### POLITECNICO DI TORINO

I Facoltà di Ingegneria

#### Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

#### TESI DI LAUREA MAGISTRALE

# Analisi numerica dell'interazione tra flussi granulari e briglie filtranti: applicazione al caso di Saint Vincent (Aosta)



**Relatrice:** 

Prof.ssa Marina Pirulli

**Correlatore:** 

Dr. Alessandro Leonardi

**Candidato:** Ezio Calcagno

Anno Accademico 2018/2019

dedicato a Cristina, il mio unico grande amore.

### Ringraziamenti

Desidero ringraziare di cuore tutti coloro che mi hanno aiutato nella stesura di questa tesi: a loro va tutta la mia riconoscenza e la gratitudine per avermi guidato e supportato con suggerimenti e consigli utili. Mi assumo pienamente la responsabilità di ogni eventuale errore contenuto in questo documento.

Ringrazio in modo particolare la professoressa Marina Pirulli, relatrice di questa tesi, ed il dottor Alessandro Leonardi, correlatore: senza la loro guida e la loro disponibilità essa non esisterebbe.

Un ringraziamento speciale per i miei genitori che mi hanno permesso con i loro sacrifici di raggiungere questo traguardo e che mi hanno sempre sostenuto.

Un grazie speciale anche a mio fratello Simone che mi ha offerto il supporto informatico necessario per il lavoro preparatorio e la stesura del documento.

Desidero ringraziare alcune persone a me care: la mia nonna e tutti i miei parenti, per il loro affetto, i consigli e l'interesse mostrato nei miei confronti; gli amici di sempre: Michele, Mirko, Alex, Geo, Scotto, Bonino, Barra, Giacomo e Pippo per il loro sempre presente appoggio e incoraggiamento; i miei amici e colleghi Andrea e Marco con cui ho intrapreso l'avventura universitaria e tutti i nuovi amici conosciuti durante questi fantastici anni, provenienti da ogni parte d'Italia.

Infine voglio ringraziare Cristina a cui dedico questo lavoro, per essere sempre stata al mio fianco in questi anni e per avermi aiutato nei momenti di maggiore difficoltà con il suo dolcissimo sorriso.

### Sommario

La presente tesi tratta dell'interazione di una colata detritica (debris flow), con un'opera di difesa, in particolare una briglia filtrante a pettine. Tale struttura realmente esistente a Saint Vincent (AO) è monitorata dal Politecnico di Torino in termini di deformazioni del pettine, formato da profilati d'acciaio.

Durante eventi reali di colata detritica, tale sistema di monitoraggio ha registrato delle deformazioni di trazione, nonostante fossero attese, nei punti di applicazione degli strumenti, deformazioni di compressione. Tale opera, crollata a seguito di un evento particolarmente rilevante avvenuto nel luglio 2014, è stata successivamente ricostruita.

Lo scopo della presente tesi è di confrontare i risultati sperimentali con quelli numerici ottenuti da una modellazione del fenomeno e una migliore comprensione del comportamento strutturale dell'opera di difesa soggetta all'azione della colata.

Questo è stato realizzato attraverso l'accoppiamento di un codice DEM (dall'inglese Discrete Element Method) e un codice FEM (Finte Element Method) rispettivamente per la modellazione della colata detritica come un flusso granulare discreto e per l'analisi della risposta strutturale della briglia filtrante.

In questo modo si è ottenuto numericamente l'evoluzione temporale delle deformazioni nella posizione della strumentazione di monitoraggio ricavando valori di trazione sia nella fase dinamica di impatto del flusso sia al raggiungimento della condizione statica finale al termine del fenomeno, ottenendo ottimi riscontri con le registrazioni sperimentali.

Si sono inoltre utilizzate le linee guida austriache ONR 248XX contenenti modelli e combinazioni di carico per la progettazione di queste opere di difesa, per la valutazione analitica delle sollecitazioni agenti sui profilati di cui sono state effettuate le verifiche strutturali secondo la normativa NTC2018.

E' risultato che le sollecitazioni derivanti dalle combinazioni austriache, basate su modelli bidimensionali, di taglio e flessione semplice sono state soddisfatte, mentre le sollecitazioni determinate numericamente non hanno soddisfatto la verifica.

In quest'ultimo caso infatti, data la configurazione tridimensionale del modello si è ricavata una flessione biassiale, quindi un comportamento differente dal precedente che giustifica le deformazioni di trazione registrate nella posizione verso valle dal monitoraggio.

I profilati IPE 270 utilizzati per il filtro della briglia, sono infatti caratterizzati da una forte disuguaglianza di resistenza flessionale nelle due direzioni principali, che ha determinato il risultato negativo delle verifiche a flessione biassiale effettuate; sezioni con tali caratteristiche sono pertanto sconsigliate nella mitigazione di fenomeni di colata detritica, che determinano azioni anche trasversalmente alla direzione del flusso.



# Indice generale

| Indice delle figure  | vii  |
|--|------|
| Indice delle tabelle   | xiii |
| Notazione e simbologia   | XV   |
| Capitolo 1 Introduzione  | 1    |
| Capitolo 2 Colate detritiche e briglie filtranti                         | 3    |
| 2.1 Sistemi di classificazione dei fenomeni franosi                      | 3    |
| 2.1.1 Classificazione di Varnes (1978)                                   | 4    |
| 2.1.2 Classificazione di Hungr et al. (2001)                             | 7    |
| 2.1.3 Ulteriori sistemi di classificazione                               | 9    |
| 2.2 Colata di detrito: descrizione fenomenologica                        | 13   |
| 2.2.1 Zona di innesco e relative cause                                   | 14   |
| 2.2.2 Zona di trasporto e erosione                                       | 15   |
| 2.2.3 Zona di deposizione  | 17   |
| 2.3 Misure di mitigazione per le colate detritiche                       | 19   |
| 2.3.1 Misure di mitigazione passive                                      | 19   |
| 2.3.2 Misure di mitigazione attive                                       | 20   |
| Capitolo 3 Modellazione dell'interazione tra colata detritica e barriera | 29   |
| 3.1 Panoramica dei modelli di interazione                                | 29   |
| 3.2 Modelli di impatto idraulici   | 31   |
| 3.2.1 Modello idrostatico  | 32   |
| 3.2.2 Modello idrodinamico   | 34   |
| 3.3 Forze d'impatto di blocchi   | 37   |
| 3.4 Linee guida austriache   | 39   |
| 3.4.1 ONR 24800  | 40   |
| 3.4.2 ONR 24801  | 41   |
| 3.4.3 ONR 24802  | 43   |
| 3.4.4 ONR 24803  | 48   |
| 3.5 Analisi dell'impatto tramite modelli numerici                        | 48   |

