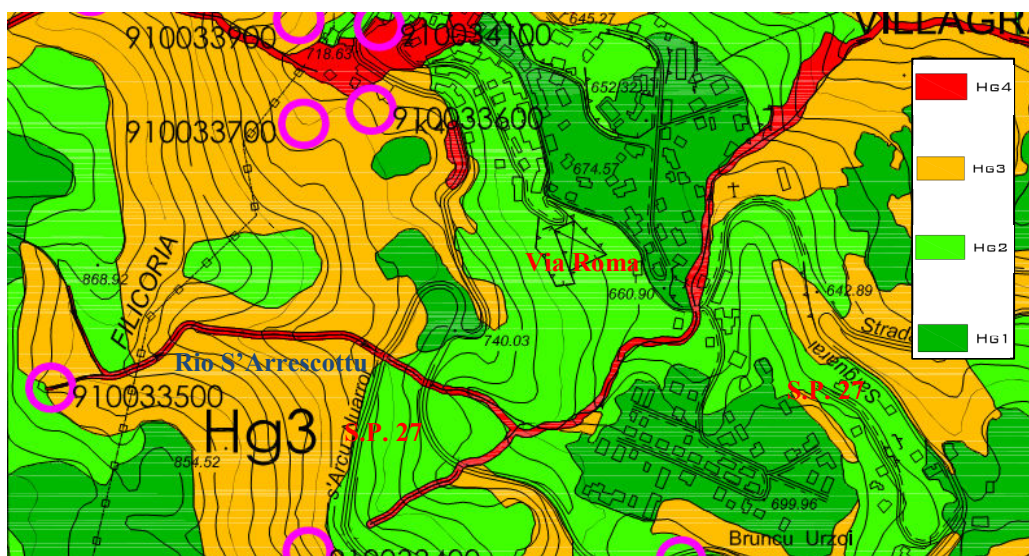


Figura 14 – Perimetrazione del Rischio da Frana del centro abitato (PAI- aggiornamento 2006 sub-bacino 6 sud-orientale comune di Villagrande Strisaili)

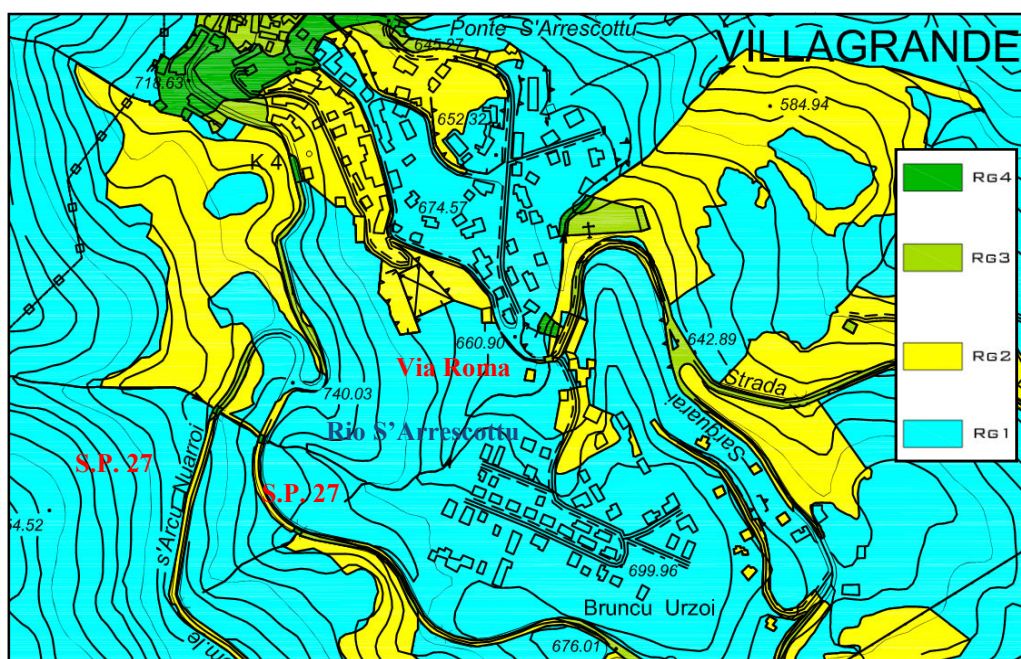


Figura 15 – Perimetrazione del rischio del centro abitato da frana (PAI- aggiornamento 2006 sub-bacino 6 sud-orientale comune di Villagrande Strisaili)

CARATTERISTICHE VEGETAZIONALI E FORESTALI

L'inquadramento fitoclimatico dell'area in oggetto riscontra la presenza del *Climax* delle foreste di leccio. Le superfici ubicate alle altitudini maggiori sono rappresentate da pascoli naturali, siti in località Pauli Majore, Pauli Serra e Is Arcos a ridosso delle aree boscate e ad un'altitudine media di circa 1.000 m s.l.m. Queste superfici sono caratterizzate da una giacitura sub-pianeggiante e suolo poco profondo, mentre in alcuni tratti è presente il substrato roccioso affiorante.

La porzione di versante sovrastante il concentrico di Villagrande, in particolare, è ricoperta da formazioni di leccio, presenti prevalentemente in popolamenti puri e misti a specie di macchia.

Tutta l'area a ovest dell'abitato è soggetta ad un carico sostenibile di bestiame al pascolo e da un elevato numero di vecchie piste di esbosco, attualmente in disuso, favorite anche dalla morfologia non accidentata della zona. La superficie del bacino è prevalentemente costituita nella parte intermedia dell'area da formazioni boschive, nella parte sommitale da pascolo e nella parte a valle da inclusi privati in abbandono, costituiti per lo più da terrazzamenti.

Secondo la classificazione di Arrigoni (Arrigoni 1968), l'area oggetto di studio è classificabile nel climax delle foreste di leccio, distinto in orizzonte freddo umido delle foreste montane di *Quercus ilex* e *Quercus pubescens* con elementi relitti dei cingoli a *Quercus-tilia-Acer* e *Lauro-cerasus*, e orizzonte mesofilo della foresta di *Quercus ilex*.

Il primo è osservabile principalmente a quote comprese tra 800 e 1200 m s.l.m., caratterizzato dalla dominanza della foresta di *Quercus ilex* con interferenze di *Quercus Pubescens*, mentre il secondo è osservabile nell'alta collina e nella montagna media a quote comprese tra 500-800 m s.l.m.

Nel *Climax* delle foreste di leccio le specie che contribuiscono a differenziare maggiormente la lecceta in entrambi gli orizzonti sono: il corbezzolo *Arbutus unedo* L., l'erica arborea *Erica arborea* L. e la fillirea *Phillyrea latifolia* L.. Il corbezzolo si ritrova consociato al leccio, come specie predominante nella macchia in evoluzione, mentre l'erica arborea è presente in consociazione al corbezzolo nelle situazioni più influenzate dalle attività umane e percorse da incendio; la fillirea infine è presente nelle aree più aride e nei versanti esposti ad Est.

Nelle formazioni ripariali che si sviluppano lungo i corsi d'acqua, caratteristica comune è l'estensione lineare dell'ontano nero *Alnus glutinosa*. Altre specie forestali presenti sono il ginepro rosso *Juniperus oxycedrus* L., il tasso *Taxus baccata* L. e l'agrifoglio *Ilex aquifolium* L..

La presenza e la distribuzione delle specie arboree e arbustive nell'area sono importanti, perché hanno un ruolo fondamentale nell'azione di difesa dell'equilibrio idrogeologico, assolvendo tale funzione nelle situazioni dove la quercia non assicura con continuità la

copertura vegetale. In ogni caso la presenza di diversi strati di vegetazione, sia a livello aereo che radicale, assicura una maggiore efficacia nella difesa del suolo.



Figura 16 - Formazioni arbustive a monte del paese.



Figura 17 - Formazione boschiva di leccio associato al castagno

Il settore a monte del bacino è condizionato da interventi antropici, come le utilizzazioni forestali e l'apertura di piste, ed inoltre da un carico, comunque sostenibile, di bestiame al pascolo, con struttura forestale di tipo disetaneiforme. La porzione intermedia dell'area è ricoperta da formazioni di leccio, presenti in popolamenti puri e misti a specie di macchia.

La striscia di territorio più a valle, immediatamente a monte dell'abitato e adiacente la S.P. 27, confinante con gli inclusi privati, ha subito una minore pressione antropica, soprattutto per la

manca di un'efficiente densità viaria, per una maggiore accidentalità del territorio e per l'assenza di pascolo, che ha favorito nel tempo lo sviluppo di una buona copertura forestale. Questa struttura forestale è di tipo coetaneiforme con un unico piano dominante.

La forma di governo e trattamento al quale è stato sottoposto in passato il bosco non si può ricondurre ad un metodo classico: in certi casi il trattamento appare una sorta di ceduo a sterzo irregolare o di ceduo intensamente e irregolarmente matricinato, ma più in generale si può affermare che il soprassuolo attuale è il risultato di un taglio a scelta eseguito con criteri mercantili. I fattori strutturali che accomunano l'intera stazione sono rappresentati da un elevato numero di polloni/ha, superiore a quello delle matricine (Rubiu 2000).

Nelle situazioni dove la copertura è più rada, la rinnovazione agamica è affermata, mentre quella gamica è limitata alle chiarie e ai bordi del bosco dove è presente in modo rilevante il corbezzolo, l'erica arborea e il ginepro rosso.

La presenza del corbezzolo è maggiore dove si interrompe la continuità della copertura forestale, condizione questa che favorisce anche la rinnovazione gamica del leccio stesso. La fertilità del suolo è condizionata dalle condizioni micro-stazionali, e l'altezza media degli alberi è più elevata in condizioni di minore pendenza, dovuta soprattutto ad un maggiore spessore del suolo forestale.



Figura 18 - Ceduo di leccio.

Lungo tutto il territorio è presente una rete viaria sterrata principale, alla quale si aggiungono un elevato numero di piste forestali, poche delle quali percorribili, e di aree utilizzate in passato per l'esbosco, dove la vegetazione arborea stenta a riaffermarsi per l'affioramento del suolo minerale sterile. Infatti a causa di una non razionale pianificazione delle utilizzazioni boschive ci si trova oggi a dover affrontare dei fenomeni erosivi anche importanti, specialmente dove l'acclività aumenta attestandosi su valori che vanno dal 30% al 35%.

VIABILITÀ RURALE NEL BACINO IDROGRAFICO

Il bacino idrografico a monte dell'abitato di Villagrande è servito da una rete stradale sterrata, costituita da delle strade principali e, come detto, da una fitta rete di piste secondarie, che spesso tagliano ortogonalmente, lungo le linee di massima pendenza, la viabilità principale.

La rete viaria principale è costituita dalle strade comunali "Nuarci – Monte Mannu", "Alara – Sa Pauli", "Is Arcos – Loros", camionabili grazie alle periodiche operazioni di manutenzione ordinaria; altre strade principali come la "Alara-Is Arcos, S'Arcu Utzai-Baccu Artacci", sono transitabili con mezzi fuoristrada. Le piste forestali secondarie, sono nella maggior parte dei casi, non transitabili.

TERRAZZAMENTI ANTROPICI E COLTIVAZIONI

A Villagrande, l'area compresa tra l'abitato e le formazioni boschive a monte è costituita da inclusi privati che consistono in piccoli terrazzamenti sostenuti da muretti a secco i quali sono, per la maggior parte, in stato di abbandono.

Tali terrazzamenti, realizzati fino all'interno dell'alveo dei torrenti, erano utilizzati un tempo per le colture necessarie al fabbisogno familiare.

SITUAZIONE FORESTALE DI DISSESTO DEL BACINO IDROGRAFICO GENERALE A MONTE DELL'ABITATO SUCCESSIVAMENTE ALL'EVENTO DEL 6 DICEMBRE 2004

Dai rilievi effettuati nel bacino idrografico in particolare nel periodo successivo all'evento alluvionale del 6 dicembre 2004, è emerso come la rete viaria rurale sia stata eseguita senza seguire una razionale pianificazione delle utilizzazioni forestali. Infatti, la maggior parte delle piste presenti allo stato attuale non seguono l'andamento delle isoipse, fatta eccezione per alcuni brevi tratti, ma le tagliano ortogonalmente con pendenze fino al 35-45%; inoltre sono prive di qualsiasi opera di deflusso delle acque piovane.

È da mettere in rilievo il ruolo principale che ha avuto il bosco nel ridurre i danni dell'evento meteorico del dicembre 2004 (517.4 mm in un giorno): la sua influenza non si è limitata alla sola difesa del suolo contro l'erosione, con un minore trasporto solido nei bacini (effetto antierosivo), ma anche con l'attenuazione delle punte di massima delle portate liquide (effetto regimante), fenomeni che nella maggior parte dei casi sono strettamente collegati tra loro.

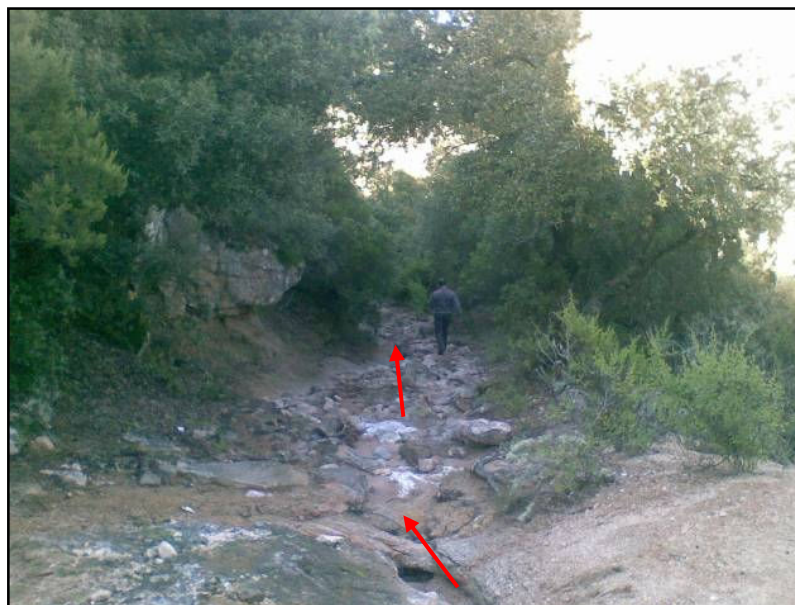


Figura 19 – Processi di erosione della coltre detritica lungo le piste rurali esistenti

La pioggia, per effetto dell'alta densità della vegetazione, ha dissipato l'effetto detto "battente", che spesso porta ad innescare processi erosivi come quelli invece avvenuti nei terreni privi di vegetazione, che in alcuni casi hanno provocato la sola asportazione della componente più fine, in altri, ha creato delle incisioni profonde fino a 1 m portando a nudo la roccia madre. Questi fenomeni sono stati evidenziati soprattutto nelle piste forestali, in corrispondenza dei compluvi naturali, che tagliano ortogonalmente le curve di livello e per tutto il loro tracciato sono prive di qualsiasi opera di deflusso idrico.

Lungo l'alveo invece, è stato evidenziato come la copertura forestale presente sia stata in parte scortecciata e in parte sradicata dalla piena torrentizia. Le piante sradicate, essenzialmente ontani, noci e castagni (la presenza di questi ultimi è legata alla coltivazione dei terrazzamenti), hanno creato delle vere e proprie dighe che sono letteralmente esplose (effetto *dam breack*) sotto la pressione della colata torrentizia, a differenza di quanto avvenuto invece con il leccio, che ha dimostrato avere una maggior resistenza alle sollecitazioni meccaniche esterne.

Quindi si può affermare che, se da una parte la copertura vegetale, e più precisamente quella presente in alveo, ha contribuito alla accentuazione del fenomeno di piena, dall'altra, la vegetazione presente nei versanti, in particolare il leccio come componente principale, ha svolto appieno la sua azione regimante immobilizzando i massi presenti in superficie sul versante.

ANALISI GEOLOGICA

INQUADRAMENTO GEOLOGICO GENERALE DEL BACINO

La litologia prevalente della zona è caratterizzata da una estesa massa granitica, appartenente al complesso intrusivo ercinico, caratterizzato da varie facies composizionali che vanno dalle granodioriti ai micrograniti e ai graniti porfirici, a cui spesso si associano altri corpi di ridotte dimensioni costituiti da filoni compositi, inclusi xenolitici, microgranodioriti di modesto spessore e inclusi microgranulari di colore scuro, la cui composizione varia dai termini dioritici ai termini tonalitici con forma sferica o lenticolare e con dimensioni variabili da 10 a 30 cm.

Il substrato roccioso presente nel bacino del torrente è riferibile al complesso granitico dell'Ogliastra, scomposto da una serie di strutture tettoniche allungate in direzione N-S che delimitano dei terrazzi a quote variabili dai 500 agli 1000-1100 m s.l.m.

Le rocce affioranti nell'area evidenziano la complessa storia evolutiva della regione, subita nel corso delle diverse fasi deformative connesse alla loro messa in posto durante le ultime eventi dell'orogenesi ercinica, con superfici di faglia, fratture e *joints* orientati prevalentemente secondo direzioni NW-SE, N-S e NE-SW.

Il basamento roccioso è scomposto dal sistema filoniano tardo-ercinico a composizione sia acida che basica (quarzosi, porfirici, aplitici e lamprofirici), che ha riempito sia le fratture generate nella massa granitica durante il raffreddamento, sia le fratture riferibili alle ultime spinte tettoniche subite. I filoni sono prevalentemente subverticali, con direzione NE-SW, coincidente con la orientazione di una serie di fratture di trazione.

La roccia granitica, per effetto degli stress tettonici subiti, si presenta localmente intensamente fratturata e di conseguenza meno resistente all'erosione. Questo stato di debolezza della roccia ha favorito l'alterazione chimica degli strati più superficiali, per spessori anche considerevoli, originando materiali alterati e ormai trasformati in sabbioni, che ricoprono la roccia in posto. In questa coltre detritica di disfacimento si sono sviluppati numerosi ed estesi fenomeni di erosione accelerata e lenti e pressoché ricorrenti movimenti franosi. La roccia del basamento, a seconda del grado di alterazione, può essere assimilata a roccia sciolta, tenera o lapidea e quindi con caratteristiche tecniche estremamente variabili sia in senso areale che verticale.

I terreni di copertura sono costituiti da materiali di varia origine quali detriti di falda, depositi colluviali ed eluviali ed accumuli caotici di antiche frane. I prodotti del disfacimento della roccia costituiscono le falde detritiche adagiate a diverse quote sui versanti o alla loro base in cui raggiungono maggiori spessori. I depositi sono costituiti da elementi lapidei spigolosi di dimensioni variabili dal centimetro fino a qualche decimetro, caratterizzati da una disposizione caotica, senza nessuna organizzazione granulometrica, talvolta presentano un accenno di stratificazione per gradazione e con passaggi graduali verso i depositi alluvionali recenti e

attuali. Gli accumuli più consistenti sono stati oggetto di intervento antropico e sfruttati ad uso agricolo sia sui versanti che lungo le aste torrentizie.

I depositi alluvionali si rinvengono lungo le aste dei torrenti e sono costituiti da elementi lapidei più o meno arrotondati in funzione della energia della corrente che li ha trasportati, soggetti a continua elaborazione e trasporto da parte delle correnti.

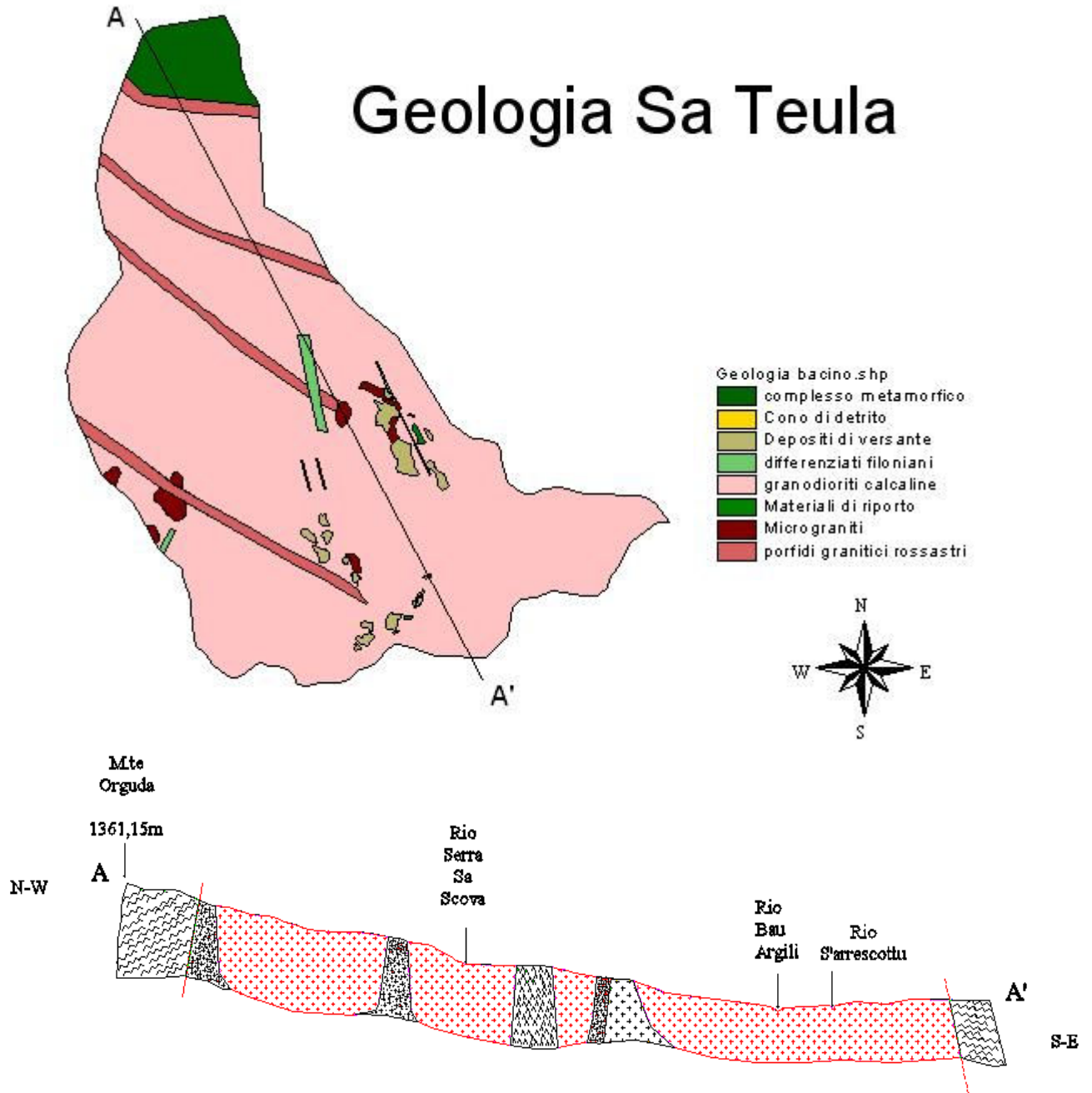


Figura 20 - Carta e sezione geologica del bacino Sa Teula (Demurtas 2005)



Figura 21 - Filone lamprofirico.

A nord del centro abitato, nella parte alta del Rio Sa Teula, esterna all'area del bacino idrografico del Rio S'Arrescottu, affiorano invece i termini metamorfici afferenti al "Complesso Metamorfico di Basso Grado della Barbagia", ricoperti in modo diffuso e discontinuo dai depositi continentali del Quaternario. Il basamento metamorfico è costituito da scisti caratterizzati da metarenarie, quarziti e filladi in facies di scisti verdi, di basso grado metamorfico.



Figura 22 - Orientazione faglie secondo direzioni prevalenti N-S



Figura 23 - Fratturazione della roccia secondo cunei e blocchi nel bacino del rio Sa Teula

CARATTERI GEOMORFOLOGICI GENERALI DEL BACINO DEL RIO S'ARRESCOTTU

La zona particolare oggetto di studio è il bacino del rio S'Arrescottu, uno dei cinque torrenti che drenano le acque del versante esposto ad est del M.te Suana. Confina a N con il bacino del rio Bau Argili, a S con il bacino del rio Sothai che nel loro insieme costituiscono il bacino montano del Rio Sa Teula). L'area è compresa totalmente nel Foglio N. 231030 dell'IGMI alla scala 1:25.000.

Il torrente è per lunghezza il primo tra le aste secondarie che drenano il territorio che sovrasta l'abitato; dalle sorgenti alla confluenza con il rio Serra Scova a valle misura 1,676 km con un bacino idrografico di 0,79 km². In particolare nel tratto montano presenta un bacino di circa 0,67 km² e misura poco meno di 1,76 km dalla confluenza.

La testata del torrente, alla quota di 1000 m s.l.m. è la meno estesa: gran parte del bacino si sviluppa tra la quota 660 m e la quota 1000 m, con una forma irregolare allungata in direzione E-W. Le cime più elevate sono ubicate nella zona occidentale con gli spuntoni di Intramontes (1042.36 m) che dominano la valle.

I versanti, costituiti da rocce granitiche, si distinguono per una maggiore energia del rilievo, forme più aspre e con una erosione che accentua nel tempo questa caratteristica, le dorsali dei rilievi sono spesso marcate dai filoni di porfido che si ergono verticali dalla massa granitica. I versanti sono prevalentemente ripidi e caratterizzati da roccia affiorante.

La composizione litologica e le caratteristiche strutturali del basamento hanno avuto un ruolo importante nella evoluzione morfogenetica generale di tutta l'area del bacino. Le forme del rilievo risultate, hanno a loro volta condizionato lo sviluppo e la distribuzione dei terreni detritici, eluviali e colluviali che ricoprono il substrato roccioso.

I versanti, costituiti da rocce granitiche, si distinguono per una maggiore energia del rilievo e per forme più aspre anche se accentuate nel tempo dall'erosione. Le dorsali dei rilievi sono

spesso marcate da filoni di porfido che si ergono verticali dalla massa granitica e i versanti sono prevalentemente ripidi e caratterizzati da roccia affiorante. La copertura detritica-eluviale è discontinua e di modesto spessore.

L'area è particolarmente soggetta a processi di denudamento dei versanti e di erosione, si ha infatti il continuo allontanamento del materiale prodotto dal disfacimento della roccia lungo solchi preferenziali. La zona è inoltre soggetta a erosione incanalata con la messa a nudo della roccia sottostante, soprattutto laddove non vi è un'omogenea copertura vegetale.



Figura 24 - Terrazzamenti antropici a valle dell'abitato.

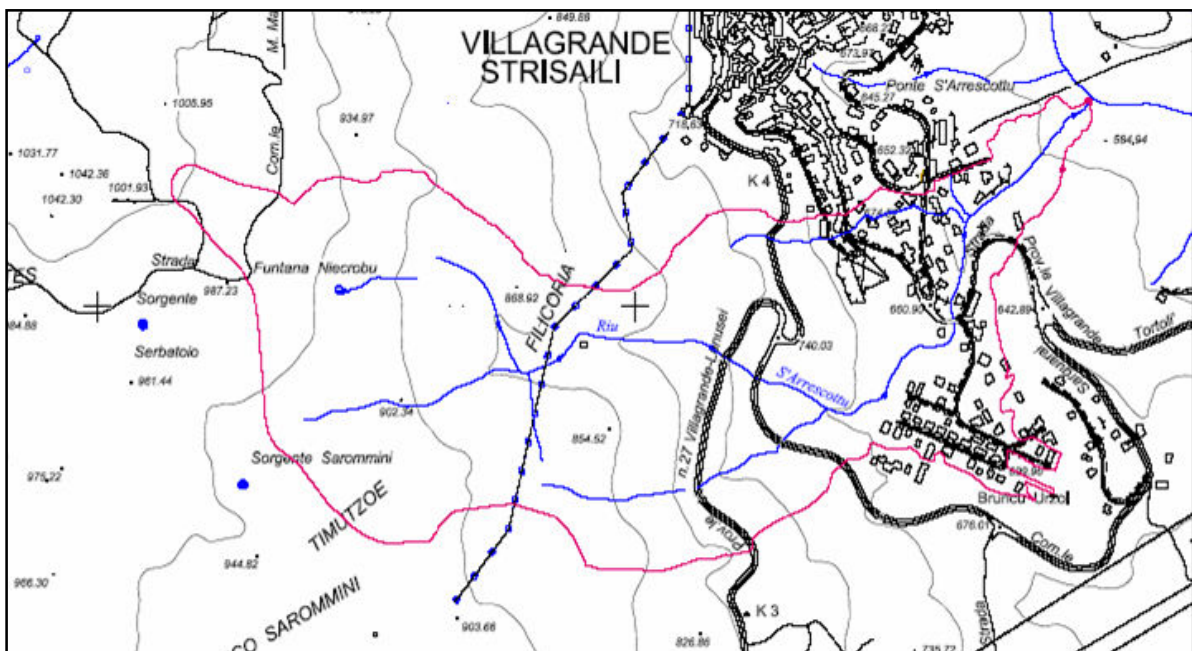


Figura 25 – Bacino idrografico del Rio S'Arrescottu.

Da un punto di vista morfologico la valle del torrente presenta caratteristiche tipiche dei torrenti di montagna con una valle a “V” stretta, delimitata da pareti rocciose subverticali, e caratterizzata da rotture di pendenza segnate dalla presenza di gradini morfologici che testimoniano l’altezza originaria di raccordo con il fondovalle. Appare evidente la notevole energia del rilievo, caratterizzata da versanti con marcate pendenze. Il risultato di questa articolata orografia è la valle in cui scorre il rio S’Arrescottu, che genera nel fondo valle periodici depositi alluvionali alimentati anche dagli smottamenti nei materiali adagiati sui versanti.

Il fondovalle è caratterizzato da piccoli tratti pianeggianti a cui si alternano dei restringimenti in roccia; nel tratto subito a ridosso dell’area di più recente urbanizzazione la valle è più aperta, più ampia e con pendenze dell’ordine dei 10-15°. Subito al di sotto l’abitato la valle si restringe notevolmente, diviene stretta e incassata nella roccia, ma sempre caratterizzata da gradini morfologici che gli consentono di superare le pendenze in brevi distanze.

Lungo tutto lo sviluppo dell’asta principale e dei collettori secondari si sviluppano intensi processi di degradazione dei versanti che si manifestano nelle coperture detritiche, che ricoprono le pendici, e nella coltre di arenizzazione del substrato. Nella fascia a valle del ponte sulla S.P. Villagrande-Tortolì, antiche superfici terrazzate mascherate dalla presenza antropica, sono state riesumate dai processi erosivi legati all’evento alluvionale del 2004.

La parte terminale della valle si apre nuovamente prima della confluenza sul rio Serra Scova a quota di circa 561 m s.l.m. dopo aver superato una distanza di circa 2 km ed aver superato un dislivello di 440 m in 0,75 km. L’assetto strutturale appare come la causa determinante dei fenomeni di approfondimento dell’alveo e dei conseguenti fenomeni di erosione esercitati alla base dei versanti, fenomeni i quali, nella maggior parte dei casi, svolgono un importante ruolo nell’innescare dei fenomeni franosi alimentati dalle coperture detritiche e dagli orizzonti di alterazione che ricoprono i versanti.

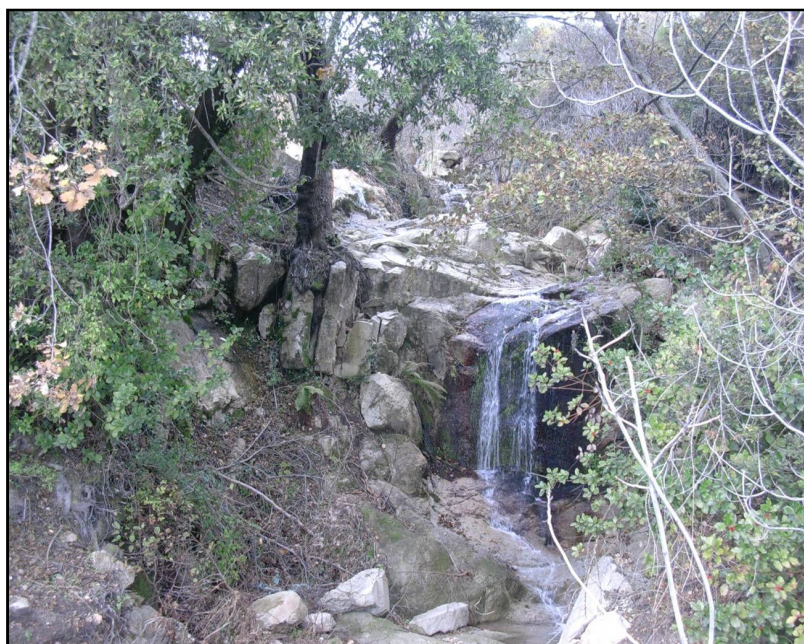


Figura 26 - Il rio S’arrescottu prima dell’attraversamento sulla S.P. Villagrande-Lanusei.

INQUADRAMENTO TETTONICO DELL'AREA

La caratteristica geologico-strutturale dell'area è data dalla presenza del blocco tettonico a composizione granitica, messi in posto in seguito al collasso gravitativo post-collisionale della catena ercinica, in un arco di tempo che va dal Permo-Carbonifero fino al Permo-Trias (Carmignani et alii 1992). La struttura così formatasi, dopo un periodo di relativa calma orogenetica e parzialmente ricoperta dai terreni mesozoici e cenozoici, è stata interessata in modo marginale dal ciclo orogenetico alpino, intensamente sviluppato invece nelle circostanti aree mediterranee, con lo sviluppo di una tettonica distensiva esplicatasi con la riattivazione delle strutture tettoniche preesistenti e la scomposizione in blocchi sollevati e depressi, probabilmente già definiti dalle precedenti strutturazioni. Nel Pliocene med.sup., con il raggiungimento di una certa stabilità strutturale, prevalsero i processi di modellamento dei rilievi con diverse modalità in funzione delle condizioni climatiche esistenti.

L'evoluzione morfotettonica dell'area è condizionata da un sistema di faglie N-S e NW-SE sbloccato da direttrici tettoniche trasversali di impostazione ercinica: è proprio lungo queste direttrici trasversali che si sono impostati i corsi d'acqua principali in Ogliastro ed i corsi d'acqua attraversanti l'abitato di Villagrande.

L'abbassamento del blocco orientale dell'isola ha determinato il ringiovanimento delle zone più interne con la reincisione dei rilievi, favorito anche dall'aumento delle precipitazioni nell'interglaciale, corrispondente in Sardegna delle glaciazioni.

CARATTERISTICHE DELL'AMMASSO ROCCIOSO

L'elevata fratturazione dell'ammasso roccioso a seguito della passate vicende tettoniche, ha dato origine a coperture detritico-residuali che costituiscono riserve di materiali disponibili al movimento lungo i versanti. Questi fattori uniti alla natura del litotipo tipicamente impermeabile, ma che acquisisce una permeabilità secondaria in funzione della fratturazione e dell'alterazione, e alla morfologia accidentata, riducono in misura considerevole la capacità di infiltrazione delle acque. La stessa fratturazione è responsabile dei fenomeni di crollo e di distacco di blocchi lapidei dalle ripide pareti rocciose.

Durante i sopralluoghi è stata verificata la presenza di ammassi rocciosi dislocati da vari sistemi di fratture e *joints* prevalentemente ad alto angolo, dispersi lungo secondo direzioni N-S, NW-SE e NE-SW, riconducibili ad un ambiente tettonico distensivo, sono presenti anche fratture a basso angolo, disperse attorno alle direzioni N-S e E-W che rappresentano le direzioni di sovrascorrimento. L'intersezione dei diversi sistemi di discontinuità e di queste con i fronti stessi, hanno prodotto blocchi di roccia di forma e dimensioni variabili in funzione delle caratteristiche di persistenza e di spaziatura delle discontinuità, che hanno dato origine ad accumuli di blocchi alla base delle pareti.

CIRCOLAZIONE IDRICA SUPERFICIALE E SOTTERRANEA

Il Rio S'arrescottu si origina a quota di 906 m alimentato dalla sorgente Funtana Niu'e Crobu, posta a quota 920 m, nei pressi della località Intramontes, dopo un percorso di circa 1,67 km confluisce in destra idrografica sul Serra Scova (565 m).

I principali affluenti del torrente sono ubicati in destra idrografica, mentre in sponda sinistra riceve apporti solamente nella parte terminale da un canale tombato che attraversa la periferia sud dell'abitato.

Inizialmente il rio segue un percorso secondo direzione SE, con locale modificazione nel tratto in località Filicoria, dove l'asta torrentizia s'imposta lungo la linea orientata W-E. L'ultimo tratto, a partire dall'attraversamento sulla S.P.27 Villagrande-Tortoli, all'ingresso sud dell'abitato, e per un tratto di circa 200 m, subisce ancora una deviazione portandosi verso la direzione N-S, evidentemente secondo una direzione di debolezza della roccia. Da questo tratto il corso d'acqua in questione scorre incassato nella roccia, incanalandosi sul Serra Scova con direzione pressoché costante SW-NE, seguendo la linea di dislocazione tettonica.

I tributari hanno origine in una fascia altimetrica compresa fra 970–880 m e confluiscono nel rio a quote variabili fra 880 e 643 m.

Gli affluenti sono spesso sede di violente piene torrentizie, caratterizzate da cospicuo trasporto solido: ne sono testimonianza i depositi di vecchie colate presenti a diverse quote lungo la valle, nonché le poche notizie storiche riferite a piene catastrofiche che hanno interessato il torrente.

Nel tratto montano, fino in prossimità dell'abitato, l'alveo ordinario occupa tutto il fondovalle, ove si contano numerose strette morfologiche dovute all'approfondimento dell'alveo in roccia. Nei tratti di maggiore ampiezza, esso divaga tra i suoi stessi depositi.

Le profonde incisioni nel tratto montano lungo i depositi alluvionali e lungo le valli tributarie dimostrano una fase giovanile del torrente, con attività prevalentemente erosiva e sponde che arrivano sino a 5 m di altezza.

Nel tratto urbanizzato, l'attività del torrente è stata fortemente condizionata dalla presenza di opere antropiche, che hanno canalizzato il corso d'acqua per un tratto complessivo di circa 25 m. In questo tratto i recenti processi erosivi hanno riesumato vecchi depositi alluvionali in sponda sinistra. A valle del tratto canalizzato si alternano ancora processi deposizionali e processi erosivi che mettono a nudo il substrato roccioso.

Dal punto di vista idrogeologico, le litologie affioranti vengono considerate impermeabili o semipermeabili, in funzione del grado di fratturazione e di alterazione che possono determinare diverse strutture idrogeologiche, le quali possono dar luogo ad una circolazione idrica di tipo superficiale, notevolmente variabile sia per andamento che per entità, condizionate da fattori locali prevalentemente morfologici. Le faglie tettoniche e strutturali a grande scala condizionano direttamente la circolazione idrica a scala regionale, più ampia e più profonda, uniforme per direzione dei flussi e per entità. Le fratture presenti nel substrato roccioso condizionano, invece,

la circolazione idrica, l'infiltrazione e la capacità di immagazzinamento della roccia. Nelle zone caratterizzate da una cospicua e profonda copertura di alterazione del substrato, sono presenti diverse emergenze idriche che testimoniano la presenza di acquiferi all'interno delle unità permeabili, ricaricati prevalentemente dalle precipitazioni meteoriche.

ANALISI DELLA COLATA DETRITICA DEL 6 DICEMBRE 2004

Lungo i corsi d'acqua che attraversano l'abitato di Villagrande, a seguito delle intense precipitazioni del 6 dicembre 2004, si sono manifestati fenomeni di ruscellamento concentrato (*gullying*) e dilavamento dello strato di suolo superficiale, rilevati nel corso del sopralluogo avuto modo di effettuare nell'immediato post-evento, i quali originarono fenomeni come *soil slips*, subito incanalatisi negli impluvi e quindi nelle aste principali, evolvendosi in processi di colata tipo *debris flow*.

La riduzione della sezione dell'alveo di piena nel tempo, a causa dei continui apporti di detriti dai versanti e dai tributari minori, ha determinato aumenti istantanei della velocità di movimento della corrente liquida e quindi della capacità di trasporto con l'innescò di processi erosivi e la mobilitazione di materiali presenti in alveo. Ciò ha prodotto intensi processi erosivi sia sulle sponde, con l'innescò di crolli per lo scalzamento al piede, sia sul fondo, con un continuo approfondimento dell'alveo sino a 1-2 m su granito arenizzato e ripulitura del substrato roccioso, con conseguente trasporto di massi e blocchi di dimensioni metriche, fino all'interno del paese.

La piena si è propagata lungo le aste torrentizie sempre accompagnata da processi erosivi e con mobilitazione dei materiali disponibili in alveo litoidi e vegetali, che creavano delle pulsazioni nella corrente di piena a causa dei temporanei sbarramenti in alveo, le cui conseguenze sono state violenti fenomeni di alluvionamento nelle zone di fondovalle.

Sui versanti, laddove non esiste un'omogenea copertura vegetale, lungo le coperture granitiche e sui terreni di riporto, si sono attivati isolati processi di soil slip evoluti in colate contenute lungo i pendii. L'alta intensità delle piogge ha saturato in breve tempo i terreni superficiali che ricoprono i versanti, determinandone lo scollamento talora fino al substrato roccioso per fluidificazione dei materiali e il loro incanalamento nell'asta più vicina. Questi processi sono stati rilevati anche lungo direzioni di deflusso inattive da lungo tempo.

Un ruolo determinante nell'innescò dei processi erosivi ha avuto la rete stradale, in particolare la rete di piste forestali lungo il versante a monte dell'abitato, che ha costituito delle vie di deflusso preferenziali convogliando e scaricando a valle, nei tratti privi di strutture di contenimento laterali, ingenti quantità di acque non regimate. Il deflusso non controllato ha dato origine a fenomeni di ruscellamento concentrato nei materiali di riporto che costituivano la sede stradale stessa. Anche in questo caso, l'intensa fratturazione e l'alterazione del basamento hanno rivestito un ruolo primario nell'apporto di materiali disponibili alla mobilitazione in occasione di piena parossistica.

La tracimazione registrata nella parte montana è stata provocata dal rigurgito delle acque, costrette all'interno dell'abitato a defluire all'interno dei canali coperti, rivelatisi insufficienti per lo smaltimento dell'onda di piena. All'esondazione ha contribuito negativamente anche il trasporto da parte della corrente di tronchi e arbusti, occludendo rapidamente le opere di attraversamento e producendo uno straordinario innalzamento della piena; con il conseguente allagamento dell'abitato e il deflusso lungo le vie del paese. Anche il tessuto urbano ha avuto un ruolo molto importante, canalizzando i deflussi idrici tracimati in aree fuori dalle zone di pertinenza fluviale.



Figura 27 – Vista da elicottero del tratto del rio s'Arrescottu interessato dal *debris-flow* presso l'abitato di Villagrande (campionatura gialla)

La colata detritica innescatasi lungo il S'Arrescottu a seguito del nubifragio del 6 dicembre 2004, con valori di pioggia pari a 112 mm registrati tra le ore 12 e le ore 19, si è originata alla quota di 842 m, per un rapido e abbondante apporto d'acqua che ha mobilizzato i materiali sciolti accumulati sul fondo del canale con approfondimento dell'alveo nella copertura di alterazione del substrato granitico e la presa in carico dei materiali presenti in alveo in una zona in cui la pendenza dell'alveo è particolarmente ridotta: 10-11°. In seguito la pendenza più elevata e la presenza di diversi salti morfologici hanno consentito la propagazione della corrente detritica lungo l'alveo.

In corrispondenza di una stretta morfologica in roccia è avvenuta una prima deposizione di materiali in sponda dx, ad una quota di circa 3 m rispetto al fondo alveo. La sezione del deflusso si allarga poi fino a non più di 6 m di larghezza, su roccia prima compatta e poi molto alterata fino al sentiero che attraversa la valle ad est, a quota 776 m. A questo punto la valle diventa più ampia allargandosi fino ad un massimo di 20 m circa, l'azione della corrente detritica

si manifesta con erosioni sul fondo e sulle sponde che portano ad un approfondimento dell'alveo per circa 2 m. I materiali presenti sulle sponde, stabilizzati con muretti a secco, sono stati presi in carico e inglobati nella corrente fluida in movimento. I materiali della colata sono costituiti principalmente da grossi massi, in cui i vuoti sono parzialmente riempiti da sabbie derivate dalla disgregazione della copertura alterata del granito. Il deposito non presenta nessuna organizzazione granulometrica degli elementi rocciosi ed è caratterizzata dalla disposizione embricata dei blocchi di maggiori dimensioni verso il bordo della colata.



Figura 28 - Zona di innesco della colata alla quota di 842 m s.l.m.

Dal sentiero che attraversa la valle, a quota 766, e fino al ponte sulla strada di circonvallazione, il torrente scorre su fondo roccioso a maggiore pendenza, vi si distinguono infatti numerosi salti morfologici.

La colata ha proseguito il suo movimento verso valle inglobando durante il percorso sia i materiali presenti in alveo, litoidi e vegetali, sia i materiali presenti sulle sponde, che a causa dei processi di erosione laterale sono stati destabilizzati e inclusi nella massa in movimento. La valle sotto il ponte della strada di circonvallazione diviene nuovamente stretta, incisa parte su roccia più o meno integra e parte su roccia alterata.

Alla quota di 698 m, in destra idrografica, il rio S'Arrescottu ha ricevuto gli apporti solidi e liquidi di uno dei principali affluenti e si è incanalato verso la zona abitata. Subito a monte dell'attraversamento sulla S.P. 27 Villagrande-Tortoli il torrente si è allargato e ha depositato parte del materiale solido fin qui trasportato. La riduzione della pendenza e la canalizzazione del torrente all'interno del canale in cemento, hanno costretto la corrente ad abbandonare parte del materiale solido, con notevoli disagi per la circolazione e l'abitazione esistente nell'area di

pertinenza del torrente. A valle del ponte sulla S.P. si è avuta un'ulteriore consistente deposizione dei materiali presi in carico in sponda dx, poco prima del tratto in cui scorre nuovamente incassato in roccia, fin quasi allo sbocco sul Rio Serra Scova. La massa fluida ha così percorso una distanza di circa 1,6 km dal punto di origine.