#### INDICE GENERALE

| Capitolo 4 Approccio DEM per la modellazione di flussi granulari                          | 51  |
|---|-----|
| 4.1 DEM: Il metodo agli elementi discreti   | 51  |
| 4.2 Modelli di contatto delle particelle  | 54  |
| 4.2.1 Modello lineare   | 55  |
| 4.2.2 Modello hertziano   | 56  |
| 4.2.3 Modello viscoso   | 57  |
| 4.2.4 Modello di Cundall e Strack   | 58  |
| 4.3 Coefficiente di rotolamento   | 59  |
| 4.4 Simulazione DEM dell'impatto sfera-muro   | 60  |
| 4.4.1 Simulazioni con modello lineare   | 62  |
| 4.4.2 Simulazioni con modello hertziano   | 65  |
| 4.4.3 Confronto dei risultati   | 67  |
| Capitolo 5 Approccio FEM per l'analisi della risposta strutturale                         | 69  |
| 5.1 Descrizione del codice Abaqus   | 69  |
| 5.2 Metodi di integrazione diretta nel tempo  | 72  |
| 5.2.1 Metodi impliciti: metodo dell'accelerazione media                                   | 73  |
| 5.2.2 Metodi espliciti: metodo delle differenze centrali                                  | 76  |
| 5.2.3 Lo smorzamento del materiale  | 78  |
| 5.3 Analisi FEM: risposta strutturale del muro  | 80  |
| Capitolo 6 Descrizione del caso studio di Saint Vincent (AO)                              | 87  |
| 6.1 Descrizione generale del sito   | 87  |
| 6.2.1 Briglie a rete  | 92  |
| 6.2.2 Briglia in c.a. in località Tromen  | 93  |
| 6.2.3 Briglia filtrante strumentata in località Perrière                                  | 94  |
| 6.3 Sequenza temporale degli eventi   | 99  |
| Capitolo 7 Modellazione DEM-FEM dell'interazione tra flusso granulare e briglia filtrante | 111 |
| 7.1 Modellazione DEM dell'interazione   | 111 |
| 7.1.1 Modellazione del flusso granulare   | 112 |
| 7.1.2 Modellazione della briglia filtrante  | 114 |
| 7.1.3 Esecuzione dell'analisi e risultati   | 115 |
| 7.2 Modellazione FEM dell'interazione   | 125 |
| 7.2.1 Part module   | 125 |
| 7.2.2 Property module   | 126 |

| 7.2.3 Assembly module                                 | 128 |
|---|-----|
| 7.2.4 Step module                                     | 128 |
| 7.2.5 Interaction module                              | 130 |
| 7.2.6 Load module                                     | 131 |
| 7.2.7 Mesh module                                     | 132 |
| 7.2.8 Job module                                      | 133 |
| 7.3 Risultati della modellazione FEM                  | 134 |
| 7.3.1 Risultati dell'analisi con i/D = 3              | 134 |
| 7.3.2 Risultati dell'analisi con i/D = 2,5            | 138 |
| 7.3.3 Risultati dell'analisi con i/D = 2              | 142 |
| 7.3.4 Confronto con i risultati sperimentali          | 146 |
| Capitolo 8 Verifiche strutturali dei profilati        | 149 |
| 8.1 Richiami sulla normativa italiana (NTC2018)       | 149 |
| 8.1.1 Verifiche di sicurezza                          | 149 |
| 8.1.1 Valutazione della sicurezza                     | 151 |
| 8.1.2 Flessione retta                                 | 153 |
| 8.1.3 Taglio  | 153 |
| 8.1.4 Presso o tenso-flessione biassiale              | 154 |
| 8.2 Verifiche strutturali                             | 155 |
| 8.2.1 Analisi con i/D = 3                             | 155 |
| 8.2.2 Analisi con i/D = 2,5                           | 161 |
| 8.2.3 Analisi con i/D = 2                             | 165 |
| Capitolo 9 Conclusioni e possibili ulteriori sviluppi | 169 |
| Appendice A   | 173 |
| File per le applicazioni DEM                          | 173 |
| A.1 Configurazione iniziale delle particelle          | 173 |
| A.2 File di configurazione                            | 174 |
| Ribliografia  | 177 |



# Indice delle figure

| Figura 2.1: Rappresentazione delle classi di movimento individuate nella  |     |
|---|-----|
| classificazione di Varnes 1978 (Pirulli, 2014).   | 5   |
| Figura 2.2: Criterio di classificazione meccanico delle colate di detrito secondo   |     |
| Takahashi (2007)  | 12  |
| Figura 2.3: Zone caratteristiche di una colata detritica (VanDine, 1996)  | 13  |
| Figura 2.4: Rappresentazione della configurazione geometrica dei blocchi  |     |
| assunta dalla colata durante il moto (Bardou, 2003).  | 16  |
| Figura 2.5: Rappresentazione tridimensionale del moto interno al flusso seguito   |     |
| 9 11  | 17  |
| Figura 2.6: Possibili forme assunte dal detrito depositato in un canale (VanDine,   |     |
|   | 18  |
| Figura 2.7: Schema delle principali opere di difesa attuabili contro le colate  |     |
| detritiche (D'Agostino, 2005).  | 20  |
| Figura 2.8: (a) Schema di disposizione delle briglie di consolidamento  |     |
| (VanDine, 1996); (b) disposizione delle soglie di stabilizzazione lungo un  |     |
| profilo longitudinale del canale (D'Agostino, 2005).  | 21  |
| Figura 2.9: Briglia frangicolata situata in località Chenaux, Valle d'Aosta   | 22  |
| Figura 2.10: Vista in pianta e in assonometria di uno schema di bacino di   |     |
| deposito in conoide (VanDine, 1996)   | 23  |
| Figura 2.11: Rappresentazione di diverse tipologie di barriere aperte (Hubl et  |     |
| al., 2003)  | 27  |
|   |     |
| Figura 3.1: Differenza principale tra l'approccio al continuo e al discontinuo  | 2.1 |
| nella rappresentazione della massa del flusso (Pirulli, 2014)   |     |
| Figura 3.2: Modello di carico per le colate detritiche (Hubl, 2017)   | 42  |
| Figura 3.3: Proiezione dell'area trasversale di impatto della colata detritica sulla  | 42  |
| barriera per la determinazione dell'area di impatto dinamica (Hubl, 2017)   | 43  |
| Figura 3.4: Differenti tipologie di collasso delle barriere di difesa torrentizia:  |     |
| (A) rottura per scorrimento alla base; (B) rottura per ribaltamento; (C) rottura per  |     |
| superamento della capacità portante del terreno sotto la fondazione; (D) rottura per sifonamento (E) rottura per sollevamento; (F) perdita di stabilità generale; |     |
| 1   |     |
| (G) rottura strutturale per flessione; (H) rottura strutturale per taglio (Suda et al.,   | 44  |
| 2010)   | 44  |
| condizioni di riempimento del bacino di deposito a tergo dell'opera   | 45  |
| Figura 3.6: Schema a blocchi dell'accoppiamento DEM-FEM utilizzato per  | 43  |
| l'analisi dell'interazione flusso detritico/opera di difesa   | 50  |
| i anansi uch interazione musso uch nico/opera ui unesa  | 50  |

| <b>Figura 4.1:</b> Rappresentazione geometrica della collisione tra due particelle e del sistema di riferimento locale (Leonardi, 2015).                          | 52  |
|---|-----|
| Figura 4.2: Rappresentazione di cluster composti da due e da tre sfere  |     |
| (Leonardi, 2015).   | 53  |
| <b>Figura 4.3:</b> Rappresentazione del modello di contatto tra due sfere (Leonardi, 2015)  | 55  |
| Figura 4.4: Rappresentazione del momento resistente generato dalla forza  |     |
| normale che nasce dal contatto della sfera con un muro (Marchelli, 2018)  | 59  |
| Figura 4.5: Rappresentazione geometrica dell'impatto sfera contro muro tramite  |     |
| due differenti viste tridimensionali.   | 61  |
| Figura 4.6: Rappresentazione di alcuni istanti temporali dell'evoluzione della  |     |
| simulazione   | 63  |
| Figura 4.7: Evoluzione temporale della forza impulsiva agente contro il muro  |     |
| registrata con $\Delta t$ out = 0,02 s caso (a) e $\Delta t$ out = 0,002 s caso (b)   | 64  |
| Figura 4.8: Evoluzione temporale della forza di impatto contro il muro con  |     |
| rapporto critico pari a 0,0002.   | 65  |
| Figura 4.9: Evoluzione temporale della forza di impatto contro il muro con il   |     |
| modello hertziano.  | 66  |
| Figura 4.10: Confronto della forza normale al muro registrata con il modello  |     |
| lineare (linea blu) e il modello hertziano (linea rossa tratteggiata)   | 67  |
|   |     |
| Figura 5.1: Forme geometriche disponibili (Abaqus/CAE user's guide)   | 70  |
| Figura 5.2: Famiglie di elementi comunemente usati nelle analisi (Abaqus  |     |
| analysis user's guide vol. IV)  | 72  |
| Figura 5.3: Andamento nell'intervallo temporale dell'accelerazione, velocità e  |     |
| spostamento (Ceravolo R., 2018).  | 74  |
| Figura 5.4: Discretizzazione della risposta spostamento secondo il metodo delle   |     |
| differenze centrali (Ceravolo R., 2018).  |     |
| Figura 5.5: Funzione dello smorzamento proporzionale (Gugliotta, 2002)  | 79  |
| Figura 5.6: Rappresentazione geometrica del muro, della condizione di incastro  |     |
| ai bordi e della forza concentrata  | 80  |
| Figura 5.7: Rappresentazione della suddivisione in elementi finiti (mesh) del   |     |
| modello   |     |
| <b>Figura 5.8:</b> Soluzione dell'analisi in termini di spostamento u <sub>3</sub>  | 82  |
| <b>Figura 5.9:</b> Evoluzione temporale degli spostamenti u <sub>3</sub> nel punto di applicazione  |     |
| della forza.  | 83  |
| Figura 5.10: Primi quattro modi di vibrare del muro e relative frequenze  |     |
| proprie   | 84  |
| Figura 5.11: Spostamenti u <sub>3</sub> lungo l'intera larghezza della parte sommitale del  | 0.5 |
| muro; la forzante impulsiva è applicata a 1,7 m dall'origine  | 85  |
| Figura 5.12: Evoluzione temporale degli spostamenti u <sub>3</sub> nel punto di   | 0.0 |
| applicazione della forzante sinusoidale.  | 86  |
| Figure 6.1. Delimitazione del hasine Saint Vincent (committue a micha a)  |     |
| <b>Figura 6.1:</b> Delimitazione del bacino Saint Vincent (campitura a righe azzurre). Elaborazione tramite GeoNavigatore cartografico SCT della Regione Autonoma |     |
| Valle d'Aosta (Melfin d.)   | 99  |

| Figura 6.2: Delimitazione del bacino Saint Vincent e individuazione delle tre        |    |
|--|----|
| aste torrentizie: Grand Valey, Biegnè, Saint Valentin. Elaborazione tramite          |    |
| GeoNavigatore cartografico SCT della Regione Autonoma Valle d'Aosta (Melfi,          |    |
| n.d.)8   | 39 |
| Figura 6.3: Posizione delle opere di difesa contro le colate detritiche lungo il     |    |
|  | 1  |
| Figura 6.4: Briglie a rete in località Perrière; (a) briglia a monte con particolare |    |
| degli anelli di dissipazione; (b) briglia a valle fondata su pali (Melfi, n.d.)9     | )2 |
| Figura 6.5: Briglia in c.a. posta in località Tromen; (a) vista frontale; (b) vista  |    |
| posteriore con gli speroni centrali in evidenza (Melfi, n.d.)9                       | )3 |
| Figura 6.6: Fotografia della briglia strumentata in località Perrière (Regione       |    |
|  | 94 |
| Figura 6.7: Schema geometrico non in scala della sezione trasversale della           |    |
| briglia sita in località Perrière (misure in cm).                                    | )4 |
| Figura 6.8: Schema della sezione di un profilato IPE 270 (Beruzzi, 2011)9            | )5 |
| Figura 6.9: Schema della disposizione dei trasduttori sui profilati con              |    |
| •  | 96 |
| Figura 6.10: Fotografia del trasduttore in posizione A, assicurato all'ala del       |    |
| profilato tramite le viti di serraggio (Borri, 2012)9                                | 96 |
| Figura 6.11: Armadio protettivo in acciaio inossidabile contenente il quadro         |    |
| elettrico (Borri, 2012).   | 7  |
| Figura 6.12: Confronto della configurazione geometrica della briglia prima e         |    |
| dopo il collasso del 2014 (Melfi, n.d.)9   | 8( |
| Figura 6.13: Fotografia scattata da elicottero che mostra un canale del bacino       |    |
| subito dopo l'evento del 2004 (fotografia ing. Gaudio)10                             | )1 |
| Figura 6.14: Fotografia che mostra una parte del deposito nei pressi del centro      |    |
| abitato di Saint Vincent in seguito all'evento del 2004 (fotografia Ing. Gaudio)10   | )1 |
| Figura 6.15: Fotografie successive alla colata detritica del marzo 2008; (a)         |    |
| briglia a pettine di monte ostruita dal materiale con evidente erosione della        |    |
| sponda destra orografica; (b) guado parzialmente ostruito dai detriti (Regione       |    |
| Valle d'Aosta).  | )2 |
| Figura 6.16: Fotografia della briglia a pettine in località Perrière completamente   |    |
| ostruita e parzialmente danneggiata, con evidente erosione della sponda destra       |    |
| (Regione Valle d'Aosta).   | )3 |
| Figura 6.17: Fotografie delle briglie a rete in seguito all'evento del maggio        |    |
| 2008; (a) briglia parzialmente interessata con poco materiale depositato e lievi     |    |
| danni; (b) e (c) briglia a rete completamente distrutta dalla colata (Regione Valle  |    |
| d'Aosta)   | )4 |
| Figura 6.18: Fotografie delle opere di mitigazione realizzate nel 2009               |    |
| interessate dall'evento del 6 giugno 2011; (a) vista in sequenza delle due briglie   |    |
| filtranti a monte del guado; (b) briglia a pettine di monte completamente ostruita   |    |
| dal materiale detritico (Regione Valle d'Aosta)10                                    | )5 |
| Figura 6.19: Fotografie dei danni causati dall'evento franoso; (a) briglia di        |    |
| monte in località Perrière completamente ostruita e danneggiamento della             |    |
| strumentazione di monitoraggio; (b) particolare del danno subito dalla               |    |
| strumentazione di monitoraggio delle deformazioni (Regione Valle d'Aosta)10          | )6 |