Figura 29 – Vista del bacino idrografico a monte



Figura 30 – Vista da valle del primo attraversamento della S.P. 27



Figura 31 – Vista a valle del primo attraversamento della S.P. 27



Figura 32 – Vista del tratto tra i due attraversamenti della S.P. 27

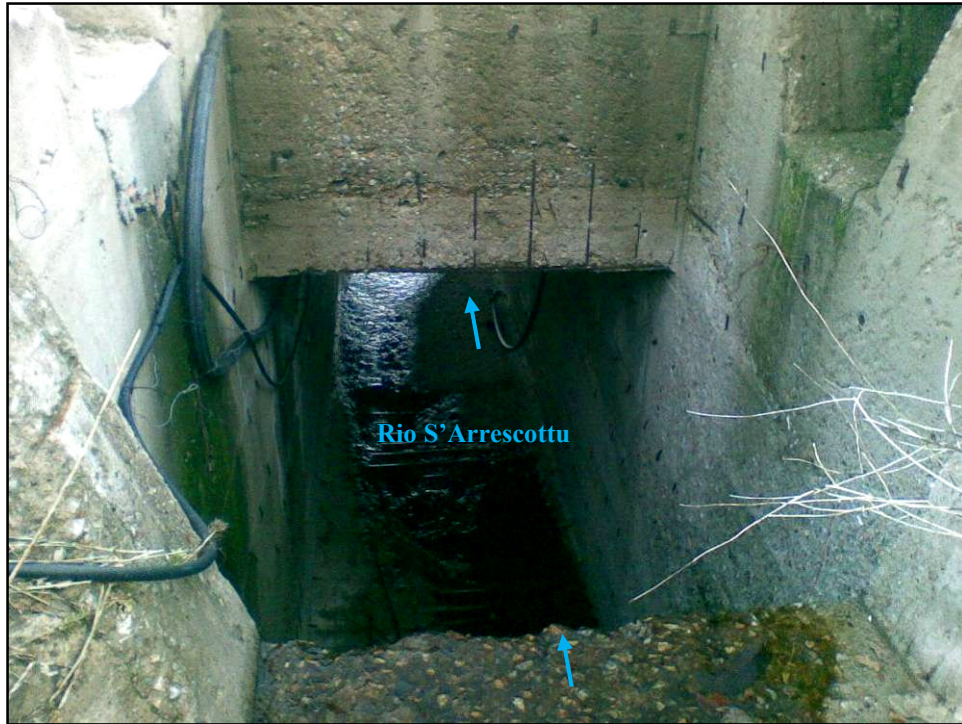


Figura 33 – Vista del secondo attraversamento della S.P. 27 (circonvallazione)



Figura 34 – Vista a valle del 2° attraversamento della S.P. 27 (circonvallazione)



Figura 35 – Vista a valle del 2° attraversamento della S.P. 27 (circonvallazione)



Figura 36 – Vista dei fenomeni di instabilità del versante lungo il rio S'Arrescottu in sponda destra presso località Gurthoi



Figura 37 – Vista dei fenomeni di instabilità di sponda ed erosivi lungo il rio S'Arrescottu in sponda destra in località Gurthoi



Figura 38 – Vista dei fenomeni di dinamica torrentizia del rio S'Arrescottu con ostruzione della tombinatura di via Roma



Figura 39 – Vista dei fenomeni di dinamica torrentizia del rio S'Arrescottu con ostruzione della tombinatura a valle della via Roma



Figura 40 – Vista dei fenomeni erosivi del rio S'Arrescottu a valle di via Roma



Figura 41 – Rio S'Arrescottu a valle della via Roma



Figura 42 – Il Rio S'Arrescottu a valle della via Roma



Figura 43 – Lobo di *debris flow* sul Rio S'arrescottu, in cui è visibile il materiale vegetale flottato dalla corrente



Figura 44 - Colata in prossimità del ponte sulla via Roma

ANALISI DEI MATERIALI PRESENTI IN ALVEO

I materiali alluvionali presenti nell'alveo del rio S'Arrescottu e nei solchi laterali sono estremamente vari dal punto di vista dimensionale: i depositi montani sono costituiti prevalentemente da blocchi, di dimensioni variabili dal cm fino anche a qualche metro, che formano una struttura solida che si auto sostiene, in cui i vuoti sono parzialmente riempiti da materiale fine, spesso imbrigliati da materiale vegetale. Questi depositi possono essere ancora mobilizzati dalla corrente in caso di eventi pluviometrici intensi come quelli occorsi durante l'alluvione del 2004.

I depositi di valle sono caratterizzati da una maggiore abbondanza della frazione fine, ghiaie e sabbie provenienti sia dall'erosione del fondo alveo sia dai depositi di materiali sciolti adagiati sul versante, in sponda dx. Sono sabbie e terre di scavo smaltiti nei compluvi o utilizzati per riempimenti al fine di recuperare spazi utili. Questi materiali sono suscettibili alla movimentazione da parte della corrente idrica anche in coincidenza di eventi pluviometrici ordinari come si è avuto modo di osservare durante i sopralluoghi effettuati in tempi diversi. Dagli studi morfologici e idraulici condotti, alla luce dei processi occorsi e dei dati raccolti a seguito dell'evento del 6 dicembre 2004 suddetto, si riscontra che gran parte dei dissesti manifestati lungo il torrente oggetto di studio sono dovuti essenzialmente alla dinamica erosiva delle acque agenti lungo le sponde e nel fondo alveo.

L'azione delle acque si è manifestata in particolare con l'incisione di solchi nelle parti più alte del bacino, che tendono ad un approfondimento progressivo originando veri e propri canali, *burrows*, responsabili di instabilità lungo i versanti. Queste dinamiche sono riconducibili, come detto, all'instabilità della superficie di alterazione dei graniti, delle coltri di detrito e dei cumuli di frana adagiati a diverse quote sulle pendici montuose. Infatti, malgrado nella parte montana del bacino il soprassuolo forestale offra una buona protezione, l'asta principale presenta tratti in cui prevale l'azione di scavo, che porta ad un approfondimento dell'alveo e tratti in cui prevale l'azione di trasporto; lungo tutta la lunghezza dell'asta si riconoscono a diverse quote aree di deposito naturali.

Il corso d'acqua scorre per lunghi tratti sul basamento cristallino profondamente alterato e quindi facilmente erodibile, la cui coltre colluviale alimenta il trasporto solido. Questi materiali alimentano con regime intermittente correnti detritiche che si propagano verso valle incanalandosi e arricchendosi di altri materiali lungo il percorso. La deposizione del detrito avviene nei tratti in cui si ha una diminuzione delle pendenze e nei tratti in cui l'alveo è meno confinato lateralmente. Procedendo verso valle, a ridosso del centro abitato i processi di deposito prevalgono su quelli erosivi, originando delle forme di conoidi.

Come si è avuto modo di osservare nel corso dei rilievi di campagna, agli effetti indotti da cause naturali sono spesso sovrapposti elementi di natura antropica: tali si sono rivelati ad esempio i canali coperti, i ponti e gli edifici costruiti in zone per natura soggette a espansione del corso d'acqua per piene straordinarie.

La situazione di dissesto geologico-idraulico evidenzia la possibilità che possano verificarsi nuovi eventi alluvionali parossistici in occasione di violente precipitazioni a carattere temporalesco: la conformazione geomorfologia dei bacini ed in particolare l'elevata pendenza dei versanti, unitamente al fatto che il substrato granitico è interessato da una fratturazione pervasiva e da intensi processi di alterazione, la presenza di una copertura detritica diffusa e lo sviluppo di aree in cui a causa degli incendi la copertura vegetale è del tutto assente, rende suscettibili a erosione volumi di materiali sempre più consistenti. Allo stato attuale, nel corso dei sopralluoghi effettuati per questa ricerca, si è riscontrata la presenza in alveo e lungo il bacino idrografico di materiali detritici in equilibrio precario, che possono innescare ed alimentare nuovi eventi di trasporto in massa.

Da questa attenta analisi, come detto condotta insieme ad un team di geomorfologi locali e il CNR IRPI di Torino, è stato possibile redarre una carta geomorfologica della situazione del dissesto dell'evento del 2004, che è stata utile per questo lavoro di ricerca al fine di valutare le dimensioni, le caratteristiche e le evidenze fisiche generali dei materiali messi in moto durante l'evento.

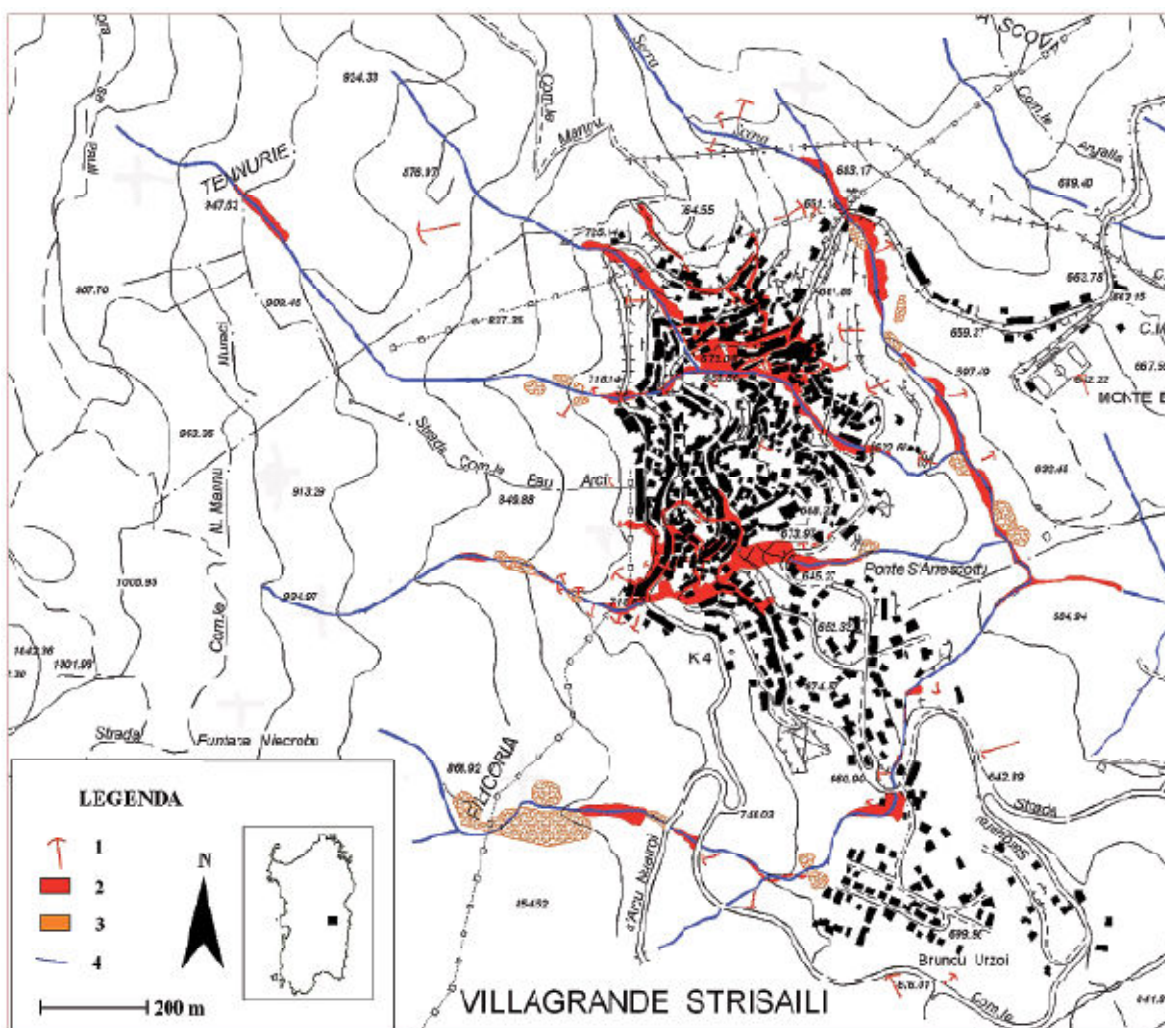


Figura 45 – Sintesi grafica degli effetti indotti dall'evento del 6 dicembre 2004 nell'abitato di Villagrande Strisaili (Demurtas et alii 2007). Simboli utilizzati: 1) frana per fluidificazione di terreni superficiali, 2) area interessata da trasporto solido torrentizio in massa, 3) accumulo di blocchi, 4) rete idrografica

Lo studio ha inoltre consentito di individuare, in un lobo di colata, un valido campione rappresentativo dell'intero evento di *debris flow*, utile per raccogliere le informazioni morfometriche necessarie per questo lavoro di ricerca.

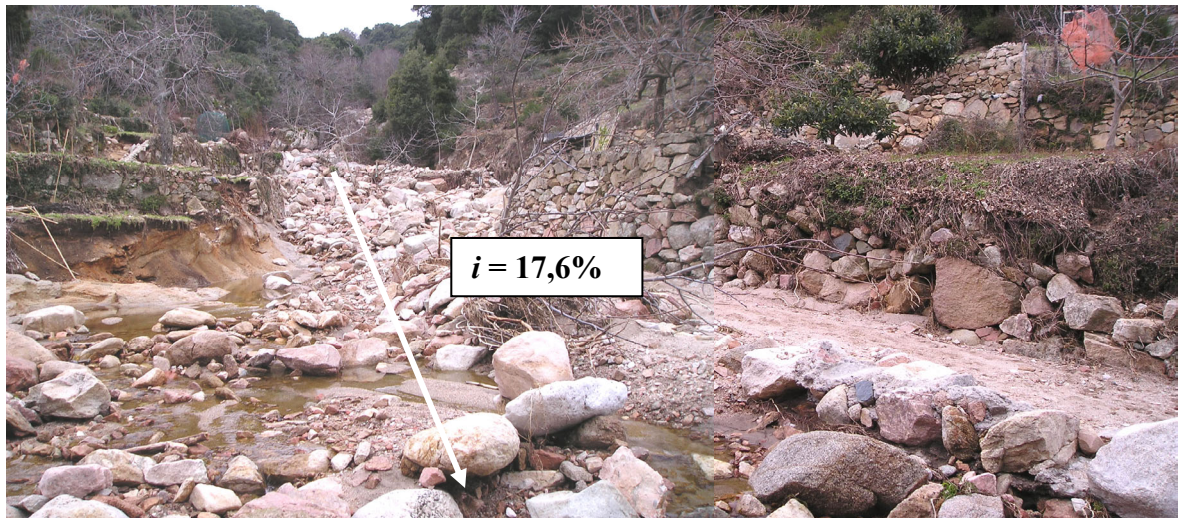


Figura 46 –Passaggio della colata detritica in località Su'e Lathori alla quota di 800 m s.l.m. con una pendenza media del tratto di scorrimento del 17,6%



Figura 47 - Margine esterno della colata in prossimità del ponte sulla circonvallazione in località Su 'e Lathori, dal quale sono stati prelevati i campioni analizzati

ANALISI REOLOGICHE SPERIMENTALI SUI CAMPIONI PRELEVATI SUCCESSIVAMENTE ALL'EVENTO DEL 6 DICEMBRE 2004

Le colate detritiche o *debris flows*, sono movimenti in massa il cui comportamento reologico è il risultato delle interazioni che si realizzano tra le frazioni solida e fluida che costituiscono la miscela. Il volume e la composizione della miscela sono i principali fattori che concorrono a determinare la pericolosità associata a tali fenomeni, dal momento che da questi dipende la mobilità e l'energia di impatto della colata.

La granulometria è strettamente collegata alle caratteristiche reologiche del campione, in quanto legata alla concentrazione solida, grandezza individuata come rapporto tra il volume della parte solida e il volume totale del campione. I parametri reologici sono utilissimi per arrivare a rappresentare la difficoltà che uno strato di fluido ha nello scorrere su di un altro strato, attraverso la determinazione della viscosità, grandezza legata al concetto di forza e di velocità. Numericamente la viscosità è espressa dal Coefficiente di viscosità μ , che è definito dalla seguente espressione:

$$\mu = N/m^2 \cdot \text{sec} = Pa \cdot \text{sec}$$

Il $Pa \cdot \text{sec}$ è un'unità di misura usata nel S.I. mentre un'altra unità di misura utilizzata per la viscosità è il *Poise*:

$$1 Pa \cdot \text{sec} = 10 \text{Poise}$$

Legato al concetto di viscosità troviamo quello di tensione individuato come:

$$\tau = F/A$$

dove τ rappresenta la tensione e ha come unità di misura il *Pascal*. Tale unità di misura si ottiene facilmente:

$$\left[N/m^2 = Pa \right]$$

Secondo la legge di Newton, la tensione è data dal rapporto tra la variazione di velocità e il valore dell'ascissa moltiplicata per la viscosità

$$\tau = -\Delta V / \Delta y \cdot \eta$$

Da queste equazioni si evince che la tensione aumenta con l'aumento della viscosità e si ricava, inoltre, una prima classificazione dei fluidi ottenuta come rappresentato dal grafico seguente:

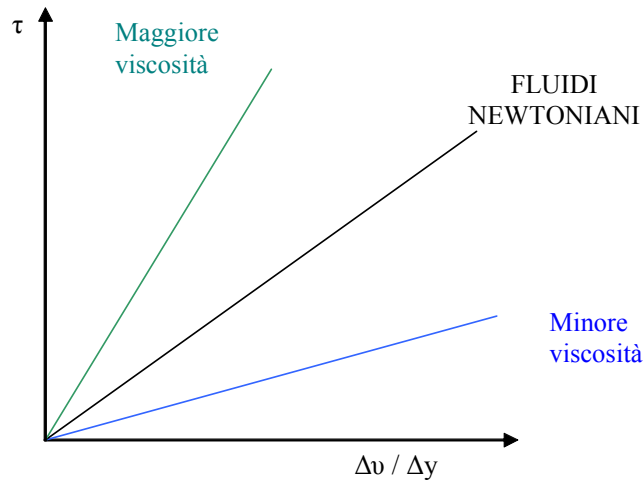


Figura 48 - Grafico sulla viscosità dei fluidi

I fluidi possono quindi essere classificati secondo tre ben distinte categorie:

- fluidi dilatanti
- fluidi newtoniani
- fluidi pseudoplastici

I fluidi dilatanti, sono quelli nei quali la tensione, cioè la forza da applicare per far muovere il fluido, aumenta con l'aumento della velocità.

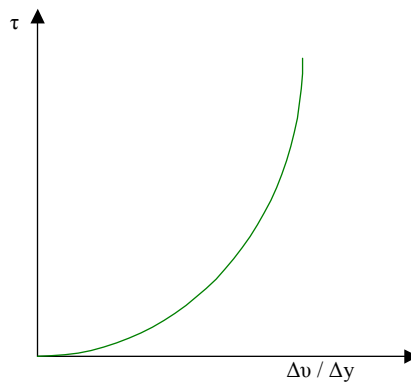


Figura 49 – Grafico dei fluidi dilatanti.

I fluidi newtoniani sono invece quelli nei quali lo sforzo da applicare per muovere il fluido è costante.

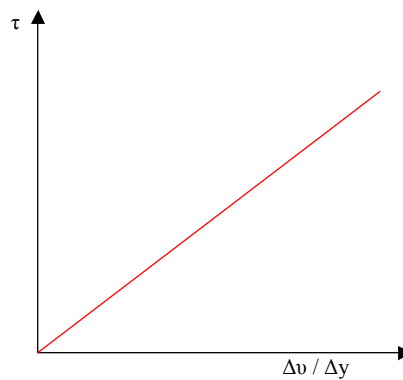


Figura 50 - Grafico dei fluidi newtoniani.

I fluidi pseudo plastici sono infine quelli nei quali gli sforzi da applicare diminuiscono con l'aumento della velocità.

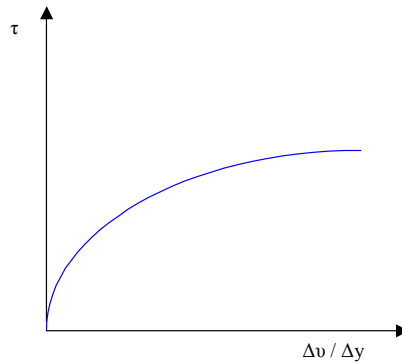


Figura 51 - Grafico dei fluidi pseudoplastici.

In campo scientifico sono stati portati avanti vari studi per ricavare i modelli fisici di base che descrivono i flussi e il comportamento della deposizione dei *debris flow* (Iverson 1997, Iverson & Denlinger 2001, 2001a, 2001b, McDougall & Hungr 2004).

A causa della altissima variabilità della composizione dei materiali, della complessità delle interazioni alla scala delle particelle che compongono il fluido e a causa della dipendenza dall'evoluzione nel tempo dell'onda di deflusso, non esiste un modello generale capace di coprire tutte le probabilità di flusso possibili. La complessità dei parametri di *input* (variabilità della resistenza meccanica in una composizione eterogenea) ed *output* (volume dell'evento, materiali presenti lungo i canali, caratteristiche dei materiali) del fenomeno rendono inoltre i modelli fisici non facilmente leggibili e chiari. Sebbene sia stato mostrato che i modelli reologici non riflettano appieno la meccanica di molti *debris flow* reali, questi modelli sono tuttora tra i più utilizzati nelle applicazioni pratiche.

Nelle ricerche degli ultimi decenni si è maggiormente focalizzata l'attenzione alla considerazione del ruolo rilevante delle particelle più grossolane, studiando dei modelli di flusso basati sulla meccanica granulare per descrivere appunto dei moti granulari senza acqua (Jop et alii 2006, Savage et alii 1989), e per studiare inoltre i moti di particelle grossolane in sospensione in fluidi con un basso contenuto di particelle fini (Pudasaini et alii 2005). Per questo tipo di flussi la resistenza al taglio, dovuta all'attrito interno delle particelle, gioca un ruolo molto importante e lo sforzo di taglio è funzione dell'attrito del canale di scorrimento, dell'angolo di attrito interno e dello sforzo normale ed è inoltre indipendente dal tasso di deformazione di taglio, a differenza di quanto succede per l'approccio utilizzato per flussi studiati con l'approccio reologico, utilizzato per lo più per lo studio dei fluidi viscoplastici. Considerando il principio di Terzaghi (Terzaghi 1963), che dice che l'effettivo sforzo normale è dato dallo sforzo normale meno la pressione neutra dell'acqua, Iverson (Iverson 1997, Iverson 2003) scoprì che lo sviluppo della pressione interstiziale gioca un ruolo fondamentale nell'evoluzione dei flussi dei materiali da lui studiati.

I *debris flow* naturali sono spesso classificati a seconda della concentrazione di sedimenti fini o grossolani e i prefissi *viscous-muddy* o *Granular-stony* sono utilizzati per definire le caratteristiche principali dello sviluppo del deflusso (Ancey 1999, Coussot & Meunier 1996, Takahashi 1991).

Coussot e Ancey (Coussot & Ancey 1999) svilupparono a tal proposito un semplice schema di classificazione per fluidi granulari in modo da identificare le maggiori cause di dissipazione di energia usando quantità dimensionali. Tali autori accertarono il fatto che, sopra una concentrazione critica, le collisioni dirette, quelle frizionali e i contatti tra le diverse particelle dominano i processi di moto per le *hard suspensions*. Allo stato attuale i modelli di meccanica dei suoli come il modello di Mohr Coulomb e alcune idee basate sulle ricerche di Bagnold (Bagnold 1954) sono tra i più utilizzati per descrivere questo tipo di flussi.

Al di sotto il livello di questa concentrazione critica, *soft suspensions*, è di particolare interesse invece capire la transizione tra il regime colloidale e il regime idrodinamico al quale corrispondono i fluidi viscoplastici. Per i *debris flow* si può quindi concludere che, se la frazione di particelle colloidali è sufficiente, e la concentrazione solida volumetrica è minore di una data concentrazione critica, che separa la *soft suspension* dalla *hard suspension*, lo sviluppo del flusso è di tipo viscoplastico. A tal proposito Coussot (Coussot 1994) suggerì che sotto un valore del 10% di particelle di diametro inferiore a 0,04 mm, per i *debris flow* le forze viscose dominano lo svilupparsi del flusso.

Per flussi complessi, composti principalmente da particelle fini e colloidali con limi e argille, dominano le forze viscose e gli sforzi totali possono essere descritti con un modello denominato Herschel –Bulkley e misurati tramite reometri (Coussot 1997, Huang & Garcia 1998).

Spesso per definire i modelli reologici viene utilizzato il modello “binghamiano”, il quale rappresenta un particolare caso del modello Herschel –Bulkley (Bird et alii 1982, Pierson & Costa 1987).

Il modello plastico di Bingham, detto “binghamiano” (Bingham 1916), rappresenta infatti il più semplice modello reologico, in quanto presuppone un andamento lineare-newtoniano del rapporto tra lo sforzo di taglio e il tasso di deformazione ottenuto in un materiale conseguentemente ad uno sforzo nominale iniziale necessario al che il fluido si inizi a deformare.

Un aspetto caratteristico degli esperimenti realizzati sui *debris flow* naturali è che in essi appare uno strato rigido superficiale che scorre su degli strati sottostanti. Queste osservazioni supportano l’idea che i *debris flow* siano dei fluidi viscoplastici in cui si necessita di un iniziale sforzo di deformazione perchè il fluido si deformi e crei un suo movimento.

Nel modello binghamiano lo sforzo di taglio è una funzione lineare del tasso di deformazione lineare, moltiplicato per la viscosità binghamiana η e, inoltre, funzione della costante del materiale corrispondente allo sforzo nominale τ_b :

$$\tau = \tau_b + \eta\gamma$$

Per un moto laminare uniforme a pelo libero che scorre su una superficie infinitamente estesa, la distribuzione della velocità sulla verticale è data da:

$$V(y) = V_s = \frac{\rho g \sin \theta}{2\eta} y_0^2 \quad \text{per } H \geq y \geq y_0$$

$$V(y) = \frac{\rho g \sin \theta}{2\eta} [y_0^2 - (y_0 - y)^2] \quad \text{per } y \leq y_0$$

Dove ρ è la densità del fluido q è la pendenza del canale, g l'accelerazione di gravità, y è l'altezza del fondo e y_0 è l'altezza dello strato di scorrimento dal letto del canale individuata come:

$$y_0 = H - \frac{\tau_B}{\rho g \sin \theta}$$

Come si può vedere nella figura seguente la distribuzione verticale delle velocità consiste in uno strato che scorre su una superficie di velocità costante con V_y uguale alla velocità della superficie totale e V_s alla velocità dello strato rigido superficiale. L'altezza e il profilo delle velocità di scorrimento dello strato rigido superficiale sullo strato sottostante dipendono dalle caratteristiche reologiche del fluido.

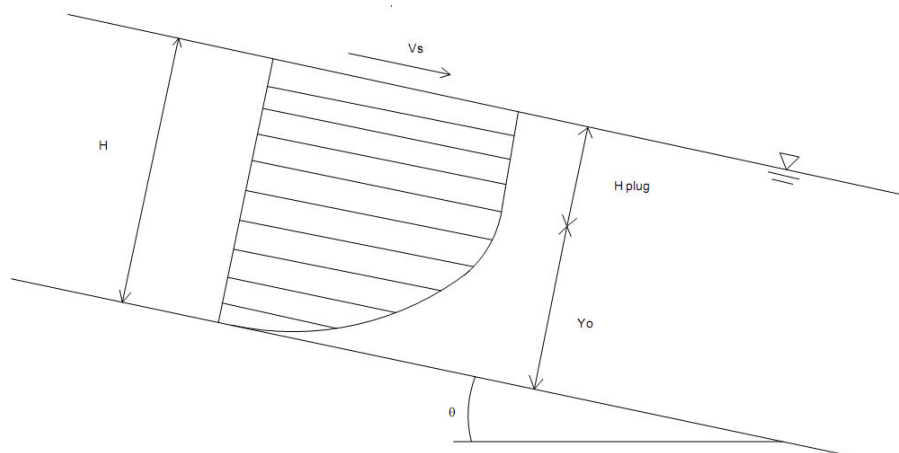


Figura 52 - Profilo delle velocità in un fluido binghamiano (Kaitna & Rickenmann 2007)

Nei fluidi binghamiani la velocità tangenziale all'interno degli strati di scorrimento aumenta quadraticamente con l'altezza dal fondo.

La velocità media verticale di uno strato che scorre in un canale infinitamente esteso prende quindi la forma di:

$$V_m = \frac{H\tau_0}{3\eta} \left[1 - \frac{3}{2} \frac{\tau_B}{\tau_0} + \frac{1}{2} \left(\frac{\tau_B}{\tau_0} \right)^3 \right]$$

dove lo sforzo di taglio sul fondo è

$$\tau_0 = \rho g H \sin \theta$$

Il modello binghamiano per la modellazione dei *debris flow* richiede quindi la determinazione dei valori di τ_b e η .

Diversi autori hanno proposto varie equazioni empiriche per relazionare i parametri binghamiani sopra visti con la concentrazione solida volumetrica dei sedimenti. Si è scoperto inoltre che anche altri parametri, come la distribuzione granulometrica e il contenuto e la tipologia dei minerali argillosi, giocano un ruolo cruciale nello sviluppo del flusso (Chen 1986, Jonshon 1970).

Naturalmente bisogna ad ogni modo tener presente che la relazione lineare tra lo sforzo di taglio e il tasso di variazione dello sforzo, come nel modello Binghamiano, è solamente una approssimazione di ciò che succede nella realtà nei flussi naturali e nella maggior parte dei *debris flow* reali. Per campioni di *debris flow* a granulometria fine occorsi nel Jiangua Ravine in Cina, gli sforzi nominali binghamiani misurati variavano in un range esteso tra 10 a 300 Pa e la viscosità binghamiana variava tra 0,4 e 15 Pa s (Huizinga 1993).

I parametri binghamiani ottenuti da osservazioni su depositi di *debris flow* granulari attraverso una *back calculation* effettuata da Tecca *et alii*, hanno mostrato invece dei valori di sforzo nominale varianti tra 450 e 3000 Pa e valori di viscosità binghamiana tra i 5 e i 75 Pa s, parametri molto differenti da quelli ottenuti dai *muddy debris flow* del Jiangua Ravine come sopra visti (Tecca *et alii* 2003).

Anche il modello di Herschel Bulkley può essere considerato un caso particolare del modello binghamiano ed è rappresentato con la seguente formula:

$$\tau = \tau_y + K\dot{\gamma}^n$$

Dove K rappresenta l'indice di consistenza ed n l'indice di plasticità. Come nel modello binghamiano lo sforzo nominale τ_y deve essere assorbito prima che inizi la deformazione e quindi il movimento dei materiali.

Per valori di gamma superiori a 5 s^{-1} , n tende ad assumere valore 1 e K è uguale alla viscosità binghamiana η (Pa*s).

Con l'aumentare delle concentrazioni solide aumenta invece anche l'interazione delle particelle grossolane, ed il comportamento reologico presunto diventa più complesso.

Alcune indagini reologiche hanno mostrato come, per la maggior parte dei *mud flow*, n sia minore di 1 e il flusso scorra mediante strati laminari sottili (Coussot 1997). Il moto laminare uniforme del fluido di Herschel Bulkley su una superficie infinitamente estesa si può esprimere come:

$$V(y) = V_s = \left(\frac{\rho g \sin \theta}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{1}{1 + 1/n} y_0^{1 + \frac{1}{n}} \text{ per } H \geq y \geq y_0$$

$$V(y) = \left(\frac{\rho g \sin \theta}{2\eta} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{1}{1+1/n} \left[y_0^{1+\frac{1}{n}} - (y_0 - y)^{1+\frac{1}{n}} \right] \text{ per } y \leq y_0$$

Dove anche in questo caso y è l'altezza del fondo e y_0 è l'altezza dello strato di scorrimento dal fondo ottenuta come:

$$y_0 = H - \frac{\tau_B}{\rho g \sin \theta}$$

Per misture naturali di acqua e argilla è stato trovato che $n \approx 1/3$ (Coussot 1994, 1997, Coussot & Piau 1995, Coussot & Proust 1996).

Coussot et alii (Coussot et alii, 1998) riportarono per differenti concentrazioni volumetriche, valori costanti di $n=1/3$, risultanti sia da test effettuati con reometri convenzionali per materiali di granulometria inferiore a 0,4 mm, così come da reometri su larga scala utilizzati con materiali di granulometria superiore a 25 mm. Al contrario studi condotti da Schatzmann (Schatzmann 2005), ed eseguiti su campioni di *debris flow* con differente granulometria massima, hanno mostrato valori di n considerevolmente differenti dal valore di $n = 1/3$. Remaitre et alii (Remaitre et alii 2005) realizzarono invece dei test su materiali fini, con granulometria inferiore a 0,4 mm, provenienti da *debris flow* dove n variava tra 0,27 e 0,36, supportando l'ipotesi di $n = 1/3$ per sospensioni composte da sabbie fini, limi e argille. Allo stato attuale rimane comunque una notevole incertezza riguardo al modo in cui il valore di n possa essere influenzato dalla presenza di particelle più grossolane come le ghiaie. Da misure effettuate su sospensioni a grana fine con $d_{max} < 0,4$ mm, si è desunto che il rapporto K/τ_y rimane costante con valori intorno a 0,3 al variare delle diverse concentrazioni solide (Coussot 1994, Coussot et alii 1998).

Esperimenti realizzati con miscele fangose miste a ghiaie, non hanno invece confermato tali osservazioni (Coussot 1995, Schatzmann 2005).

Alcuni limiti evidenti del comportamento reologico dei materiali derivanti da esperimenti portati avanti con particelle grossolane prelevate da materiali di colate detritiche reali, denotano il fatto che, in molti casi, i *debris flow* non mostrano un'evidente distribuzione omogenea dei materiali che lo costituiscono in tutta la lunghezza dell'onda del flusso. Inoltre, nonostante diversi tentativi, i parametri come la resistenza caratteristica e la viscosità non sono facilmente determinabili né attraverso misure dirette, anche considerando dimensioni di particelle grossolane dal cm al m, né derivabili dalle proprietà del materiale come la concentrazione solida, la distribuzione granulometrica e il contenuto dell'acqua e delle frazioni di argilla (Parson et alii, O'Brien, Julien, 1988, Major & Pearson 1992, Takahashi 1991).

In passato, inoltre, sono stati portati avanti solamente pochi studi per verificare i risultati ottenuti da delle modellazioni numeriche con i risultati reali misurati su eventi occorsi (Naef et alii 2006, Remaitre et alii 2005, Rickenmann 1999, Rickenmann et alii 2006).

In particolare per modelli di simulazione di *debris flow* fondati su approcci basati sulla meccanica granulare delle miscele, gli esperimenti effettuati sono stati pochissimi, ed è questa la ragione per cui nelle simulazioni pratiche per la realizzazione e la mappatura di aree a pericolosità da frana dovuta a eventi di *debris flow* si utilizzano i modelli basati sull'ipotesi di fluidi viscoplastici (Bertolo & Wieczorek 2005).

I modelli reologici utilizzati però non si rivelano quasi mai efficaci nelle previsioni attendibili del flusso in uscita per simulazioni numeriche di *debris flow* naturali, proprio a causa della mancanza della valutazione dell'effetto del quantitativo di ghiaia e ciottoli nelle colate reali (Parson et alii 2001).

A volte questi parametri sono ottenuti attraverso dei processi di *back calculation* sui dati raccolti in campagna, nei siti dove sono occorsi degli eventi di colata detritica, ma questi dati dovrebbero sempre essere verificati attraverso delle sperimentazioni su campioni raccolti dai materiali reali.

A questo proposito sono stati provati numerosi modelli fisici sperimentali per simulare flussi di materiali non-newtoniani in scala reale in laboratorio.

Molti esperimenti sono stati effettuati con canali inclinati (Takahashi 1991, Holzinger & Huebl 2004, Coussot 1994, Coussot & Laigle 1994)), canali con nastri trasportatori (Davies 1990, Huebl & Steinwendtner 2000, Ling & Chen 1989), reometri di larga scala (Phillips & Davies 1991, Coussot & Piau 1995) ed inoltre con alcuni canali rotanti verticali (Brown 1993, Huinzinga 1993, 1996, Major 1997). Il principale vantaggio nell'utilizzare il canale rotante verticale è la possibilità di stabilire un moto in condizioni stazionarie per un lungo periodo di tempo. Paragonato al canale col nastro trasportatore, il canale rotante può più facilmente essere equipaggiato con dei sensori di misura dei parametri di interesse come il momento torcente assiale, gli sforzi normali e gli sforzi tangenziali. D'altra parte il comportamento del flusso è più complesso a causa della curvatura del letto del canale ed a causa degli effetti dell'attrito delle pareti che possono essere di natura superiore rispetto a quelli presenti negli apparati a nastro trasportatore.

ESPERIMENTI REOLOGICI EFFETTUATI SUI CAMPIONI

Nei laboratori dell'Università Boden Kulture di Vienna è stato realizzato un Canale Verticale Rotante per studiare le proprietà dei flussi di materiali non-newtoniani. Il Canale Verticale è stato sviluppato per testare le proprietà di miscele con diversa granulometria e diverso contenuto d'acqua e viscosità. La strumentazione è stata tarata inizialmente utilizzando materiali viscoplastici omogenei presenti nel mercato come il Carbobol Ulltrez 10 (Noveon 1995) e successivamente è stata calibrata anche utilizzando diversi campioni di *debris flow* reali (Kaitna, Rickenmann & Schneiderbauer 2006, Kaitna, Rickenmann & Schatzmann 2007, Kaitna 2006, Kaitna & Rickenmann 2007), ricavando i parametri di flusso del modello binghamiano, comparati poi con risultati misurati indipendentemente su gli stessi campioni in un reometro

convenzionale a cilindri coassiali (Bohlin Visco 88BV), in un Conveyor Belt Flume e in un Ball Measuring System sviluppato da Muller et alii (Muller et alii 1999), e implementati nel Paar Physica MCR 300 Rheometer.

Il canale verticale è stato utilizzato anche per questo lavoro di ricerca. Si è scelto in questo modo di indagare a fondo sulle proprietà reologiche dei materiali interessati dall'evento oggetto di studio, in maniera da avere una più ampia conoscenza del fenomeno e poter arrivare ad una sua miglior classificazione, ed in modo da poter effettuare i confronti con altri fenomeni di *debris flow* di diversa natura.

Per riuscire a realizzare gli esperimenti su dei campioni di granulometria in scala adeguata a rappresentare i materiali protagonisti dell'evento parossistico del 6 dicembre 2004 nel bacino del rio S'Arrescottu, dai lembi di colata identificati nell'immediato post-evento secondo le modalità precedentemente enunciate, sono stati prelevati dei campioni naturali dalla matrice formante lo strato fluido su cui sono stati flottati i clasti di grosse dimensioni.

È stata prelevata una quantità sufficiente di materiale che è stata inviata a Vienna nei laboratori della University for Natural Resources and Applied Life Sciences (BOKU), dove sono stati condotti dei test su delle parti del campione con diversa granulometria e con diversi contenuti d'acqua. In seguito i risultati sono stati analizzati in modo da tentare di estrapolare la tendenza che consente di valutare il comportamento reologico del campione totale in diverse condizioni di concentrazione solida volumetrica.



Figura 53 – Campioni del rio S'Arrescottu nei laboratori della Universitat Bodan Kulture di Vienna

Inizialmente sono state condotte le analisi granulometriche attraverso le quali sono state individuate da subito alcune differenze tra la matrice franco sabbiosa caratterizzante la colata detritica oggetto di questo studio e la composizione dei classici *debris flow* con miscele argillose

e limose che, come prima ricordato, Coussot (Coussot 1994) classificò tali per una composizione formata da particelle di diametro inferiore a 0,04 mm in una percentuale inferiore al 10%.

Sample A									
Total weight	Tara in g	191.89	Most Weight in g	1076.50	Dry Weight in g	1049.60	Percentually		
Grain Size mm	8.00	Tara in g	184.12	Total Weight in g	192.80	Net Weight in g	8.68	1.01	%
Grain Size mm	4.00	Tara in g	191.08	Total Weight in g	247.78	Net Weight in g	56.70	6.61	%
Grain Size mm	2.00	Tara in g	192.06	Total Weight in g	285.32	Net Weight in g	93.26	10.87	%
Grain Size mm	1.00	Tara in g	191.17	Total Weight in g	344.68	Net Weight in g	153.51	17.90	%
Grain Size mm	0.50	Tara in g	191.00	Total Weight in g	398.99	Net Weight in g	207.99	24.25	%
Grain Size mm	0.25	Tara in g	183.76	Total Weight in g	376.65	Net Weight in g	192.89	22.49	%
Grain Size mm	0.125	Tara in g	183.64	Total Weight in g	273.42	Net Weight in g	89.78	10.47	%
Grain Size mm	0.063	Tara in g	233.28	Total Weight in g	266.79	Net Weight in g	33.51	3.91	%
Grain Size mm	< 0,063	Tara in g	241.27	Total Weight in g	262.66	Net Weight in g	21.39	2.49	%

Tabella 1 – Analisi granulometriche del Campione A

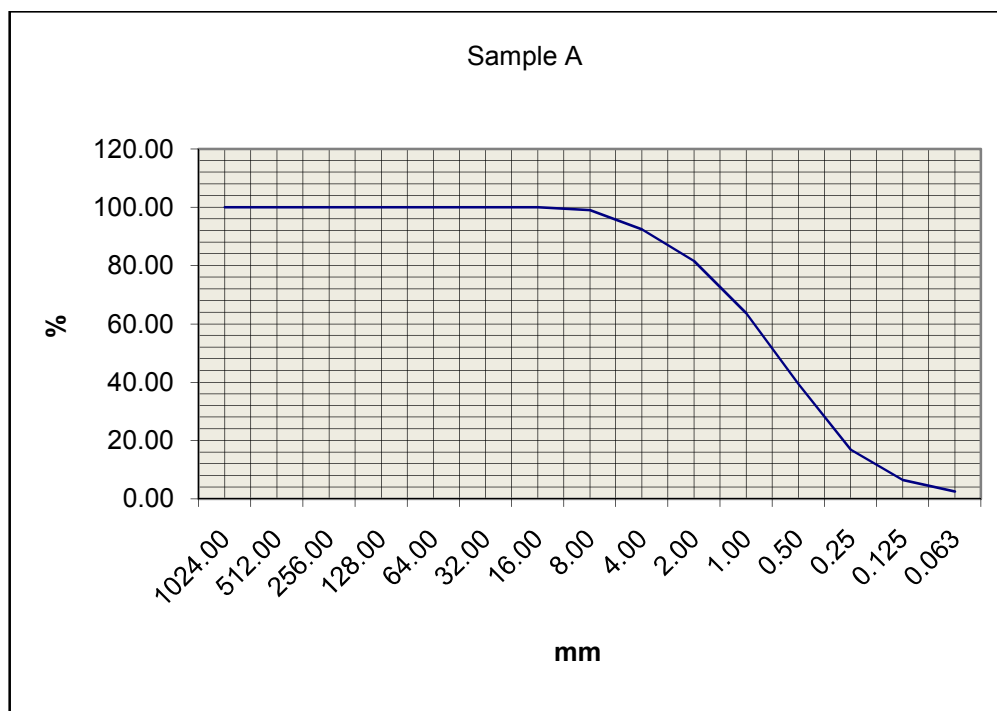


Figura 54 – Diagramma delle analisi granulometriche del Campione A

Sample B									
Total weight	Tara in g	240.68	Most Weight in g	1146.00	Dry Weight in g	1121.10	Percentually		
Grain Size mm	8.00	Tara in g	191.11	Total Weight in g	200.20	Net Weight in g	9.09	1.03	%
Grain Size mm	4.00	Tara in g	190.44	Total Weight in g	240.93	Net Weight in g	50.49	5.73	%
Grain Size mm	2.00	Tara in g	182.68	Total Weight in g	292.47	Net Weight in g	109.79	12.47	%
Grain Size mm	1.00	Tara in g	190.98	Total Weight in g	351.18	Net Weight in g	160.20	18.20	%
Grain Size mm	0.50	Tara in g	191.60	Total Weight in g	392.73	Net Weight in g	201.13	22.84	%
Grain Size mm	0.25	Tara in g	237.92	Total Weight in g	430.10	Net Weight in g	192.18	21.83	%
Grain Size mm	0.125	Tara in g	191.72	Total Weight in g	288.17	Net Weight in g	96.45	10.95	%
Grain Size mm	0.063	Tara in g	190.63	Total Weight in g	227.70	Net Weight in g	37.07	4.21	%
Grain Size mm	< 0,063	Tara in g	246.53	Total Weight in g	270.55	Net Weight in g	24.02	2.73	%

Tabella 2 – Analisi granulometriche del Campione B

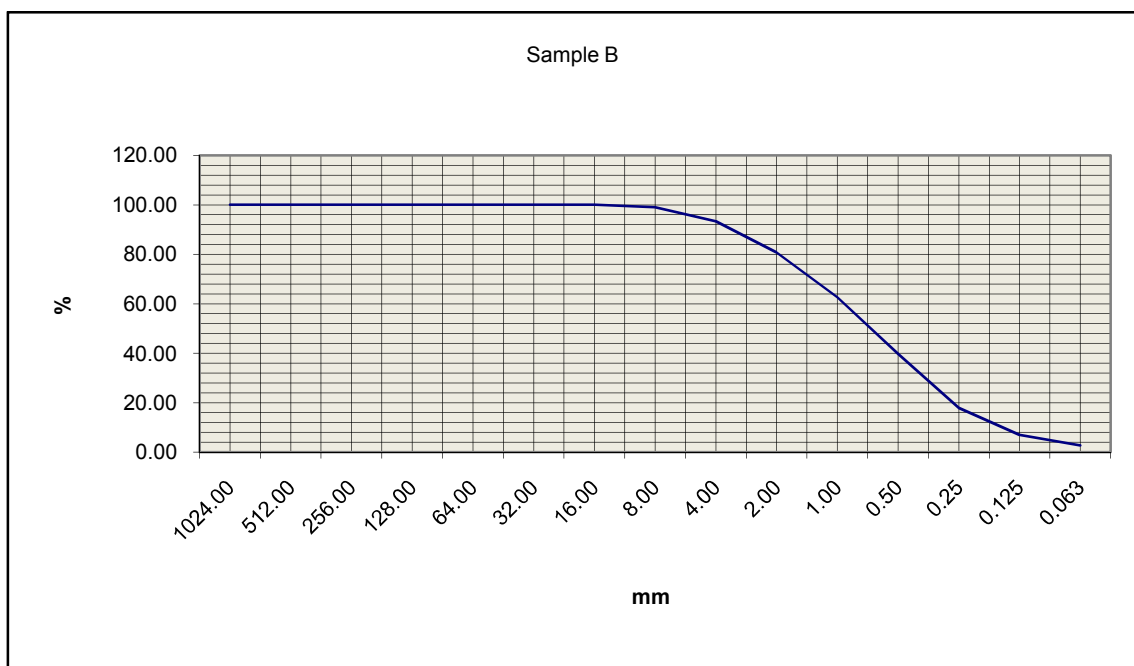


Figura 55 - Diagramma delle analisi granulometriche del Campione B

Come appare chiaramente dai risultati riportati, il campione presenta, oltre una maggioranza di passante presente nei regimi franco sabbiosi, un limite massimo del diametro di 8 mm in cui il campione è rappresentato per la quasi totalità.

Ricordando che i clasti di maggiori dimensioni portati in sospensione dalla matrice non sono stati considerati in queste analisi, si può subito notare che il peso percentuale dei materiali

di dimensione dell'ordine di misura dei centimetri è di poco superiore all' 1%. Per questo motivo si è scelto di considerare come limite massimo dei campioni da sottoporre a test il valore di 8 mm come Diametro max in quanto si è ritenuto necessario poter riferire i dati ottenuti ad un valore fisso considerandolo comunque significativo dell'intero campione.

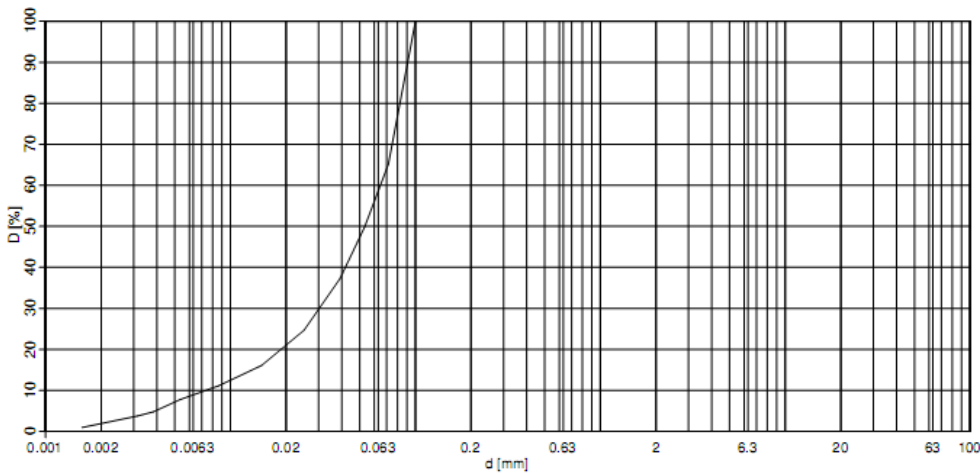
Sono state condotte oltre a ciò le analisi sulle frazioni più fini dei campioni, con diametro max 0,063 mm, che sono risultate essere poco rilevanti nella complessità della costituzione della matrice. Queste frazioni, inoltre, come è apparso anche da un analisi visiva, presentavano un colore abbastanza scuro ad indicare la presenza di materiali organici nella mistura.

Kornverteilung

Seite 1/2

Projekt Übung2

Datensatz Sample a
Sardinien



Steine: 0.0 % Kies: 0.0 % Sand: 41.3 % Schluff-Fraktion: 56.7 % Tonfraktion: 1.9 %
 $d_{max} = 0.2 \text{ mm}$ $U = 8.8$ $C = 1.9$ $d_{10} = 0.007 \text{ mm}$ $d_{50} = 0.053 \text{ mm}$

Bodenbezeichnung: fS, mgU

Bearbeiter:
Institut für Geotechnik

10.03.08
15:25

Programmentwicklung: O. Peggel, D. Sukup
Stiftung für geotechnische Grundlagenforschung, Universität für Bodenkultur Wien

Figura 56 - Diagramma delle analisi granulometriche della parte più fine del Campione A

Kornverteilung

Seite 2/2

Projekt Übung2

Datensatz Sample a
Sardinien

Siebversuch

Siebsatz A

$R_{\bar{U}} = 0.0 \%$
 $D_{max, \bar{U}} = 0.100 \text{ mm}$
 $m_s = 40.02 \text{ g}$
 $d_{max} = 0.200 \text{ mm}$
 $d_{min} = 0.100 \text{ mm}$
 $d_{min, G} = 8.000 \text{ mm}$
 $d_{min, M} = 0.400 \text{ mm}$
 $D'(d_{min, G}) = 40.02 \%$
 $D'(d_{min, M}) = 40.02 \%$
 $m_{s, F} = 40.02 \text{ g}$
 $w = 0.0 \%$

	d [mm]	R [g]	D [%]
F	0.10	0.00	100.00
	0.10	0.00	100.00

Ärömeterversuch

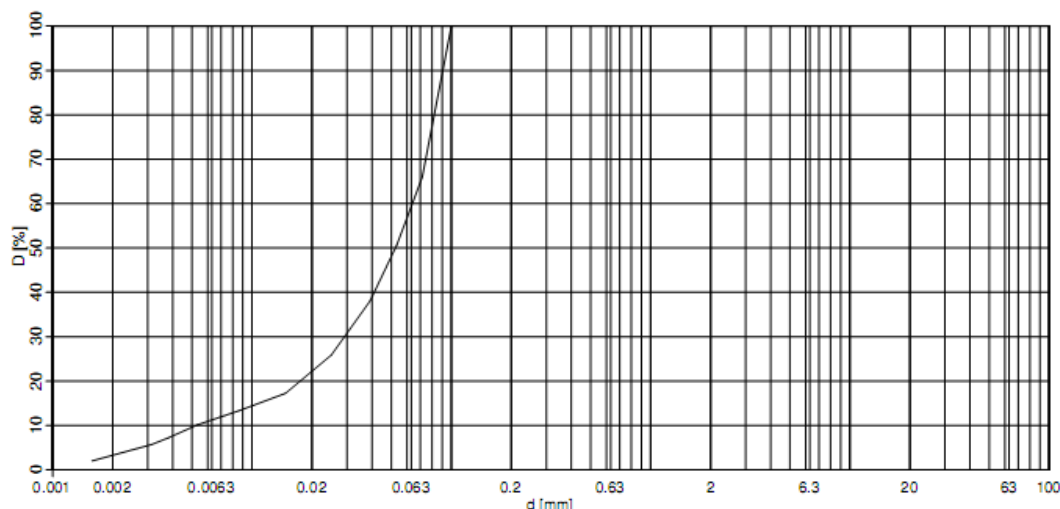
Ärömeter 3

$\rho_s = 2.750 \text{ g/cm}^3$
 $m_{s, A} = 40.02 \text{ g}$
 $K_M = 0.3 \text{ cm}$
 $K_D = 2.6 \text{ g}$
 $K_A = 1.4 \text{ g}$
 $D(d_{0.02}) = 21.08 \%$

t [min]	T [°C]	d [mm]	R' [-]	D [%]
0.5	21.0	0.0714	17.50	65.21
1.0	21.0	0.0532	13.60	49.89
2.0	21.0	0.0391	10.40	37.32
5.0	20.9	0.0250	7.00	24.71
15.0	21.0	0.0147	5.00	16.11
45.0	21.1	0.0086	3.50	11.13
120.0	20.9	0.0053	2.70	7.82
240.0	20.6	0.0038	2.00	4.81
360.0	20.3	0.0031	1.80	3.78
1440.0	20.7	0.0016	1.00	0.97

Tabella 3 – Analisi granulometriche della parte più fine del Campione A

Datensatz Sample b
Sardinien



Steine: 0.0 % Kies: 0.0 % Sand: 40.6 % Schluff-Fraktion: 56.1 % Tonfraktion: 3.3 %
 $d_{max} = 0.2 \text{ mm}$ $U = 12.2$ $C = 2.5$ $d_{10} = 0.005 \text{ mm}$ $d_{50} = 0.052 \text{ mm}$

Bodenbezeichnung: fS, mgU

Bearbeiter:
Institut für Geotechnik

10.03.08
15:29

Programmentwicklung: O.Piegl, O.Sukup
Stiftung für geotechnische Grundlagenforschung, Universität für Bodenkultur Wien

Figura 57 - Diagramma delle analisi granulometriche della parte più fine del Campione B

Datensatz Sample b
Sardinien

Siebversuch

Siebsatz A
 $R_{\dot{U}} = 0.0 \%$
 $D_{max, \dot{U}} = 0.100 \text{ mm}$
 $m_s = 40.02 \text{ g}$
 $d_{max} = 0.200 \text{ mm}$
 $d_{min} = 0.100 \text{ mm}$
 $d_{min, G} = 8.000 \text{ mm}$
 $d_{min, M} = 0.400 \text{ mm}$
 $D(d_{min, G}) = 40.02 \text{ g}$
 $D(d_{min, M}) = 40.02 \text{ g}$
 $m_{s, F} = 40.02 \text{ g}$
 $w = 0.0 \%$

	d [mm]	R [g]	D [%]
F	0.10	0.00	100.00
	0.10	0.00	100.00

Aräometerversuch

Aräometer 3
 $\rho_s = 2.750 \text{ g/cm}^3$
 $m_{s, A} = 40.02 \text{ g}$
 $K_M = 0.3 \text{ cm}$
 $K_D = 2.3 \text{ g}$
 $K_A = 1.4 \text{ g}$
 $D(d_{0,02}) = 22.26 \%$

t [min]	T [°C]	d [mm]	R' [-]	D [%]
0.5	21.0	0.0715	17.40	65.99
1.0	21.0	0.0533	13.50	50.67
2.0	21.0	0.0392	10.30	38.10
5.0	20.9	0.0250	7.00	25.88
15.0	21.0	0.0147	5.00	17.28
45.0	21.0	0.0086	4.00	13.35
120.0	20.9	0.0053	3.00	10.17
240.0	20.7	0.0038	2.30	7.25
360.0	20.3	0.0031	2.00	5.74
1440.0	20.6	0.0016	1.00	2.06

Tabella 4 – Analisi granulometriche della parte più fine del Campione b

Oltre al valore massimo del diametro considerato di 8 mm è stato quindi scelto un valore minimo di campione da sottoporre a test di d_{max} 0,125 mm al quale corrisponde una percentuale di trattenuto di circa il 10%.

Un altro test è stato inoltre portato avanti con un campione avente massimo diametro di 1 mm che, oltre a rappresentare un valore intermedio tra i campioni considerati, rappresenta nella complessità dei materiali utilizzati la frazione con trattenuto maggiore.

I test sui materiali di d_{max} 0,125 mm sono stati effettuati utilizzando un Reometro convenzionale, il Bohlin Visco 88 Viscometer, della Bohlin Instruments®, con due cilindri coassiali in cui all'interno si collocano le miscele a diverso contenuto d'acqua: mentre un

cilindro impone il moto dei materiali all'interno, nell'altro viene misurata la resistenza di taglio per tassi di deformazione imposti da un software specifico.

Gli altri test sono stati sviluppati nel canale verticale "*Rotating Drum*" sviluppato dal prof. Rinckenmann. Il canale è stato per l'occasione rimesso in pristino e ritarato per portare avanti, per la prima volta sui campioni provenienti dalla Sardegna e su quelli provenienti da un altro *debris flow* verificatosi a Lattenbach nel Tirolo Austriaco, degli esperimenti su materiali di diversa granulometria e, per ogni diversa granulometria, con diverso contenuto d'acqua e quindi diversa concentrazione volumetrica.



Figura 58 – Il canale verticale *Vertical Rotating Drum* visto frontalmente

Il canale rotante verticale, anche chiamato *Vertical Rotating Flume*, ha un diametro di 2,46 m. La parte interna della superficie del canale circolare è resa scorrevole per evitare possibili instabilità del flusso dovuto alle irregolarità della curva del letto del canale. La sezione del canale è rettangolare e presenta una larghezza di 0.45 m, essa è confinata per un lato da acciaio inossidabile e dall'altro da un vetro acrilico per permettere l'osservazione laterale del flusso. Per evitare scivolamenti sul fondo del canale, la circonferenza interna è comunque stata resa rugosa attraverso la messa in opera di una rete sintetica di spessore di 1mm, e maglia 5x5mm.

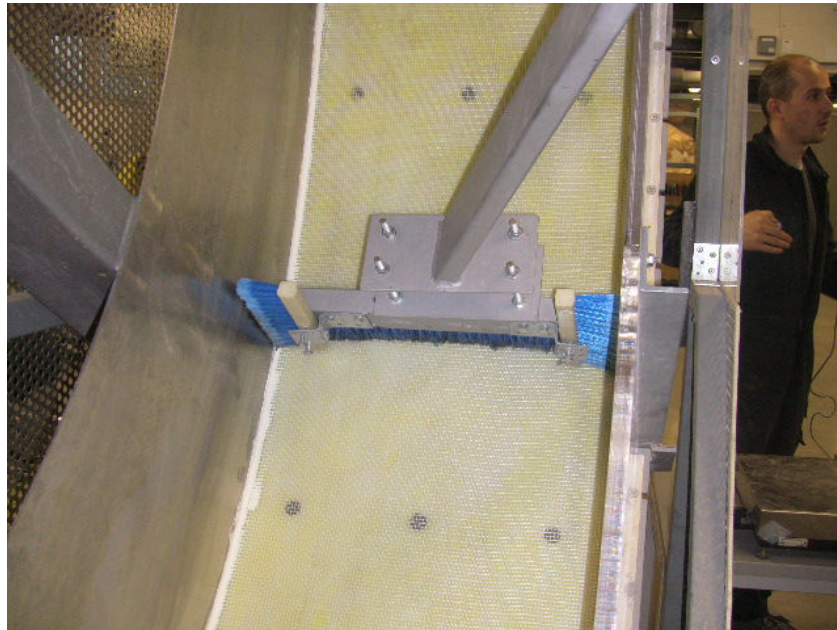


Figura 59 – Il canale verticale *Vertical Rotating Drum* visto all'interno

Il canale verticale utilizzato è fissato solo in un lato. La massima velocità fornita attraverso l'unità motrice di trasmissione è 32 giri /min, alla quale corrisponde una velocità di circa 4,2 m/s alla circonferenza.



Figura 60 - Il canale verticale *Vertical Rotating Drum* visto lateralmente

Tra l'unità motrice di trasmissione e l'asse del tamburo del Canale Verticale è installata una presa a frizione ed una flangia. La flangia registra il momento torcente sviluppato dal motore per portare ad una velocità costante il flusso del materiale. La presa a frizione invece serve per smorzare le fluttuazioni generate dall'unità di trasmissione. Lungo la circonferenza della Rotating Drum sono installati nove sensori per la misurazione dei vari parametri: lo sforzo

di taglio “*shear stress*”, lo sforzo normale “*normal stress*”, la pressione neutra, la geometria dell’onda di flusso e la misura della velocità degli strati superficiali del flusso di colata all’interno del canale.

I dati rilevati dai sensori, insieme a quelli ricavati dalla flangia di torsione, sono trasmessi ad un amplificatore e trasferiti direttamente ad un personal computer. I dati sono poi analizzati tramite il software Catman Professional e ripuliti dai disturbi registrati dai sensori attraverso degli script di calcolo sviluppati in ambiente Mat-Lab.



Figura 61 – Amplificatori dei segnali registrati dai sensori del canale rotante verticale

Attraverso la flangia torcente si misura lo sforzo di taglio totale del fluido, dato dalla somma dello sforzo di taglio sul fondo del canale e da quello laterale sulle pareti con una precisione dello 0.05% del momento torcente. La media degli sforzi di taglio della miscela, posta sul fondo del canale, è stimata assumendo una uguale distribuzione dello sforzo di taglio sulla superficie del canale, il quale decresce linearmente sino ad arrivare a zero verso le pareti del canale, attraverso una distribuzione triangolare dello stesso sforzo di taglio sulle pareti:

$$\tau_{mean} = \frac{\tau_{net}}{A_B R + A_s (R - A_s / 3)}$$

τ_{net} è il momento torcente del canale verticale in condizioni totalmente pulite, A_B è l’area bagnata del canale, A_s è l’area bagnata delle pareti, R è il raggio della Rotating Drum.

Per verificare gli sforzi di taglio così ottenuti sono state inoltre effettuate delle misure attraverso il canale verticale senza materiale e comparando la risultante delle forze totali, compresa la forza di gravità calcolata dalla geometria del flusso di materiale all’interno del

canale attraverso i sensori di profondità sopra visti, come dimostrato anche nei precedenti esperimenti che hanno testato la Rotating Drum (Kaitna 2006, Kaitna & Rickenmann 2007).



Figura 62 – Preparazione dei campioni da inserire nel canale rotante verticale

Le misure degli sforzi normali e di taglio sono realizzate usando quattro singole celle di sensori, installate in due posizioni diverse nella circonferenza. Il carico nominale per una cella è di 7200 gr, con una precisione di misura dello 0,1% sullo stesso carico nominale. I sensori “*force plates*” hanno un diametro di 60mm sistemati a coppie: uno misura in direzione normale e uno in direzione tangenziale. Questa sistemazione, installata doppiamente nella *Rotating Drum* e disposta con un angolo di 180°, consente di ottenere due misure indipendenti di sforzo normale e due di sforzo tangenziale. I due sensori sono posizionati simmetricamente nel mezzo della metà della sezione del canale.

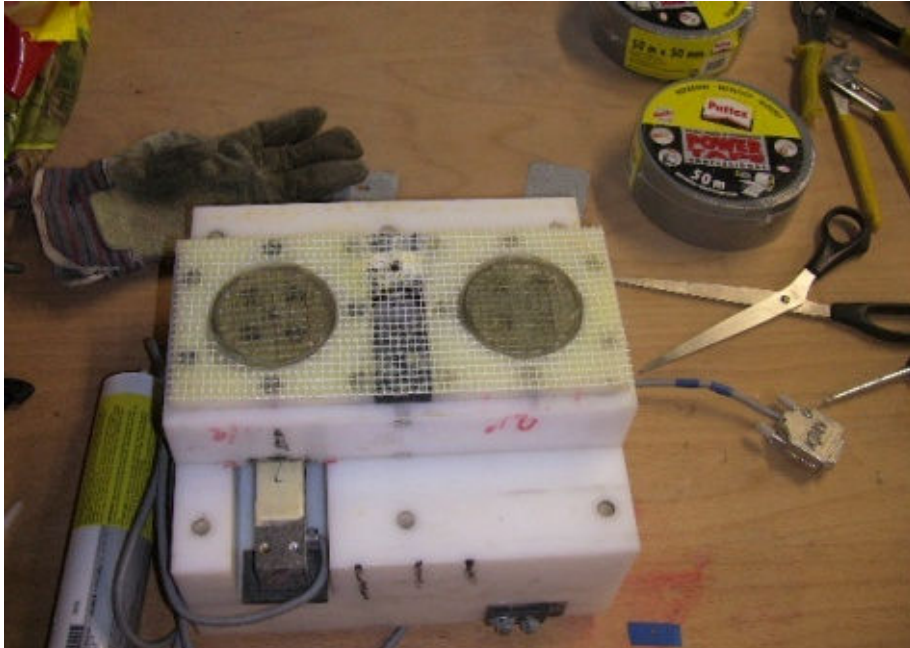


Figura 63 – Sensori di misura degli sforzi normali e tangenziali sul fondo del canale

La profondità del flusso è misurata sia attraverso sensori ad ultrasuoni e sia attraverso dei sensori laser. In entrambi i casi i sensori sono installati nel mezzo della sezione del canale, direttamente sopra ogni unità di misura degli sforzi normali e tangenziali come sopra visti. A causa del breve tempo di reazione e dell'alta precisione, i sensori laser danno i risultati migliori.

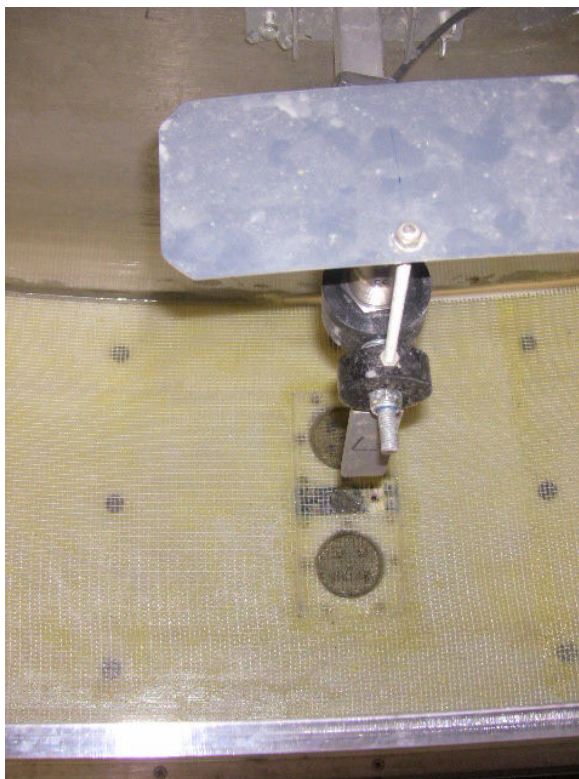


Figura 64 - Sensori laser di misura della geometria del flusso all'interno del canale

La velocità media del flusso dei materiali è uguale alla velocità di rotazione della Rotating Drum sul fondo del canale, ed è registrata attraverso un anello spezzato fissato sull'asse, e un sensore foto-elettrico statico che registra un impulso ad ogni grado di rotazione, in modo da determinare così l'esatta posizione angolare di ogni sensore installato nella *Rotating Drum*. Il tempo della velocità di campo della rotazione, misurata in giri /min può essere convertita nella velocità media del flusso in m/s.

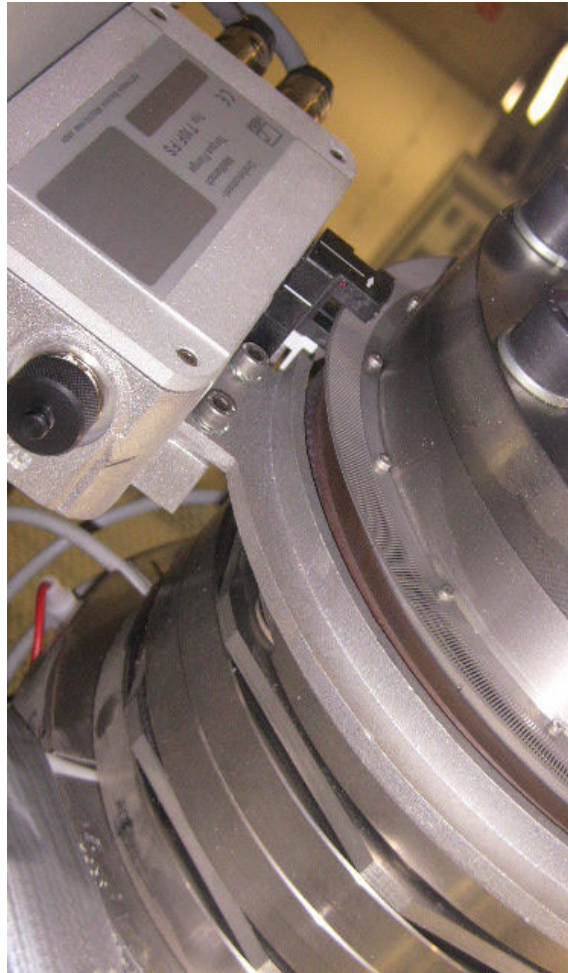


Figura 65 – Misura delle rotazioni al minuto applicate sulla flangia torcente

A causa dei problemi tecnici per la corretta determinazione della velocità angolare durante le fasi di accelerazione tra 0 e 1 giro /min, un sensore indipendente di induzione è stato installato sulla circonferenza della *Rotating Drum* per dare un impulso ad ogni rotazione, in modo da calibrare la rotazione di campo misurata.

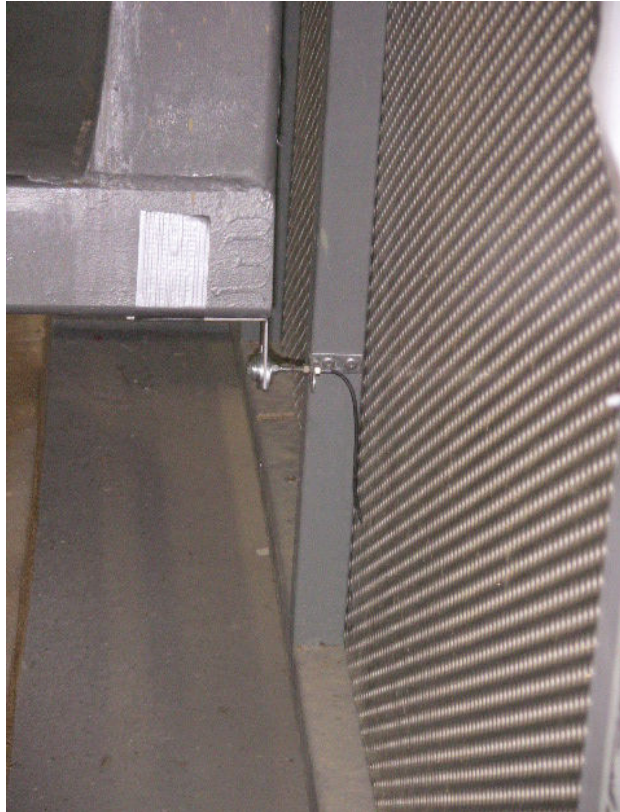


Figura 66 – Sensore di induzione installato sulla circonferenza della *Rotating Drum*

La velocità di superficie e la sua distribuzione è determinata attraverso delle analisi effettuate su video digitali. Il flusso per ogni test è stato registrato attraverso una videocamera montata direttamente sopra il campione all'interno del canale. Per calibrare la distanza di ogni *frame* digitale, è stata disegnata una cella 50 x 50 mm in una lastra di vetro acrilico rimovibile, filmata prima di ciascun esperimento.

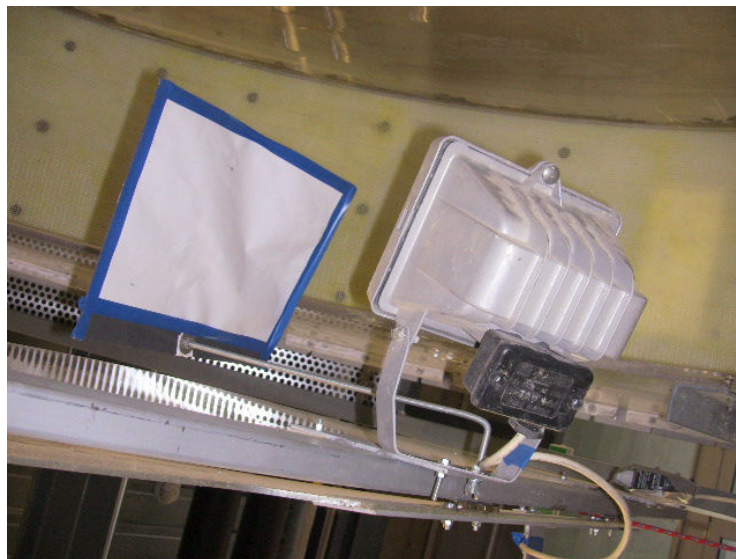


Figura 67 - Sensore ad ultrasuoni di misura della geometria del flusso all'interno del canale

Usando un tracciatore di particelle ed un software commerciale disponibile denominato "Diatrack 3.01" la media della velocità delle particelle traccianti, misurata relativamente rispetto alla superficie del piano di laboratorio, è stimata da 9 *frame* sequenziali. Non è stato considerato nessun angolo di correzione della distorsione in quanto si è analizzato un unico punto per ogni immagine considerando l'errore dovuto a tale angolo ininfluente.



Figura 68 – Telecamera di precisione per la misura della velocità degli strati superficiali

I test per ogni campione sono stati effettuati attraverso differenti volumi di materiale, varianti tra i 50 litri e i 70 litri. I campioni sono stati miscelati attentamente con acqua, mediante apposito strumento miscelatore e sono stati eseguiti sulla stessa miscela diversi campionamenti in modo tale da ottenere un valore certo di concentrazione volumetrica C_v .

I campioni sono stati composti dunque in modo da avere un *range* di variazione dei C_v utilizzati varianti tra 0,32 circa e 0,70 circa, concentrando però i diversi contenuti d'acqua intorno ai valori che variano da 0,47 sino a 0,620 rappresentanti i C_v massimo e minimo per cui è possibile utilizzare ragionevolmente la Rotating Drum, come dimostrato da Kaitna (Kaitna, Rickenmann & Schatzmann 2007) e come dimostrato anche dagli esperimenti condotti di seguito riportati. I campionamenti sono stati poi eseguiti anche durante l'esperimento, in modo tale da verificare l'effettiva permanenza di uno stesso C_v e quindi di un medesimo contenuto d'acqua nella miscela in movimento. Inoltre durante l'esperimento sono stati campionati diversamente le parti iniziali del flusso di colata all'interno del canale e le parti finali, in modo tale da verificare che la miscela in movimento abbia o meno un contenuto d'acqua omogeneo. I C_v misurati prima dell'inizio dei test sul canale sono risultati essere simili a quelli durante il movimento anche se, a seconda delle velocità, sono state osservate delle parziali segregazioni di materiale grossolano, flottato dalla parte anteriore della colata sino alla coda della stessa. Questo appare ragionevole per miscele naturali di C_v minore di 0,55 ma rende difficile una

determinazione certa della stessa concentrazione volumetrica in queste zone rispetto a quella di riferimento effettuata prima degli esperimenti all'interno del canale. All'aumentare delle velocità è stato notato come questo effetto venga a sparire o comunque si rivela in maniera meno pronunciata.

Per stimare i numeri di Reynolds dei flussi sperimentali, è stata calcolata l'effettiva viscosità per ogni velocità presa in considerazione, mediante il rapporto tra la media degli sforzi tangenziali calcolati attraverso le misure dei sensori ed i tassi di deformazione. Le stime sono state effettuate attraverso un metodo iterativo ed inoltre mediante un metodo in cui si suppone un profilo di velocità di tipo parabolico all'interno del flusso creato nel canale rotante, come meglio descritto in seguito.

I valori misurati del numero di Reynolds, descritto come:

$$Re = \frac{V_{mean} \rho H_{mean}}{\mu}$$

dove V_{mean} è la velocità media del flusso e H_{mean} è la profondità media sempre del flusso all'interno del canale, sono generalmente molto bassi e variano tra 8 e 234, salvo un unico caso corrispondente ad una velocità elevata e probabilmente ad una misura errata di qualche parametro. Questi valori sono una chiara indicazione che, durante i test, ci si trova in un regime di moto laminare. Per un moto laminare in un canale aperto si considerano infatti dei valori del numero di Reynolds inferiori a 500. Per una maggior conferma sono stati determinati numeri di Froude con valori tra 0,4 e 3,28 a dimostrazione dello stesso regime di moto.

Per poter eseguire le analisi dei dati ottenuti dalle misure effettuate sui diversi campioni è stato necessario elaborare qualche assunzione fondamentale.

Inizialmente è stata fatta una analogia con il moto stazionario lungo un piano inclinato con angolo α . L'angolo di inclinazione del fondo curvo del canale θ , corrispondente all'angolo α del piano inclinato utilizzato nel calcolo, è definito come l'angolo di deviazione del centro di gravità della massa dalla verticale.

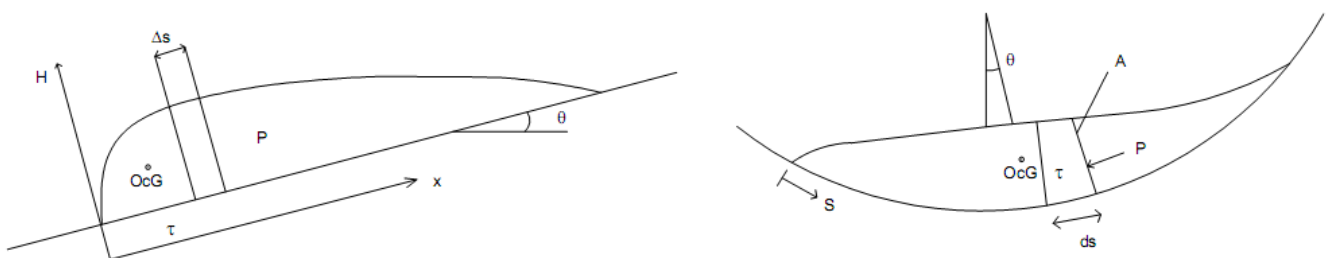


Figura 69 - Figura schematica di un flusso in un piano inclinato e adattamento della simulazione in un canale verticale: P =pressione interna τ =resistenza sul fondo del canale A = area dello strato di scorrimento q =inclinazione del centro di gravità sulla verticale del centro del canale α = inclinazione del piano inclinato corrispondente a θ sul canale verticale (Kaitna & Rickenmann 2007)

L'equazione del flusso binghamiano usata nelle analisi è monodimensionale, ed è stata calcolata nel mezzo del flusso per non quantificare gli effetti dell'attrito sulle pareti. Sebbene, infatti, le pareti laterali della sezione rettangolare siano molto lisce, composte da acciaio lucido e vetro acrilico, questa considerazione può essere tollerata solo a basse velocità di rotazione e/o per piccoli volumi. Il risultato del rapporto larghezza/altezza per la maggior parte dei test dovrebbe essere intorno a 7-8 mentre in alcuni casi, con grandi volumi, anche 5,5 e più di 18 per piccoli volumi di materiali (Kaitna & Rickenmann 2007).

Le osservazioni effettuate sulle particelle traccianti ad alte velocità di rotazione, hanno invece rivelato sviluppi complessi tridimensionali del moto di flusso. Per queste condizioni i numeri di Froude sono risultati essere maggiori di 2-3.

Le velocità sul letto del canale è stata assunta pari a zero, ossia senza scivolamenti. Questa ipotesi appare giustificata perché la superficie interna della circonferenza è stata resa ruvida attraverso la rete sintetica come sopra riportato. L'ipotesi è supportata inoltre dalle osservazioni effettuate attraverso le pareti trasparenti, dove sono state chiaramente individuate delle particelle trascinate indietro con la stessa velocità di rotazione della circonferenza.

La lunghezza longitudinale del flusso considerata per calcolare i numeri di Reynolds e di Froude, come quella utilizzata per la stima dell'intensità dello sforzo, è stata individuata e calcolata nel mezzo dello spessore del flusso stesso.

Al flusso dentro al canale sono state quindi applicate le equazioni di St.Venant per il moto. Seguendo l'approccio presentato da Prof. Hungr, (Hungr 1995, 2000) il flusso avvenuto al variare delle rotazioni del canale, è stato descritto inoltre attraverso l'ipotesi di scorrimento dei diversi strati di lunghezza ΔS , larghezza W , e profondità media h .

L'equazione della conservazione del momento per ogni strato è considerata come:

$$\rho H w \Delta s \left(\frac{\delta V}{\delta t} + \beta V \frac{\delta V}{\delta x} \right) = \rho g H w \Delta s \sin \theta - \tau_0 w \Delta s + H \frac{\delta p}{\delta x} w \Delta s$$

Dove ρ è la densità del fluido, g è l'accelerazione di gravità, V è la velocità media, θ è la pendenza del canale, β è il fattore medio di correzione del momento, τ_0 è lo sforzo tangenziale sul canale e $\delta p / \delta x$ è la variazione longitudinale della spinta idrostatica. Il termine sulla sinistra rappresenta le forze totali per ciascun strato.

Nel moto stazionario del canale verticale questo termine si riduce a zero fino a che la velocità media non varia col tempo e la posizione non cambia lungo la direzione del flusso. In questo modo le componenti tangenziali del peso date dal primo termine sulla destra dell'equazione, si bilanciano con le forze di opposizione sommate alle pressioni interne del flusso.

Sostituendo $\Delta s^* H$ con A_i , l'equazione sopra vista può essere riformulata per un moto stazionario in un ambiente ricurvo ottenendo:

$$o = \rho g A_i w \sin \theta - \tau_0 w \Delta s + \frac{\delta p}{\delta x} w A_i$$

con A_j uguale all'area dei diversi strati considerati.

Come sopra accennato i parametri reologici degli esperimenti sono stati ottenuti attraverso il modello binghamiano perchè rappresenta il più semplice modello per descrivere lo sviluppo dei parametri reologici di un flusso di colata detritica, ed inoltre perché è particolarmente usato nelle applicazioni pratiche e nei codici di calcolo numerici Flo 2d Simulation Software (O'Brien 1993)

In particolare, usando la *Vertical Rotating Drum*, per stimare i parametri principali dei campioni analizzati sono state usate alcune semplificazioni.

Come visto per la definizione dello sforzo di taglio è stata utilizzato il modello binghamiano descritto con la seguente equazione:

$$\tau = \tau_b + \eta \gamma$$

Per ciascun test sono stati determinati gli sforzi tangenziali globali calcolandoli sia attraverso la geometria del flusso, come sopra visto, e sia determinandoli direttamente attraverso le misure ottenute dalla flangia di torsione e dai sensori installati sul fondo del canale.

La velocità verticale è stata considerata composta da uno strato continuo, chiamato "tappo superficiale", il quale scorre sui diversi strati sottostanti, i quali a loro volta scorrono gli uni sugli altri. Per stimare una media degli sforzi di taglio sulla intera estensione longitudinale della massa in movimento sono stati seguiti due diversi approcci: il primo assume una velocità lineare nei diversi strati di scorrimento, mentre il secondo ipotizza un profilo parabolico della stessa velocità nei diversi strati sino a quello più superficiale.

Considerando il profilo delle velocità lineare, è stata ipotizzata una variazione anche essa lineare dello sforzo di taglio nei diversi strati, rappresentando così la più semplice approssimazione per i fluidi newtoniani. Assumendo questa approssimazione il tasso di deformazione è stato calcolato attraverso un metodo iterativo: in un primo passo la velocità della superficie è stata divisa per lo spessore medio del flusso all'interno del canale, ed in seguito lo sforzo nominale binghamiano τ_b è stato ricavato dalla soluzione dell'equazione vista in precedenza usando lo sforzo di taglio misurato τ e una stima del tasso di deformazione γ . Successivamente è stato calcolato un nuovo spessore medio del flusso, sottraendo dallo spessore medio del flusso all'interno del canale utilizzato precedentemente lo spessore del "tappo superficiale" calcolato attraverso la formula seguente:

$$H = \tau_b / \rho g (\sin \alpha)$$

dove l'angolo α tra la deviazione del centro di gravità della massa in movimento e la verticale del centro del canale verticale, corrisponde all'angolo θ del piano inclinato di scorrimento, come visto in precedenza. Attraverso il nuovo tasso di deformazione affinato, sono

state ottenute delle misure più accurate dello sforzo nominale τ_b e della viscosità μ . Questo procedimento è stato ripetuto sino a che il valore di sforzo nominale τ_b è rimasto costante al variare del tasso di deformazione γ .

La seconda considerazione che è stata effettuata, quella in cui si è considerata una variazione parabolica del profilo delle velocità attraverso i diversi strati dei fluidi newtoniani a pelo libero, è stata verificata da diversi autori in passato come quella più attinente alla realtà (Ancey 2001, Iverson 2003). Da alcune analisi geometriche, Holmes et alii (Holmes et alii 1993) hanno elaborato, attraverso questa considerazione, un'equazione per stimare il tasso di deformazione γ di un fluido binghamiano in un canale infinitamente esteso, tenendo conto dell'ipotesi che non ci siano slittamenti sul fondo del canale, attraverso la seguente equazione:

$$\gamma = \frac{2V_t^2}{3(V_t - V_{mean})H}$$

dove V_t è la velocità del “tappo superficiale” relativamente al fondo del canale.

Quest'ultimo approccio è quello che ha consentito, anche nei test effettuati sui campioni del rio S'Arrescottu, di meglio rappresentare i parametri reologici binghamiani dei diversi campioni esaminati.

RISULTATI FINALI

Attraverso la metodologia sopra descritta sono stati analizzati i risultati degli esperimenti effettuati per ogni campione.

Per ogni test effettuato sono stati variati i valori di concentrazione volumetrica C_v per i massimi diametri analizzati, quello di $D_{max}=1\text{mm}$ e quello di $D_{max}=8\text{mm}$, per i quali a loro volta sono state variate le velocità di rotazione e quindi di scorrimento sul canale.

Attraverso le misure ottenute per le diverse velocità, costanti per il tempo necessario a registrare i valori dei sensori posizionati sul canale verticale, sono stati acquisiti i risultati finali.



Figura 70 – Svolgimento dei test all'interno della *Vertical Rotating Drum*

A questi risultati sono stati aggiunti quelli ottenuti attraverso il Bohlin Visco 88 Viscometer, della Bohlin Instruments® sui campioni di massimo diametro 0,125 mm per le differenti concentrazioni volumetriche C_v , di seguito riportate.

	Sample luca1_1 Cv 0,344	Sample luca2_1 Cv 0,408	Sample luca3_1 Cv 0,618	Sample luca4_1 Cv 0,782	Sample luca5_1 Cv 0,687	Sample luca6_1 Cv 0,323
Cv %	0.344	0.408	0.618	0.782	0.687	0.323
Shear Rate	Shear Stress	Shear Stress	Shear Stress	Shear Stress	Shear Stress	Shear Stress
38.23	25.93	11.89	11.96	34.44	13.00	1.64
61.29	28.89	16.08	16.17	55.64	16.33	2.13
84.56	33.22	18.83	19.20	70.79	17.89	2.95
107.82	38.01	21.67	22.39	80.43	19.47	3.76
131.38	42.90	24.57	25.83	90.82	21.29	4.77
154.68	47.41	27.24	29.21	99.95	23.15	6.30
177.93	51.89	29.22	32.19	108.96	24.64	8.29
201.22	56.33	31.03	34.64	118.38	25.93	10.54
224.98	60.69	32.89	36.98	127.77	27.11	13.03
248.09	64.56	35.04	39.18	137.28	28.33	15.11
271.74	68.39	36.86	41.31	146.16	29.74	17.89
295.42	72.14	38.79	43.37	154.78	31.31	18.42
271.74	68.45	41.00	45.49	155.19	32.89	18.53
248.08	64.70	39.58	43.22	147.20	31.19	18.36
224.96	61.14	38.22	41.89	139.37	29.47	18.50
201.22	57.31	36.79	40.29	130.66	27.91	18.10
177.93	53.35	35.42	38.49	121.89	26.55	17.65
154.66	49.41	33.77	36.79	113.15	25.09	17.45
131.37	45.15	31.93	34.63	103.54	23.64	16.88
107.81	40.43	29.75	32.07	93.16	21.98	16.03
84.58	35.38	26.80	28.80	82.54	19.48	14.90
61.19	30.54	23.40	24.91	70.29	16.60	13.10

Tabella 5 – Risultati ottenuti attraverso il Bohlin Visco 88 Viscometer (Bohlin Instruments®) sui campioni di massimo diametro 0,125 mm per differenti concentrazioni volumetriche C_v

I dati ottenuti per i diametri massimi di 1 mm e di 8 mm sono invece di seguito riportati

Tests Material Dmax < 1mm	Density Kg/m ³	Velocity [m/s]	Velocity Plug [m/s]	Hma x m	Hmea n m	Shear stress τ	Shear Rate s ⁻¹	Froude Number	Reynolds Number
lu080401-1	1756	0.48	0.73	0.107	0.052	124.78	27.20	0.67	27.36
39.60	1756	0.85	1.21	0.162	0.053	152.81	51.94	1.19	34.03
MW	1756	1.11	1.70	0.162	0.051	172.36	63.59	1.56	43.68
Cv 0.480	1756	1.34	2.02	0.159	0.051	187.62	77.97	1.89	54.31
	1756	1.97	2.84	0.144	0.048	223.39	125.01	2.82	74.46
	1756	0.65	0.96	0.104	0.051	130.24	38.31	0.91	32.24
lu080401-2	1745	0.48	0.76	0.113	0.049	58.34	28.02	0.69	49.40
41.25	1745	1.05	1.37	0.103	0.049	90.25	80.66	1.52	52.99
MW	1745	1.60	2.21	0.086	0.046	114.96	110.47	2.32	87.30
Cv 0.464	1745	2.10	3.21	0.079	0.043	126.65	134.46	3.12	137.44
	1745	0.55	0.89	0.112	0.051	82.12	33.00	0.81	50.39
lu080401-3	1699	0.44	0.68	0.114	0.049	46.26	26.02	0.63	59.44
42.50615708	1699	0.95	1.62	0.104	0.048	66.97	53.36	1.37	86.95
MW	1699	1.31	2.37	0.090	0.047	95.97	72.50	1.89	79.99
0.451	1699	1.58	2.85	0.089	0.047	103.17	88.57	2.30	121.35
lu080401-4	1685	0.49	0.83	0.113	0.046	41.45	27.48	0.71	85.10
41.27	1685	0.91	1.70	0.101	0.048	63.46	51.16	1.33	70.01
MW	1685	1.44	2.55	0.097	0.043	71.67	81.55	2.10	135.50
0.455	1685	1.83	3.53	0.089	0.043	79.64	104.55	2.70	206.73
	1685	2.17	3.88	0.081	0.040	85.64	131.84	3.28	234.02
	1685	0.68	1.11	0.108	0.048	53.83	39.40	0.99	59.67

Tabella 6 - Risultati ottenuti attraverso la Vertical Rotating Drum sui campioni di massimo diametro 1 mm per differenti concentrazioni volumetriche C_v

Tests Material Dmax <8mm	Density Kg/m ³	Velocity [m/s]	Velocity Plug [m/s]	Hma x m	Hmea n m	Shear stress τ	Shear Rate s ⁻¹	Froude Number	Reynolds Number
lu080207-1	1921	0.69	0.84	0.05	0.027	182.95	111.93	1.33	16.07
15.17	1921	1.07	1.32	0.05	0.032	296.16	145.40	1.92	15.04
MW	1921	1.58	1.96	0.05	0.032	334.32	207.29	2.81	26.88
Cv 0.552	1921	0.74	0.92	0.05	0.033	295.22	92.09	1.29	8.61
	1921	0.28	0.32	0.06	0.025	131.45	73.92	0.57	22.74
	1921	0.82	0.89	0.052	0.020	157.70	363.35	1.85	89.80
lu080304-1	1899	0.34	0.41	0.100	0.048	169.57	32.83	0.49	4.60
34.13	1899	0.54	0.67	0.095	0.049	209.32	44.88	0.77	6.42
MW	1899	0.85	1.07	0.088	0.049	258.00	69.14	1.22	11.21
Cv 0.562	1899	1.71	2.21	0.073	0.049	346.72	133.12	2.47	29.62
	1899	0.40	0.61	0.097	0.045	182.68	25.96	0.60	6.63
lu080304-2	1886	0.29	0.36	0.097	0.050	124.81	24.67	0.42	-83.63
31.69711384	1886	0.62	0.83	0.093	0.046	176.13	48.40	0.93	15.10
MW	1886	1.21	1.57	0.080	0.047	248.45	96.36	1.78	25.19
Cv 0.5554	1886	1.59	2.08	0.074	0.046	283.83	126.78	2.35	35.20
	1886	2.04	2.70	0.078	0.046	318.94	161.27	3.05	48.70
	1886	0.49	0.59	0.092	0.045	173.33	48.46	0.73	8.24
lu080304-3	1824	0.28	0.38	0.101	0.052	120.64	19.48	0.40	21.77
32.22	1824	0.61	0.84	0.093	0.048	147.25	43.53	0.90	22.10
MW	1824	0.93	1.22	0.085	0.045	173.23	77.65	1.41	30.51
Cv 0.555	1824	1.41	1.82	0.081	0.045	208.75	118.76	2.11	44.74
	1824	2.04	2.66	0.067	0.044	246.33	175.81	3.12	67.70
	1824	0.45	0.61	0.094	0.044	133.01	35.70	0.69	17.97
lu080304-4	1783	0.35	0.43	0.102	0.042	63.08	34.25	0.54	-5.87
34.38246345	1783	0.66	0.83	0.101	0.043	77.00	62.58	1.01	-32.40
MW	1783	1.12	1.36	0.093	0.044	108.11	113.25	1.69	1067.56
Cv 0.520	1783	1.55	1.95	0.081	0.044	132.18	144.97	2.37	188.69
	1783	1.99	2.59	0.072	0.043	148.19	175.90	3.08	205.21
	1783	0.50	0.63	0.099	0.043	76.82	46.89	0.76	-19.76

Tabella 7 - Risultati ottenuti attraverso la Vertical Rotating Drum sui campioni di massimo diametro 8 mm per differenti concentrazioni volumetriche C_v

I risultati ottenuti sono stati in seguito analizzati e riassunti per ogni massimo diametro, evidenziando solamente i parametri binghamiani e tralasciando gli altri risultati ottenuti.