| Figura 6.20: Fotografia del settore di distacco della frana da crollo e del  |     |
|--|-----|
| percorso di propagazione incanalato (Regione Valle d'Aosta, Catasto Dissesti   |     |
| Regionale CST).  | 107 |
| Figura 6.21: Fotografia del collasso strutturale della briglia di monte in località  |     |
| Perrière (cortesia Regione Autonoma Valle d'Aosta).  | 108 |
| <b>Figura 6.22:</b> Particolari del collasso strutturale; (a) profilati in acciaio della   |     |
| briglia; (b) zona di collegamento tra profilato e basamento di calcestruzzo; (c)   |     |
| sponda laterale destra della briglia (cortesia Regione Autonoma Valle d'Aosta)   | 109 |
| <b>Figura 6.23:</b> Completa ostruzione di entrambe le briglie filtranti a pettine senza   | 207 |
| danni evidenti (Regione Valle d'Aosta, Catasto Dissesti Regionale CST)   | 110 |
| (20-ground + unit de 2000), e unito de 2000 e unito de |     |
| Figura 7.1: Configurazione geometrica del modello DEM, visualizzata con il   |     |
| programma ParaView   | 112 |
| Figura 7.2: Schema ordinato di particelle ottenuto tramite il codice Matlab  | 113 |
| Figura 7.3: Individuazione della parte di briglia filtrante modellata via DEM  |     |
| <b>Figura 7.4:</b> Evoluzione temporale della simulazione dell'interazione tra flusso  |     |
| granulare e briglia a pettine.   | 118 |
| <b>Figura 7.5:</b> Risultati DEM i termini di forze scambiate tra il flusso granulare e  |     |
| la briglia in tre posizioni rappresentative A, B e C.  | 120 |
| <b>Figura 7.6:</b> Confronto tra le combinazioni delle ONR 24802 e le configurazioni   |     |
| iniziali nei tre casi delle simulazioni DEM.   | 122 |
| <b>Figura 7.7:</b> Confronto delle altezze raggiunte dal deposito granulare al termine   |     |
| di ciascun caso di analisi, per differenti valori del diametro D.  | 124 |
| <b>Figura 7.8:</b> Rappresentazione non in scala delle due parti create in Abaqus; (a)   |     |
| basamento in calcestruzzo armato; (b) asta rappresentante il profilato d'acciaio   | 125 |
| <b>Figura 7.9:</b> Finestra di dialogo di Abaqus per l'assegnazione del profilo di una   |     |
| sezione.   | 126 |
| Figura 7.10: Modello assemblato della briglia filtrante a pettine; (a)   |     |
| assemblaggio con i profilati visualizzati come "fili"; (b) profilati visualizzati con  |     |
| la sezione IPE assegnata.  | 128 |
| <b>Figura 7.11:</b> Schema di sezione a I con indicazione dei punti di integrazione; (a)   |     |
| trave nel piano; (b) trave nello spazio (Abaqus analysis user's guide vol. IV)   | 130 |
| Figura 7.12: Rappresentazione del vincolo interno "embedded region"  |     |
| Figura 7.13: Schema non in scala dell'accoppiamento DEM-FEM  |     |
| dell'interazione; (a) applicazione delle forze concentrate sui profilati; (b)  |     |
| modello DEM della barriera con evidenziate le aste centrali  | 132 |
| Figura 7.14: Visualizzazione della mesh del modello e la sua discretizzazione in   |     |
| elementi.  | 133 |
| Figura 7.15: Rappresentazione delle deformazioni dei profilati in alcuni istanti   |     |
| temporali  | 134 |
| <b>Figura 7.16:</b> Evoluzione del momento di reazione all'incastro del profilato  |     |
| sinistro e destro, evidenziati rispettivamente in rosso e blu.   | 135 |
| <b>Figura 7.17:</b> Andamento temporale dei momenti flettenti agenti sui profilati   |     |
| circa nel punto di applicazione del monitoraggio   | 136 |
| Figura 7.18: Andamento temporale del taglio sollecitante nella sezione di  |     |
| interesse.   | 137 |

| Figura 7.19: Andamento temporale delle deformazioni assiali nel punto di                     |                  |
|--|------------------|
| interesse.   | 137              |
| Figura 7.20: Rappresentazione delle deformazioni dei profilati in alcuni istanti             |                  |
| temporali rappresentativi, amplificate di un fattore 2,5                                     | 138              |
| Figura 7.21: Andamento temporale dei momenti reagenti nella sezione di                       | 120              |
| incastro.  | 139              |
| <b>Figura 7.22:</b> Andamento temporale dei momenti sollecitanti nella posizione monitorata. | 139              |
| Figura 7.23: Rappresentazione del fenomeno di riattivazione del cumulo di                    | 139              |
| deposito; (a) e (b) particolari della sedimentazione del secondo strato di                   |                  |
| particelle che causa la riattivazione del deposito sottostante; (c) e (d) istanti            |                  |
| successivi in cui avviene la riattivazione   | 140              |
| Figura 7.24: Andamento temporale del taglio sollecitante nella sezione di                    | 140              |
| interesse.   | 141              |
| Figura 7.25: Andamento temporale delle deformazioni assiali nel punto di                     | 171              |
| interesse.   | 141              |
| Figura 7.26: Rappresentazione delle deformazioni dei profilati in alcuni istanti             | 171              |
| temporali rappresentativi.   | 142              |
| Figura 7.27: Andamento temporale dei momenti reagenti nella sezione di                       | 1 <del>7</del> 2 |
| incastro.  | 143              |
| Figura 7.28: Andamento temporale dei momenti sollecitanti nella posizione                    | 17J              |
| monitorata   | 143              |
| Figura 7.29: Andamento temporale del taglio sollecitante nella sezione di                    | 173              |
| interesse.   | 144              |
| Figura 7.30: Andamento temporale delle deformazioni assiali nel punto di                     |                  |
| interesse.   | 144              |
| <b>Figura 7.31:</b> Confronto dei risultati di momento reagente all'incastro; (a) fattore    |                  |
| di smorzamento $\alpha = 2.5$ ; (b) tempo di risoluzione $\Delta t_{out} = 0.025$ s          | 145              |
| <b>Figura 7.32:</b> Storie di deformazione sperimentali durante una colata detritica a       | 1 10             |
| Saint Vincent.   | 146              |
| <b>Figura 7.33:</b> Confronto tra i risultati sperimentali e numerici di deformazione        |                  |
| assiale.   | 147              |
| Figura 7.34: Confronto tra i risultati numerici e sperimentali di deformazione,              |                  |
| nella fase finale.   | 148              |
|  |                  |
| Figura 8.1: Configurazioni geometriche del flusso granulare; fila (a)                        |                  |
| configurazione iniziale; fila (b) configurazione assunta immediatamente prima                |                  |
| dell'impatto.  | 156              |
| Figura 8.2: Configurazioni geometriche del flusso granulare; fila (a)                        |                  |
| configurazione iniziale; fila (b) configurazione assunta immediatamente prima o              |                  |
| durante l'impatto.   | 162              |
| Figura 8.3: Configurazioni geometriche del flusso granulare; fila (a)                        |                  |
| configurazione iniziale; fila (b) configurazione assunta immediatamente prima                |                  |
| dell'impatto.  | 165              |