Max diameter 0,125 mm		Bingham parameters	
Sample's C_v Value	τ_0 Pa	n Pas	
Luca1_1 Cv	0.344	19.3400	0.1830
Luca2_1 Cv	0.408	14.5700	0.0920
Luca3_1 Cv	0.618	14.2500	0.1100
Luca4_1 Cv	0.782	37.7600	0.4230
Luca5_1 Cv	0.687	12.7200	0.0690
Luca6_1 Cv	0.323	3.5310	0.0530

Tabella 8 – Parametri binghamiani, sforzo nominale τ e viscosità μ ottenuti per i diversi C_v per il diametro massimo di 0,125 mm

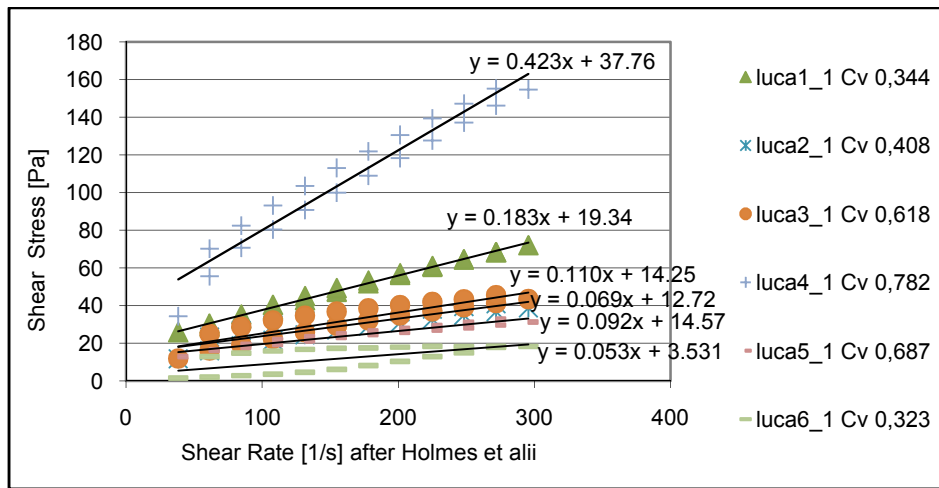


Figura 71 – Grafico della curva reologica di flusso dei parametri Binghamiani, sforzo nominale τ e viscosità μ ottenuti per i diversi C_v per il diametro massimo di 0,125 mm

Max diameter 1,00 mm		Bingham parameters	
Sample's Cv Value	τ_0 Pa	n	Pas
Luca10_2 Cv	0.399	-24.4700	0.8910
Luca10_3Cv	0.421	-4.4960	0.3240
Luca10_4 Cv	0.449	-20.5000	0.7430
Lu080401-1 Cv	0.48	97.8400	1.0520
Lu080401-2 Cv	0.464	51.8500	0.5510
Lu080401-4 Cv	0.454	34.4700	0.3910

Tabella 9 - Parametri Binghamiani, sforzo nominale τ e viscosità μ ottenuti per i diversi C_v per il diametro massimo di 1 mm

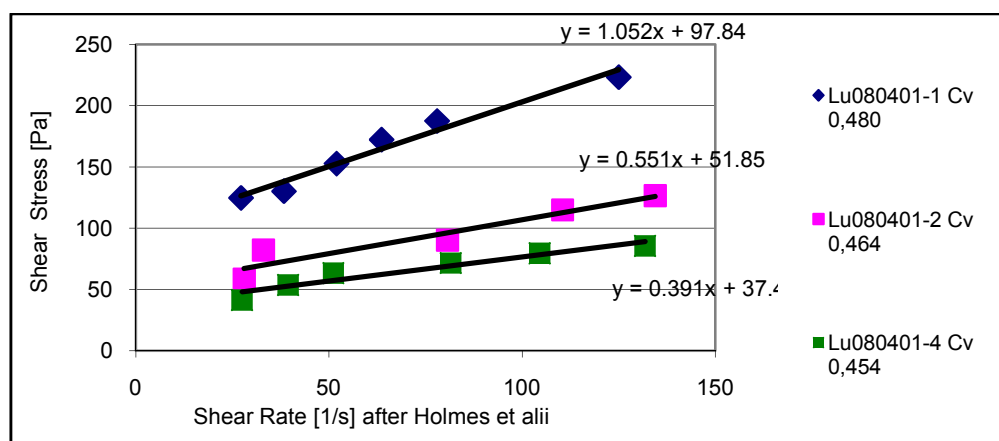


Figura 72 - Grafico della curva reologica di flusso dei parametri Binghamiani, sforzo nominale τ e viscosità μ ottenuti per i diversi C_v per il diametro massimo di 1 mm

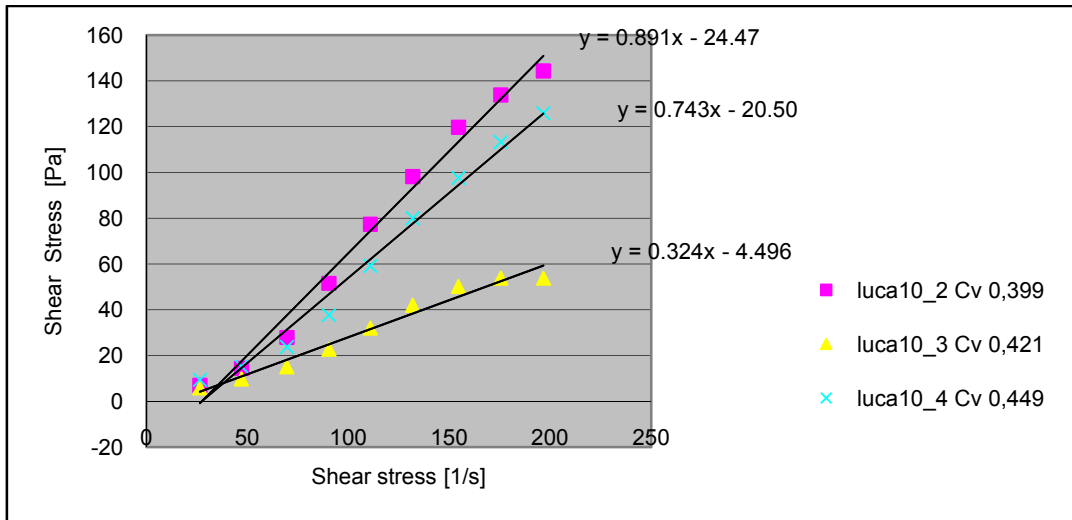


Figura 73 - Grafico della curva reologica di flusso dei parametri Binghamiani, sforzo nominale τ e viscosità μ ottenuti per i diversi C_v per il diametro massimo di 1 mm

Sample's C_v Value		Max diameter 8,00 mm	
		Bingham parameters	
		τ_0 Pa	n Pas
Lu080304-1 Cv	0.562	133.2000	1.6340
Lu080304-1 Cv	0.5554	102.9000	1.3990
Lu080304-1 Cv	0.5556	107.9000	0.8090
Lu080304-1 Cv	0.5200	43.7100	0.5930

Tabella 10 - Parametri Binghamiani, sforzo nominale τ e viscosità μ ottenuti per i diversi C_v per il diametro massimo di 8 mm

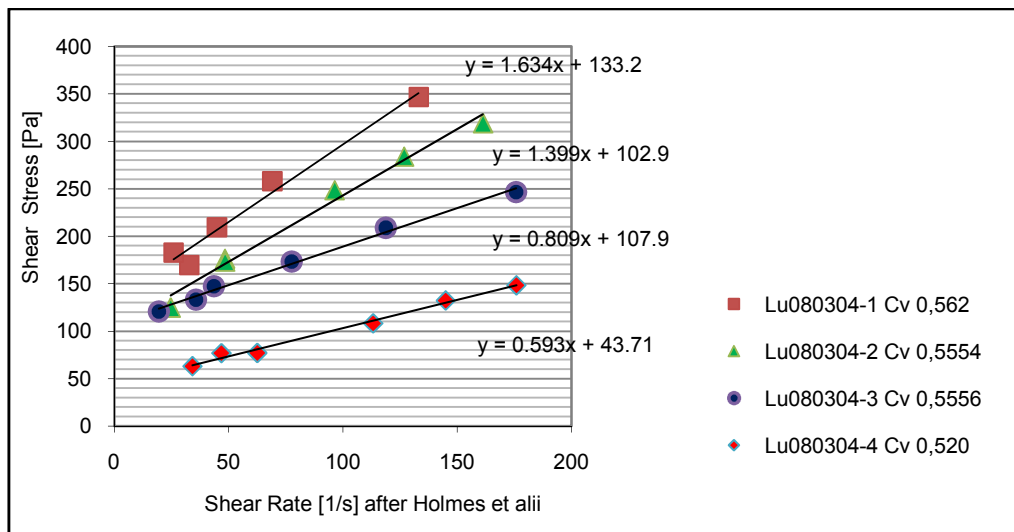


Figura 74 - Grafico della curva reologica di flusso dei parametri Binghamiani, sforzo nominale τ e viscosità μ ottenuti per i diversi C_v per il diametro massimo di 8 mm

Successivamente sono state portate avanti delle ipotesi di confronto dei dati ottenuti tra di loro, attraverso la ricerca dei parametri e delle corrispondenze tra la variazione dei parametri binghamiani e i valori di concentrazione volumetrica C_v .

Queste ipotesi sono state effettuate tenendo conto dei vari test svolti per cui si sono ottenuti dei valori ragionevoli dei numeri di Froude nel canale verticale, che sono stati quindi supposti corrispondenti a dei flussi non turbolenti, tenendo quindi in questo modo un certo margine di sicurezza sull'analisi degli stessi dati.

La complessità nell'effettuare questo tipo di osservazioni è stata data ancora dalla loro rarità (Coussot et alii 1998) e quasi completa assenza in letteratura di esperimenti di confronto dei dati simili a quelli proposti.

Yield Strenght			
Sample's Cv Value	Linear parameters		
	a	b	
Diameter Max	0.125	2.4840	37.0200
Diameter Max	1	969.9000	1945.0000
Diameter Max	8	1093.0000	2478.0000

Tabella 11 – Parametri della relazione lineare che individua lo sforzo nominale per i diversi campioni al variare del C_v per i diversi valori di diametro massimo

Per quanto riguarda i valori ottenuti dai campioni di diametro massimo 0,125 mm si può notare come essi non seguano una vera e propria tendenza che possa permettere di individuare la relazione che collega lo sforzo nominale con la variazione della concentrazione volumetrica.

Questo probabilmente è dovuto al fatto che per la frazione più fine lo sforzo nominale è influenzato in maniera predominante dalla resistenza coesiva, come già osservato nelle analisi di alcune modellazioni numeriche in ambiente alpino (Sosio et alii 2006).

Questo fa sì che il valore dello sforzo tangenziale aumenti per la semplice presenza di ulteriori sedimenti, come considerato anche da altri esperimenti effettuati in passato per diversi miscugli (Coussot P & Piau 1995, Coussot 1997), che evidenziarono come, per frazioni più fini, i modelli binghamiani non fossero i più adatti a descrivere i comportamenti reologici dei materiali.

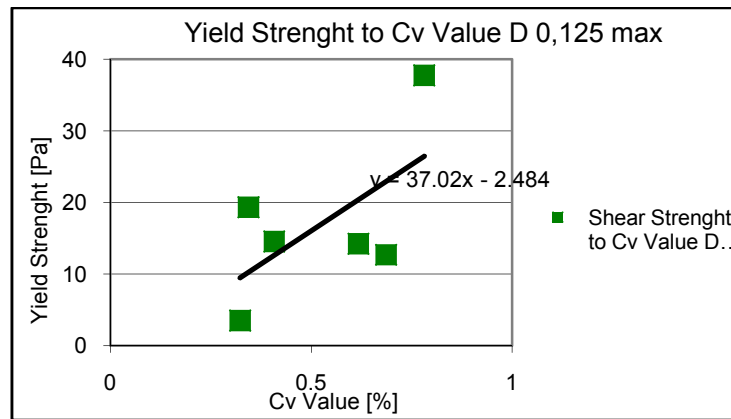


Figura 75 – Rappresentazione della relazione lineare che individua lo sforzo nominale al variare del Cv per il campione dal valore di diametro massimo 0,125 mm

Per i campioni con diametro massimo 1mm e 8 mm invece la presenza dei contatti intergranulari determina un aumento della resistenza frizionale che diventa in questo modo un contributo rilevante alla resistenza del flusso totale come già osservato da altri autori per miscele che presentano distribuzioni granulometriche a componente prevalentemente sabbiosa, come quella oggetto del presente studio (Coussot et alii 1998, Parson et alii 2001)

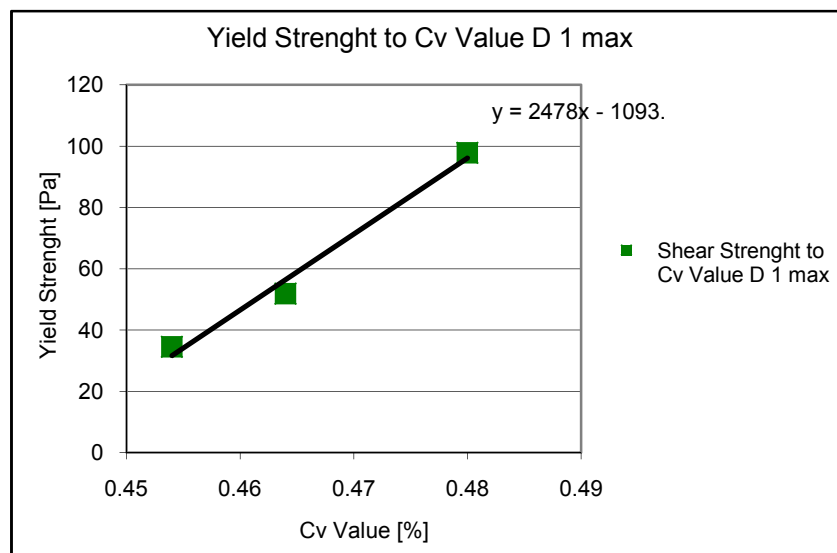


Figura 76 – Rappresentazione della relazione lineare che individua lo sforzo nominale al variare del Cv per il campione dal valore di diametro massimo 1 mm

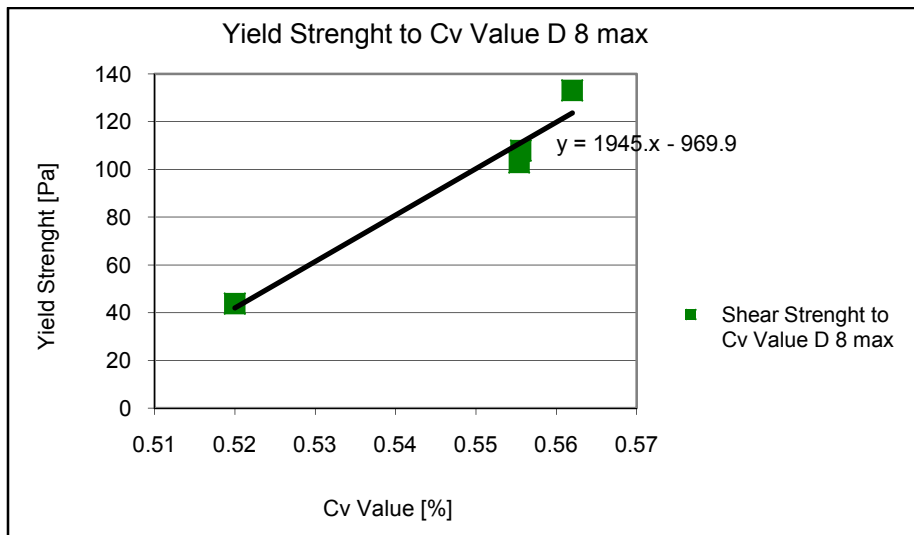


Figura 77 – Rappresentazione della relazione lineare che individua lo sforzo nominale al variare del Cv per il campione dal valore di diametro massimo 8 mm

Anche per questi campioni è stato notato un incremento del valore critico dello sforzo nominale per più alti valori di concentrazione volumetrica, ed inoltre è apparsa una forte similitudine tra le relazioni lineari che legano i valori di sforzo nominale misurati per i campioni di diametro massimo di 1 mm e quelli di diametro massimo di 8 mm.

Come dimostrato dalla figura seguente, è stata infatti notata una tendenza simile dei campioni. Gli stessi mostrano infatti uno sviluppo del tutto simile tra la relazione lineare che lega i valori di sforzo critico per lo stesso massimo diametro all'incremento della C_v , con due andamenti lineari che seguono all'incirca la stessa pendenza.

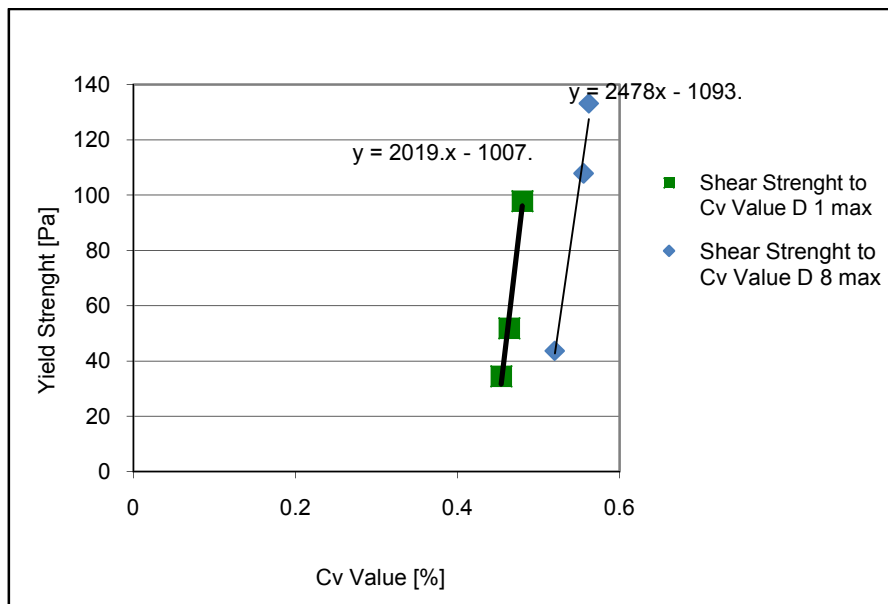


Figura 78 – Sovrapposizione delle rappresentazioni della relazione lineare che individua lo sforzo nominale per i diversi campioni al variare del Cv per diversi valori di diametro massimo

I dati ottenuti sono stati quindi confrontati insieme, in modo da verificare questa tendenza, mettendo gli sforzi nominali ottenuti in relazione con i diversi C_v ma non separando le serie di dati per massimo diametro. Il risultato così ottenuto ha mostrato effettivamente una tendenza unica che fornisce una relazione lineare che è stata ipotizzata essere quella che lega effettivamente lo sforzo nominale del campione nella sua complessità al variare della concentrazione volumetrica C_v .

Per verificare questo andamento sono state effettuate, inoltre, delle analisi per determinare il valore critico dello sforzo tangenziale per la concentrazione volumetrica di massimo impaccamento attraverso la metodologia seguita da Coussot e Boyer. Questo metodo prevedeva l'utilizzo di un piano inclinato e la misura, per diverse inclinazioni, dello sforzo critico limite per diverse granulometrie (Coussot e Boyer 1995). Alcuni autori hanno utilizzato questo metodo utilizzando dei dati di campagna (Coussot et alii 1998), ottenendo dei buoni risultati attraverso l'individuazione delle caratteristiche fisiche dei depositi lasciati da *debris flow* naturali.

Anche per questo studio è stata effettuato lo stesso tipo di analisi, utilizzando i dati ottenuti dall'osservazione del deposito da cui sono stati prelevati i campioni, individuati in seguito ai sopralluoghi effettuati nell'immediato post evento.

Il deposito considerato presentava l'aspetto di un grosso lobo di lunghezza 10 m circa, larghezza 1,8 m e altezza 1 m circa, ed è stato osservato (vedi Figure 53 e 54) nel canale del rio S'Arrescottu in un tratto di pendenza misurata di circa $7,9^\circ$.

Per calcolare lo sforzo critico è stata utilizzata quindi la formula di Johnson (Johnson 1970) riportata di seguito:

$$\tau_b = \rho g h (\sin i)$$

dove ρ rappresenta la densità della miscela, g l'accelerazione di gravità, h lo spessore del deposito ed i la sua pendenza. Il dato ottenuto, cioè $\tau_b = 196,57$ Pa è stato inserito nella relazione lineare sopra elaborata ed ha portato ad un valore di $C_v = 0,65$ che corrisponde ai valori di massimo impaccamento C^* ipotizzati da Takahashi (Takahashi 1981, 1991).

Il valore così ottenuto, e riportato nel grafico seguente, appare giustificato dal fatto che il materiale costituente i campioni è stato effettivamente preso in un lobo di colata depositatosi lateralmente nel canale del rio S'Arrescottu. In questo lobo, la variazione di pendenza che ne ha determinato l'arresto, ha determinato quindi le condizioni di C^* , e cioè di massimo impaccamento o concentrazione statica, che rappresenta il valore ultimo di C_v limite prima che l'ammasso si mobiliti.

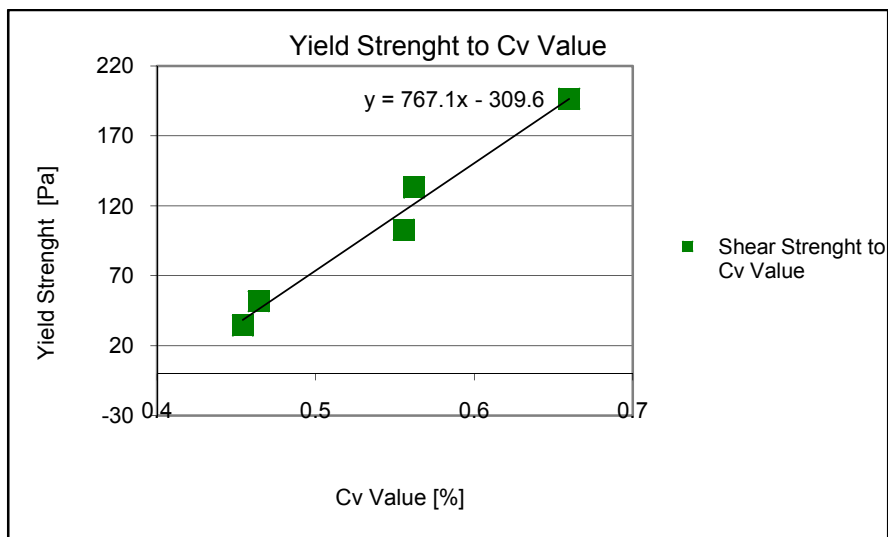


Figura 79 – Linea di tendenza della relazione lineare che individua lo sforzo nominale per l'intera matrice al variare del C_v

Anche per i valori di viscosità binghamiana è stato tenuto lo stesso procedimento che ha portato alla relazione lineare tra la stessa viscosità binghamiana e i diversi C_v per i differenti valori massimi di diametro dei sedimenti, come riportato nelle figure seguenti.

Bingh Visc			
Sample's Cv Value	Linear parameters		
	a	b	
Diameter Max 0.125	0.0510	0.3910	
Diameter Max 1	11.4300	25.9700	
Diameter Max 8	9.7650	19.8300	

Tabella 12 – Parametri della relazione lineare che individua la viscosità binghamiana, per i diversi campioni al variare del C_v per diversi valori di diametro massimo

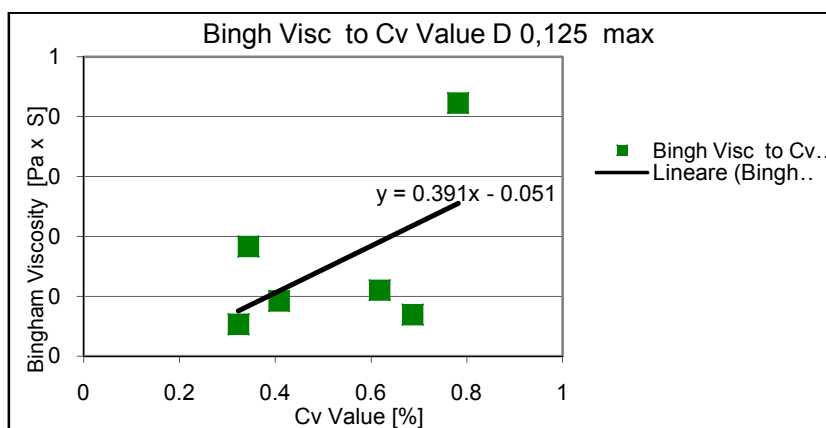


Figura 80 - Rappresentazione della relazione lineare che individua la viscosità binghamiana al variare del C_v per il campione del valore di diametro massimo 0,125 mm

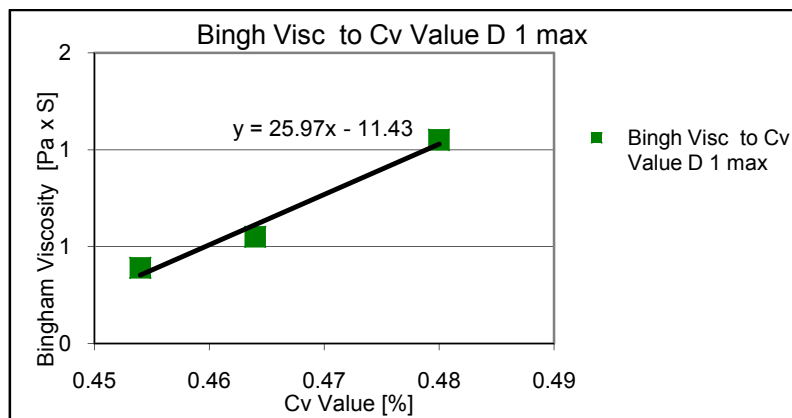


Figura 81 - Rappresentazione della relazione lineare che individua la viscosità binghamiana al variare del Cv per il campione del valore di diametro massimo 1 mm

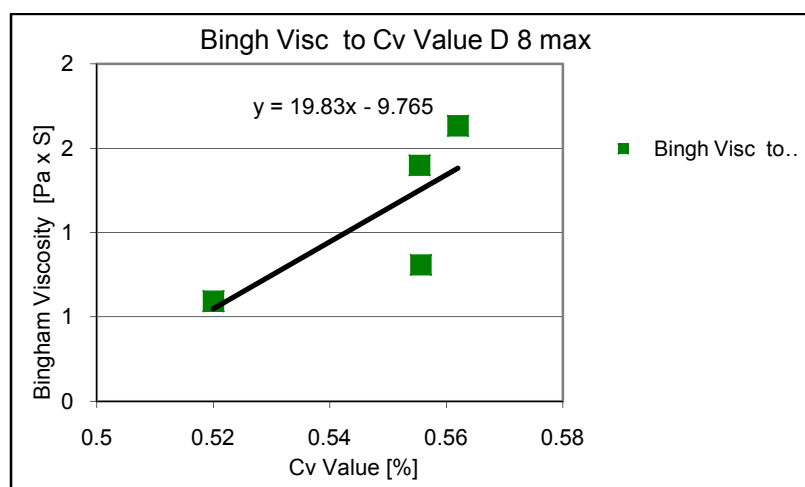


Figura 82 - Rappresentazione della relazione lineare che individua la viscosità binghamiana al variare del Cv per il campione del valore di diametro massimo 8 mm

Anche per la viscosità binghamiana sono state rilevate le stesse osservazioni effettuate per lo sforzo critico, ed è stata quindi rilevata una accentuata similitudine del comportamento della viscosità stessa all'aumentare della concentrazione solida volumetrica C_v .

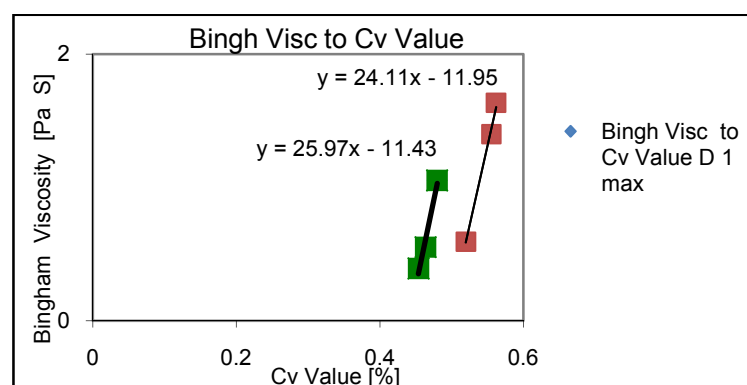


Figura 83 - Sovrapposizioni delle rappresentazioni della relazione lineare che individua la viscosità binghamiana per i diversi campioni al variare del Cv per diversi valori di diametro massimo

È stata quindi elaborata, anche per la viscosità binghamiana, una relazione lineare che descrive l'andamento della stessa viscosità al variare della C_v per il campione nella sua complessità totale.

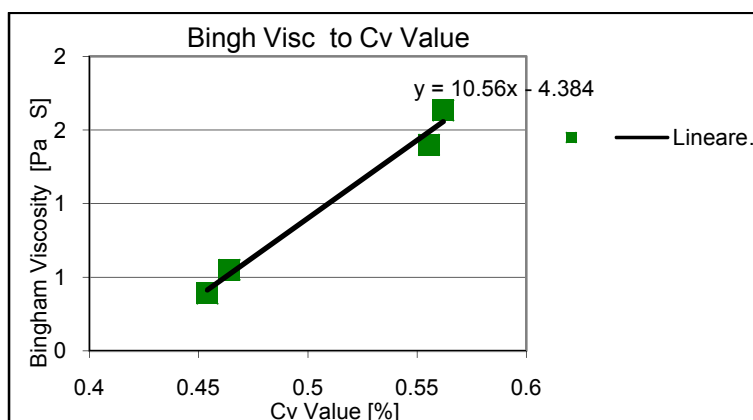


Figura 84 – Linea di tendenza della relazione lineare che individua la viscosità binghamiana per l'intera matrice al variare del C_v

I risultati ottenuti hanno permesso di individuare un'ipotesi di andamento della variazione dello sforzo critico e della viscosità binghamiana al variare del contenuto d'acqua della miscela per l'intero campione costituente i materiali della colata detritica del 6 dicembre 2004 sul rio S'Arrescottu.

I dati ottenuti sono stati utilizzati nel seguito del lavoro di ricerca per individuare le condizioni di C_v per la colata detritica studiata.

Inserendo di volta in volta dei diversi valori di C_v nelle relazioni sopra riportate, sono stati ottenuti dei possibili parametri reologici caratterizzanti la colata, utilizzati poi in delle simulazioni numeriche bidimensionali che usano come condizioni di calcolo le equazioni costitutive dei materiali. Procedendo in maniera iterativa sono stati verificati i diversi valori ottenuti con queste simulazioni con quelli ottenuti dal modello monodimensionale calibrato mediante *back analysis* nel post evento, che non si basa sui parametri reologici. Il processo è stato ripetuto sino ad identificare dei valori dei parametri reologici τ_0 e μ che hanno reso simili i risultati delle diverse simulazioni effettuate in termini di altezza dei fronti della colata, delle velocità e delle energie poste in gioco durante l'evento osservato.

ANALISI IDROLOGICHE

ASPETTI CLIMATICI E PLUVIOMETRICI

Il clima dell'area in esame è tipico insulare, caratterizzato da una stagione caldo-arida che si alterna ad una stagione fredda-umida, con possibilità di precipitazioni a carattere nevoso e gelate notturne nei periodi che vanno da dicembre a marzo.

Dai dati pluviometrici registrati dalla stazione di Villagrande Strisaili, per 53 anni di osservazione, emerge che la piovosità media annua è di 1027,8 mm, la massima precipitazione annua è di 2079 mm, relativa al nubifragio del 1951, la massima mensile è di 1311 mm, relativa all'ottobre del 1951, e la minima annua è di 475 mm, nell'anno 1954. Eccezionale, in particolare, fu inoltre la precipitazione durante il nubifragio che avvenne tra il 14 e il 15 ottobre del 1940 nel corso del quale furono registrati 330 mm di pioggia in 24 ore.

Il contesto climatico dimostra quindi come l'area in esame sia soggetta ad un regime di precipitazioni di forte intensità e breve durata, tra le più alte che normalmente si registrano in tutta l'isola e nel territorio nazionale, le quali, favorite da versanti scarsamente permeabili e molto ripidi, spesso, sono direttamente responsabili di eventi di piena improvvisi e violenti con conseguenze sul territorio dagli effetti catastrofici.

L'evento pluviometrico del 6 dicembre 2004, ultimo evento eccezionale sull'area, si configurò come violenta perturbazione temporalesca, caratterizzata da elevata intensità di pioggia che localmente raggiunse i 500 mm in 24 ore e interessò in maniera significativa il settore centro orientale della Sardegna, in particolare i territori dell'Ogliastra e della Baronia. Le precipitazioni, di straordinaria violenza, furono generate da una perturbazione proveniente da SE, bloccata dalla dorsale montuosa del Gennargentu, che hanno creato dei fenomeni di *Jet Streams* d'alta quota, investendo principalmente i bacini idrografici del rio Flumendosa e del rio Sa Teula, nell'Ogliastra, e del rio Cedrino in Baronia.

PARAMETRI DI FORMA

Il bacino del Rio S'Arrescottu risulta essere di modeste dimensioni, occupando una superficie complessiva di 0,79 km². Lo studio idrologico effettuato è stato esteso all'intera superficie sino alla confluenza nel rio Serra 'e Scova, poco a valle del concentrico di Villagrande Strisaili.

L'asta torrentizia del S'Arrescottu è caratterizzata da uno sviluppo complessivo di circa 1,8 km, con una pendenza media del 17,6%, ma che presenta valori superiori nella parte sommitale del bacino, per poi decrescere nelle sezioni di valle dello stesso.

Nella valutazione dei parametri morfologici in grado di caratterizzare la conformazione del bacino si è valutata, oltre all'area *S*, anche il perimetro *P*. Il bacino considerato presenta forma allungata, nella prima parte con asse principale di scolo in direzione O-E, e nella seconda in direzione SO-NE. Esso si estende a partire dalla sezione di chiusura posta poco a valle del

concentrico di Villagrande Strisaili sino alla testata, a monte di Funtana Niu 'e Crobu, a quota 1.005 m s.l.m., in prossimità della sorgente Sarommini.

I rapporti tra i parametri fisiografici del bacino idrografico costituiscono l'indicazione sintetica e quantitativa della forma del bacino stesso. Si definiscono quindi i seguenti coefficienti di forma, introducendo il diametro D e il perimetro C corrispondenti ad un bacino di forma circolare avente la stessa estensione S del bacino in esame:

$$F_1 = \frac{L}{D} = \frac{L}{\sqrt{4S/\pi}} = 0,89 \frac{L}{\sqrt{S}}$$

$$F_2 = \frac{P}{C} = \frac{P}{2\sqrt{S\pi}} = 0,28 \frac{P}{\sqrt{S}}$$

Nella Tabella 13 seguente sono riportati i parametri di forma calcolati per i due bacini considerati: entrambi i valori di F sono superiori all'unità, indicando quindi una morfologia piuttosto allungata.

Parametro	Bacino rio S'Arrescottu
Perimetro P [km]	5,56
Superficie S [km ²]	0,79
Lunghezza L [km]	1,84
F1	1,85
F2	1,76

Tabella 13 – Parametri di forma

CALCOLO DEL TEMPO DI CORRIVAZIONE

In molte schematizzazioni delle trasformazioni afflussi-deflussi s'introduce l'ipotesi che il tempo impiegato da una particella d'acqua per raggiungere la sezione di chiusura del bacino scorrendo in superficie sia una costante che dipende soltanto dalla posizione del punto in cui è caduta e dalle caratteristiche morfologiche del bacino.

Pur essendo un'assunzione che presenta notevoli limiti, risulta comunque molto utile nella pratica in quanto, a prescindere dal metodo scelto per la determinazione della portata di piena, fornisce con calcoli relativamente semplici un'indicazione sul comportamento idrologico del bacino in studio.

Il tempo di corrivazione è il tempo impiegato da una particella d'acqua per raggiungere la sezione di chiusura del bacino, per cui ad ogni punto della zona esaminata corrisponde un valore del tempo di corrivazione. Un punto particolare è quello idraulicamente più lontano dalla sezione di chiusura, che rappresenta il contributo "ultimo" del deflusso superficiale. Il tempo di corrivazione di questo punto, che è il tempo impiegato da una particella d'acqua per percorrere l'intera superficie del bacino, dall'origine alla sezione di chiusura, e che risulta il maggiore tra quelli dei diversi punti del bacino, prende il nome di "tempo di corrivazione del bacino".

Quindi, per il bacino esaminato si può determinare il tempo di corrivazione T_c corrispondente, tenendo conto che dipende da numerosi fattori che possono essere elencati nel modo seguente:

- parametri relativi alla topografia e alle caratteristiche planimetriche del bacino, come la superficie, la lunghezza e la pendenza dell'asta principale, la larghezza media del bacino, la distanza del baricentro del bacino dal punto idraulicamente più lontano dalla sezione di chiusura, la pendenza media dei versanti;
- parametri che definiscono le caratteristiche della rete idrografica quali la densità della rete, la capacità d'invaso nella rete e in bacini naturali e artificiali, le scabrezze degli alvei;
- parametri relativi alla copertura vegetale che definiscono la maggiore o minore presenza di boschi, pascoli, seminativi o altra destinazione d'uso del suolo;
- parametri relativi alle caratteristiche geologiche e fisiche del suolo quali la permeabilità e la capacità di trattenuta dell'acqua.

Vista la notevole difficoltà che sorge nel prendere in considerazione tutti questi parametri, il tempo di corrivazione si stima in genere utilizzando formule che derivano dall'analisi di molti casi reali e che esprimono il legame mediamente esistente tra il tempo di corrivazione e alcune altre grandezze caratteristiche del bacino di facile determinazione (Ferro 2006).

Per stimare il tempo di corrivazione, è molto usata la formula di Giandotti:

$$T_c = \frac{4\sqrt{S} + 1,5L}{0,8\sqrt{H}}$$

dove:

T_c = tempo di corrivazione (ore);

S = area del bacino idrografico (km²);

L = lunghezza dell'asta principale (km);

H = altitudine media del sottobacino riferita alla sezione di chiusura (m).

Un'altra formulazione è stata determinata da Pasini:

$$T_c = 0,108 \cdot \frac{\sqrt[3]{S \cdot L}}{\sqrt{i_m}}$$

dove:

T_c = tempo di corrivazione (ore);

S = area del bacino idrografico (km²);

L = lunghezza dell'asta principale (km);

i_m = pendenza media dell'asta principale (-).

Una terza formula per calcolare il tempo di corrivazione è quella proposta dal VAPI - Sardegna, che ha svolto lo studio dell'idrologia superficiale della Sardegna per la stima delle portate di piena osservando 28 bacini. La formulazione, ricavata per i bacini idrografici chiusi alle sezioni dove esistono misuratori di portata, non è validata per bacini con superficie inferiore ai 50 km², ed è espressa come:

$$T_c = 0,212 \cdot S^{0,231} \cdot \left(\frac{H_m}{i_m} \right)^{0,289}$$

dove:

T_c = tempo di corrivazione (ore);

S = area del bacino idrografico (km²);

H_m = altitudine media del bacino (m);

i_m = pendenza media dell'asta principale (-).

Un'ultima formula per calcolare il tempo di corrivazione è quella fornita dal Soil Conservation Service del servizio agronomico del governo degli USA, che è stata determinata analizzando dati provenienti da numerosi bacini agricoli americani ed è espressa come:

$$T_c = \frac{0,00227 \cdot L^{0,8} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0,7}}{\sqrt{i_v}}$$

dove:

T_c = tempo di corrivazione (ore);

L = lunghezza dell'asta principale (m);

CN = "curve number", adimensionale;

i_v = pendenza media dei versanti (%).

Per l'utilizzo delle precedenti formule, è necessario determinare i parametri morfologici necessari, vale a dire la superficie, la lunghezza dell'asta fluviale tra la quota della sezione iniziale e quella finale di chiusura del bacino, la pendenza dell'asta principale, la pendenza media dei versanti, il parametro CN e l'altitudine media del bacino.

I valori utilizzati per il calcolo sono riassunti nella Tabella 14. Valutate le ipotesi alla base dei diversi metodi applicati, si è ritenuto ragionevole utilizzare per i calcoli successivi il valore medio stimato ottenuto con le formulazioni di Giandotti, Pasini ed SCS, escludendo quella del VAPI - Sardegna.

Parametro	Bacino rio S'Arrescottu
S [km ²]	0,79
L [km]	1,84
H_{max} [m s.l.m.]	1.005
H_0 [m s.l.m.]	560
i_m [m/m]	0,176
i_v [m/m]	0,281
CN	86
T_c [h]	0,39

Tabella 14 – Calcolo del tempo di corrivazione per il bacino idrografico in studio

CALCOLO DEL NUMERO DI CURVA ADIMENSIONALE CN

Il numero di curva adimensionale CN (*runoff curve number*) è un indice di ritenzione potenziale del suolo, che dipende dalla pedologia, dal tipo e grado di copertura del suolo e dal grado di umidità iniziale del terreno.

Tale indice ha un valore compreso tra 0 e 100 e, per la sua determinazione, il Soil Conservation Service propone delle classificazioni, in modo da far rientrare la zona esaminata in una determinata categoria e ricavare da opportune tabelle il valore di CN corrispondente.

I terreni che costituiscono il bacino in esame devono essere ricondotti ad una delle quattro classi litologiche presenti nella tabella seguente. Si sottolinea che il calcolo del CN è stato effettuato per il bacino complessivo e il valore determinato è stato assunto valido anche per il sottobacino di monte.

Classe	Tipologia di terreno
A	Accumuli di frana da crollo
B	Depositi da debris flow, alluvioni antiche, depositi colluviali, depositi gravitativi di falda e conoide, depositi glaciali di ablazione e indifferenziati
C	Depositi colluviali, prodotti colluviali
D	Calcari dolomitici, serpentiniti, calcescisti, micascisti, gneiss indifferenziati, metabasiti

Tabella 15 - Gruppi idrogeologici assegnabili ai diversi litotipi.

Per il territorio in esame è stato ritenuto opportuno attribuire una classe litologica di tipo B, corrispondente ad una permeabilità mediamente alta.

I valori calcolati, con riferimento alla figura e alla tabella seguenti, si riferiscono ad un grado di umidità iniziale del terreno prima che si verifichi l'evento meteorico di tipo II, cioè a un terreno umido, e sono relativi alle diverse classi di uso del suolo del bacino idrografico.

Codice uso del suolo Sardegna	Descrizione classe	Codice CN	Area [m ²]
3111	Boschi a prevalenza di conifere	5	465093.79
243	Aree agro silvo pastorali	20	79819.3
3121	Boschi a prevalenza di conifere	5	19307.05
1112	Tessuto residenziale rado	99	9328.76
1111	Tessuto residenziale compatto e denso	99	86385.59
141	Aree verdi urbane	24	33603.76
2112	Prati artificiali	24	7638.16

Tabella 16 – Attribuzione dei valori di CN pesato sulle aree di uso del suolo

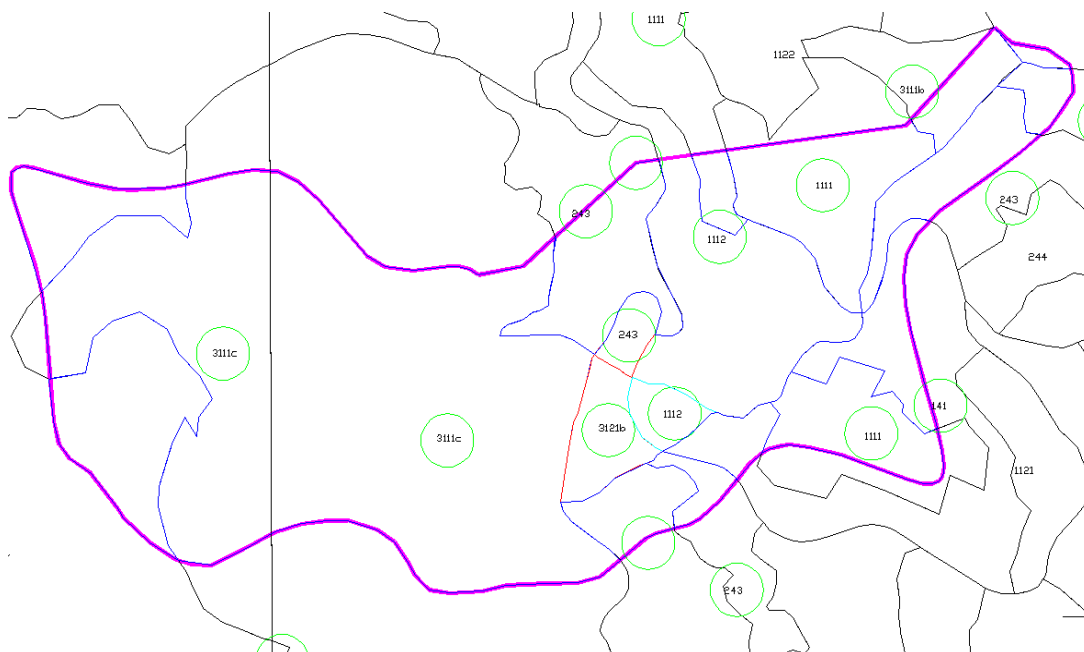


Figura 85 – Carta del CN per il bacino in esame

E' possibile prendere in considerazione anche situazioni di umidità del terreno all'inizio della precipitazione diverse da quella media; il metodo infatti classifica le condizioni di umidità in tre categorie:

- AMC I: potenziale di scorrimento superficiale minimo: i suoli del bacino sono sufficientemente asciutti da permettere un'aratura o coltivazione soddisfacente;
- AMC II: condizione media;
- AMC III: potenziale di scorrimento superficiale massimo: il bacino è stato praticamente saturato dalle piogge precedenti.

La categoria a cui fare riferimento si può individuare in base alla precipitazione totale dei 5 giorni precedenti quello dell'evento di pioggia e in base alla stagione vegetativa o a quella non vegetativa.

AMC	Precipitazione antecedente di 5 gg l'evento	
	Stagione di riposo (mm)	Stagione vegetativa (mm)
I	< 12,7	< 35,6
II	12,7 – 27,9	35,6 – 53,3
III	> 27,9	> 53,3

Tabella 17 – Condizioni di umidità in funzione della precipitazione antecedente

I valori di CN corrispondenti alla categoria AMC I e AMC III si possono ricavare dal valore di CN che corrisponde alla categoria AMC II per mezzo delle seguenti relazioni (Chow et alii 1988), dove n , m e δ sono dei coefficienti numerici noti:

$$CN(I) = \frac{n \cdot CN(II)}{\delta - 0,058 \cdot CN(II)} \quad CN(III) = \frac{m \cdot CN(II)}{\delta + 0,13 \cdot CN(II)}$$

Nel calcolo in esame si è fatto riferimento alla condizione AMCIII, rappresentativa di una situazione di sostanziale saturazione del terreno: tale ipotesi risulta essere più cautelativa in quanto ipotizza una ridotta capacità di assorbimento della pioggia che va ad alimentare il deflusso superficiale.

Bacino	AMC I	AMC II	AMC III
Rio S'Arrescottu	53	73	86

Tabella 18 – Valori del CN in condizioni di differente saturazione del terreno

DESCRIZIONE DEL MODELLO NUMERICO UTILIZZATO

Nel presente studio idrologico è stata prevista la ricostruzione dell'evento parossistico del dicembre 2004. Le portate di piena sono state calcolate utilizzando un modello numerico di trasformazione afflussi-deflussi, allestito sulla base delle informazioni pluviometriche disponibili.

Per determinare la portata di piena, non essendo disponibili misure dirette di portata, si è allestito un modello numerico di trasformazione afflussi-deflussi, che consente di determinare le caratteristiche principali dell'onda di piena (portata al colmo, volume totale della piena, idrogramma) nella sezione di chiusura del bacino, a partire da precipitazioni estreme statisticamente significative per il bacino medesimo o a partire dalla misurazione delle precipitazioni nel tempo che hanno caratterizzato il bacino.

Si osserva che l'analisi delle portate di piena, necessarie per definire le modalità di deflusso in condizioni critiche, è stata condotta in corrispondenza della sezione di chiusura del rio S'Arrescottu, a valle del concentrico di Villagrande Strisaili.

Il modello afflussi-deflussi consente il calcolo dell'idrogramma di piena, definite le principali caratteristiche del bacino. Il reticolo idrografico viene rappresentato come una serie di elementi idrologicamente interconnessi. Per ciascun elemento devono essere specificati i seguenti parametri:

- le perdite iniziali;
- il metodo di trasformazione adottato;
- il flusso di base.

Per determinare le perdite iniziali (ossia la parte di precipitazione che non dà luogo a deflusso superficiale ma viene persa in intercettazione, infiltrazione, evapotraspirazione etc.) si possono utilizzare diverse metodologie che richiedono in ingresso parametri di difficile determinazione. Nell'applicare il modello HEC-HMS[®] al bacino in studio, si è optato per il metodo sviluppato dal S.C.S., che richiede solo la conoscenza del numero adimensionale CN e delle perdite iniziali I_a , valutabili con la seguente relazione:

$$I_a = 0,2 \cdot \frac{1000 - 10CN}{CN}$$

Nella valutazione delle perdite iniziali può essere specificata la percentuale d'area impermeabile nel bacino, per la quale il codice di calcolo impone che gli afflussi vengano trasformati completamente in deflusso superficiale, ossia per cui le perdite risultano nulle.

Il metodo di calcolo utilizzato per valutare la trasformazione afflussi–deflussi, come detto, è quello elaborato dal Soil Conservation Service, richiedente la conoscenza del tempo di ritardo (t_{lag}):

$$t_{lag}=0,6 T_c \text{ (minuti)}$$

ove T_c indica il tempo di corrivazione del bacino.

Infine, si è imposto un flusso di base nullo.

Il codice di calcolo consente, inoltre, la scelta tra diverse opzioni per la definizione dell'idrogramma unitario; questo, infatti, può essere fornito direttamente oppure descritto in funzione dei parametri di Clark, Snyder o dell'SCS (Soil Conservation Service). L'opzione dell'onda cinematica consente invece di schematizzare il deflusso dal sottobacino con elementi che rappresentano uno o due superfici scolanti oppure con uno o due canali collettori e un canale principale.

Per la determinazione delle portate idriche interessanti il rio S'Arrescottu in corrispondenza dell'evento del dicembre 2004 si è ovviamente optato per l'inserimento manuale delle precipitazioni al variare del tempo.

PLUVIOMETRIA DELLA ZONA DI INTERESSE

Uno degli obiettivi dello studio idrologico è quello di determinare il comportamento del corso d'acqua di interesse in riferimento ad eventi meteorici intensi.

Lo studio ha inizialmente analizzato le precipitazioni affluenti sul bacino, dedicando particolare attenzione al reperimento dei dati pluviometrici misurati durante l'evento del 6 dicembre 2004. In mancanza di misure dirette di portata, è necessaria un'approfondita conoscenza del regime pluviometrico, in particolare, in relazione alle precipitazioni di notevole intensità e breve durata, al fine di poter valutare il massimo deflusso superficiale mediante metodi indiretti, che correlino le altezze di pioggia di assegnata frequenza con la portata in alveo.

Di primaria importanza quindi, al fine della caratterizzazione dell'evento occorso, è stata la ricostruzione idrologica dell'evento meteorologico del 6-7 dicembre 2004.

RICOSTRUZIONE DELL'EVENTO 6-7 DICEMBRE 2004

Il 6 e il 7 dicembre 2004 una violenta perturbazione temporalesca, caratterizzata da elevata intensità di pioggia che localmente raggiunse i 500 mm in 24 ore, ha interessato in maniera significativa il settore centro orientale della Sardegna, in particolare i territori dell'Ogliastra e della Baronia.

A partire dalle ore 13:00 del 6 dicembre le precipitazioni iniziarono ad abbattersi incessantemente su tutta l'Ogliastra. I paesi più colpiti furono Urzulei, Talana, ma soprattutto Villagrande Strisaili. Durante la notte tra il 6 e il 7 dicembre in Baronia si verificarono straripamenti del fiume Cedrino e del Rio Posada che interessarono le campagne di Galtelli e Torpè. I valori di precipitazione misurati alla stazione di Bau Mandara, posta a 6 km a NE dall'abitato di Villagrande Strisaili, raggiunsero un'intensità oraria di 125 mm e un valore cumulato di 330 mm in tre ore, il che rappresenta, per l'area di interesse, un tempo di ritorno più che secolare.

La ricostruzione dell'evento pluviometrico intercorso il 6 e 7 dicembre 2004 e interessante il rio S'Arrescottu, è stata definita in funzione delle misurazioni pluviometriche rilevate alla stazioni di misura di Villagrande e di Villanova Strisaili.

La determinazione delle portate per l'evento 2004 è stata effettuata mediante l'applicazione del modello numerico di trasformazione afflussi-deflussi descritto precedentemente.

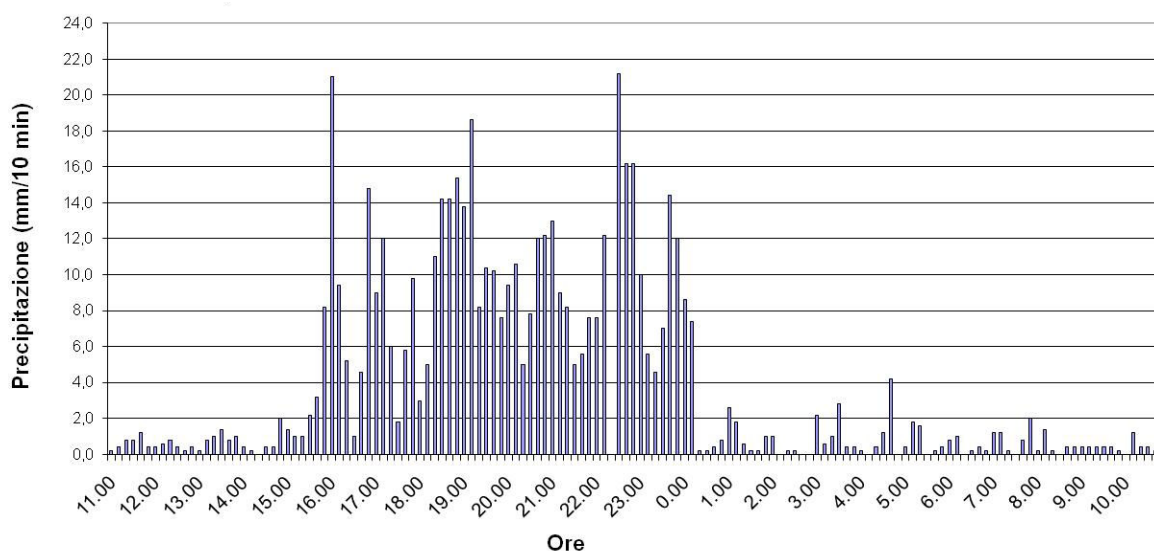


Figura 86 – Precipitazioni 6-7 Dicembre registrate alla stazione di Villanova Strisaili.

Come si rileva dall'andamento delle precipitazioni registrate al pluviometro di Villanova Strisaili, pochi chilometri a monte di Villagrande, si evidenziano due picchi di massima intensità, uno registrato tra le ore 16:00 e le ore 16:10 con 21 mm di pioggia, ed un secondo tra le 22:30 e le 22:40 con 21.2 mm di pioggia.

Le precipitazioni registrate a Villagrande Strisaili hanno una frequenza di misurazione meno accurata, si dispongono infatti dei dati per ogni ora. L'andamento delle altezze di precipitazione in funzione del tempo registrate al pluviometro di Villagrande sono mostrate nella figura seguente.

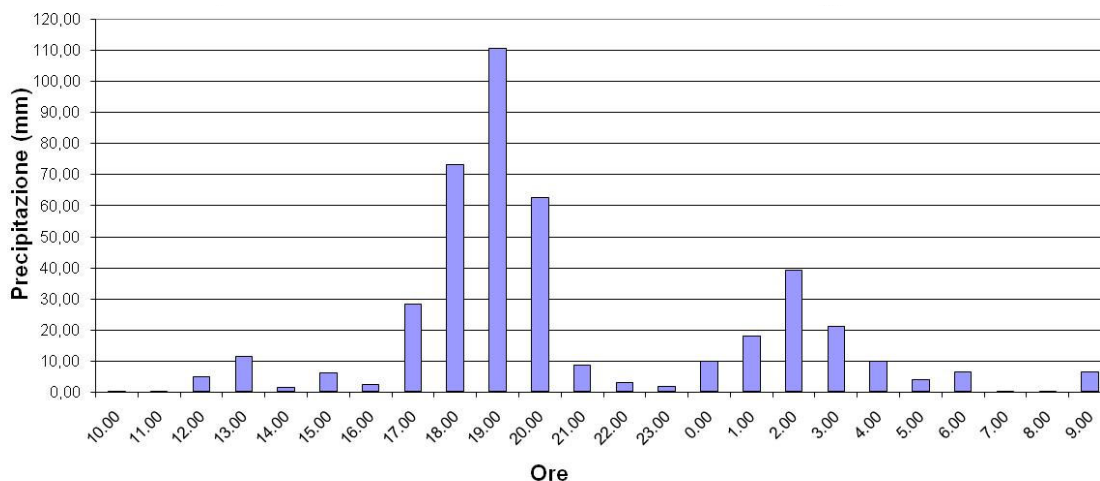


Figura 87 - Precipitazioni 6-7 dicembre registrate alla stazione di Villagrande Strisaili

I dati forniti dalla Regione Saredegna in merito alle massime intensità di pioggia registrate alla stazione di Villagrande per l'evento in corrispondenza di 1, 2, 3, 6, 12 e 24 ore sono invece riportate nella tabella seguente, evidenziando come nelle 24 ore alla stazione di Villagrande siano caduti 428.4 mm di pioggia.

Stazione	1 ora (mm)	2 ore (mm)	3 ore (mm)	6 ore (mm)	12 ore (mm)	24 ore (mm)
Villagrande Strisaili	118,0	184,0	242,4	281,6	382,4	428,4

Tabella 19 – Piogge di massima intensità per il pluviografo di Villagrande Strisaili

Le registrazioni alla stazione di Villagrande Strisaili (Puligheddu 2005) mettono in evidenza un picco di intensità particolarmente elevata registrato intorno alle 19:00, con una intensità di circa 111 mm, seguito alle ore 2:00 del 7 da un secondo picco di intensità inferiore e pari a 39 mm.

Come appare in evidenza, il picco di intensità si è protratto per un tempo estremamente elevato, superiore al tempo di corrivazione del piccolo bacino di interesse.

RISULTATI DELLA SIMULAZIONE EFFETTUATA SULLO IETOGRAMMA REGISTRATO A VILLANOVA STRISAILI

Per la simulazione effettuata si è optato per la determinazione delle portate mediante metodo numerico attraverso l'inserimento dell'idrogramma registrato dalla stazione pluviometrica a Villanova. Esso infatti presenta informazioni che hanno una maggiore accuratezza, in quanto si rileva la registrazione delle misure di altezze ogni 10 minuti.

Il modello di calcolo, nel valutare la portata di piena conseguente ad un evento meteorico, risulta estremamente sensibile alle condizioni di umidità iniziale del suolo, quindi alle perdite iniziali (CN, *Ia*) che si registrano.

In questa fase di studio, pertanto, si è scelto di applicare il modello assumendo delle ipotesi in merito alla condizione iniziale dei suoli, le quali hanno presupposto l'assunzione per il bacino di interesse di un valore di CN AMC III (condizione di saturazione elevata), condizione che può essere rappresentativa soprattutto in merito alla ridotta potenza degli strati di copertura superficiale. Inoltre, la portata al colmo è stata anche valutata imponendo perdite iniziali nulle, che consentono di simulare l'assenza, all'inizio dell'evento meteorico, di perdite (per infiltrazione, evapotraspirazione...): ossia tutto quanto affluisce sul bacino, dà vita a deflusso superficiale. Si sono dunque determinati i valori di portata liquida al colmo caratteristici dell'evento, riportati nella tabella seguente.

Project: Project 1			
Simulation Run: Villanova pluviometro		Subbasin: S'Arrescottu	
Start of Run: 06dic2004, 10:50	Basin Model: S'Arrescottu		
End of Run: 07dic2004, 10:50	Meteorologic Model: Evento 2004 Villanova		
Compute Time: 19gen2009, 15:08:28	Control Specifications: Villanova		
Volume Units: <input checked="" type="radio"/> MM 1000 M3			
Computed Results			
Peak Discharge :	20.59 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge :	06dic2004, 22:52
Total Precipitation :	554.80 (MM)	Total Direct Runoff :	507.84 (MM)
Total Loss :	46.71 (MM)	Total Baseflow :	0.00 (MM)
Total Excess :	508.09 (MM)	Discharge :	507.84 (MM)

Tabella 20 – Risultati della simulazione per il bacino del S'Arrescottu imponendo in ingresso le misure pluviometriche di Villanova

Il grafico che mette in evidenza l'andamento temporale delle portate in uscita dal bacino è di seguito riportato.

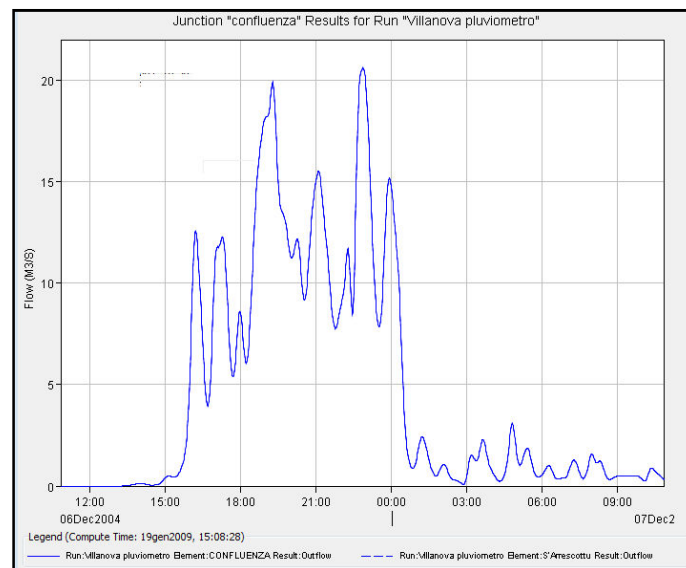


Figura 88 – Andamento dell'idrogramma in uscita dal bacino del s'Arrescottu calcolato in funzione delle portate registrate al pluviografo di Villanova Strisaili

La portata di picco si ha in corrispondenza del secondo picco di pioggia. Il picco che si rileva è pari a **20,59 m³/s**.

RISULTATI DELLA SIMULAZIONE EFFETTUATA SULLO IETOGRAMMA REGISTRATO A VILLAGRANDE STRISAILI

In maniera del tutto analoga a quanto effettuato per la simulazione con il pluviografo di Villanova, si è operato alla simulazione idrologica imponendo quale dato di input l'andamento delle precipitazioni orarie rilevate a Villagrande Strisaili. I parametri in ingresso al sistema e le implementazioni di calcolo sono state mantenute identiche alla simulazione precedentemente sviluppata.

Project: Project 1			
Simulation Run: Villagrande pluviometro		Subbasin: S'Arrescottu	
Start of Run: 06dic2004, 09:00	Basin Model: S'Arrescottu		
End of Run: 07dic2004, 10:00	Meteorologic Model: Evento Villagrande		
Compute Time: 19gen2009, 20:09:24	Control Specifications: Villagrande		
Volume Units: <input checked="" type="radio"/> MM <input type="radio"/> 1000 M3			
Computed Results			
Peak Discharge : 23,41 (M3/S)	Date/Time of Peak Discharge : 06dic2004, 19:01		
Total Precipitation : 428,41 (MM)	Total Direct Runoff : 383,34 (MM)		
Total Loss : 45,07 (MM)	Total Baseflow : 0,00 (MM)		
Total Excess : 383,34 (MM)	Discharge : 383,34 (MM)		

Tabella 21 - Risultati della simulazione per il bacino del S'Arrescottu imponendo in ingresso le misure pluviometriche di Villagrande Strisaili

Il grafico che mette in evidenza l'andamento temporale delle portate in uscita dal bacino è di seguito riportato. Come si evidenzia dal grafico e dalla tabella di output, le portate idriche calcolate per la simulazione dell'evento attraverso i dati di pioggia registrati alla stazione di Villagrande determinano una portata di **23,41 m³/s**.

Tale valore di portata risulta essere superiore alla portata in output al bacino calcolata dall'idrogramma in ingresso di Villanova; ciò si giustifica considerando che, a fronte di durate di piogge differenti, le intensità che si sono manifestate in prossimità del pluviometro di Villagrande siano state superiori rispetto alle intensità di pioggia rilevate a Villanova.

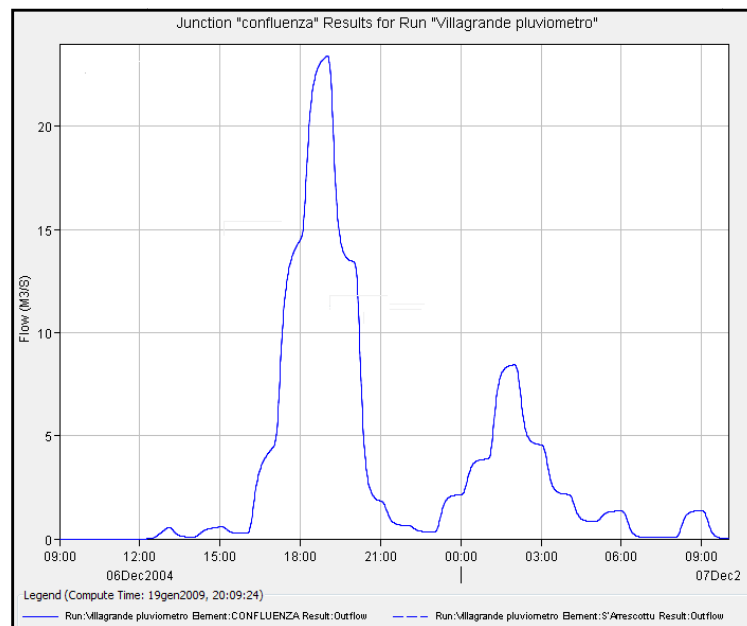


Figura 89 - Andamento dell'idrogramma in uscita dal bacino del s'Arrescottu calcolato in funzione delle intensità di pioggia registrate al pluviografo di Villagrande Strisaili

ANALISI TOPOGRAFICHE

Per quanto riguarda le analisi topografiche inizialmente è stata portata avanti una ricognizione della cartografia esistente con particolare riferimento a quella digitale. In particolare è stata analizzata la seguente cartografia:

- Cartografia IGM in scala 1:25.000.
- Primo volo aerofotogrammetrico realizzato nel '71
- CTR numerica in scala 1:10.000, Geod. dell'Assessorato EE.LL., Finanze e Urbanistica;
- Orto fotogrammetrie aggiornate al 2006 fornite Assessorato EE.LL., Finanze e Urbanistica;
- Cartografia tecnica numerica in scala 1:1000 realizzata dalla Compucart, aggiornata al 2006.
- Carta dell'Uso del Suolo;
- Cartografia catastale;
- Carte del Piano di Fabbricazione vigente del 1987;
- Proiezioni realizzate sul torrente fornite dal comune di Villagrande Strisaili;
- DTM del SIT della Regione Autonoma della Sardegna maglia 10m x 10m.

Naturalmente le cartografie digitali sono state quelle più interessanti che hanno permesso di creare un Digital Elevation Model di precisione di base che è stato in seguito accurato attraverso una serie di dati rilevati ad hoc con le modalità di seguito riportate.

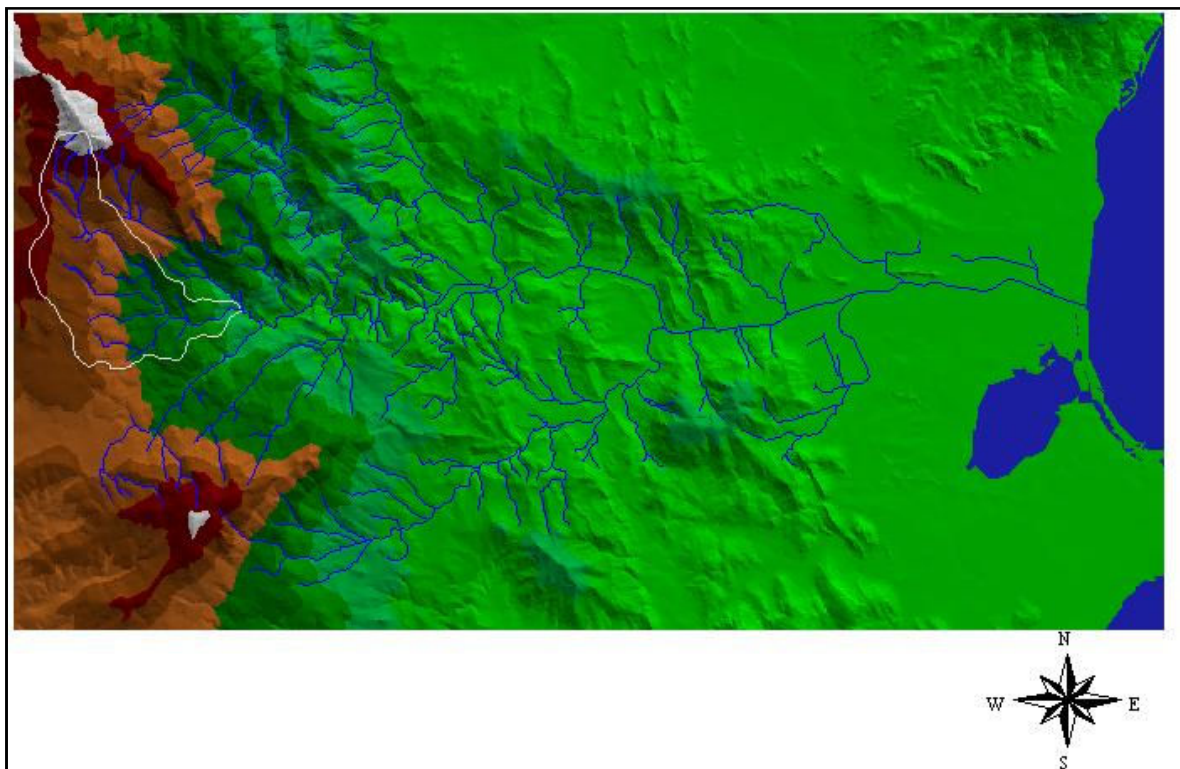


Figura 90 - Rappresentazione digitale del terreno ottenuta per il bacino del rio Girasole

La necessità di una modellazione idraulica che tenesse conto non solo della geometria delle sezioni d'alveo, ma anche della morfologia delle aree perfluviali, in modo da evidenziare le caratteristiche idrauliche che si instaurano lungo esse in termini di velocità e profondità della corrente, ha comportato la necessità di un maggior approfondimento topografico relativamente alle quote plano-altimetriche dell'alveo e dell'intera area circostante.

Si è quindi utilizzato il modello digitale di elevazione del terreno (DEM), che ha permesso le successive operazioni atte alla determinazione delle quote medie per le celle del grigliato per tutta la zona che è poi stato utilizzato nelle simulazioni numeriche bidimensionali.

È stato inoltre realizzato un rilievo topografico di dettaglio per la determinazione delle sezioni idrauliche del cunettone nell'area di interesse.

È stato quindi possibile ricostruire circa 31 sezioni dell'alveo a partire dalla pista rurale a monte della Strada Provinciale 27, da dove si sono dipartiti i fenomeni di colata sul canale, sino a valle della via Roma dove l'alveo incassato in roccia si dirige verso il suo naturale confluente, il rio Serra 'e Scova, che sono state riportate in una carta rappresentante la planimetria della zona (cfr. Allegato 2).

Nei siti dove per problematiche ambientali, quali copertura vegetativa ostacoli di varia natura, non è stato possibile utilizzare la strumentazione GPS, è stata utilizzata la strumentazione tradizionale utilizzando i capisaldi di sottorete ottenuti come punti di partenza del rilievo in tradizionale.

Come detto, a queste attività, è stata premessa una acquisizione critica dei rilievi già esistenti sul reticolo attraverso l'acquisizione presso gli enti competenti dei dati (dimensioni e funzionalità) relativi ai tratti tombinati e alle altre opere dalle quali si è decisa la successiva individuazione cartografica delle sezioni oggetto dei rilievi e dei relativi vertici.

Le ulteriori sezioni integrative, ritenute necessarie ai fini di una corretta descrizione della morfologia del corso d'acqua per la modellazione idraulica sono state riferite quindi all'individuazione in cartografia delle opere d'arte (ponti e infrastrutture idrauliche in generale) rilevate e definite.

Per ogni sezione sono stati identificati gli estremi dai quali è partita la misurazione e determinati tutti elementi interessanti al fine di poter definire in maniera dettagliata una sezione idraulica attraverso anche il censimento della natura del terreno presente (tipologie di coltivazioni, tipologie di strade, tipologie delle sponde e delle arginature ecc.).

Per il rilievo dei manufatti e delle interferenze lungo i corsi d'acqua si è proceduto nel modo seguente: il rilievo della sezione d'alveo coincidente con il manufatto è stato acquisito come sopra descritto e si è provveduto inoltre a misurare una serie di punti significativi del manufatto stesso tali da poterlo rappresentare in sezione.



Figura 91 Rappresentazione digitale del terreno ottenuta per il bacino del rio S'Arrescottu

ANALISI IDRAULICA 1: MODELLAZIONE DEI FENOMENI DI COLATA DETRITICA CON METODI CINEMATICI MONODIMENSIONALI

DESCRIZIONE DEL MODELLO NUMERICO UTILIZZATO

Il modello globale dei processi di colata detritica, finalizzato alla ricostruzione dei processi di debris flow lungo l'asta del Rio S'Arrescottu, è stato condotto mediante una simulazione con DB_PREV®.

Il codice di calcolo utilizzato nel presente lavoro (Rosso Cavallo Sesenna et alii 2003), è stato sviluppato da un gruppo di liberi professionisti nel campo idraulico (R&C Associati® studio Associato di ingegneri) in collaborazione con docenti universitari del Politecnico di Torino e studiosi del settore. Il codice utilizza il modello dell'onda cinematica proposta da Arattano & Savage (Arattano & Savage 1992) tenendo conto delle numerose variabili fisiche, idrauliche e geometriche, che entrano in gioco per l'innesco, il moto e la propagazione del debris flow (Arattano 1994a., 1994b, Arattano, Deganutti, Marchi 1997).

Tale modello, studiato su un canale prismatico a pendenza costante, può essere applicato per n tratti in cui è stata suddivisa l'asta torrentizia, aggiornando di volta in volta i parametri di caratterizzazione in modo da introdurre i valori di pendenza e larghezza di ciascun tratto considerato del canale in esame. Il codice di calcolo DB_PREV® prende in considerazione anche i fenomeni di erosione e deposito lungo l'asta, simulando le variazioni del volume d'onda, della velocità e le altezze del fronte della colata.

Per simulare il moto di un *debris-flow*, la metodologia proposta da Arattano & Savage (Arattano & Savage 1992) utilizza le equazioni di Saint Venant, per descrivere il moto vario unidimensionale di un fluido in un canale rettangolare aperto di pendenza assegnata costante.

Tale semplificazione, che non tiene conto direttamente dei parametri reologici del *debris flow*, può essere ritenuta valida solo in situazioni in cui i parametri cinematici siano effettivamente preponderanti rispetto a quelli reologici, come nel caso di impluvi e aste torrentizie ad elevata acclività quali quelle in ambiente alpino. Anche per l'asta oggetto del presente studio di ricerca, viste le condizioni morfologiche e orografiche del canale del rio S'Arrescottu, è parso giustificato l'uso di questo codice di calcolo.

Le equazioni di Saint Venant comprendono l'equazione del moto:

$$u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial t} + g \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = g \cdot i - g \cdot i_p$$

e l'equazione di continuità:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial h}{\partial x} + h \cdot \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

dove il termine i_p rappresenta la perdita di carico per unità di lunghezza e può essere espresso tramite una relazione del tipo di quella di Chezy, mentre con u e h vengono indicate, rispettivamente, velocità e altezza del fronte di colata alla progressiva x e al tempo t . Senza assumere direttamente i parametri reologici della massa in movimento, l'effetto della perdita di carico unitaria dovuta al movimento della colata viene introdotta con un coefficiente di

scabrezza equivalente C , ricavato da osservazioni sperimentali (DeLeon & Jeppson 1982) su alcuni *debris flow* svizzeri, con valori compresi tra 3 e 25 m^{1/3}/s.

Le equazioni sopra elencate sono risolvibili mediante il metodo delle caratteristiche che fornisce la seguente espressione:

$$x - C \cdot i^{1/2} \cdot (k+1) \cdot h^k \cdot t = \frac{L}{H} \cdot h$$

dove:

- C coefficiente di scabrezza equivalente;
- i pendenza del fondo alveo;
- k coefficiente numerico legato al raggio idraulico;
- L lunghezza dell'onda iniziale di debris-flow;
- H altezza dell'onda iniziale di debris-flow.

L'evoluzione dinamica di un processo di *debris-flow* viene così espressa analiticamente mediante le seguenti equazioni parametriche del fronte della colata nel piano (x,t) :

$$t_f = \frac{2A - \frac{L}{H} \cdot h_f^2}{2k \cdot C \cdot i^{1/2} \cdot h_f^{k+1}}$$

$$x_f = \frac{A \cdot (k+1)}{k \cdot h_f} + \frac{(k-1) \cdot L \cdot h_f}{2k \cdot H}$$

Il modello considera una possibile condizione iniziale di formazione del *debris flow*: una massa di detriti (di volume V_0) presente lungo l'asta torrentizia, di origine franosa o depositata da processi di colata detritica precedenti, viene fluidificata da una certa quantità d'acqua (corrente liquida o saturazione a seguito di abbondanti precipitazioni), generando in questo modo il fenomeno. La sezione longitudinale della massa di detriti viene schematizzata a forma di prisma a base triangolare e si assume che la forma d'onda della colata si mantenga tale, diminuendo di spessore in prossimità del fronte e appiattendosi quindi sempre più all'aumentare della progressiva considerata.

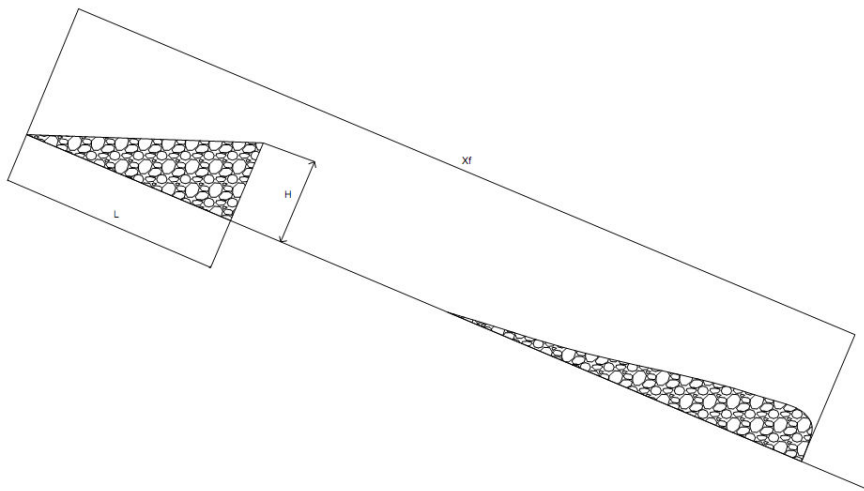


Figura 92 - Schematizzazione di *debris flow* adottato nella teoria dell'onda cinematica (Rosso, Cavallo, Sesenna et alii 2003)

Il modello matematico sviluppato contempla anche le variazioni di volume in seguito a contributi erosivi e/o deposizionali che si manifestano lungo l'asta torrentizia, ipotizzando un andamento di tipo esponenziale della funzione di volume proposta da Bianco e Rosso (Bianco e Rosso in Cellino 1993):

$$V_n = V_0 \cdot \left\{ \left(e^{bx_1} \right) \cdot e^{d \cdot [x_1 - x_{fn}]} \right\} \quad \text{se } i_n \leq i_c \quad (\text{deposito})$$

$$V_n = V_0 \cdot e^{b \cdot x_{fn}} \quad \text{se } i_n > i_c \quad (\text{erosione})$$

dove:

- V_n volume della colata in transito nel tratto n dell'asta torrentizia;
- V_0 volume iniziale;
- x_{fn} progressiva del fronte;
- i_c pendenza critica o di inizio deposito (alla progressiva x_1).

La valutazione della massima elongazione X_L raggiunta dalla colata nella zona di arresto è stata implementata nel codice di calcolo seguendo la trattazione teorica proposta da Takahashi (Takahashi 1978, 1981)

$$X_L = \frac{U_0^2}{G}$$

dove:

$$U_0 = U_u \cdot \cos(\theta - \theta_0) \cdot \left\{ 1 + \frac{[(\rho_s - \rho) \cdot C_{DU} \cdot k_a + \rho] \cdot \cos \theta}{2 \cdot [(\rho_s - \rho) \cdot C_{DU} + \rho]} \cdot \frac{g \cdot h_u}{U_u^2} \right\}$$

$$G = \frac{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot C_{DU} \cdot \cos \theta_0 \cdot \tan \alpha}{(\rho_s - \rho) \cdot C_{DU} + \rho} - g \cdot \sin \theta_0$$

con:

- U_u velocità assunta dalla colata all'apice del conoide o della zona di deposizione;
- θ pendenza del tratto di valle (zona di deposizione);
- θ_0 pendenza del tratto di monte;
- C_{DU} concentrazione dinamica della colata nel tratto di monte;
- ρ peso specifico dell'acqua;
- ρ_s peso specifico dei grani costituenti la colata;
- k_a coefficiente che quantifica l'azione della pressione attiva del terreno in corrispondenza della variazione di pendenza;
- h_u altezza del fronte di colata nel tratto di monte;
- α angolo di attrito interno dinamico.
-

DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO

Il codice implementato è stato sviluppato in ambiente MATLAB[®], allo stato attuale uno dei più diffusi tra gli strumenti matematici di calcolo utilizzati in ambito scientifico e, più in particolare, ingegneristico. Analogamente ad altri linguaggi di programmazione, MATLAB[®] include strutture logiche, relazionali, condizionali e cicli che permettono di controllare il processo di elaborazione, e fornisce all'utente un'interfaccia di facile comprensione e ricca di funzioni e utilità grafiche.

Il codice di calcolo sviluppato, permette di analizzare i principali parametri di un *debris flow* lungo un impluvio, in corrispondenza di una qualunque sezione di calcolo, in forma numerica sia tabellare che grafica.

I parametri in ingresso richiesti si suddividono in quattro tipologie:

- *volume iniziale d'innescò* (deposito in alveo o ammasso in frana): altezza massima, lunghezza, larghezza;
- *canale di deflusso*: geometria delle sezioni che descrivono il canale e loro collocazione in coordinate UTM (per la generazione del modello digitale dell'impluvio);
- *caratteristiche del debris flow*: coefficiente di scabrezza equivalente, funzione parametro di erosione (variabile lungo la progressiva x, potendo differenziare le condizioni geologiche del fondo e delle sponde del canale), parametro di deposito, pendenza critica di deposito;
- eventuali immissioni concentrate volumetriche lungo l'asta.

Attraverso la procedura di *back analysis* è possibile tarare i parametri di deposito ed erosione e il coefficiente di scabrezza equivalente del canale di deflusso. E' quindi necessario disporre di osservazioni in sito di eventi pregressi (altezza dei depositi di colata, aree preferenziali di deposito, di erosione, zona di arresto), oppure applicare i parametri già tarati su tipologie di fenomeni simili per dinamica e ambiente di formazione.

Il codice di calcolo restituisce sotto forma di diagrammi l'andamento delle velocità, dell'altezza del fronte e dei volumi della colata lungo tutto l'impluvio.

APPLICAZIONE DEL MODELLO AL CASO IN STUDIO

L'analisi dei dissesti condotta nell'ambito del presente lavoro ha permesso di evidenziare le zone caratterizzate da maggiore criticità, riconducibili agli apporti di materiale solido dovuti ai depositi presenti in alveo, lungo l'asta.

La metodologia adottata ha previsto una fase di calibrazione del modello mediante *back analysis* condotta sui dati dell'evento alluvionale del dicembre 2004.

In particolar modo è stato tenuto conto di una carta propedeutica alla calibrazione redatta sulla base della carta geomorfologica e sulla base inoltre dei sopralluoghi effettuati nell'immediato post evento con un gruppo di geomorfologi locali ed un gruppo di geomorfologi proveniente dal

CNR IRPI di Torino che ha consentito di redarre una carta contenente una planimetria (cfr. Allegato 3) dove sono illustrati i dati da inserire nel modello in termini di volumi ed altezze della colata.

CALIBRAZIONE DEL MODELLO

L'attendibilità dei risultati forniti dal modello di calcolo è funzione di una corretta calibrazione del modello, eseguita utilizzando tutte le informazioni che si possono ottenere mediante la *back analysis* di eventi pregressi.

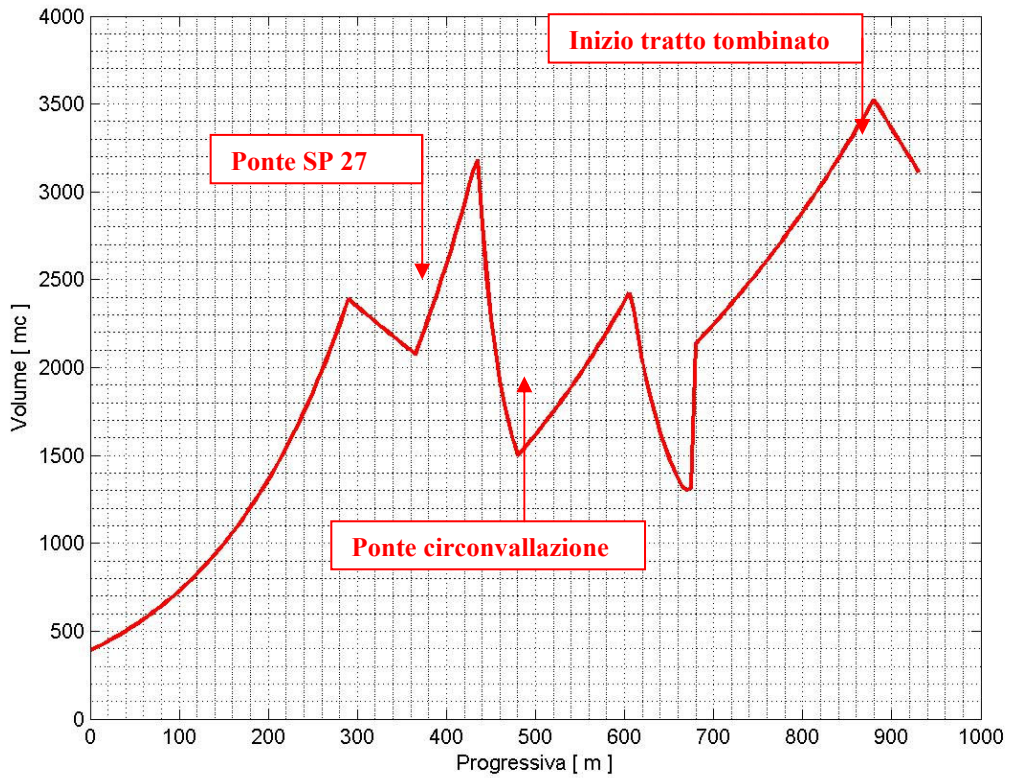
Il caso in studio presenta in particolare una situazione favorevole da questo punto di vista, poiché il fenomeno che viene simulato mediante il modello di calcolo si è già manifestato, in modo analogo, in concomitanza con l'evento alluvionale del dicembre 2004.