#### INDICE DELLE FIGURE

| Figura 9.1: Evidenze fotografiche del comportamento deformativo dei profilati      |      |
|--|------|
| sotto l'azione della colata; (a) evento del 3 marzo 2008; (b) evento del 27 maggio | 1.70 |
| 2008)  | 1/0  |
| Figura A.1: Estratto di particleFile utilizzato nelle simulazioni DEM              | 173  |
| Figura A.2: Estratto della prima parte del file di configurazione                  | 174  |
| Figura A.3: Seconda parte del file di configurazione del DEM                       | 175  |

# Indice delle tabelle

| Tabella 2.1: Classificazione basata sul volume della frana (Fell, 1994)   |              |
|---|--------------|
| Tabella 2.2: Classificazione dei fenomeni franosi secondo Varnes (1978).  |              |
| Tabella 2.3: Scala delle velocità delle frane (Cruden e Varnes 1996).   | <u>.</u><br> |
| <b>Tabella 2.4:</b> Classificazione dei fenomeni franosi di tipo flusso secondo Hungr                                       |              |
| et al. (2001); in rosso sono evidenziate le frane di tipo flusso che coinvolgono  |              |
| materiale detritico.  | 8            |
| Tabella 2.5: Caratteristiche del materiale coinvolto nelle frane di tipo flusso   |              |
| (Hungr et al. 2001); in rosso sono evidenziati i materiali tipici coinvolti nei   |              |
| fenomeni di flusso.   | 8            |
| <b>Tabella 2.6:</b> Confronto tra i valori di pendenza della zona di innesco forniti da                                     |              |
| diversi autori (Marchelli, 2018)  | 15           |
|   |              |
| Tabella 3.1: Intervalli di variazione della densità e della concentrazione solida   |              |
| in volume, secondo la classificazione di Pierson e Costa, (1987)  | 32           |
| Tabella 3.2: Valori del coefficiente empirico k per la valutazione della forza di   |              |
| impatto idrostatica secondo diversi autori.   | 33           |
| <b>Tabella 3.3:</b> Valori del coefficiente empirico α per la valutazione della forza di                                    |              |
| impatto idrodinamica secondo diversi autori   | 35           |
| Tabella 3.4: Elenco di formulazioni per la valutazione della forza di impatto di  |              |
| massi, proposta da Huang et al. (2007).   | 38           |
| Tabella 3.5: Differenti caratteristiche delle tipologie di processo definite nelle  |              |
| ONR 24800 (Suda et al., 2010).  | 41           |
| Tabella 3.6: Tabella riassuntiva contenente tutte le combinazioni di carico   |              |
| individuate dalle linee guida austriache (Melfi, n.d.).   | 47           |
|   |              |
| Tabella 4.1: Parametri usati nella simulazione con modello lineare.   |              |
| Tabella 4.2: Parametri usati nella simulazione con modello hertziano.   |              |
| Tabella 4.3: Risultati ottenuti con l'applicazione della teoria di Hertz.   | 68           |
|   | 0.4          |
| Tabella 5.1: Frequenze proprie del muro.  | 84           |
| T-1-U- (1. C  | 0.4          |
| <b>Tabella 6.1:</b> Caratteristiche del profilato IPE 270 con riferimento alla figura 6.8                                   | 95           |
| <b>Tabella 6.2:</b> Cronistoria degli eventi noti che hanno interessato il bacino del                                       | 99           |
| Grand Valey fino al 2002 (Melfi, n.d.).   | 95           |
| Tabella 7.1: Parametri usati nella simulazione DEM  | 114          |
| Tabella 7.1: Parametri usati nena simulazione DEM.         Tabella 7.2: Proprietà dei materiali utilizzati nel modello FEM. |              |
| Tabena 1.2. I ropricta dei materian unitzzan nei modeno i zivi  | 1∠(          |

#### INDICE DELLE TABELLE

| <b>Tabella 7.3:</b> Risultati derivanti dall'analisi modale della struttura eseguita con                        |      |
|---|------|
| Abaqus/Standard; in rosso sono indicati i valori utilizzati per la valutazione                                  | 127  |
| Taballa 9.1. Coefficienti narziali nar la azioni e nar l'effette della azioni (Tab                              |      |
| <b>Tabella 8.1:</b> Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni (Tab. 6.2.I delle NTC2008) | 150  |
| <b>Tabella 8.2:</b> Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno (Tab.                          | 130  |
|   | 151  |
| <b>Tabella 8.3:</b> Coefficienti parziali per le verifiche agli stati limite ultimi di muri                     | 131  |
| di sostegno (Tab. 6.5.I delle NTC2008).   | 151  |
| <b>Tabella 8.4:</b> Classificazione di alcune sezioni tipiche (Tab. 4.2.III delle                               |      |
| NTC2008).   | 152  |
| Tabella 8.5: Parametri generali impiegati nella valutazione delle azioni  |      |
| <b>Tabella 8.6:</b> Valutazione delle azioni e delle sollecitazioni agenti nella sezione                        |      |
| di incastro per i tre casi analizzati.  | 157  |
| Tabella 8.7: Sollecitazioni di progetto dei profilati ricavate dall'analisi DEM-                                |      |
| FEM.  | 159  |
| Tabella 8.8: Parametri geometrici e di resistenza del profilato di acciaio                                      |      |
| Tabella 8.9: Risultati delle verifiche a taglio.  | 160  |
| Tabella 8.10: Risultati delle verifiche a flessione semplice.   | 161  |
| Tabella 8.11: Risultati delle verifiche a flessione biassiale   | 161  |
| <b>Tabella 8.12:</b> Valutazione delle azioni e delle sollecitazioni per il caso 1 e il                         |      |
| caso 2.   |      |
| Tabella 8.13: Valutazione delle azioni e delle sollecitazioni per il caso 3                                     | 163  |
| Tabella 8.14: Sollecitazioni di progetto dei profilati ricavate dall'analisi DEM-                               |      |
| FEM   |      |
| Tabella 8.15: Risultati delle verifiche a taglio.   |      |
| Tabella 8.16: Risultati delle verifiche a flessione semplice.   |      |
| Tabella 8.17: Risultati delle verifiche a flessione biassiale.  | 164  |
| Tabella 8.18: Valutazione delle azioni e delle sollecitazioni per i tre differenti                              |      |
| casi  | 166  |
| <b>Tabella 8.19:</b> Sollecitazioni di progetto dei profilati ricavate dall'analisi DEM-                        | 1.5= |
| FEM   |      |
| Tabella 8.20: Risultati delle verifiche a taglio.   |      |
| <b>Tabella 8.21:</b> Risultati delle verifiche a flessione semplice.  |      |
| <b>Tabella 8.22:</b> Risultati delle verifiche a flessione biassiale  | 168  |

### Notazione e simbologia

In questo documento di tesi, ove non diversamente specificato, si adotta la notazione vettoriale con la seguente convenzione: i simboli che rappresentano delle grandezze vettoriali o tensori sono indicate in grassetto mentre le grandezze scalari sono indicate con il simbolo semplice. Non vi è distinzione tra simboli in maiuscolo o minuscolo per quanto riguarda la tipologia di grandezza indicata. Un punto o due punti al di sopra di un simbolo indica il livello di derivazione temporale di tale grandezza. Il sistema di riferimento globale adottato è il sistema di coordinate cartesiano con assi x, y e z mentre il sistema di riferimento locale è indicato con la terna ortogonale di assi n, t e b ossia normale, tangenziale e binormale. I due principali acronimi utilizzati nel documento sono DEM ovvero Discrete Element Method e FEM, Finite Element Method. Di seguito si riporta la lista dei simboli utilizzati all'interno della presente tesi, con l'unità di misura e una breve descrizione. Nel caso in cui lo stesso simbolo sia stato utilizzato per differenti parametri sono indicati entrambi, con l'unità di misura del secondo tra parentesi. Successivamente si riportano i principali apici e pedici utilizzati nel documento.