Le informazioni di base che hanno consentito di calibrare il modello numerico sono:

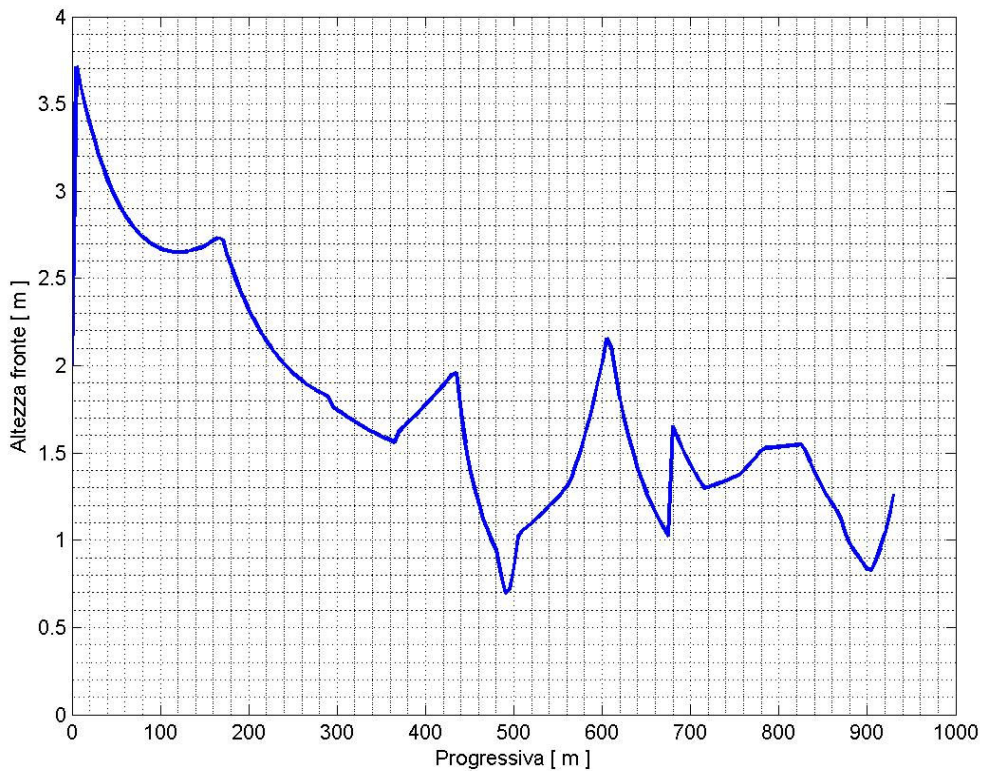
- definizione della geometria dell'alveo, mediante rilievi topografici ed integrazione con supporto cartografico;
- valutazione dei volumi di innesco e di eventuali contributi concentrati localizzati lungo l'asta;
- individuazione della pendenza critica caratteristica del tratto in studio, in base ad informazioni di tipo geomorfologico che hanno consentito di evidenziare le principali zone in erosione ed in deposito;
- taratura dei parametri di erosione e deposito, responsabili delle variazioni di volume della colata lungo il suo percorso: sono state utilizzate le informazioni alle analisi geomorfologiche di dettaglio;
- confronto dei risultati ottenuti con quanto riscontrato nell'evento del 2004.

I risultati sono riportati nelle figure seguenti. Il modello consente di ottenere l'andamento lungo l'asta torrentizia indagata delle variabili principali: volume, velocità e altezza del fronte. È possibile inoltre conoscere gli stessi parametri in corrispondenza delle sezioni trasversali.

Nella figura seguente viene rappresentato il volume cumulato della colata detritica lungo l'asta: si può osservare come il modello risponda in modo adeguato agli input forniti ricostruendo opportunamente quanto accaduto durante l'evento del dicembre 2004. Nelle figure successive si osservano inoltre rispettivamente, le altezze del fronte, le velocità lungo tutto il profilo dell'alveo e alcune sezioni caratteristiche con i battenti raggiunti dal debris flow.



**Figura 93 – Volume cumulo della colata detritica lungo l’asta del Rio S’Arrescottu
Calibrazione del modello–back analysis evento 2004**



**Figura 94 – Altezza del fronte della colata detritica lungo l’asta del Rio S’Arrescottu
Calibrazione del modello–back analysis evento 2004**



Figura 95 – Velocità della colata detritica lungo l’asta del Rio S’Arrescottu Calibrazione del modello-back analysis evento 2004

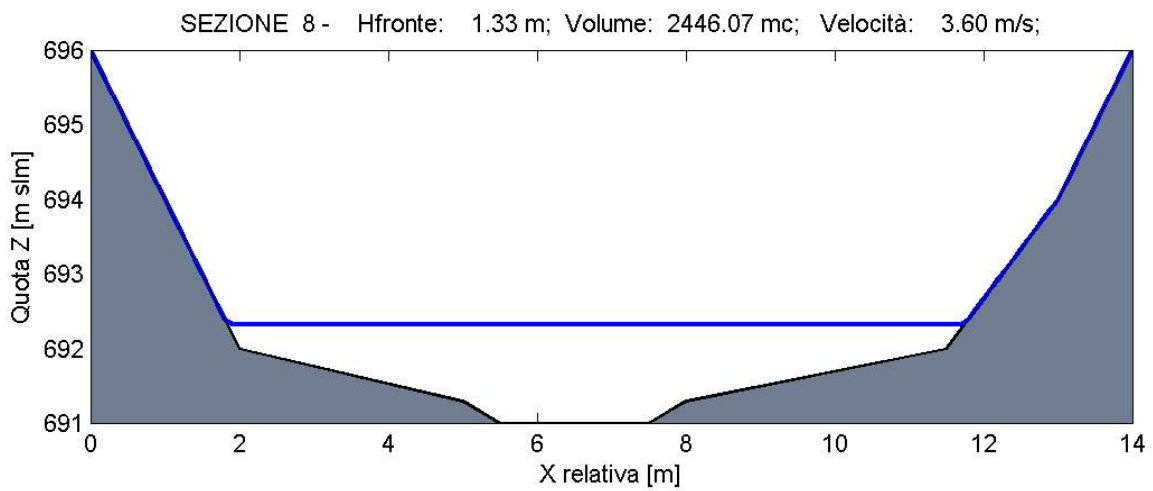
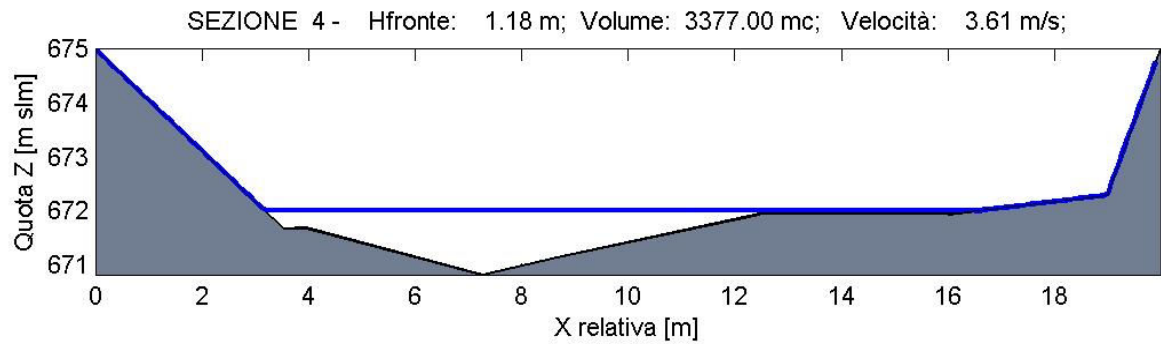


Figura 96 - Sezioni trasversali lungo l’asta del Rio S’Arrescottu Calibrazione del modello-back analysis evento 2004.

ANALISI IDRAULICA 2: MODELLAZIONE DEI FENOMENI DI COLATA DETRITICA CON METODI BIDIMENSIONALI TENENDO CONTO DELLA REOLOGIA DELLE ANALISI SPERIMENTALI

CODICE DI CALCOLO UTILIZZATO

Il codice di calcolo FLO – 2D, distribuito da FLO – 2D Software Inc., è un modello bidimensionale sviluppato sia per la simulazione di eventi di piena sia per specifiche applicazioni nell'ambito della modellazione di colate detritiche. Esso fa parte dei modelli idraulici approvati dal FEMA (Federal Emergency Management Agency) per questi tipo di studi.

La prima versione di FLO – 2D, chiamata mudflow, venne sviluppata a partire dal 1988 ed era costituita da poche centinaia di righe in linguaggio Fortran, limitando la simulazione a 250 celle. Dopo una quindicina di anni di studi, si è giunti ad un codice di calcolo in grado di simulare il deflusso fuori alveo in otto direzioni basandosi sul principio di conservazione della massa, avente efficienti criteri di stabilità numerica e un illimitato numero di celle in cui schematizzare canale e topografia del territorio circostante.

Per la modellazione di un sistema idrologico, FLO – 2D comprende una serie di componenti e di programmi che effettuano la simulazione attraverso un numero di piccole unità discrete, che sono le celle costituenti la griglia. Il codice di calcolo contiene poi elementi in grado di simulare le piogge, il deflusso nel canale, il deflusso esterno all'alveo e lungo le strade, l'infiltrazione, l'effetto di argini, ponti e di molti altri elementi che possono ostruire o propagare il regolare flusso di un evento di piena.

FLO – 2D simula il deflusso nel canale come un flusso monodimensionale attraverso la sezione dell'alveo di geometria nota; il deflusso lungo le strade viene considerato come un flusso monodimensionale lungo un canale rettangolare, mentre nelle aree circostanti si ha un flusso bidimensionale computato non appena si supera la capacità dell'alveo.

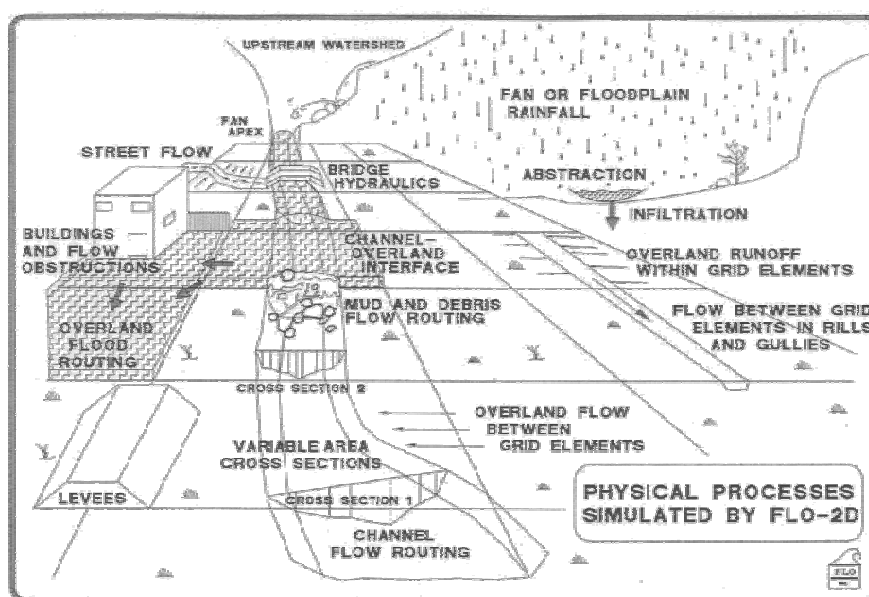


Figura 97 - Processi fisici simulati da FLO – 2D (O'Brien et alii 2006)

ASPETTI TEORICI DELLA MODELLAZIONE

FLO – 2D è un modello che si basa sull'equazione di conservazione del volume. Il codice di calcolo la utilizza attraverso una serie di celle per il deflusso in superficie e lungo il percorso che rappresenta il canale per il deflusso in alveo. La corrente fuori alveo è controllata dalla topografia e dalle resistenze al moto. La simulazione in due dimensioni è svolta attraverso l'integrazione numerica delle equazioni del moto e della conservazione del volume del fluido.

Di seguito sono riportate le formule che regolano il modello.

L'equazione costitutiva del fluido include l'equazione di continuità e l'equazione del moto bidimensionale, come riportato nelle formule seguenti:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h V_x}{\partial x} + \frac{\partial h V_y}{\partial y} = i$$
$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \cdot \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{V_y}{g} \cdot \frac{\partial V_x}{\partial y} - \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial V_x}{\partial t}$$
$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{V_y}{g} \cdot \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{V_x}{g} \cdot \frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial V_y}{\partial t}$$

dove:

- h = profondità della corrente;
- V_x = componente della velocità media lungo l'asse x;
- V_y = componente della velocità media lungo l'asse y;
- i = intensità della pioggia netta;
- S_{fx} = componente del fattore di resistenza al moto lungo l'asse x;
- S_{fy} = componente del fattore di resistenza al moto lungo l'asse y;
- S_{ox} = componente della pendenza dell'alveo lungo l'asse x;
- S_{oy} = componente della pendenza dell'alveo lungo l'asse y.

Le ultime due equazioni rappresentano le componenti di resistenza al moto scritte in funzione della pendenza di fondo, del gradiente di pressione e dei termini di accelerazione convettiva e locale; l'approssimazione con il metodo dell'onda diffusiva prevede che vengano trascurati gli ultimi tre termini dell'equazione, che sono quelli relativi all'accelerazione.

La rappresentazione bidimensionale delle equazioni del moto in FLO – 2D può essere meglio definita come quasi bidimensionale, in quanto il modello utilizza uno schema alle differenze finite basato su celle quadrate. L'equazione del moto è risolta calcolando la velocità media della corrente attraverso il confine di ogni singola cella, in una direzione alla volta. Ci sono otto potenziali direzioni, le quattro principali (nord, est, sud e ovest) e le quattro diagonali (nord-est, sud-est, sud-ovest e nord-ovest). Ogni calcolo relativo alla velocità è computato in modo monodimensionale ed è quindi risolto indipendentemente dalle altre direzioni.

La forma differenziale dell'equazione di continuità e dell'equazione di momento nel modello di FLO – 2D è calcolata con uno schema centrale alle differenze finite. L'algoritmo risolve l'equazione per la velocità attraverso il confine di cella per un elemento alla volta. Gli schemi numerici espliciti sono semplici da formulare ma spesso sono limitati all'utilizzo su brevi intervalli temporali da severi criteri di stabilità numerica.

Il dominio delle soluzioni è discretizzato anch'esso in celle quadrate, la procedura di calcolo per il deflusso in superficie comprende il calcolo della portata attraverso ciascuno dei confini di cella nelle otto potenziali direzioni della corrente. Per ciascun elemento della griglia, il calcolo idraulico inizia con la stima della profondità della corrente sul confine della cella, come media delle profondità nei due elementi che si spartiranno la portata. Gli altri parametri idraulici mediati nel computo sono la velocità della corrente, il coefficiente di scabrezza di Manning, l'area di deflusso, la pendenza, la quota del pelo libero e il contorno bagnato.

La velocità della corrente nella piana alluvionale è la variabile dipendente. FLO – 2D risolve ciascuna delle equazioni dell'onda diffusiva o dell'onda dinamica per il calcolo delle velocità; l'equazione di Manning è poi applicata in una direzione usando la differenza media tra le pendenze del pelo libero della corrente.

Scegliendo il metodo dell'onda diffusiva, la velocità è poi computata per ciascuna delle otto potenziali direzioni della corrente per ogni cella. Se si utilizza, invece, l'onda dinamica per le equazioni di momento, la velocità così calcolata diventa una prima approssimazione nel metodo delle tangenti di second'ordine di Newton – Raphson (Raphson et alii 1990) per determinare le radici dell'equazione dell'onda dinamica che è di secondo ordine, non lineare e alle differenze parziali. Il termine locale di accelerazione è la differenza nella velocità per una data direzione di flusso che si registra rispetto al precedente istante temporale. L'accelerazione convettiva è valutata come differenza della velocità della corrente attraverso il singolo elemento della griglia rispetto al passo temporale precedente. Per esempio, il termine di accelerazione locale $[(1/g) \cdot (\partial V / \partial t)]$ per la cella 3503 nella direzione est è pari a:

$$\frac{\Delta(V_t - V_{t-1})_{3503}}{(g \cdot \Delta t)}$$

dove:

V_t = velocità nella direzione est per la cella 3503 al tempo t;

V_{t-1} = velocità nella direzione est per la cella 3503 al precedente passo temporale (t-1);

Δt = intervallo temporale espresso in secondi;

g = accelerazione di gravità.

Una costruzione simile può essere fatta per riassumere il calcolo dell'accelerazione convettiva.

La portata attraverso il confine della cella è calcolata moltiplicando la velocità per la sezione di deflusso. Dopo aver calcolato la portata per tutte le otto direzioni, la differenza netta in portata, in ingresso o in uscita dalla cella, è moltiplicata per l'intervallo temporale al fine di

determinare la differenza in volume. In riferimento alle convenzioni di segno indicate, la portata netta per la cella n°6 sarà:

$$\pm Q_{13} - Q_{14} \pm Q_{15} \pm Q_2 \pm Q_7 + Q_2 \pm Q_3 \pm Q_4 = A_6 \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t}$$

La differenza netta in volume viene poi divisa per la superficie della cella disponibile per il suo immagazzinamento, al fine di ottenere l'incremento o il decremento della profondità della corrente per l'istante temporale considerato. La metodologia di calcolo della portata lungo il canale è strutturata in un modo molto simile, tranne per il fatto che la profondità della corrente è una funzione della geometria della sezione trasversale del corso d'acqua e che, in genere, si ha un'unica cella a monte e un'unica cella a valle di quella considerata.

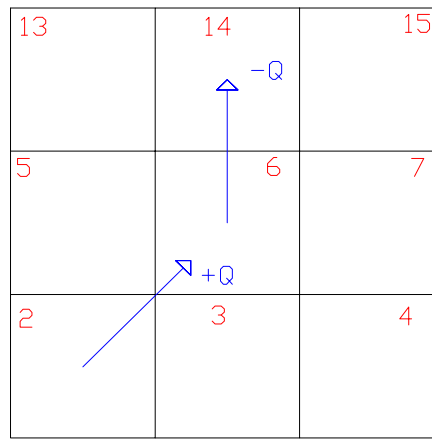


Figura 98 – Flusso di portata attraverso il confine di un elemento di cella (O'Brien et alii 2006)

CRITERI DI STABILITÀ NUMERICA

La chiave di un'efficiente procedura di calcolo alle differenze finite risiede nei criteri di stabilità numerica che limitano l'ampiezza del passo temporale. Essi sono controllati affinché per ciascuna cella e ad ogni intervallo di tempo, la soluzione del modello converga e sia stabile. Il criterio di stabilità utilizzato da FLO – 2D per il calcolo della portata nel canale, nelle zone alluvionali e lungo le strade è la condizione di Courant – Friedrich – Lewy (CFL) (Courant et alii 1928, 1967) che correla la velocità della corrente agli incrementi spaziali e temporali del modello. Il passo temporale è limitato da:

$$\Delta t = \frac{C \cdot \Delta x}{(v + c)}$$

dove:

C = numero di Courant < 1.0;

Δx = larghezza della cella;

v = velocità media calcolata nella sezione trasversale;

c = velocità di propagazione dell'onda.

Per la simulazione con l'onda dinamica, è utilizzato un altro gruppo di criteri di stabilità sviluppato da Ponce e Theurer (Ponce & Theurer 1982) ed è espresso come:

$$\Delta t < \frac{\zeta \cdot S_o \cdot \Delta x^2}{q_o}$$

dove:

q_o = portata unitaria;

S_o = pendenza dell'alveo;

ζ = coefficiente empirico.

COSTRUZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO

Le principali caratteristiche del modello FLO – 2D sono:

- l'attenuazione dell'onda di piena può essere analizzata attraverso il calcolo dell'idrogramma;
- il flusso esterno all'alveo su superfici non delimitate è schematizzato in otto direzioni;
- il flusso nelle zone di inondazione può essere simulato su una complessa topografia e differenti coefficienti di scabrezza;
- può essere simulato il deflusso lungo il canale, le strade e le celle esterne ad esso calcolando anche i reciproci scambi;
- il canale è identificato da una sezione a geometria rettangolare, trapezia o irregolare;
- il deflusso lungo le strade può essere assimilato a quello lungo un canale rettangolare;
- il regime della corrente può essere sia subcritico che supercritico;
- possono essere simulati effetti di rientro della portata all'interno del canale;
- possono essere modellati gli effetti di ostruzioni al normale deflusso della corrente costituito da edifici, muri, argini che modificano la capacità di immagazzinamento della singola cella e deviano il percorso dell'acqua;
- la portata che transita sotto un ponte o attraverso una tubazione può essere analizzata mediante delle curve esprimenti la relazione tra portata e altezza idrometrica;
- il numero di celle e di elementi del canale è illimitato.

GRIGLIA DI CELLE QUADRATE

Il primo passo per creare il modello in FLO – 2D è stato quello di discretizzare le superfici topografiche di interesse in celle di dimensione note tali per cui fosse ottimale il compromesso di velocità computazionale del modello e di affidabilità ed esattezza dei risultati ottenuti. Dato di partenza su cui effettuare la discretizzazione spaziale del modello è stato il modello digitale di elevazione del terreno (DEM), ricavato come sopra visto, che determina una griglia di celle di coordinate ed elevazione nota.

La maglia offerta dal DEM è risultata, nella sua precisione, essere troppo fitta per allestire un modello di simulazione in Flow-2D. Il programma ha permesso quindi di determinare una maglia di celle di dimensione 10 m x10 m scelta attraverso l'interpolazione delle quote rilevate dal DEM. È stata dunque ottenuta una griglia di celle identificate numericamente, definendo per ciascuna di essa la quota.

Il passo successivo è stato l'assegnazione di un coefficiente di scabrezza caratteristico e univoco per ogni cella. Tale processo è stato effettuato sovrapponendo la griglia di celle ad alcune ortofotocarta e verificando da sopralluogo l'esattezza dei valori di Manning assegnati e la presenza di univocità non rilevabili direttamente dall'analisi delle immagini aeree.

Le celle, che si trovano ai bordi del reticolo, sono state elencate nel file FPINOUT.DAT per far sì che da esse la portata in ingresso potesse comunque uscire verso l'esterno. Se le celle interessate non venissero indicate in questo modo si creerebbe infatti un effetto di invaso ai margini della griglia in quanto l'acqua non riuscirebbe a defluire dal reticolo.

DEFLUSSO SUPERFICIALE

Il deflusso superficiale, essendo la tipologia più semplice di deflusso, richiede soltanto la definizione della topografia e di un idrogramma, ed è simulato in otto possibili direzioni, come se ogni cella quadrata venisse considerata come un ottagono.

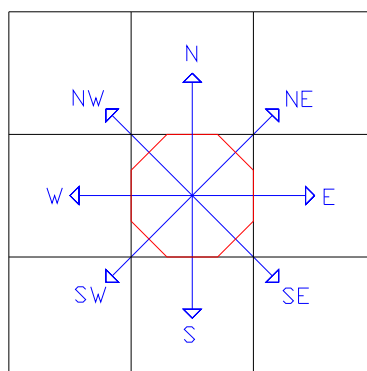


Figura 99 – Calcolo del deflusso superficiale nelle otto direzioni (O'Brien et alii 2006)

Nel file FPLAIN.DAT è stata definita la potenziale superficie di deflusso tramite la creazione dello schema di celle, ciascuna caratterizzata da una quota e da un valore di

scabrezza, mentre nel file CADPTS.DAT sono state definite le coordinate x e y dei baricentri delle singole celle.

Il codice di calcolo ha quindi consentito di modificare la capacità di immagazzinamento di ogni singola cella introducendo un fattore di riduzione dell'area (ARFs). In alternativa è stato possibile tenere conto del fatto che una o più direzioni di deflusso possano essere state ostruite da ostacoli. In particolare le celle in prossimità del canale che coinvolgono la presenza di una o più costruzioni sopraelevate, case ed edifici in genere, sono state trattate riducendo la superficie di deflusso e bloccando alcune direzioni preferenziali di deflusso.

DEFLUSSO NEL CANALE

Il deflusso nel canale è stato simulato come un flusso monodimensionale utilizzando l'approssimazione dell'onda dinamica dell'equazione di momento. L'alveo è quindi stato descritto attraverso un insieme di celle inserito in un file di input denominato CHAN.DAT dove sono stati immessi gli elementi della griglia che definiscono la posizione del canale, i punti rappresentativi della linea di *thalweg*, i punti rappresentanti la sponda destra, la sponda sinistra, la scabrezza media e la lunghezza del canale all'interno di ogni singola cella.

Nei punti dove la larghezza del canale risulta maggiore della dimensione di una cella, occupando più elementi trasversali, il modello espande automaticamente il canale anche nelle celle contigue nella direzione specificata dall'utente.

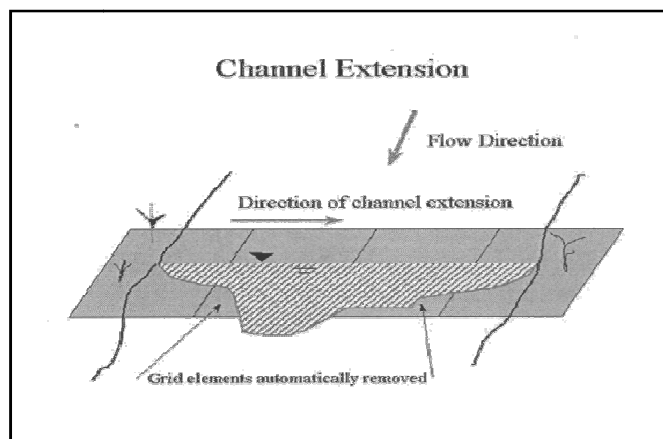


Figura 100: Estensione del canale su più celle (O'Brien et alii 2006)

Un ulteriore file, chiamato XSEC.DAT, è stato creato per contenere le coordinate dei punti che definiscono geometricamente le sezioni da assegnare alle relative celle del canale. Per definire, infine, le condizioni di monte e di valle, è stata necessaria la creazione di un file CINOUT.DAT, dove è stato anche possibile introdurre i dati relativi all'idrogramma in ingresso e specificare le celle dalle quali la portata esce dal sistema.

INTERFACCIA CANALE – AREA DI ESONDAZIONE

Quando la capacità di trasporto del canale o di una strada non è stata più sufficiente a contenere l'onda di piena durante la simulazione, la portata che esce dagli argini è stata valutata con un programma apposito di interfaccia tra canale e aree di esondazione. Il calcolo della portata che fuoriesce dal canale o che vi rientra è infatti basato sulla differenza di quota del pelo libero dell'acqua tra canale e aree esterne ad esso.

Finché la portata nel canale è risultata essere inferiore a quella a pieni argini, il sottoprogramma di interfaccia non è entrato in funzione, essendo interno al programma non ha richiesto infatti l'inserimento di dati e ha computato gli scambi di portata avvenuti inoltre tra le aree di esondazione ed il reticolo stradale. Il deflusso nelle zone di esondazione è stato invece calcolato attraverso l'equazione dell'onda diffusiva.

STRUTTURE IDRAULICHE

Le strutture idrauliche sono state simulate attraverso una curva che lega portata e altezza idrometrica con le scale di deflusso, e comprendono ponti, tubazioni, traverse, sfioratori e ogni altro manufatto idraulico che controlli il trasporto fluido. FLO – 2D ha consentito la simulazione degli effetti di rigurgito a monte dei ponti e dei culverts che costituiscono il tombinamento del canale.

I ponti possono essere identificati dalla loro posizione sulla griglia, specificata poi nel file di input BRIDGE.DAT. La curva di portata è espressa dalla relazione:

$$Q = a \cdot h^n$$

dove:

a = coefficiente di regressione;

n = esponente di regressione.

Per ogni struttura possono essere specificate più relazioni come la precedente a patto che vengano definiti i limiti di profondità della corrente all'interno dei quali ciascuna di esse è valida. E possibile anche specificare una tabella che riporti la scala di deflusso relativa alla struttura, affinché il modello possa interpolare tra i vari valori di profondità e di portata per il calcolo di quest'ultima grandezza.

STRADE

Il deflusso lungo una strada è simulato paragonando la rete viaria ad una serie di canali rettangolari di altezza pari all'altezza del marciapiede, pertanto l'algoritmo di calcolo della portata di deflusso è uguale a quello usato per il corso d'acqua.

Il file di input è chiamato STREET.DAT ed è organizzato per strade. Ogni cella può contenere una o più strade e le stesse possono intersecarsi. Sono state individuate le diverse strade, il numero delle celle occupate dalle stesse, la loro larghezza e il coefficiente di scabrezza che le caratterizza.

Nel caso in cui l'altezza d'acqua nelle strade superi l'altezza del marciapiede, si ha un deflusso nelle zone limitrofe che tuttavia può rientrare più a valle nella rete viaria. Si considera che il deflusso nelle strade venga valutato dal baricentro della cella in esame verso il baricentro delle celle circostanti che si trovano nelle otto direzioni di deflusso e per le quali sono state definite le strade.

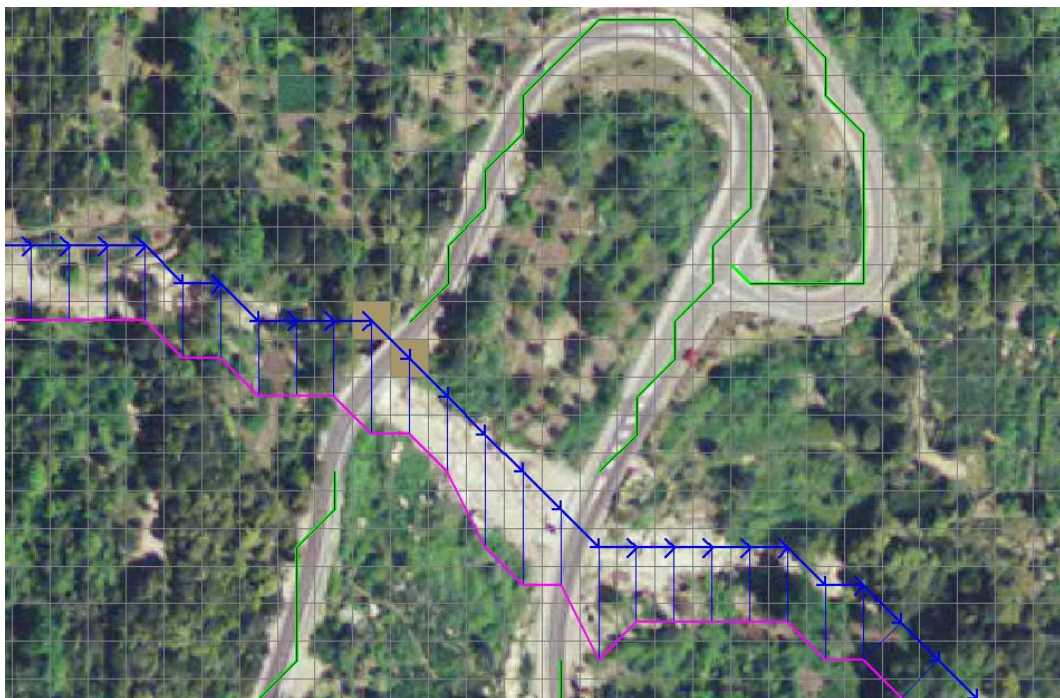


Figura 101 - Rappresentazione delle strade nel modello bidimensionale

ARGINI

All'interno del modello bidimensionale è possibile inserire degli argini, impostati in maniera tale che siano impediti alcune direzioni di deflusso fino ad una certa quota. Queste direzioni di deflusso bloccate permettono di modellizzare la presenza di muri, argini fluviali non rappresentati nelle sezioni, impedimenti etc. Essendo l'unica parte di canale vincolata da un muro in sponda destra, quella a monte del culvert che attraversa la via Roma, posto ad un dislivello importante rispetto alle quote a monte del rio S'Arrescottu, non è stata utilizzata questa opzione per la simulazione sull'evento.

RIDUZIONE DELLE AREE DELLE CELLE DEL RETICOLO

Le celle che racchiudono al loro interno edifici, rilevati e strutture in generale che impediscono il flusso in maniera anche solo parziale lungo una o più direzioni preferenziali, possono essere calibrate imponendo la riduzione percentuale di area della cella legata alla presenza ad esempio di una casa e le direzioni di deflusso con la connessa percentuale di riduzione di sezione disponibile che vengono parzialmente occluse al deflusso idrico.

Le celle che presentano queste caratteristiche, persistenti nel modello di calibrazione in particolare nelle zone maggiormente antropizzate, devono conseguentemente essere accuratamente modellate all'interno dell'ARF.DAT.

Il programma permette di evidenziare l'effetto della loro riduzione della superficie e della sezione di deflusso nelle differenti direzioni attraverso un programma di visualizzazione, come mostrato nella figura seguente.

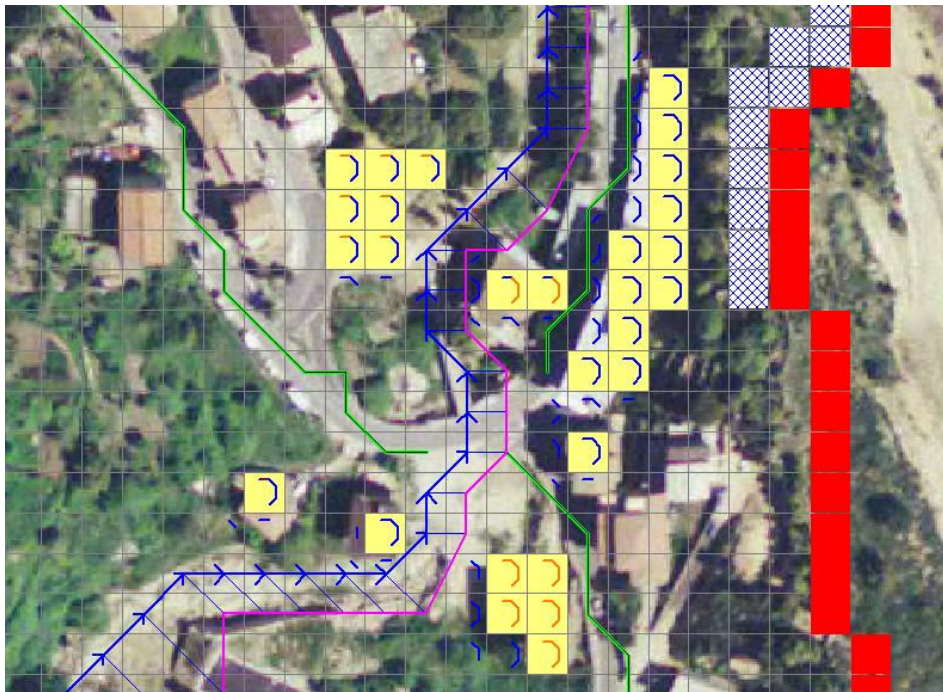


Figura 102 - Rappresentazione delle zone a riduzione di area e direzione di deflusso parzialmente impedita

SIMULAZIONE DELLA COLATA DI DETRITO

La simulazione della colata di detrito può essere determinata mediante il modello bidimensionale attraverso l'inserimento dei parametri reologici della colata e l'inserimento dell'andamento della concentrazione della colata al variare del tempo.

L'analisi ha richiesto inizialmente un inquadramento generale degli aspetti teorici e sperimentali connessi ai fenomeni di *debris flow*, con particolare riferimento alla metodologia di

determinazione del debrisgramma, ovvero del grafico che rappresenta la variazione di portata della colata nel tempo.

In seguito si è analizzato nel dettaglio l'evento occorso nel 2004, caratterizzando la situazione di dissesto dal punto di vista geologico e idraulico. In merito all'evento alluvionale non soltanto viene individuata la dinamica associata, ma sono censiti i principali effetti registrati sulle aree antropizzate.

DETERMINAZIONE DEL DEBRISGRAMMA

Uno degli aspetti determinanti per l'analisi di un fenomeno di colata detritica, nell'ottica di una corretta definizione dei fenomeni che potenzialmente si possono manifestare, è rappresentato dalla costruzione del "debrisgramma", ovvero del grafico che rappresenta la variazione di portata della colata nel tempo.

Le caratteristiche e l'entità del debrisgramma dipendono in generale dall'apporto di portata liquida dell'evento a cui sono correlate, ovvero dall'idrogramma di piena; partendo da teorie in cui si ipotizza la disponibilità illimitata del sedimento, occorre successivamente calibrare il risultato in funzione della reale propensione al dissesto dell'asta torrentizia in termini di disponibilità di materiale potenzialmente erodibile.

L'analisi idrologica è pertanto propedeutica allo studio dei fenomeni di colate detritiche: una volta ottenuto l'idrogramma della portata liquida corrispondente all'evento considerato, si è in grado di stimare i volumi solidi e liquidi dei *debris flow* utilizzando le metodologie ed i criteri proposti in letteratura.

Secondo la metodologia utilizzata per il calcolo del volume e della portata di picco e del *debris flow* la formulazione da utilizzare è quella proposta da Takahashi (Takahashi 1991):

$$Q_{d\max} = Q_{l\max} \frac{C^*}{C^* - C}$$

La formula è altrimenti esprimibile come:

$$Q_{d\max} = Q_{l\max} k$$

$$k = \frac{C^*}{C^* - C}$$

dove con C^* si indica la concentrazione volumetrica di massimo impaccamento o la concentrazione statica dei sedimenti, ossia la concentrazione prima che l'ammasso si mobiliti.

Il valore di C^* , secondo numerose fonti di letteratura, vale 0.65 – 0.7; C indica invece la concentrazione volumetrica di equilibrio del fronte stazionario della colata in movimento.

La condizione imposte da D'Agostino (D'Agostino 1996) e l'utilizzo della formulazione di Takahashi non sono estendibili a condizioni di dissesto che interessano il distacco di una coltre di materiale al di fuori dei limiti del corpo idrico di interesse.

Le formulazioni proposte per la determinazione della concentrazione di equilibrio sono quelle di seguito proposte:

- Formulazione di Takahashi (Takahashi 1981)

$$C = \frac{\rho \tan \beta}{(\rho_s - \rho)(\tan \varphi - \tan \beta)}$$

- Formulazione di Ou Mizuyama (Ou & Mizuyama 1994)

$$C = \frac{4.3C_*\rho(\tan \beta)^{1.5}}{1 + 4.3C_*(\tan \beta)^{1.5}}$$

- Formulazione di D'Agostino (D'Agostino 1996, 2006, Marchi & D'Agostino 2004)

$$C = \frac{2.9C(\tan \beta)^2}{2.9(\tan \beta)^2 + 1}$$

Se si effettua un'analisi in funzione delle condizioni della colata nella zona di innesco della frana generalmente si utilizza la formulazione di Takahashi, mentre se si effettuano le indagini nelle zone di fondo del bacino allora generalmente ci si affida alle formulazioni di Mizuyama o di D'Agostino. La differenza delle diverse formulazioni risiede nella realizzazione dell'idrogramma di piena. Generalmente la formulazione di Takahashi fornisce valori superiori della costante K per la quale moltiplicare il valore di picco dell'idrogramma di piena, determinando condizioni più cautelative circa l'entità della colata di detrito.

In alcuni casi, come in quello considerato, la concentrazione può essere desunta da dati sperimentali. In ogni modo, i tre metodi consentono di determinare le portate solide a seguito di eventi pluviometrici parossistici che producono una ingente precipitazione causa di una portata liquida in grado di mobilitare l'ammasso. La condizione di partenza, considerata implicitamente all'interno della formulazione di cui sopra, è che l'ammasso sia saturo.

Formulazione che può essere presa in considerazione nel caso in cui l'ammasso si dimostri non imbibito di acqua è quella proposta da Costa (Costa 1984):

$$Q_{d \max} = \frac{Q_{l \max}}{1 - C_{s-vol}}$$

dove con C_{s-vol} si indica la concentrazione solida volumetrica della colata detritica.

Le formulazioni per il calcolo della C , ossia della concentrazione solida volumetrica all'equilibrio del fronte stazionario, sono funzioni essenzialmente delle caratteristiche geomeccaniche del sedimento e della pendenza dell'alveo, oltre che della densità dell'acqua e della densità del solido. Le formulazioni di Takahashi e di Ou Mizuyama sono funzione anche del valore della concentrazione statica C^* , imposta come detto pari a 0.65-0.7. Grazie a una formulazione empirica elaborata da D'Agostino, è stato possibile passare dall'andamento dell'idrogramma a quello del debrisgramma. Essa infatti si basa sull'istante per il quale si verifica la mobilitazione del materiale. La mobilitazione del materiale dipende dalla portata critica, ossia dalla portata per la quale si ha l'instaurarsi del fenomeno di colamento per effetto dell'azione di trasporto della portata liquida. Il valore di portata liquida iniziale di soglia, al di sopra della quale si attivano i movimenti di particelle solide e il trasporto solido, è stata valutata mediante la formulazione di Schoklitsch (Schoklitsch 1957)

$$Q_{cr} = 0.26 \cdot \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)^{5/3} \cdot \frac{d^{3/2}}{S^{7/6}} \cdot B = 0,6 \cdot B \cdot \frac{d^{3/2}}{S^{7/6}}$$

dove:

B = larghezza del canale di flusso, espressa in m;

d = diametro dei grani, espresso in metri;

S = pendenza motrice.

Il picco di *debris flow* è determinato calcolando la condizione di massimo in corrispondenza del massimo valore di portata idrica. In genere il valore di C_v non supera mai il valore di C^* , ossia assume come limite superiore il valore di $0.9 C^*$. Conseguentemente, il valore di picco della portata solida per il debrisgramma non supera mai la condizione di $10Q_{cr}$.

DEFINIZIONE DEL DEBRISGRAMMA DELL'EVENTO PER IL RIO S'ARRESCOTTU

La definizione del debrisgramma è propedeutica, come detto, all'applicazione dei modelli di dettaglio sviluppati in seguito.

La ricostruzione del debrisgramma è stata effettuata mediante la metodologia proposta da Takahashi (Takahashi 1991), ritenuta la più realistica in funzione della concentrazione volumetrica stimata nelle analisi sperimentali e in funzione della concentrazione di massimo impaccamento per il bacino del rio S'Arrescottu. I parametri di input per l'ottenimento del debrisgramma elaborato sono sintetizzati nella tabella seguente:

Sezione di chiusura	Picco di portata liquida m^3/s	Concentrazione
valle	23,41 m^3/s	0,55

Tabella 22 – Parametri di input per la definizione del debrisgramma

Il parametro che influenza maggiormente la portata di picco del debrisgramma è la concentrazione di equilibrio. L'analisi ha dunque elaborato un approfondimento specifico sul valore di concentrazione da utilizzare come sopra evidenziato, attraverso un metodo iterativo che ha previsto la verifica dei valori massimi di portata in funzione dei valori di altezza di picco e velocità di altezze di flusso calcolati col metodo idraulico cinematico attraverso il software DB PREV[®]. Il parametro di concentrazione è stato infatti calibrato, utilizzando il valore sperimentale di 0,55 che ha dato la migliore corrispondenza tra i valori dello sviluppo della colata ottenuti con il metodo monodimensionale.

In funzione dell'andamento dell'idrogramma di portata liquida derivata dai dati rilevati dal pluviometro di Villagrande Strisaili nel giorno 6 dicembre 2004 come sopra visto, ed inserendo nella parte corrispondente al massimo picco di portata una relazione che tenga conto gradualmente dell'aumento della concentrazione volumetrica C_v , sino ad arrivare a quella stimata per la colata detritica di 0,55, è stato ricavato quindi il debrisgramma corrispondente all'evento parossistico oggetto di studio.

Questo incremento di C_v è stato elaborato precedentemente all'inserimento dei dati nel codice di calcolo in modo che, una volta inserito l'idrogramma nel software, fosse possibile ottenere direttamente l'andamento desiderato del debrisgramma. In questo modo si è potuto simulare meglio quello che è stato il reale sviluppo della colata dell'evento. La maggior parte del volume solido interessato dalla colata si è movimentato infatti in corrispondenza del picco delle portate liquide, quando sono collassate le coltri di detrito in alveo a partire dalla sezione alla quota di 842 m s.l.m, individuata in Figura 28 come zona di innesco della colata.

Quest'analisi è stata effettuata in funzione della considerazione che l'evento di colata che ha interessato il bacino del rio S'Arrescottu, a causa della composizione dei materiali movimentati e delle caratteristiche geomorfologiche del territorio, è stato caratterizzato da uno

sviluppo di tipo lava torrentizia, *mud debris flow*, con una prevalenza di materiali franco sabbiosi portati in sospensione dalla massa fluida, ben diversi dai fluidi propriamente pseudo plastici caratterizzanti i fenomeni di *debris flow* che ad esempio si manifestano in ambienti alpini.

Il debrisgramma ottenuto ha una forma molto impulsiva caratterizzata da un andamento della campana stretta sull'asse dei tempi che raggiungere in brevissimo tempo il picco di portata stimabile in 149,9 m³/s.

La durata della sollecitazione impulsiva è di circa 10 minuti e si colloca in corrispondenza dell'arrivo della massima portata liquida. La durata breve con cui si manifesta la colata e l'andamento del debrisgramma estremamente impulsivo è perfettamente rappresentativo della condizione reale di formazione e di propagazione di questo tipo di fenomeni.