#### Simboli latini

| Simbolo      | Unità               | Descrizione  |  |  |
|--------------|---------------------|--|--|--|
| A            | $m^2(m)$            | Area o Raggio di rotolamento                           |  |  |
| b            | m (m)               | Base o Larghezza                                       |  |  |
| Ba           | -                   | Numero di Bagnold                                      |  |  |
| c            | - (kg/s)            | Coefficiente di rotolamento o Smorzamento              |  |  |
| C            | %                   | Frazione solida  |  |  |
| d, D         | m                   | Diametro o distanza                                    |  |  |
| e            | kg/m s <sup>2</sup> | Pressione del terreno                                  |  |  |
| E            | kg/m s <sup>2</sup> | Modulo elastico o di Young                             |  |  |
| f            | 1/s                 | Frequenza  |  |  |
| $\mathbf{F}$ | $kg m/s^2$          | Forza  |  |  |
| $F_r$        | -                   | Numero di Froude                                       |  |  |
| g            | $m/s^2$             | Accelerazione di gravità                               |  |  |
| h            | m                   | Altezza  |  |  |
| i            | m                   | Interasse  |  |  |
| J            | kg m <sup>2</sup>   | Momento di inerzia                                     |  |  |
| k            | - (kg/m)            | Coefficiente di amplificazione o Rigidezza di contatto |  |  |

| K               | - (-)                        | Fattore di riduzione o Coefficiente di spinta        |
|-----------------|------------------------------|--|
| m               | kg                           | Massa  |
| $\widetilde{m}$ | kg                           | Massa effettiva                                      |
| M               | $kg m^2/s^2$                 | Momento  |
| Ma              | -                            | Numero di massa                                      |
| p               | $kg/m s^2 (kg m/ s^2)$       | Pressione o Forza esterna                            |
| P               | $kg m/s^2$                   | Forza  |
| PI              | %                            | Indice di plasticità                                 |
| Q               | $m^3/s$                      | Portata  |
| r               | m                            | Raggio   |
| $\tilde{r}$     | m                            | Raggio effettivo                                     |
| Re              | -                            | Numero di Reynolds                                   |
| t               | s (m)                        | Tempo o Spessore                                     |
| T               | $kg/m s^2 (s)$               | Tensione totale o Periodo                            |
| u, v            | m/s                          | Velocità   |
| V               | $m^3 (kg m/s^2)$             | Volume o Taglio                                      |
| W               | % (m) (kg/m s <sup>2</sup> ) | Contenuto d'acqua o larghezza o pressione dell'acqua |
| W               | $m^3$                        | Modulo di resistenza                                 |
| X               | m                            | Posizione nello spazio                               |

### Simboli greci

| Simbolo    | Unità               | Descrizione   |  |  |
|------------|---------------------|---|--|--|
| α          | - (-)               | Coefficiente di amplificazione o di smorzamento     |  |  |
| β          | (-)                 | Coefficiente di smorzamento                         |  |  |
| γ          | $kg/m^2 s^2$ (-)    | Peso specifico o Coefficiente di sicurezza          |  |  |
| Ϋ́         | 1/s                 | Velocità di deformazione                            |  |  |
| δ          | m                   | Compressione di impatto                             |  |  |
| $\Delta t$ | S                   | Intervallo temporale                                |  |  |
| 3          | -                   | Deformazione  |  |  |
| ζ          | -                   | Coefficiente di restituzione                        |  |  |
| η          | kg/m s              | Viscosità   |  |  |
| θ          | - (°)               | Posizione angolare o inclinazione                   |  |  |
| μ          | -                   | Coefficiente di attrito                             |  |  |
| v          | -                   | Coefficiente di Poisson                             |  |  |
| ξ          | m (-)               | Sovrapposizione o smorzamento modale                |  |  |
| ρ          | kg/m <sup>3</sup>   | Densità   |  |  |
| <i>τ</i>   | kg/m s <sup>2</sup> | Tensione tangenziale                                |  |  |
| Φ          | ° (°)               | Angolo di riposo o Angolo di resistenza al taglio   |  |  |
| ω          | 1/s (1/s)           | Velocità angolare o Frequenza angolare (pulsazione) |  |  |

### Apici e Pedici

| Simbolo                  | Descrizione                               |
|--------------------------|---|
| $(\cdot)_a$              | Attiva                                    |
| (·) <sup>p</sup>         | Barriera                                  |
| $(\cdot)_{\mathrm{B}}$   | Boulder, masso                            |
| $(\cdot)_{\text{coll}}$  | Collisione                                |
| (·)cr                    | Critico                                   |
| $(\cdot)_{\mathrm{d}}$   | Debris flow (colata detritica) o Dinamico |
| DEM                      | o di Progetto                             |
| $(\cdot)^{	ext{DEM}}$    | Relativo al DEM                           |
| $(\cdot)_{	ext{dep}}$    | Deposito                                  |
| $(\cdot)_{\mathrm{dyn}}$ | Dinamica                                  |
| $(\cdot)_{\mathrm{f}}$   | Flusso o fluido o Flangia                 |
| $(\cdot)^{H}$            | Hertziano                                 |
| $(\cdot)_{i}$            | Istante i-esimo                           |
| $(\cdot)^{\mathrm{I}}$   | Impatto                                   |
| $(\cdot)_k$              | Caratteristico                            |
| $(\cdot)^{\Gamma}$       | Liquido o Lineare                         |
| $(\cdot)^n$              | Componente normale                        |
| $(\cdot)^{\text{out}}$   | Output (risultato)                        |
| (·) <sub>p</sub>         | Particella                                |
| $(\cdot)^{b}(\cdot)^{b}$ | Plastico                                  |
| $(\cdot)^{\mathrm{pm}}$  | Tra particella e muro                     |
| $(\cdot)^{bb}$           | Tra particelle                            |
| $(\cdot)_{\rm r}$        | Reagente                                  |
| $(\cdot)_{s}$            | Smorzamento o Statico                     |
| $(\cdot)_{\rm st}$       | Statica                                   |
| $(\cdot)^{t}$            | Componente tangenziale                    |
| $(\cdot)_{t}$            | Totale                                    |
| $(\cdot)_{\mathrm{w}}$   | Wall (muro) o Anima                       |



## Capitolo 1

### Introduzione

Nell'ambito dell'ambiente alpino e più in generale di quello montano, il fenomeno della colata detritica è particolarmente pericoloso e potenzialmente distruttivo a causa della sua velocità, forza di impatto e imprevedibilità.

Si tratta di un fenomeno che avviene lungo canaloni e aste torrentizie caratterizzate da forti pendenze e dalla presenza di materiale detritico o erodibile che a seguito di precipitazioni intense può mobilitarsi e propagarsi verso valle anche per lunghe distanze.