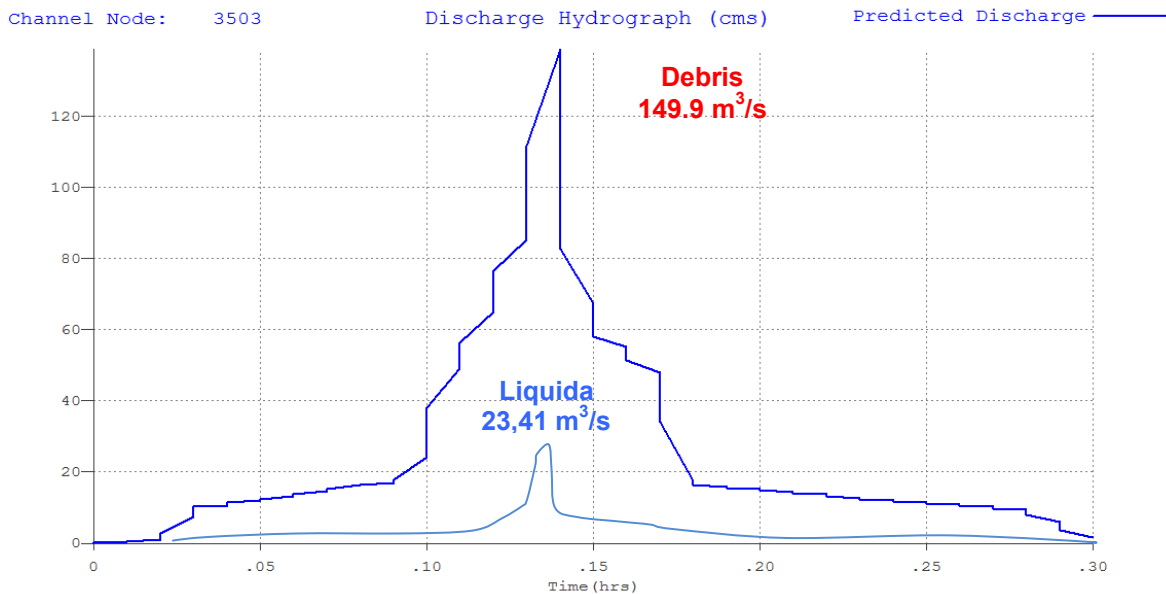


Figura 103 – Debrisgramma dell'evento calcolato con la Cv 0,55 e calcolato con il metodo di Takahashi.

Il modello determina il valore della portata complessiva come somma della portata liquida in ingresso e della portata solida calcolata come percentuale della portata totale e quindi della portata liquida secondo la formulazioni proposta da Costa come prima vista e di seguito riportata:

$$Q_s = C \cdot Q_{Tot}$$

$$Q_s = Q_l / (1 - C_{s-vol})$$

È stato quindi necessario calcolare preventivamente la relazione tra la formulazione proposta da Costa e quella proposta da Takahashi, essendo il software Flo 2D un codice commerciale sviluppato in Fortrand non modificabile dagli utenti.

Come detto, il comportamento reologico della colata deve essere definito per abilitare il processo computazionale del modello bidimensionale. L'approccio migliore è quello di trattare il

flusso come un materiale continuo, combinazione della componente di sedimenti e della componente di materiale solido.

Il comportamento di una colata iperconcentrata determina l'interazione di numerosi processi fisici. In aggiunta alla turbolenza ed alla viscosità del fluido occorre tenere in considerazione l'interazioni tra le particelle di sedimento ed il fluido e tra l'interazione tra gli stessi sedimenti che lo compongono. Questi, infatti, possono collidere tra loro, rotolare, ruotare e vibrare nel loro moto, agendo gli uni sugli altri.

I parametri maggiormente significativi della colata di detrito sono lo sforzo tangenziale τ e la viscosità dinamica η , parametri caratteristici della colata che definiscono le dinamiche di interazione fluido-solido e solido-solido. In dipendenza dalle proprietà della matrice fluida considerata, viscosità e sforzo tangenziale per alte concentrazioni possono essere correlate allo sforzo turbolento associato alle alte velocità.

In analogia con il lavoro di Meyer-Peter e Muller (Meyer-Peter & Müller 1948) e con quanto effettuato da Einstein (Einstein 1942) la relazione che determina lo sforzo tangenziale nel modello bidimensionale Flow - 2D, è integrata con il termine di battente e riscritta nella seguente forma:

$$S_f = S_y + S_v + S_{td}$$

dove la pendenza totale di attrito è la somma delle varie componenti:

- S_y la pendenza di soglia;
- S_v la pendenza viscosa;
- S_{td} la pendenza turbolenta-dispersiva.

il termine S_f deve quindi essere determinato in funzione della seguente equazione:

$$S_f = \frac{\tau_y}{\gamma_m \cdot h} + \frac{K \cdot \eta \cdot V}{8\gamma_m \cdot h^2} + \frac{n_{td} \cdot V^2}{h^{4/3}}$$

dove

- K indica il parametro di resistenza per il flusso laminare;
- τ_y indica lo sforzo tangenziale di snervamento o di soglia;
- γ_m indica il peso specifico della miscela di sedimento;
- η indica la viscosità dinamica;
- V indica la velocità media;
- h indica il battente;
- n_{td} indica il parametro di resistenza al flusso.

Una soluzione quadratica all'equazione è definita nella routine di calcolo di Flow - 2D, la velocità è calcolata per ogni cella negli elementi di contorno usando il battente medio calcolato tra due celle adiacenti. Il valore di γ aumenta all'aumentare della concentrazione solida. Lo sforzo di taglio τ_y e la viscosità η variano principalmente con la concentrazione del sedimento.

La seguente relazione empirica definisce la legge esponenziale che lega i due termini poc'anzi definiti in funzione della concentrazione.

$$\eta = \alpha_1 \cdot e^{\beta_1 \cdot C_v} \quad \tau_y = \alpha_2 \cdot e^{\beta_2 \cdot C_v}$$

Il comportamento di colate di detrito è quindi funzione delle proprietà della matrice solida, delle caratteristiche del canale, della pendenza e della rugosità dello stesso.

Per simulare le colate di detrito occorre inserire lo *switch* all'interno del CONT.DAT file e devono essere assegnati i parametri α_i e β_i delle due curve di modellazione di η e τ all'interno del file SED.DAT.

In aggiunta occorre inserire una concentrazione volumetrica del sedimento associata all'idrogramma in ingresso per ogni step temporale, riportandola all'interno del file CINOUT.DAT. L'incremento del volume solido è calcolato per ogni step di calcolo e sommato al volume liquido, riportando i risultati complessivi delle due routine all'interno della tabella di sommario della conservazione del volume.

α_1 (Poise)	β_1	C_v	η max (PA*s)
0.00283	11,312	0.55	1,424
α_2 (Poise)	β_2	C_v	τ max (PA)
0.0013	20,6637	0.55	112,12

Tabella 23 – Valori di τ e η e dei coefficienti delle curve esponenziali ad essi legate utilizzati nel modello bidimensionale

COEFFICIENTI DI SCABREZZA

La caratterizzazione del coefficiente di scabrezza dell'alveo nel tratto in esame è determinata dalla scelta del parametro n di Manning, espresso in $s/m^{1/3}$. Tale coefficiente dipende in generale dalla granulometria del materiale presente in alveo, dalla regolarità delle sezioni, dall'andamento planimetrico del corso d'acqua più o meno rettilineo, dalle caratteristiche idrauliche delle sponde, dalla pendenza dell'alveo nonché dalla circostanza che il materiale presente sul fondo partecipi o meno al moto complessivo.

In letteratura esistono alcune formule che esprimono il coefficiente di scabrezza come funzione delle caratteristiche medie del materiale di fondo alveo, con espressioni logaritmiche derivate dalla teoria della turbolenza che correlano l'altezza assoluta di scabrezza al diametro medio del materiale di fondo alveo. Tutte le formule di questo tipo sono applicabili nell'ipotesi che l'altezza assoluta di scabrezza sia una frazione minore dell'altezza d'acqua nella sezione.

I parametri di scabrezza da utilizzare nel calcolo idraulico devono tenere conto delle reali e documentabili condizioni di manutenzione del corso d'acqua. Tali valori di parametro di scabrezza devono essere desunti da quelli individuati nella tabella seguente.

Descrizione corso d'acqua	Coeff. di scabrezza di Gauckler – Strickler K_s ($m^{1/3}/s^{-1}$)
Tratti di corso d'acqua naturali con salti, rocce o vegetazione anche arbustiva – arborea in alveo	25 – 30
Corsi d'acqua naturali con vegetazione e movimento di materiale sul fondo	30 – 35
Tratti urbanizzati di corsi d'acqua naturali con argini cementati (e/o platee) in buono stato	35 – 40
Corsi d'acqua con fondo ed argini totalmente cementati in ottimo stato ed assenza di manufatti (tubi, cavi, ecc.) o discontinuità interferenti con le acque	40 – 45
Tombinature perfettamente lisce o dotate a monte di dispositivi atti ad assicurare la trattenuta di trasporto solido di fondo e in sospensione (briglie selettive, vasche di sedimentazione, ecc)	45 – 55

Tabella 24: Valori di scabrezza di riferimento

In accordo con quanto indicato da Chow (Chow 1959) è stato assunto per tutto il canale un valore del coefficiente n di Manning pari a $0,022 \text{ s}/m^{1/3}$, cui corrisponde un valore del coefficiente di Gauckler-Strickler $c=1/n = 45 \text{ m}^{1/3}/s$.

Per quanto riguarda il modello bidimensionale, il parametro di scabrezza assunto per il deflusso nelle strade è di $0,015 \text{ sec}/m^{1/3}$ (Strickler $c = 1/n = 67 \text{ m}^{1/3}/s$).

I valori del coefficiente di Manning per le superfici esterne alla zona di deflusso sono stati determinati in funzione dei valori tratti da letteratura indicati da Chow (Chow 1959). Successivamente il programma attraverso la calibrazione dei parametri di ingresso, ha suggerito alcuni parametri che hanno reso più stabile il modello e che sono stati automaticamente assegnati alle strade e alle celle facenti parte del FPLAIN.DAT.

PORTATE DI RIFERIMENTO

Le portate di riferimento utilizzate per le modellizzazioni effettuate con Flow - 2D sono quelle in uscita a monte del ponte sulla SP 27 in arrivo dalla Lanusei-Nuoro inserite nella cella 3503.

I valori di portata introdotti nella simulazione idraulica per la determinazione delle aree inondabili risultano essere quelli riportati nella tabella seguente.

Scenario di interesse	Concentrazione volumetrica considerata	Picco di portata totale (m^3/s)
Evento dicembre 2004	$C_v 055$	149.9

Tabella 25 – Portate di verifica per il Torrente S'Arrescottu nel tratto considerato.

IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO BIDIMENSIONALE

L'analisi delle piene del torrente S'Arrescottu prevede innanzi tutto la creazione di una griglia formata da 8056 celle quadrate con lato di 10 metri, ciascuna caratterizzata dalla relativa quota sul livello del mare e da un coefficiente di Manning variabile in funzione della copertura media della cella. Come detto le quote relative al baricentro di ogni elemento di griglia sono determinate mediante una

interpolazione svolta automaticamente dal codice di calcolo dei punti situati in un intorno circolare della cella avente raggio proporzionale al lato della maglia quadrata.

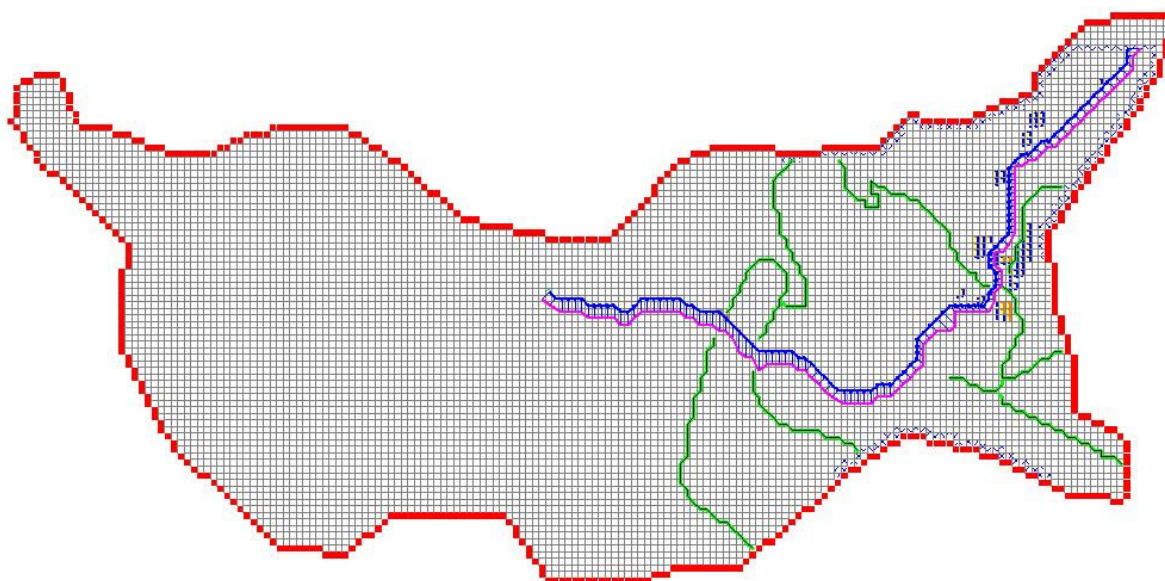


Figura 104: Implementazione del modello bidimensionale del bacino del rio S'Arrescottu

Le celle che delimitano il reticolo nei punti più a valle sono state definite in modo che da esse l'acqua possa fuoriuscire verso valle senza che si crei rigurgito.

Sono poi state introdotte le 30 sezioni d'alveo riportando le coordinate dei punti significativi compresi tra le due sponde, caratterizzate da un coefficiente di scabrezza medio pari a 0.05. Ciascuna delle sezioni è stata poi associata ad una delle celle che definiscono il tracciato del canale e che seguono nel miglior modo possibile l'andamento del corso d'acqua in planimetria.

Le strutture che sono state inserite nel modello sono rappresentate dal ponte che attraversa il rio S'Arrescottu posto in prossimità della Provinciale 27 e il *culvert* sulla Via Roma situato nella fase conclusiva del torrente; per ciascuno di essi è stata inserita la scala di deflusso ottenuta attraverso l'implementazione in Hec-Ras® di numerosi step di portata, determinando sia il battente sia la sezione di deflusso corrispondente. La scala di deflusso è stata tarata imponendo le caratteristiche di flusso proprie della colata in esame, ossia caratterizzando il tracciato di una scabrezza rappresentativa del fluido. Una volta determinata la scala di deflusso delle portate per i ponti in esame esse sono state successivamente inserite all'interno del modello bidimensionale, specificando la cella identificativa della posizione dell'infrastruttura.

Non è stata invece inserito il secondo ponte sulla circonvallazione in quanto, come si evince anche dalla figura seguente, che mostra una fotografia scattata nell'immediato post evento

2004, lo stesso ponte, essendo poco più che una piccola caditoia, è stato immediatamente interrito dalla colata detritica.



Figura 105 – Vista del secondo attraversamento della S.P. 27 (circonvallazione), ostruito nel corso dell'evento alluvionale

Per quanto riguarda la rete viaria, sono state definite numerose strade, principali e non e di collegamento tra i concentrici posti nelle immediate vicinanze del canale.

Da esse si dirama poi una rete di vie che, nel caso di fuoriuscita della portata dall'alveo inciso, contribuisce al deflusso all'interno del centro abitato in quanto diventa un percorso preferenziale per lo smaltimento della portata. Le strade sono caratterizzate da una larghezza media di 6 metri, da un coefficiente di scabrezza medio pari a 0.015 e da una altezza del marciapiede di 0.45 metri, necessario per la modellizzazione del deflusso e rappresentativo delle condizioni in esame anche nel caso in cui la strada fosse sprovvista di marciapiede ma fosse contigua al bordo strada, determinanti una condizione di ostruzione laterale, seppure marginale, al flusso preferenziale lungo la carreggiata.

PRESENTAZIONE DEI RISULTATI PER IL MODELLO BIDIMENSIONALE

Con le ipotesi assunte e con la metodologia illustrata sono state condotte le simulazioni dei deflussi lungo il torrente S'Arrescottu, per l'evento considerato.

I risultati numerici delle elaborazioni, condotte per diverse portate di calcolo, sono riportati sia in forma tabellare, dove sono riassunte e confrontate le principali grandezze che

caratterizzano il deflusso della corrente nelle sezioni di calcolo utilizzate, sia in forma grafica, sotto forma di sezioni e profili.

Nei sottoparagrafi successivi sono riportati i risultati delle simulazioni, con una sintesi dei principali parametri del deflusso di piena, che assumono il seguente significato:

<i>River Sta</i>	<i>Profile</i>	<i>Min Ch El</i>	<i>W.S. Elev</i>	<i>LOB Elev</i>	<i>ROB Elev</i>	<i>E.G. Slope</i>	<i>Vel Chnl</i>	<i>Froude # Chl</i>
		(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	

Tabella 26 – Principali parametri del deflusso di piena.

dove:

- *River Sta*: sezione di calcolo;
- *Profile*: portata di calcolo riferita al profilo prescelto;
- *Min Ch El (m s.l.m.)*: quota minima della sezione (fondo alveo);
- *W.S. Elev. (m s.l.m.)*: quota superficie libera;
- *LOB Elev (m)*: quota della sommità della sponda o dell'argine sinistro;
- *ROB Elev (m)*: quota della sommità della sponda o dell'argine destro;
- *E.G. Slope (m)*: pendenza dell'alveo;
- *Vel Chnl (m/s)*: velocità media della corrente nel canale principale;
- *Froude Chl*: numero di Froude.

I risultati ottenuti dalla simulazione bidimensionale consentono di avere informazioni relative ad ogni cella in esame.

Sono presenti, all'interno del codice di calcolo, dei post processor che visualizzano in forma grafica i massimi tiranti e le relative velocità per ogni singola cella e consentono altresì un rapido controllo durante la simulazione.

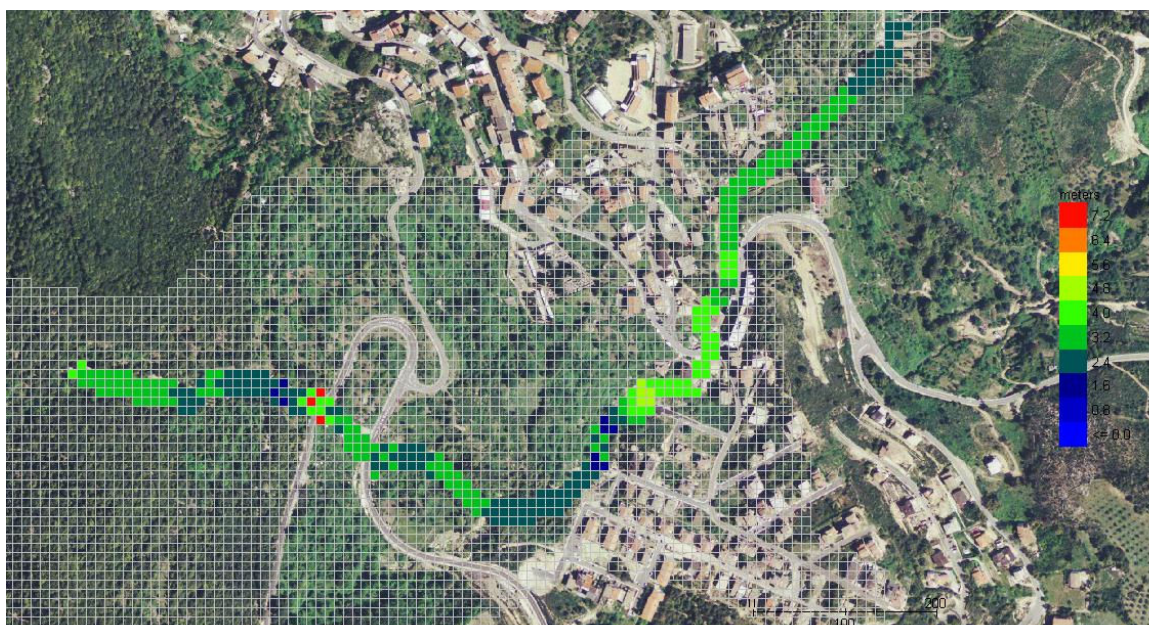


Figura 106 - Risultati relativi ai massimi tiranti idrici forniti da FLO - 2D

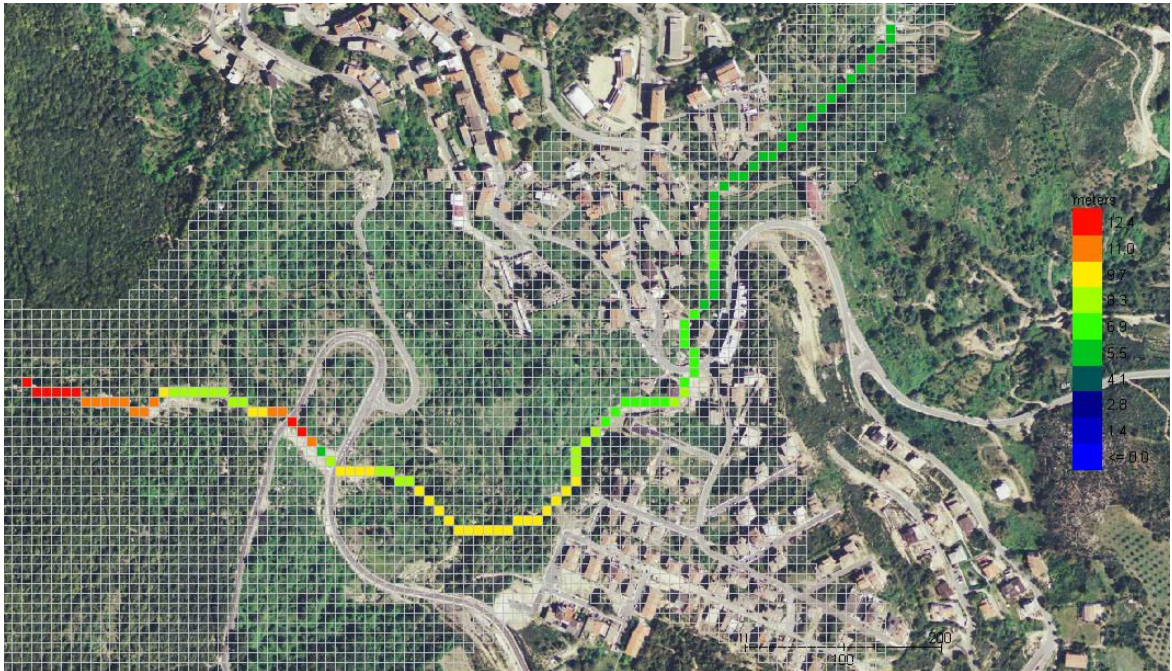


Figura 107 - Risultati relativi alle massime velocità forniti da FLO - 2D

- BASE.OUT contiene tutte le informazioni relative alle singole celle per ogni passo temporale ed è un riassunto delle informazioni contenute negli altri file forniti dal codice di calcolo;
- DEPTH.OUT contiene i massimi tiranti idrici per ogni cella;
- VELOC.OUT contiene le massime velocità raggiunte in ogni singola cella durante la simulazione;
- VELDIREC.OUT contiene le direzioni preferenziali di velocità per tutte le celle presenti nell'area di esondazione ed è utile al fine del tracciamento delle vie preferenziali della corrente;
- STVEL.OUT contiene le massime velocità raggiunte durante la simulazione in ogni singola cella sulla quale sono state inserite delle strade.

CONFRONTO DEI RISULTATI E CONCLUSIONI

Una delle principali domande poste dai vari ricercatori che indagano sui fenomeni naturali di colata detritica è quella che riguarda la appropriatezza o meno dell'utilizzo dei modelli reologici per la descrizione dello sviluppo del flusso di *debris flow* naturali, composti da clasti di diverse dimensioni.

I modelli reologici hanno generalmente in comune come premessa il fatto di riguardare miscele omogenee (Iverson & Denlinger 2001, 2001b, Hungr 2000), correlando in maniera diretta la resistenza del materiale agli sforzi di taglio con il tasso di variazione della deformazione nel materiale stesso (modelli di Bingham, Herschel Bulkley, il modello dello scorrimento degli strati granulari di Bagnold (Bagnold 1954) e il modello quadratico reologico proposto da O'Brian (O'Brien 1993)).

È dimostrato come i modelli reologici descrivano con successo i flussi di miscele di materiali fini portanti in sospensione una considerevole quantità di materiale grossolano (Coussot 1994, Parson et alii 2001). Quando invece la frazione di materiale grossolano viene incrementata e il flusso diventa più eterogeneo, si forma una parte anteriore composta da materiale frizionale, seguita da un corpo più liquido dove la resistenza dovuta alle collisioni e alle frizioni tra i diversi grani diventa importante e significativa (Iverson 1997, Hungr 2000).

In molti studi relativi ai *debris flow* sono stati svolti vari tentativi per determinare i parametri reologici per sospensioni granulari ad una scala di laboratorio significativa. Coussot e Piau (Coussot & Piau 1995) elaborarono un reometro di larga scala formato da cilindri coassiali per indagini di laboratorio di materiali di *debris flow* provenienti da campioni naturali. Lo spazio tra i cilindri era di circa 0,2 m, consentendo di analizzare materiali che includessero grani del diametro massimo superiore ad 1 cm. In questi esperimenti è apparso chiaro come all'aumentare delle frazioni fini (fanghi e argille) prevalessero le forze viscosse, e la curva di flusso reologica ottenuta dal reometro potesse essere ben descritta da un modello Herschel Bulkley; all'aumentare della concentrazione delle parti grossolane prevalevano invece le forze di resistenza dovute alla frizione dei grani, e la curva reologica del flusso del materiale mostrava un minimo. Coussot e Piau inoltre riportarono delle difficoltà negli esperimenti, dovuti a sezioni di calcolo non omogenee originate in seguito alle interazioni di clasti grossolani depositati sul fondo. Contreras e Davies (Contreras & Davies, 2000), testarono successivamente dei materiali granulari mediante un reometro di larga scala simile a quello elaborato da Coussot e Piau, i cui risultati finali non furono però particolarmente soddisfacenti per la difficoltà nell'individuare la curva del flusso per ogni campione di materiale analizzato. I risultati mostrarono infatti una grande dispersione grafica, con una isteresi tra l'aumentare e il ridiminuire dei tassi di deformazione imposti ai materiali analizzati. Davies nel 1990 (Davies 1990) studiò lo sviluppo di un flusso di un materiale ad alta concentrazione di materiali grossolani in un canale inclinato con nastro trasportatore, dando interessanti risultati qualitativi sulle interazioni delle sospensioni

granulari analizzate. Per ovviare ai ridotti tempi di analisi degli esperimenti Brown (Brown 1993), e Huizinga (Huizinga 1993) realizzarono degli esperimenti in un canale rotante verticale provando ad ottenere i parametri binghamiani della curva reologica del flusso con materiali omogenei molto fini e basandosi sulla velocità del flusso e la misura della geometria attraverso un'analisi fotogrammetrica. Le difficoltà nell'ottenere i risultati sperati furono dovute al fatto che la misura degli sforzi di taglio, attraverso il metodo basato sulla geometria del flusso, è molto sensibile alla precisione con cui viene determinata l'esatta posizione e forma del flusso nel canale.

Mediante l'utilizzo del canale verticale *Rotating Drum*, sviluppato dal prof. Rinkemann e dal dott. Kaitna dell'Università Boden Kulture di Vienna, attraverso una miglior attrezzatura ed una miglior taratura della strumentazione facente parte del canale verticale, rispetto a quelli precedenti, è stato possibile ottenere dei risultati attendibili, prima nella determinazione dei parametri reologici di miscele omogenee artificiali e poi di miscele provenienti da *debris flow* naturali (Kaitna, Rickenmann & Schneiderbauer 2006, Kaitna, Rickenmann & Schatzmann 2007, Kaitna 2006, Kaitna & Rickenmann 2007)

Il principale vantaggio del canale verticale elaborato presso l'università di Vienna, ed utilizzato per gli esperimenti di questo studio, è proprio quello di poter paragonare i risultati degli sforzi tangenziali calcolati indirettamente, attraverso la geometria del flusso, con quelli misurati direttamente dai sensori sul fondo del canale e dalle misure del momento torcente sull'asse della flangia di torsione per un lungo periodo di tempo di rotazione.

L'utilizzo del canale verticale sui campioni prelevati lungo il rio S'Arrescottu, ha permesso la determinazione dei parametri reologici attraverso la considerazione del flusso come uno sviluppo di un fluido di tipo binghamiano. Questo si sviluppa attraverso uno strato continuo superficiale, che scorre su degli strati infinitesimi, su cui il profilo delle velocità del flusso mostra un andamento parabolico nella direzione del flusso stesso. Queste ipotesi sono state ampiamente confermate dalle osservazioni effettuate durante il corso degli esperimenti e dalle videoregistrazioni che hanno mostrato un tappo superficiale non deformato, che scorre su gli strati discontinui ed infinitesimali ad una velocità differente rispetto agli stessi.

Il metodo di studio proposto è stato mirato alla comprensione degli eventi parossistici di tipo colata detritica *debris flow* in ambienti mediterranei, mediante una metodologia di analisi complessa, caratterizzata dall'osservazione dei fenomeni sotto diversi punti di vista e composta da diverse distinte fasi di analisi presentate nell'introduzione allo studio.

In particolare, con questo studio di ricerca si è cercato di porre per la prima volta in correlazione le proprietà reologiche, calcolate attraverso esperimenti su campioni di diversa granulometria e diverso contenuto volumetrico d'acqua. Questi risultati sono stati infine verificati attraverso quelli ottenuti mediante due simulazioni numeriche con due codici di calcolo, uno monodimensionale, basato sulla teoria dell'onda cinematica di Arattano e Savage (Arattano & Savage 1992) che non tiene conto dei parametri reologici, calibrato in funzione dell'evento del 2004 dalle condizioni note, ed un altro bidimensionale sviluppato dal Prof. O'Brien (O'Brien et

alii 1993, O'Brien et alii 2006), che tiene invece conto dei parametri reologici misurati, confrontati e verificati attraverso il riscontro degli output ottenuti in termini di velocità, portate di picco e volumi messi in gioco dalla colata detritica studiata.

I parametri reologici sono stati ricavati attraverso i test sui campioni prelevati in un lobo di colata, di cui sono stati rilevati anche i principali parametri fisici, ed hanno interessato la matrice fine, con l'esclusione dei clasti più gossolani.

Attraverso l'individuazione delle relazioni lineari che legano lo sforzo critico τ_b e la viscosità binghamiana μ alla variazione della concentrazione volumetrica C_v , è stato possibile verificare che i parametri fisici ottenuti dal modello bidimensionale corrispondessero in intensità e distribuzione a quelli ottenuti con il modello monodimensionale che, basandosi sull'onda cinematica, non tiene conto dei parametri reologici dei materiali.

Attraverso questo metodo iterativo, è stato possibile individuare nella concentrazione volumetrica $C_v = 0,55$ un'ottima corrispondenza dei dati ottenuti tra i due codici di calcolo. I principali dati confrontati sono di seguito riportati.

Innanzitutto è stata verificata la sovrapposizione delle aree di inondazione della colata lungo il canale del rio S'Arrescottu. È stato riscontrato come queste coincidano con quelle che sono state rilevate nell'immediato post evento in collaborazione con il gruppo di geomorfologi composto da professionisti locali e da ricercatori del CNR di Torino (cfr. Allegato 1).

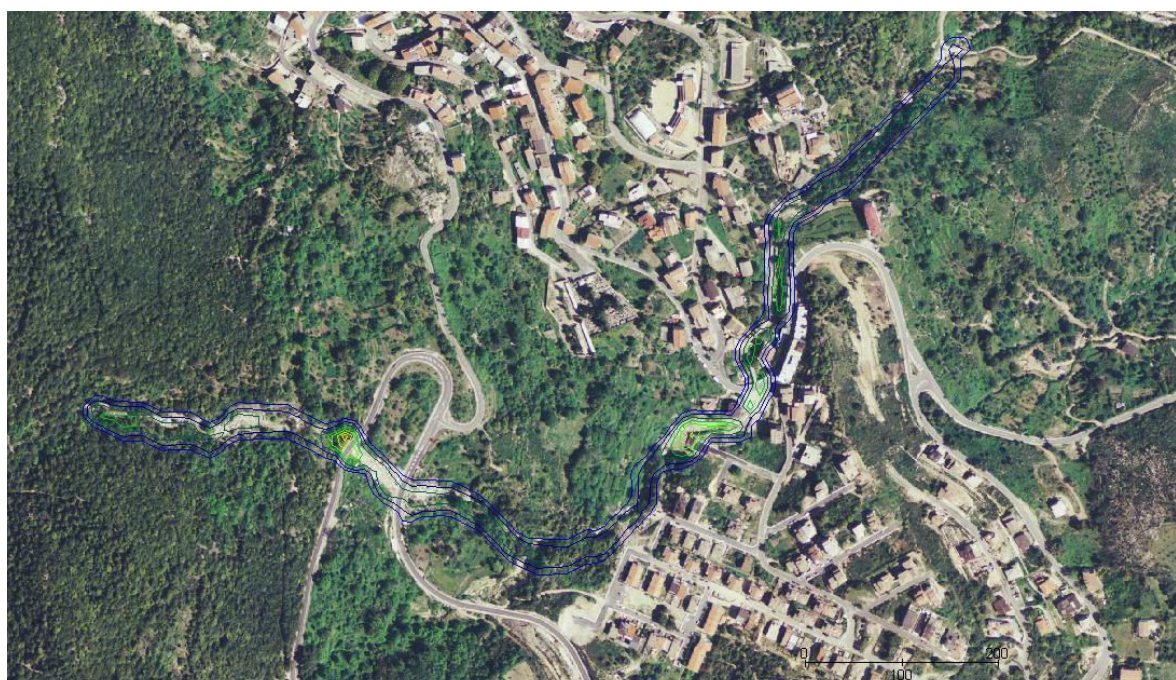


Figura 108 – Aree di inondazione della colata detritica fornite da FLO 2D

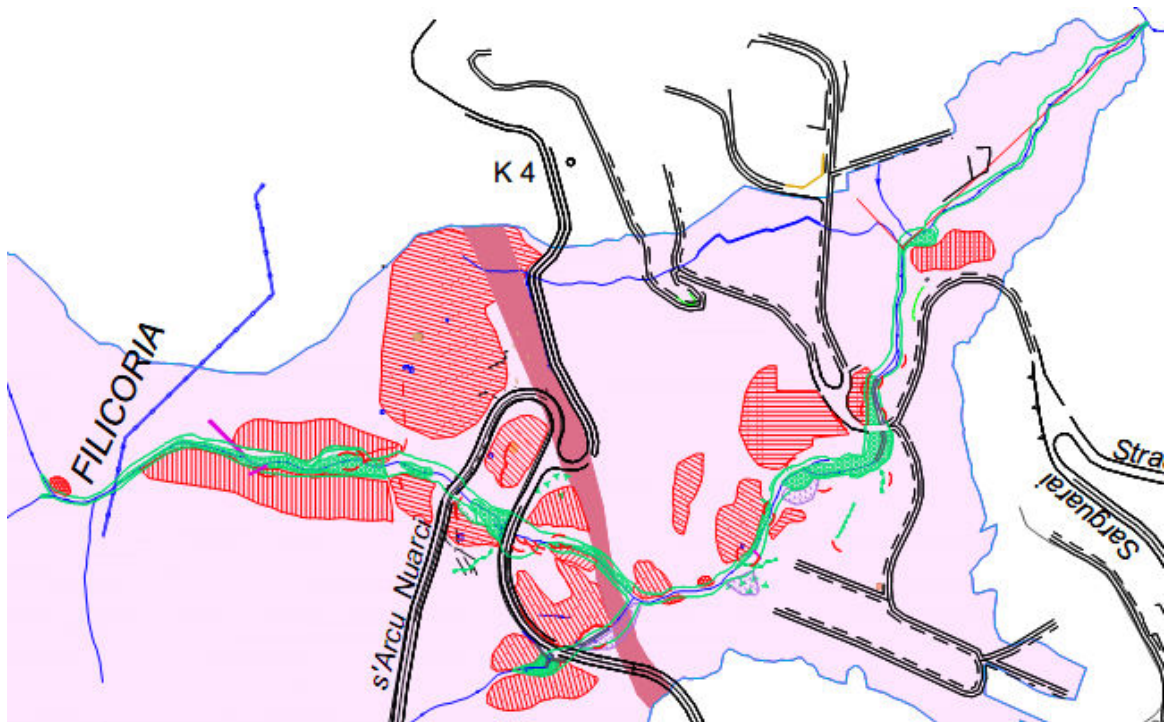


Figura 109 – In verde le aree di inondazione della colata detritica riportate nella carta geomorfologica allegata

Anche le sezioni individuate, coincidenti nei due modelli utilizzati, hanno mostrato avere una ottima corrispondenza in termini di superfici di deflusso. Di seguito si riportano alcune figure esempio dei risultati ottenuti.

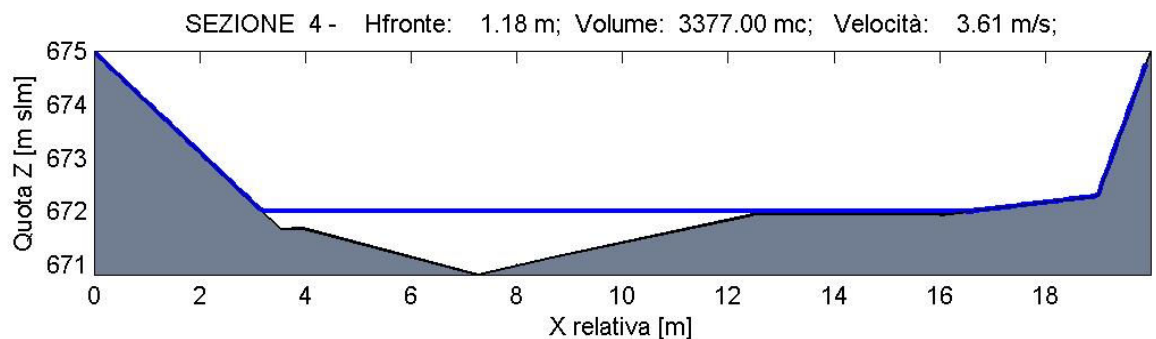


Figura 110 – Sezione n° 4 Calibrazione del modello monodimensionale *back analysis* evento 2004

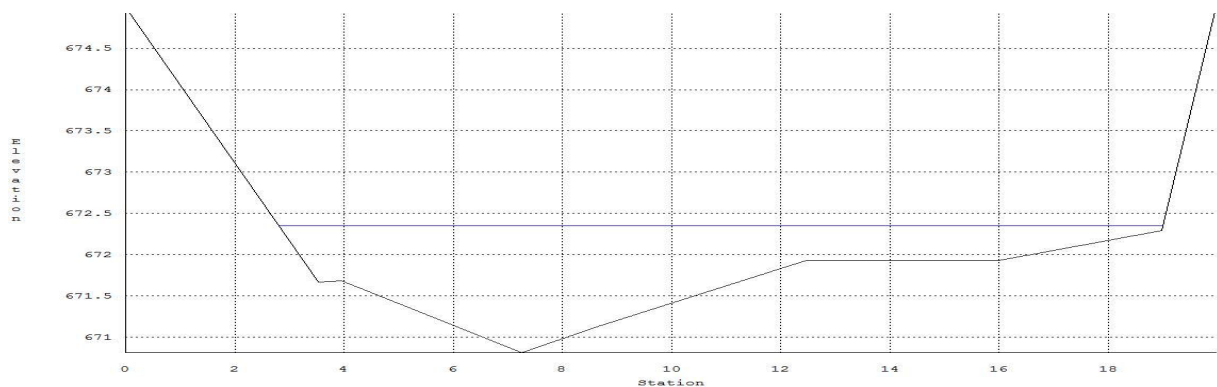


Figura 111 – Sezione n° 4 Calibrazione del modello bidimensionale tenendo conto della reologia

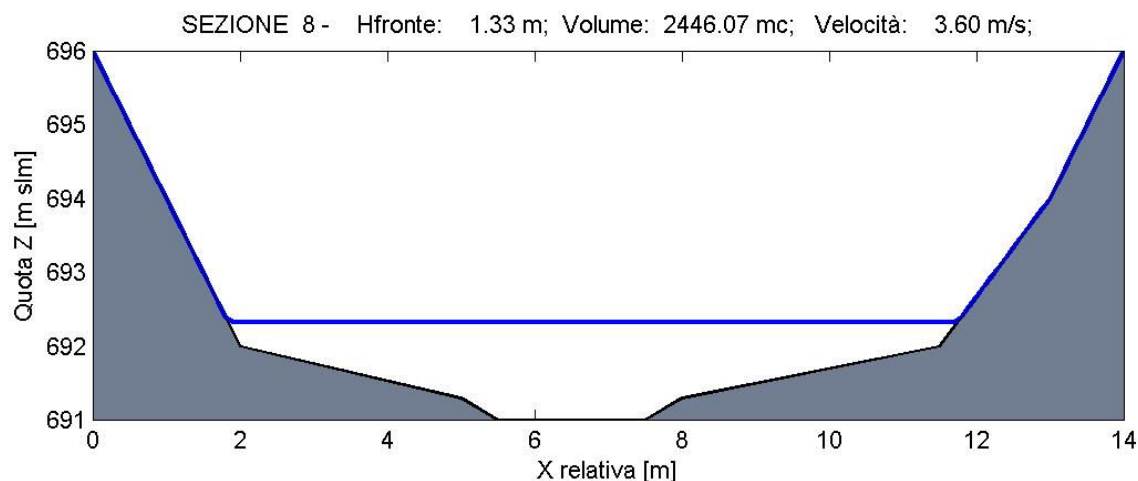


Figura 112 – Sezione n° 8 Calibrazione del modello monodimensionale *back analysis* evento 2004

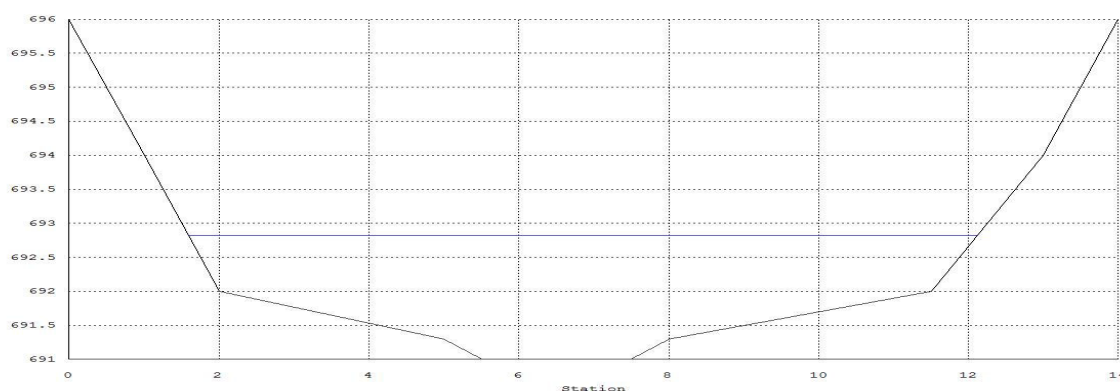


Figura 113 – Sezione n° 8 Calibrazione del modello bidimensionale tenendo conto della reologia

Per quanto riguarda le altezze dei fronti della colata, i risultati rivelati sono stati soddisfacenti in quanto sono stati riscontrati gli stessi ordini di grandezza, anche se, in corrispondenza delle strutture idrauliche si possono notare dei picchi maggiori di intensità sia per quanto riguarda le velocità del flusso e sia per quanto riguarda le altezze di massimo deflusso. Questo è comunque spiegato dal fatto che il modello monodimensionale non consente di considerare i ponti o i *culverts*, mentre il modello bidimensionale ha consentito di inserire sia il ponte a monte della circonvallazione e sia il *culverts* a monte della via Roma.

Al modello monodimensionale sono state in ogni caso date delle sezioni di adeguata scala di portate che consentono lo smaltimento delle portate calcolate per le stesse strutture idrauliche.

Le massime velocità della colata sul canale coincidono su quasi tutto il tratto dell'asta del rio S'Arrescottu in maniera abbastanza precisa, e variano nel range tra 3 m/s e 7 m/s, tranne in alcuni punti in cui il modello bidimensionale presenta anche in questo caso dei picchi di maggiore intensità rispetto al modello cinematico.

Le maggiori velocità del modello bidimensionale sono da considerarsi dovute alle condizioni a valle dei ponti che, a causa del forte dislivello, creano un salto idraulico importante. Questo si evince anche dalla figura seguente che mostra il salto a valle del ponte sulla circonvallazione in occasione delle piogge del 12 ottobre 2010.

Questi salti hanno creato dei problemi di instabilità al modello, che ha necessitato di un'accurata calibrazione dei criteri di stabilità numerica, limitando l'ampiezza del passo temporale e dei valori dei coefficienti di Manning, che hanno a loro volta portato a dei picchi di altezza del fronte diversi da quelli ottenuti per il codice monodimensionale.



Figura 114 – Salto a valle del ponte sulla circonvallazione in occasione delle piogge del 12 ottobre 2010

Il codice monodimensionale, inoltre, ha ottenuto valori più elevati di altezza del fronte di colata all'inizio del tratto di innesco della colata. Questo è dovuto sicuramente al fatto che la sua implementazione richiede un volume di ingresso da immettere direttamente nella sezione di origine della colata, mentre il modello bidimensionale considera un idrogramma di piena che, in base alle formule proposte da Takahashi, è stato trasformato in un debrisgramma che si diffonde in maniera più uniforme sul canale a valle.