La presenza di insediamenti umani e infrastrutture lungo il suo percorso o con maggior probabilità sui conoidi in cui il materiale trasportato si deposita, è causa di un elevato rischio per la vita dell'uomo. Per tali ragioni, specialmente negli ultimi decenni, tali fenomeni hanno suscitato un certo livello di interesse mirato principalmente alla valutazione di opere di mitigazione di tale rischio.

In questo panorama, particolare importanza hanno assunto le opere di difesa strutturali, tra cui le barriere, che hanno subito una notevole evoluzione nel tempo; ciò ha portato allo sviluppo di una notevole varietà di soluzioni adottabili, in funzione degli obbiettivi principali dell'opera e della conformazione geomorfologica del sito.

Tuttavia, data la complessità del fenomeno, la sua forte variabilità e la pericolosità, necessita di ulteriori studi ed approfondimenti per ottenere un continuo miglioramento della conoscenza e sviluppare opere difensive sempre più efficaci per la riduzione al minimo del rischio.

In questo lavoro di tesi, si fa riferimento alla tipologia di briglia filtrante a pettine, a cui appartiene l'opera di difesa situata nel comune di Saint Vincent in Valle d'Aosta e monitorata dal Politecnico di Torino.

L'obbiettivo principale è quello di analizzare l'interazione tra questa briglia ed una colata detritica attraverso una modellazione numerica DEM-FEM. Si tratta di un accoppiamento particolare, in cui la simulazione della colata avviene per mezzo di un codice DEM in cui viene rappresentata come un flusso granulare di numerose particelle sferiche, trattate singolarmente, che interagiscono tra di loro e con la briglia.

Questo metodo semplifica notevolmente il reale comportamento della colata detritica, fortemente eterogenea e caratterizzata dalla compresenza di materiale solido e fluido e da notevole dispersione granulometrica; tuttavia permette di valutare alcune peculiarità

interessanti da un punto di vista ingegneristico come la creazione di catene di forze stabili e l'interazione con i pettini del filtro.

Successivamente viene studiata la risposta strutturale della briglia tramite l'utilizzo del codice ad elementi finiti Abaqus, in cui vengono introdotte le forze concentrate ricavate tramite l'analisi DEM che permette di registrare le storie temporali delle forze scambiate tra le particelle.

In modo particolare, ciò è stato fatto per le particelle formanti le aste del pettine, realizzate nella realtà mediante profilati di acciaio. La risposta in termini di deformazioni e sollecitazioni ricavata con questo approccio ha permesso di giungere ad importanti considerazioni riguardo alcune indicazioni progettuali di queste opere, convalidando, seppur qualitativamente, i risultati sperimentali registrati dal sistema di monitoraggio.

Infine l'ultima parte della tesi è dedicata all'esecuzione delle verifiche strutturali dei profilati secondo la normativa tecnica NTC2018; sono state considerate sia le sollecitazioni di progetto determinate mediante le analisi numeriche precedentemente descritte, sia le combinazioni di carico suggerite dalle linee guida austriache, denominate ONR248XX.

Si tratta di combinazioni basate su una modellazione più semplice, bidimensionale, mediante l'utilizzo di un modello di derivazione idrodinamica. La peculiarità consiste nel considerare le differenti fasi in cui si può trovare l'opera di difesa durante l'evoluzione del fenomeno, ossia con bacino di deposito vuoto, parzialmente riempito e tracimazione della barriera. Questo comportamento ad ondate successive, tipico dei fenomeni di colata detritica è stato modellato nel DEM tramite strati successivi sedimentati al di sopra delle particelle trattenute e depositate a tergo della briglia nella fase precedente. In tal modo il confronto e la verifica secondo i due approcci è stato più significativo, nonostante l'impossibilità di una perfetta corrispondenza delle configurazioni iniziali.

## Capitolo 2

### Colate detritiche e briglie filtranti

Le colate detritiche, generalmente indicate con il termine inglese debris flow, sono un particolare gruppo di fenomeni franosi di tipo flusso, con un comportamento assimilabile sotto alcuni aspetti a quello di un fluido.

Sono fenomeni caratterizzati generalmente da elevata velocità e intensità, quindi particolarmente distruttivi, che si sviluppano in zone di montagna lungo le incisioni presenti sui pendii.

In questo capitolo, nel paragrafo 2.1 vengono descritti i sistemi di classificazione principali dei fenomeni franosi esistenti in letteratura, focalizzando l'attenzione sulle colate detritiche e il loro inquadramento. In seguito, nel paragrafo 2.2 viene approfondito il fenomeno, con la descrizione delle tre zone con cui viene generalmente suddivisa la sua evoluzione e le principali cause di un possibile innesco.

Infine nel paragrafo 2.3 vengono descritti i principali interventi di mitigazione del rischio, illustrando le caratteristiche di alcune opere strutturali tra cui le barriere aperte, in cui ricade la tipologia di briglia oggetto di studio in questa tesi.

#### 2.1 Sistemi di classificazione dei fenomeni franosi

I fenomeni franosi o semplicemente frane, possono essere definiti come il movimento di una massa di roccia, terra o detrito lungo un versante (Cruden, 1991). A fronte della semplicità della definizione, le frane sono fenomeni naturali alquanto complessi e caratterizzati da una notevole variabilità.

L'esistenza di numerose tipologie di frane, caratterizzate da peculiarità differenti, ha reso necessario un loro inquadramento generale allo scopo di individuare una nomenclatura comune. Tuttavia, data la complessità e la variabilità del fenomeno, diversi autori hanno analizzato il problema sotto differenti punti di vista, come ad esempio i meccanismi di innesco, la tipologia di materiale, la velocità ecc. pervenendo a classificazioni differenti tra di loro. Ad esempio una classificazione può essere effettuata in base al volume di materiale spostato durante il movimento franoso, come proposto da Fell nel 1994 (tabella 2.1).

| ia 2.1. Ciassificazione basata sui voiume dena frana (Fen |                                     |  |  |  |
|---|-------------------------------------|--|--|--|
| DESCRIZIONE   | VOLUME [m <sup>3</sup> ]            |  |  |  |
| Estremamente grande                                       | $> 5.10^6$                          |  |  |  |
| Molto grande  | $1.10^6 \div 5.10^6$                |  |  |  |
| Da media a grande   | $2,5\cdot10^5 \div 1\cdot10^6$      |  |  |  |
| Media   | $5 \cdot 10^4 \div 2, 5 \cdot 10^5$ |  |  |  |
| Piccola   | $5.10^3 \div 5.10^4$                |  |  |  |
| Molto piccola   | $5.10^2 \div 5.10^3$                |  |  |  |
| Estremamente piccola                                      | $< 5.10^2$                          |  |  |  |

Tabella 2.1: Classificazione basata sul volume della frana (Fell, 1994).

Vengono riportate nel seguito, alcune delle classificazioni ritenute più rilevanti e maggiormente utilizzate nella comunità scientifica. Occorre tuttavia precisare che, data la variabilità dei fenomeni, nessuna classificazione è esaustiva e completa. Per una migliore comprensione, ai termini italiani vengono affiancate le relative terminologie in lingua inglese, utilizzate dagli autori e dalla comunità scientifica.