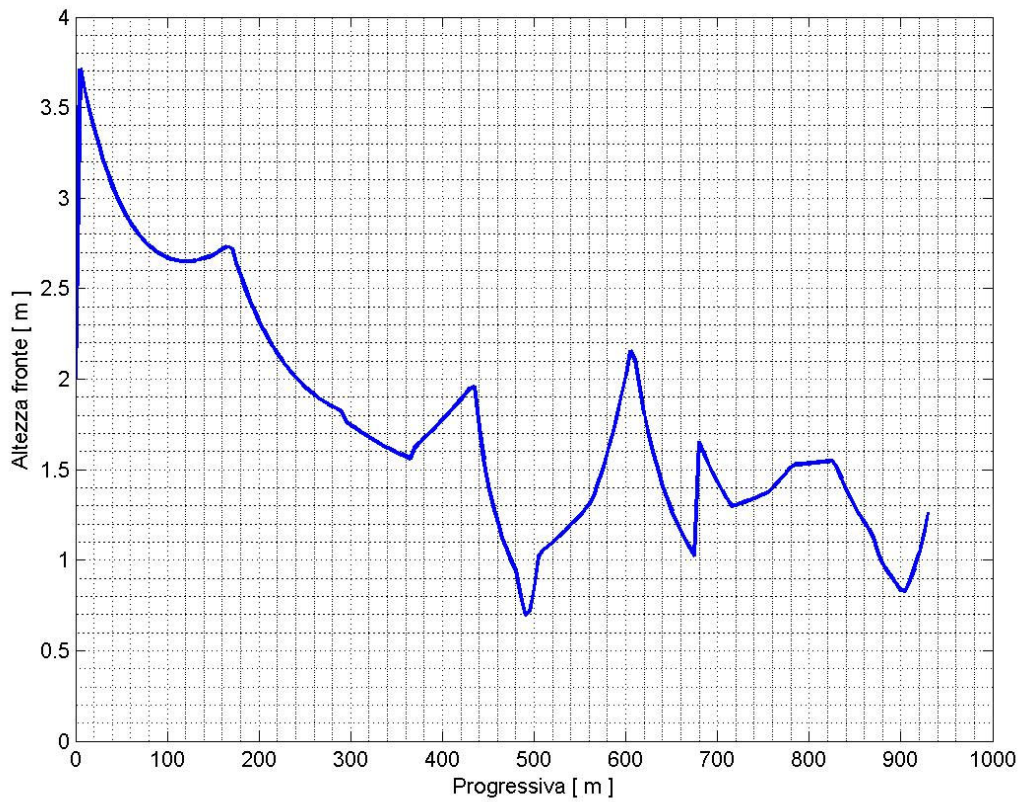


Figura 115 – Altezza del fronte della colata detritica lungo l'asta del Rio S'Arrescottu. Risultati della calibrazione del modello – back analysis evento 2004

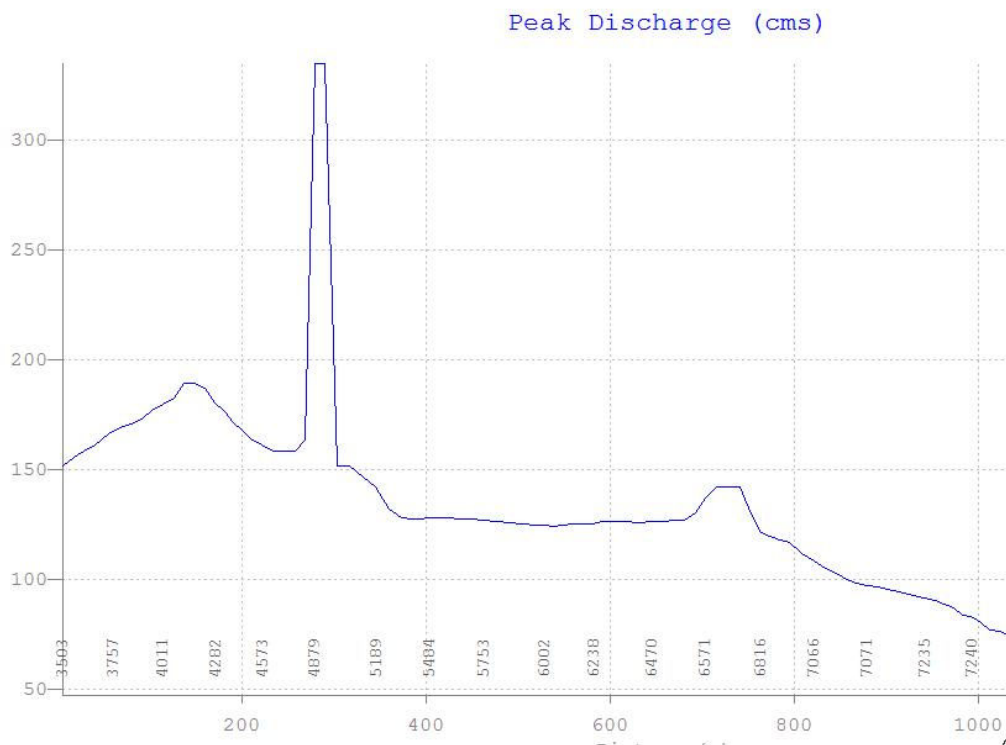


Figura 116 – Altezza del fronte della colata detritica lungo l'asta del Rio S'Arrescottu. Risultati del modello bidimensionale tenedo conto della reologia della colata



Figura 117 – Velocità della colata detritica lungo l’asta del Rio S’Arrescottu. Risultati della calibrazione del modello – *back analysis* evento 2004

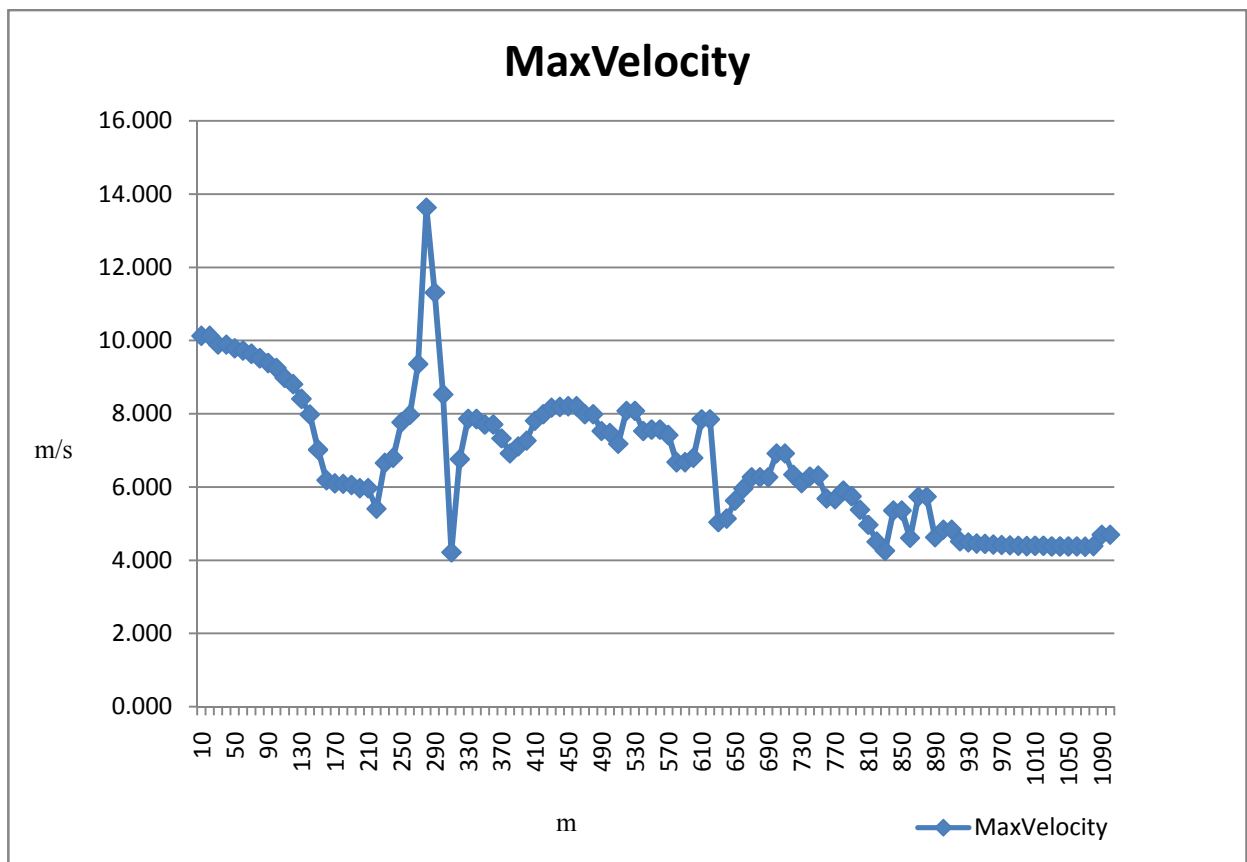


Figura 118 – Altezze in m/s delle velocità della colata detritica lungo l’asta del Rio S’Arrescottu. Risultati del modello bidimensionale tenendo conto della reologia della colata

Attraverso il confronto dei risultati è stato possibile effettuare un'analisi sulle caratteristiche reologiche estrapolate dai test ed estese non più alla sola matrice della colata sviluppatasi sul canale del Rio S'Arrescottu, ma al miscuglio completo, permettendo inoltre di dedurre le caratteristiche reologiche della stessa colata con un buon grado di precisione.

I limiti dell'analisi effettuata sono sicuramente dovuti al fatto che le condizioni di moto studiate all'interno del Canale Verticale, corrispondenti ad un flusso in moto stazionario uniforme e non turbolento, non coincidono precisamente con quello che avviene realmente in natura. Infatti i modelli reologici dei flussi naturali, sono sicuramente più complessi rispetto al semplice modello binghamiano analizzato. Questa considerazione vale in particolare per il caso preso in esame, in quanto la concentrazione solida della colata assume valori importanti soprattutto in coincidenza del picco di portata, ed in corrispondenza del collassamento delle coltri detritiche in alveo, mentre per la restante parte, la concentrazione volumetrica nel canale si è sempre mantenuta abbastanza bassa con le caratteristiche di una lava torrentizia *mud-debris-flow*, piuttosto che di un flusso iperconcentrato *debris-flow*. Questo effetto, come detto, è stato considerato nello sviluppo del modello bidimensionale, il quale ha permesso di ottenere dei buoni risultati. Questi sono stati verificati dal modello cinematico calibrato in *back-analysis*, con un buon grado di precisione nella determinazione delle caratteristiche reologiche dell'evento del 6 dicembre 2004 sul canale considerato. È stato inoltre importante rilevare come, per i diversi diametri, per cui si è potuto testare il campione prelevato, i valori critici dello sforzo tangenziale del miscuglio contenente i valori da 1 mm sino ad 8 mm, e i valori ottenuti per estrapolazione dalla curva ottenuta, siano coincisi con quelli del materiale completo determinato in base ai dati di campagna. Questo, insieme alla buona corrispondenza dei modelli sviluppati, oltre a far riporre buona fiducia nei risultati ottenuti, induce a pensare che i processi all'origine dell'incremento del valore critico dello sforzo di taglio, all'aumentare del diametro massimo dei sedimenti, non variano in maniera rilevante al passaggio dalla matrice intermedia alla composizione del materiale completo, rappresentativo del materiale del flusso reale dell'evento. Come era stato già osservato, infatti da Coussot *et alii* (Coussot et alii 1998), si può ritenere che non vi siano nuovi fenomeni fisici che compaiono e che possano influire in maniera sostanziale sul comportamento del miscuglio stesso in questo passaggio, in quanto questo avrebbe determinato una modifica importante dello sviluppo del valore nominale dello sforzo tangenziale. Si può dunque ipotizzare una certa similitudine tra il materiale studiato nei test di laboratorio e quelli che realmente hanno costituito l'evento del 6 dicembre 2004 sul rio S'Arrescottu. Questa ipotesi trova inoltre conferma nelle analisi granulometriche, che hanno individuato una chiara maggioranza di passante presente nei regimi franco sabbiosi e un limite massimo del diametro di 8 mm in cui il campione è rappresentato per la quasi totalità.

In base a queste osservazioni è stato dunque possibile individuare nella concentrazione volumetrica $C_v = 0,55$ la concentrazione solida dell'evento, ed è stato inoltre possibile schematizzare il comportamento del materiale completo costituente il *mud-debris-flow*, considerandolo come un

modello Binghamiano in cui lo sforzo di taglio critico si può considerare uguale a $\tau_c \text{ max}=112,12 \text{ (PA)}$ e la viscosità uguale a $\eta \text{ max}=1,424 \text{ (PA*s)}$.

Questi risultati portano a caratterizzare i fenomeni occorsi in quest'area del centro Sardegna, tipicamente esposta al clima mediterraneo e ad eventi parossistici di forte intensità, come degli eventi di lava torrentizia ***mud-debris flow***, caratterizzati da una matrice franco sabbiosa portata in sospensione dalla corrente fluida. Questo tipo di fenomeni, seppur differenti rispetto a quelli puramente viscoplastici dei *debris flow* che si sviluppano in ambiente alpino o in altri ambienti con più importanti energie dei rilievi e differenti caratteristiche geomorfologiche, presentano delle concentrazioni massime, delle altezze del fronte di colata, delle velocità del flusso e di conseguenza delle energie e forze di impatto, come precedentemente riportate, elevatissime, che ne contrassegnano un'importante pericolosità.

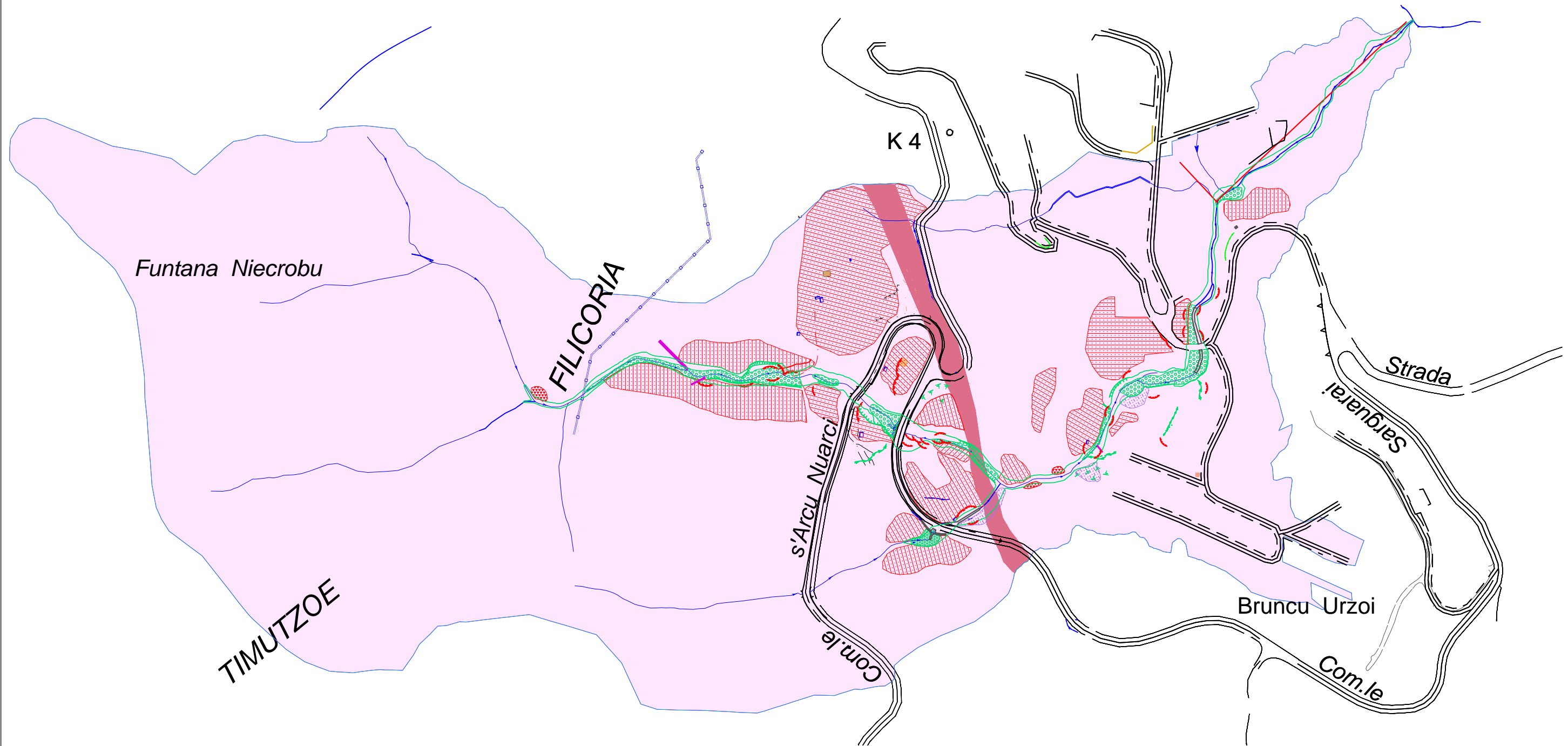
Tale pericolosità purtroppo, nel corso degli anni, è stata quasi trascurata o sottovalutata dalle comunità locali, che hanno ritenuto di potersi insediare nelle aree di pertinenza delle piene torrentizie. Questo ha fatto sì che gli eventi parossistici abbiano avuto in più di una occasione conseguenze catastrofiche per le popolazioni.

Le tipologie di analisi descritte vogliono quindi offrire un metodo efficace per definire l'evoluzione di questi fenomeni per eventi attesi, in modo da poterlo utilizzare nelle fasi di progettazione delle opere di difesa, in termini di risposta alle forze in gioco, e nelle fasi di studio della pianificazione urbana e territoriale per la mitigazione del pericolo da essi derivati.

Lo studio di questi eventi parossistici può inoltre consentire una maggiore comprensione delle dinamiche evolutive e di propagazione dell'onda di flusso, attraverso la valutazione delle enormi velocità, forze ed energie da essa innescate, consentendo quindi una migliore conoscenza delle caratteristiche e dell'entità dei fenomeni di *mud-debris-flow* considerati. Una più corretta valutazione potrà consentire infine un maggior rispetto delle aree di propagazione e di diffusione di tali piene torrentizie, in modo da garantire così la sostenibilità e la sicurezza dei nostri centri montani.

Allegato 1: Carta geomorfologica del bacino del rio S'Arrescottu

CARTA GEOMORFOLOGICA DEL BACINO DEL RIO S'ARRESCOTTU



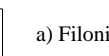
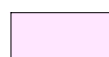



LEGENDA

scala 1:5.000




ELEMENTI GEOLOGICO-STRUTTURALI

LITOLOGIA DEL SUBSTRATO



-  Materiali di riporto
-  a) Filoni porfirici
-  b) filoni lamporfirici
-  Substrato granitico
-  Faglia

FORME E DEPOSITI DOVUTI ALLO SCORRIMENTO DELLE ACQUE SUPERFICIALI

FORME DI EROSIONE


-  Solco di ruscellamento concentrato
-  Orlo di scarpata di erosione fluviale
-  Superficie con forme di dilavamento diffuso

FORME DI ACCUMULO



-  Colata da trasporto in massa
-  Deposito colluviale

FORME E DEPOSITI DOVUTI ALLA GRAVITA'



FORME DI EROSIONE

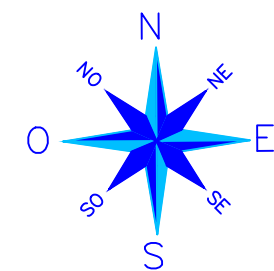
- Nicchia di frana:
-  di colamento

FORME DI ACCUMULO

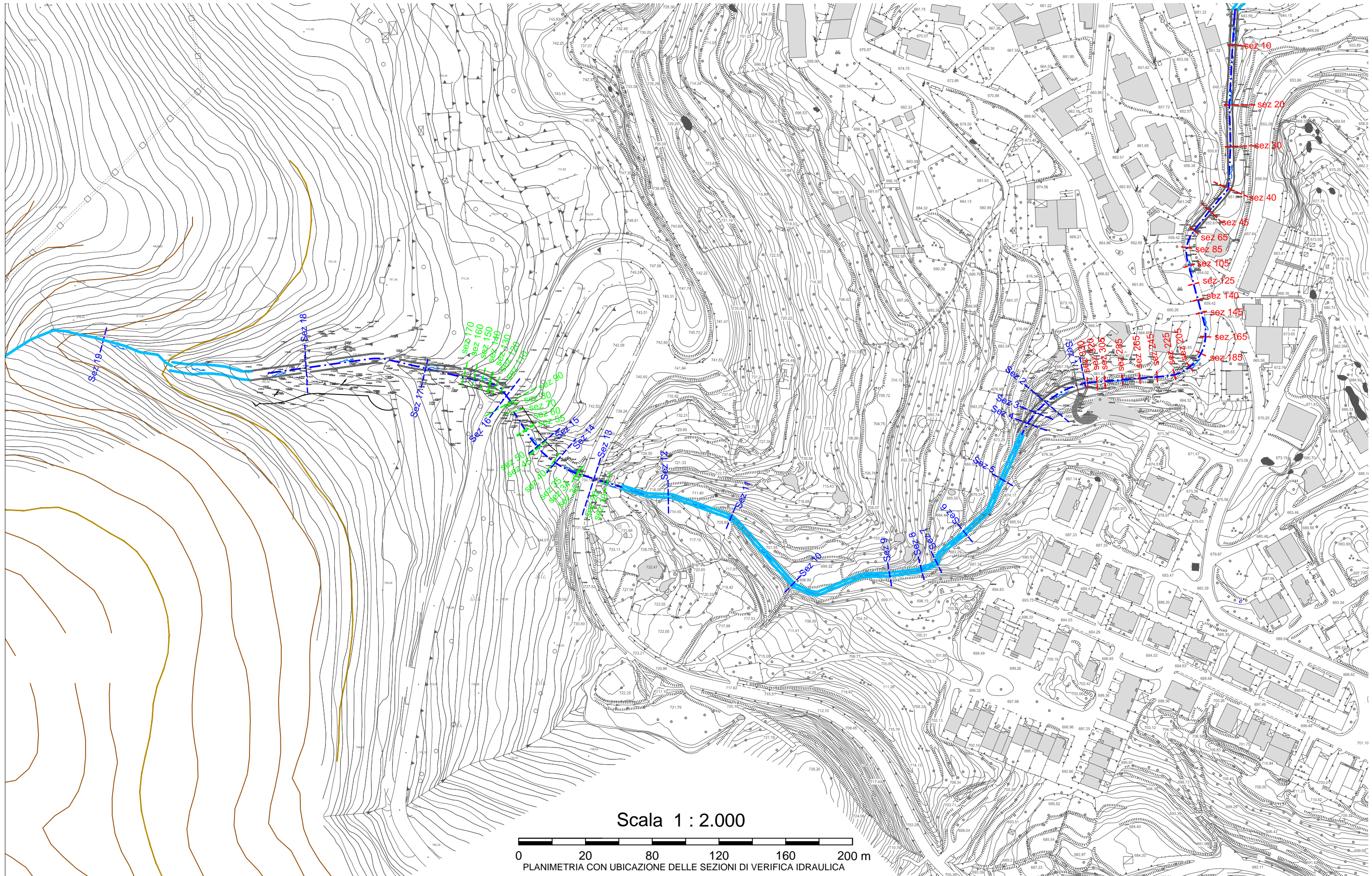
- Corpo di frana:
-  a) di crollo
-  Falda di detrito

FORME ANTROPICHE

-  Canale artificiale
-  Bacino idrografico



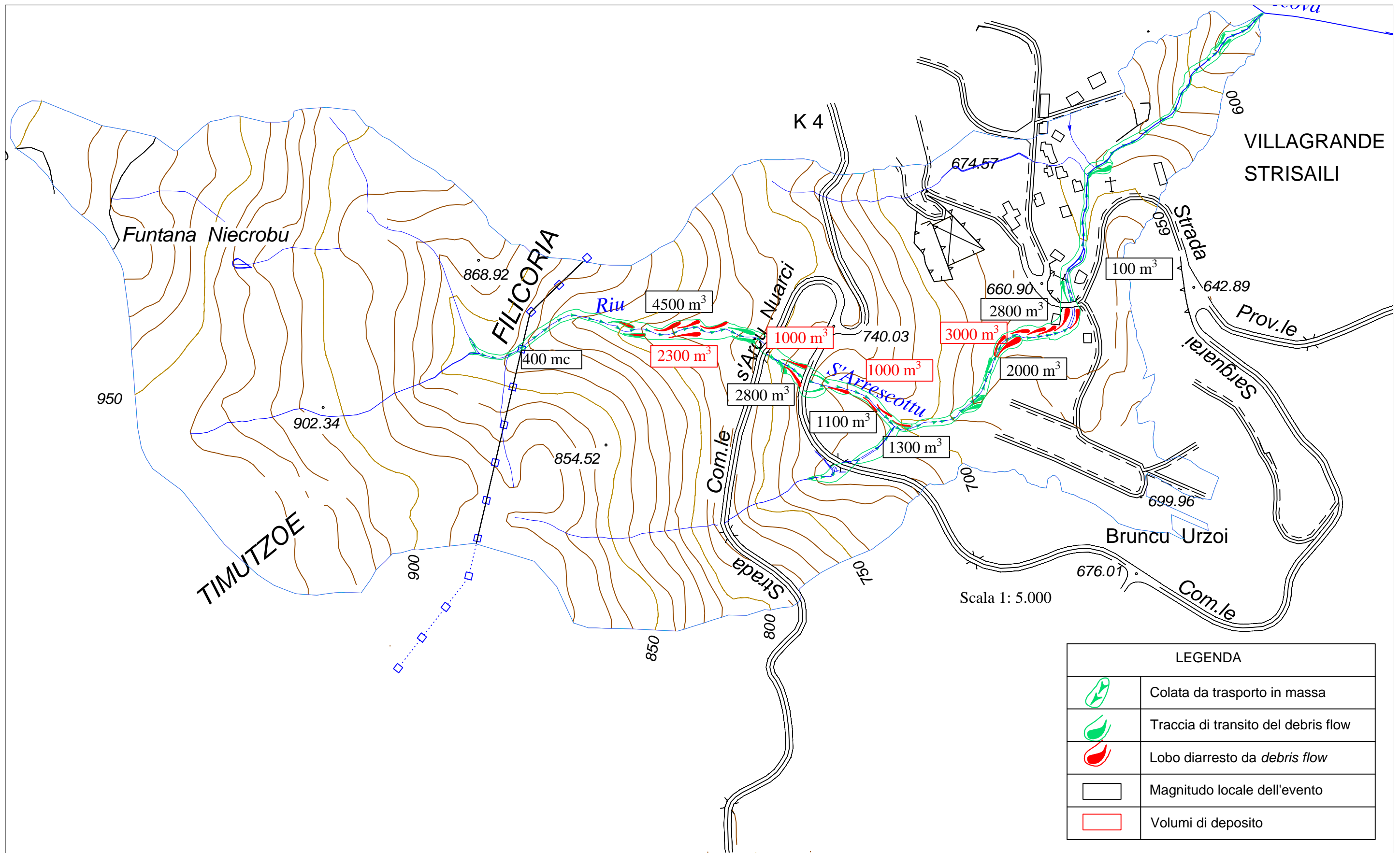
Allegato 2: Planimetria con ubicazione delle sezioni di verifica idraulica



Scala 1 : 2.000

0 20 80 120 160 200 m
PLANIMETRIA CON UBICAZIONE DELLE SEZIONI DI VERIFICA IDRAULICA

Allegato 3: Planimetria dell'evento 2004:dati per la calibrazione del modello



PLANIMETRIA DELL'EVENTO 2004:
DATI PER LA CALIBRAZIONE DEL MODELLO
Scala 1:5.000

BIBLIOGRAFIA

Ancey C., 1999, Rheologie des laves torrentielles. Final scientific report PNRN 1998-1999, CEMAGREF;

Ancey C., 2001, Role of lubricated contacts in concentrated polydisperse suspensions. *J Rheol.* 45:1421-1439;

Arattano M., 1994, Applicazione di un modello matematico a processi di debris flow in ambiente alpino. *Geologica Romana Vol. XXX Estratti*;

Arattano M., 1994b, Considerazioni sull'utilizzo della teoria dell'onda cinematica per la modellazione numerica di fenomeni di debris flow. *GEAM - Geoingegneria Ambientale e Mineraria, Associazione Georisorse n. 84*;

Arattano M., Denagutti A.M., Marchi L., 1997, Debris flow monitoring activities in an instrumented water shed on the Italian Alps. Cheng Lung Chen (Ed.) *Debris flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assesment, ASCE*, pp.: 506-515;

Arattano M., Savage W.Z., 1992, "A kinematic wave model for debris flow". U.S. Geological Survey Open-file Report 92-290;

Arrigoni P. V., 1968, *Climatologia della Sardegna-Webbia 23*, Istituto Botanico Università di Firenze;

Artizzu F., 1958, Rendite pisane nel Giudicato di Cagliari nella seconda meta del secoloXIII-Archivio Storico Sardo a cura della Deputazione di Storia Patria per la Sardegna volume XXV fasc.3 CEDAM-Padova;

Bagnold R.A., 1954, Experiment on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. *Proc R Soc London* 225:49-63;

Bertolo P, Wieczorek GF, 2005, Calibration of numerical models for small debris flow in Yosemite Valley, California, USA. *Nat. Hazards Earth Syst Sci* 5:993-1001;

Bingham E.C., 1916, *U.S. Bureau of Standards Bulletin*, 13, 309-353 "An Investigation of the Laws of Plastic Flow";

Bird R.B., Dai G.C., Yarusso B.J., 1982, The Rheology and Flow of Viscousplastic Materials” Reviews in Chemical Engineering 1(1), 1-70;

Brown S.M., 1993, The vertically rotating flume for use as a rheometer. Thesis University of Missouri- Rolla. USA;

Cannas A., Rubiu A.,1977, Villagrande Strisaili tra Storia e Leggenda-Stab.Editoriale Fossataro-Cagliari;

Carmignani L., Oggiano G., Barca S., Conti P., Eltrudis A., Funedda A., Pasci S., 1992, Note illustrative della Carta Geologica della Sardegna a Scala 1:200.000 – Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato – Roma Carmignani - 1993 -Struttura della Catena Ercinica in Sardegna- Pacini Editore-Pisa;

Cellino M.,1993, Modello matematico per lo studio della propagazione dei *debris flow* – Politecnico di Torino, Tesi di Laurea;

Chen C.L., 1986, Chinese Concepts of modelling Hyperconcentrated stream flow and debris flow. Proceedings of the third International Symposium on river sedimentation. University of Mississippi, pp1647-1657;

Chow V. T., 1959, Open Channel Hydraulics (1959). McGraw-Hill, USA

Chow V. T.et alii, 1988, Applied Hydrology, Mac Graw-Hill-USA;

Costa J. E., 1984, Physical geomorphology of debris flow. In: Developments and applications of geomorphology, J. E. Costa and P.J. Fleisher (editors), Springer-Verlag, Berlin, Chap.9, 268-317;

Courant R., K. Friedrichs e H. Lewy, 1928, Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik, Mathematische Annalen, vol. 100, n. 1, pagg. 32–74;

Courant R., Friedrichs K., Lewy H., 1967, On the partial difference equations of mathematical physics, IBM Journal, pagg. 215-234;

Coussot P., 1994, Steady laminar flow of concentrated mud suspensions in open channel. J Hidraulyc Res 32(4):535-559;

Coussot P., 1997, "Mudflow Rheology and Dynamics" IAHR Monograph Series, Balkema Publisher, The Netherlands;

Coussot P., Ancey C., 1999, Reophysical classification of concentrated suspension and granular pastes. *PhYs Rev E* 59: 4445-4457;

Coussot P., Boyer S., 1995, Determination of yield stress fluid behaviour from inclined plane test *Rheol. Acta* 34, pp 534-543;

Coussot P., Laigle D., 1994, "Etude des laves torrentielles sur modele reduit en similitude des phenomenes naturale". *La Houille Blanche* 3,44-49;

Coussot P., Laigle D., Arattano M., Deganutti A., Marchi L., 1998, Direct determination of rheological characteristics of debris flow. *J Hydraulic Engineering*, 124 (8): 865-868;

Coussot P., Meunier M., 1996, Recognition, classification and mechanical description of Debris Flow. *Earth Sci Rev* 40:209-227;

Coussot P., Piau J.M., 1995, A large scale field coaxial cylinders rheometer for the study of the rheology of natural coarse suspensions. *J Rheol* 39: 105-125;

Coussot P., Proust S., 1996, Slow unconfined spreading of a mud flow. *J Geophys. Res.* 101 (B11): 25217, 25229;

D'Agostino V., 1996, "Analisi quantitativa e qualitativa del trasporto solido torrentizio nei bacini montani del Trentino Orientale", In *Scritti dedicati a Giovanni Tournon*. Associazione Italiana di Ingegneria Agraria – Associazione Idrotecnica Italiana: Novara (Italy); 111–123;

D'Agostino V, 2006, le opere di idraulica torrentizia per il controllo dei sediment, *Sediments control works in mountain streams*, © Nuova Editoriale Bios- pp231-250;

Davies T., 1990, "Debris Flow surges-Experimental Simulation". *J. Hydrology (NZ)* 29(1), 18-46;

DeLeon A.A., Jeppson R.W, 1982, Hydraulics and numerical solutions of steady state but spatially varied debris flow, UWRL/ H-82/03, Utah Water research laboratori, Utah state University, Logan Utah;

Demurtas L., 2005, Calibrazione del Piano di Assetto Idrogeologico del Comune di Villagrande Strisaili (Nu). Tesi del Corso di Laurea in Ingegneria per l'ambiente e il territorio, Università di Cagliari 2004-2005;

Demurtas L., Demurtas F., Pendugiu B., Turconi L., 2007, Evento alluvionale del 6 dicembre 2004 in comune di Villagrande Strisaili, Ogliastra, Sardegna(Debris Flood on 6 december 2004 in Villagrande Strisaili, Sardinia) - GEAM, (Geoengineering Environment and Mining) Anno XLIV, n°3, dicembre 2007, 23-37;

Einstein H.A., 1942, Formulas for the Transportation of Bed Load. Transaction American Society of Civil Engineers, paper No.2140, v. 107, 561-577;

Falciai M., Trucchi P., 1996, – *Debris flow at Fusine (Valtellina, Italy – July 1987)*. Atti congresso “La difesa dalle alluvioni” , G.N.D.C.I. pubbl. n. 1963, Firenze, pp. 19 – 28;

Ferro V., 2006, La sistemazione dei bacini idrografici. II ed., McGraw-Hill, Milano;

Govi M.,1984, The instability processes induced by meteorological events. An approach for hazard evaluation in the piedmont region. Atti convegno “Progress in mass movement and sediment transport studies” Torino, 5 -7 december 1984;

Holmes R.R., Hinzinga R.J., Brown S.M., Jobson H.I., 1993, Laboratory procedures and data reduction techniques to determine rheologic properties of mass flow. USGS Water Resour Invest Rep. 93-4123;

Holzinger G., Huebl J., 2004, “Belastung Eines Murbrechers- Ab geleitet Aus Labor verruche” in MiKos M., Gutknecht D. (eds) 10. Kongress Interprevent 2004, 24-27. Maggio 2004, Riva del Garda, Vol. 3 pp 131-139.;

Huang X., Garcia M.H., 1998, “ A Herschel Bulkley Model for Mudflow down a slope” J. Fluid Mech. 374,305-333;

Huebl J., Steinwendtner H., 2000, “Estimation of Rheological Properties of Viscous Debris Flow Using a Belt Conveyor” Physics and Chemistry of the Earth (JPCE), 25 (B9), 751-755;

Huizinga R.J., 1993, An analysis of the two dimensional flow in a vertically rotating flume. Thesis University of Missouri- Rolla. USA;

Huizinga R.J., 1996, Verification of vertically rotating flume using non Newtonian fluid. *J Hydraulic Eng.* 122 (8): 456-459;

Hungr O., 1995, "A model for the Runout Analysis of Rapid Flow Slides, Debris Flow and Avalanches" *Canadian Geotechnic Journal* 32,610-623;

Hungr O., 2000, "Analyses of Debris Flow Surges Using the Theory of Uniformly Progressive Flow" *Earth Surface Processes and Landforms* 25, 483-495;

Iverson R.M., 1997, "The Physics of a debris Flows" *Rev. Geophys* 35(3),245-296;

Iverson R.M., Denlinger R.P, 2001, "Flow of Variably Fluidized Granular Masses Across Three-Dimensional Terrain.2.Numerical Predictions and Experimental Tests" *J. Geophys. Res.* 106 (B1),537-522;

Iverson R.M., Denlinger R.P., 2001a, "Flow of Varyably Fluized Granular Masses Across Three-Dimensional Terrain. 1 Culomb Mixture Theory". *J Geophys. Res.* 106(B1),537-552;

Iverson R.M., Denlinger R.P., 2001b, "Mechanics of Debris Flow and Debris Laden Flash Floods" *Proceedings of the Seventh Federal Interagency Sedimentation Conference, Reno, Nevada, Usa, Section IV;*

Iverson R.M., 2003, The physics of Debris Flows. *Rev Geophys* 35(3):245-296;

Iverson R.M, 2003, The Debris Flows Rheology myth. In Rickeenmamm D., Chen C.L. (eds) *Debris Flow Hazards mitigation: mechanics, predictions and assessment; Proceeding of the third International DFHM Conference Davos Switzerland September 10-12, 2003 Mill Press, Rotterdam, pp 303-314;*

Jonshon A.M., 1970, *Physical processes in geology.* Freeman and Cooper, San Francisco, pp 577;

Jop P., Forterre Y., Pouliquen O., 2006, A constitutive law for dense granular flows. *Nature* 441(8) 727-730;

Kaitna R., 2006, Debris flow experiments in a rotating drum. Thesis, University for Natural resources and applied life Sciences (BOKU) Austria, Vienna;

- Kaitna R., Rickenmann D., 2007, A new experimental facility for laboratory debris flow investigation. *J Hydraulic Research* Vol 45 No 6pp 797-810;
- Kaitna R., Rickenmann D., Schatzmann M., 2007, " Experimental study on rheologic behaviour of debris flow material, *Acta Geotechnica* DOI 10.1007/s11440-007-0026-z;
- Kaitna R., Rickenmann D., Schneiderbauer S., 2006, Comparative rheologic investigations in a vertically rotating flume and a moving bed conveyor belt flume *Wit Transactions on Ecology and The Environment* Vol. 90;
- Ling C., Chen C., 1989,"Idealized debris flow in Flume with bed driven by a Conveyor belt." *Proceedings of the 1989 National Conference of Hydraulic Engineering*, pp. 1144-1149;
- Major JJ, 1997, Verification of vertically rotating flum using non newtonian fluids. Discussion by Jon. J. Major. *J Hydraul Eng.* 123 (10): 936-937;
- Major JJ, Pearson T., 1992, Debris flow rheology: Experimental analysis of fine-grained slurries. *Water Resour Res.* 28: 841- 857;
- Marchi L., D'Agostino V., 2004, Estimation of debris-flow magnitude in the Eastern Italian Alps. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29, 207-220;
- McDougall S.D., Hungr O., 2004, " A model for the Analysis of Rapid Landslides Motion Across Three-Dimensional Terrain" *Canadian Geotechnical Journal* 41 (6) 1084-1097;
- Meyer-Peter E., Müller R., 1948, Formulas for Bedload Transport, *Proc. 2nd Meeting Intl. Ass. Hyd Structures Res.*, Stockolm, Sweden;
- Muller M., Tyrach J., Brunn P.O., 1999, Rheological Characterization of machine-applied plasters *ZKG Int* 52:252-258;
- Naef D., Rickenmann D., Rutschmann P., Mc Ardell BW, 2006, Comparison of flow resistance relations for debris flow using a one dimensional finite element simulation model. *Nat. Hazards Earth Syst Sci* 6:155-165;
- Noveon, 1995, Carbobol Ulltrez 10 polymer for personal care applications. Datasheet. <http://www.homecare.noveonic.com>;

- O'Brien J. S., Julien P.Y., 1988, Laboratory analysis for of mud flow properties J Hydraulic Eng. 114: 877-887;
- O'Brien O'Brien J.S., Julien P.Y., Fullerton, W.T., 1993, " Two Dimensional Water Flood and Mud Flow Simulation, Journal Hydraulic Engineering 119(29), PP. 244-261;
- O'Brien J.S., Jorgensen C.R., Garcia R., 2006, "Flo-2d: Users Manual";
- Ou, G., Mizuyama T., 1994, "Predicting the average sediment concentration of debris flows." J. Jpn. Erosion Control Eng. Soc. 47 (4), 9 – 13;
- Palacios D., Garcia R., Rubio V., Vigil R., 2003, Debris Flows in weathered granitic massif: Sierra del Gredos, Spain. Catena, Volume 51, Number 2, 20 February 2003, pp. 115-140(26);
- Parson J.D., Whipple K.X., Simoni A., 2001, Experimental study of the grain flow, fluid – mud transition in debris flow. Journal Geology 109: 427-447;
- Paulis G., 1987, Nomi di luogo della Sardegna-C.Delfino–Sassari
- Pica M., 1978, Resistenze al moto di correnti in alvei mobili. Estratto da "Idrotecnica", n. 3, giugno 1978. Università di Napoli, facoltà di Ingegneria, Istituti Idraulici;
- Pierson T.C., Costa J.E., 1987, " Archeologic classification of Subaerial Sediment-WaterFlows" Reviews in Engineering Geology. Vol III;
- Phillips CH.J., Davies T. R. H., 1991, "Determining rheological parameters of debris flow material. Geomorphology 4,101-110;
- Ponce V.M.,Theurer F.D., 1982, Accuracy criteria in diffusion routing. Journal of the hydraulics division, ASCE, vol. 108, no. HY6, June 1982, pg. 747-757
- Pudasaini S.P., Wang Y., Hutter K., 2005, Modelling debris flows down general Channels. Nat Hazards Hearth Syst Sci 5:799-819;
- Puligheddu G., 2005, Precipitazioni del 6-7 dicembre 2004 nell'area Centro Orientale della Sardegna". Assessorato ai Lavori Pubblici, Servizio Dighe e Risorse Idriche, Settore del Servizio Idrografico della Regione Autonoma della Sardegna. Cagliari;

- Raphson J.F.R.S., Thomas D. J.; Smith J. M., 1990, Notes and Records of the Royal Society of London, Vol. 44, No. 2. (Jul.), pp. 151-167;
- Remaitre A., Malet J. P., Maquaire O., Ancey C., Locat J., 2005, Flow behavior and run out modeling of a complex debris flow in a clay shale basin. Earth surf. Proc. Land forms 30: 479-488);
- Rickenmann D, 1999, "Empirical relationship for debris flow" Natural Hazards 19(1):47-77;
- Rickenmann D., Laigle d., Mc Ardell B.W., Hubl J., 2006, "Comparison of 2D debris flow simulation models with field events. Comput Geoscience 10:241-264. Doi:10.1007/s10596-005-9021-3;
- Rosso M., Cavallo C., Sesenna R., Citera E., Cussotto M., 2003, "*Modellazione numerica di un debris flow finalizzata alla progettazione di opere di difesa in ambiente alpino*" GEAM – Geoingegneria Ambientale e Mineraria, Associazione Georisorse e Ambiente c/o Dipartimento Georisorse e Territorio – Politecnico di Torino, Anno XL – dicembre n°4;
- Rubiu P. A. S., 2000, Studio preliminare al Piano di Gestione delle Lecce del Comune di Villagrande Strisaili (NU)-Tesi del Corso di Laurea in Scienze Forestali dell'Università della Tuscia di Viterbo;
- Savage S.B., Hutter K., 1989, The motion of a finite Mass of granular material down a rough incline. J Fluide Mech 199:177-215;
- Schatzmann M., 2005, Rheometry for large particle fluids and debris flows. Disertation n. 16093 ETH Zurich, Switzerland;
- Schoklitsch A.,1957, "River bed degradation below large capacity reservoirs. Trans. ASCE, 122;
- Sosio R., Crosta G.B., Frattini P., Valbuzzi E., 2006, Caratterizzazione reologica e e modellazione numerica di un debris Flow in ambiente alpino - Giornale di Geologia Applicata 3 (2006) pp:263-268;
- Takahashi T., 1978, "Mechanical characteristics of debris flow." J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng. 104 (8), 1153 – 1169;

Takahashi T., 1981, "Debris Flow." Annual Reviews of Fluid Mechanics, Vol 13;

Takahashi T., 1991, Debris flow. IAHR monograph series. Balkema, Rotterdam;

Takahashi T., Nakagawa H., 1991, *Estimation of a debris flow and the area of hazard for a given rainfall*. Study of Streams and Watersheds of high hydraulic irregularity - XXIV Iahr Congress, 9 – 13 september 1991. Madrid pp. A161-A168;

Tecca P.R., Galgaro A., Genevois R., Deganutti A. M., 2003, Development of a remotely controlled debris flow monitoring system in the Dolomites. Acqua Buona, Italy. Hydrol Process 17: 1771-1784;

Terzaghi K., 1963, Theoretical soil mechanics. Wiley, New York;

Tropeano D., Maraga F., Marchi L., Mortara G, Moscariello A., 1998, Colate detritiche torrentizie: aspetti granulometrici e influenza sul territorio. Mem. Soc. Geol. It. 53 pp 75-96;

Tropeano D., 1991, *High flow events and sediment transport in small streams in the "tertiary basin" area in piedmont (Northwest Italy)*. Earth surface processes and landforms, vol. 16 323-339 (1991).

Tropeano D., 1990, Indagini quantitative sul carico di sedimenti sospesi nel F. Dora Riparia in località Serre La Voute (Alta Val si Susa, Piemonte Occidentale). Boll. Ass. Min. Subalp., Anno XXVII, n. 1-2, marzo-giugno 1990;

Turconi L., Mussino S., 2003, Colate detritiche sul versante destro della Dora Riparia (Exilles, Valle di Susa): evento del 14-15 ottobre 2000. Geam, marzo – giugno 2003;

Wagner M. L., 1960, Dizionario etimologico Sardo–Heidelberg-C.Winter;