#### 2.1.1 Classificazione di Varnes (1978)

Questa classificazione è una delle più conosciute e impiegate, caratterizzata da notevole semplicità. L'inquadramento delle diverse tipologie di fenomeno avviene sulla base di due caratteristiche rilevanti: il tipo di materiale coinvolto nel fenomeno e il tipo di cinematismo relativo, che avviene tra la massa in movimento e il materiale stabile in loco.

Il materiale viene classificato come **roccia** (rock), **detrito** (debris) o **terreno** (earth). In particolare viene definito con il termine detrito un materiale grossolano, caratterizzato da grani di diametro superiore ai 2 mm, compreso tra il 20% e l'80% del materiale totale coinvolto. Con il termine terreno, viene indicato invece un materiale prevalentemente fine, caratterizzato da particelle di diametro inferiore a 2 mm per una percentuale superiore all'80%.

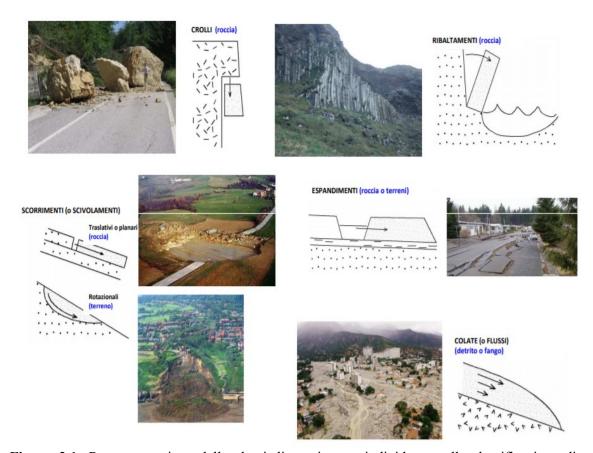
Con riferimento alla tipologia di movimento, Varnes individua sei classi differenti:

- **crollo** (fall): con questo termine viene indicato un distacco improvviso di materiale da un pendio molto ripido o zone in aggetto, dovuto alla presenza di fratturazione o piani di discontinuità;
- **ribaltamento** (topple): movimento in cui una porzione di materiale si distacca subendo una rotazione rispetto alla base di appoggio o ad un punto specifico;
- **scorrimento** o **scivolamento** (slide): questa tipologia di movimento può essere ulteriormente suddivisa in scivolamento traslazionale o rotazionale a seconda che il movimento di mutuo scorrimento avvenga prevalentemente su una superficie piana nel primo caso, piuttosto che su una o più superfici concave;

- **espansione laterale** (lateral spread): tipologia in cui il movimento dominante è un'estensione laterale causata da deformazioni del materiale sottostante o fenomeni di liquefazione;
- **colate** o **flussi** (flow): movimenti caratterizzati da peculiarità simili ai fluidi viscosi, come il profilo della velocità; per tale comportamento possono percorrere anche notevoli distanze. Si tratta di fenomeni che sono generalmente incanalati.
- **complesso** (complex): con questa categoria Varnes raggruppa quei movimenti complessi frutto della combinazione di due o più delle precedenti classi.

Un'illustrazione di queste tipologie di movimento è rappresentata in figura 2.1 con l'indicazione della tipologia di materiale nel quale si verificano più frequentemente (in colore blu).

La classificazione risulta dall'incrocio di tutte le possibili combinazioni di queste classi di materiale e movimento, come riportato in tabella 2.2 in cui in rosso è evidenziata la categoria di interesse in questa tesi, ossia le colate o flussi.



**Figura 2.1:** Rappresentazione delle classi di movimento individuate nella classificazione di Varnes 1978 (Pirulli, 2014).

A fronte di tale semplicità di classificazione si contrappone tuttavia uno scarso grado di dettaglio dei fenomeni, tralasciando caratteristiche molto rilevanti da un punto di vista ingegneristico come la velocità con cui si sviluppa il fenomeno. Ad esempio, le colate di detrito possono sviluppare notevoli velocità e quindi un potenziale distruttivo elevato; le colate di terra invece avvengono generalmente molto lentamente permettendo così l'evacuazione delle persone a rischio. Inoltre fenomeni franosi molto differenti tra loro possono ricadere nella stessa classe.

Tabella 2.2: Classificazione dei fenomeni franosi secondo Varnes (1978).

|   |               | TIPO DI MATERIALE  |  |   |  |
|---|---------------|--|--|---|--|
| TIPO DI M                               | OVIMENTO      | ROCCIA (rock)  | DETRITO (debris)                           | TERRA (earth)                           |  |
| CROLLO (fall)                           |               | Crollo in roccia Crollo di detrito (Rock fall) (Debris fall) |  | Crollo di terra<br>(Earth fall)         |  |
| RIBALTAM                                | ENTO (topple) | Ribaltamento in roccia (Rock topple)                         | Ribaltamento di detrito<br>(Debris topple) | Ribaltamento di terra<br>(Earth topple) |  |
| SCORRIMENTO                             | TRASLAZIONALE | Scorrimento in roccia  | Scorrimento di detrito                     | Scorrimento di terra<br>(Earth slide)   |  |
| (slide)                                 | ROTAZIONALE   | (Rock slide)   | (Debris slide)                             |   |  |
| ESPANSIONE LATERALE<br>(lateral spread) |               | Espansione in roccia (Rock spread)                           | Espansione di detrito (Debris spread)      | Espansione di terra<br>(Earth spread)   |  |
| COLATE o FLUSSI (flow)                  |               | Colata in rocca<br>(Rock flow)                               | Colata di detrito<br>(Debris flow)         | Colata di terra<br>(Earth flow)         |  |
| COMPLES                                 | SI (complex)  | Combinazione di due o più tipi principali di movimento       |  |   |  |

Per queste considerazioni, questa classificazione è stata rivista è perfezionata da Cruden e Varnes nel 1996 in cui viene inserita anche una scala di velocità delle frane, riportata in tabella 2.3. In particolare, identificano sette classi di velocità, da estremamente lenta fino a estremamente rapida, ciascuna abbinata ad un danno probabile.

| CLASSE DI<br>VELOCITA' | DESCRIZIONE         | VELOCITA' [mm/s]                    | VELOCITA' TIPICA         | DANNI PROBABILI  |
|------------------------|---------------------|-------------------------------------|--------------------------|--|
| 7                      | Estremamente rapida | ↑<br>5 · 10³                        | 5 m/s                    | Catastrofe di eccezionale violenza. Edifici distrutti<br>per l'impatto del materiale spostato. Molti morti.<br>Fuga impossibile.   |
| 6                      | Molto rapida        | 5 · 10 <sup>1</sup>                 | 3 m/min                  | Perdita di alcune vite umane. Velocità troppo<br>elevata per permettere l'evacuazione delle persone.   |
| 5                      | Rapida              |                                     | <b>,</b>                 | Evacuazione possibile. Distruzione di strutture, immobili ed installazioni permanenti.   |
| 4                      | Moderata            | $5 \cdot 10^{-1}$ $5 \cdot 10^{-3}$ | 1,8 m/ora                | Alcune strutture temporanee o poco danneggiabili possono essere mantenute.   |
| 3                      | Lenta               | 5·10 <sup>-5</sup>                  | 13 m/mese                | Possibilità di intraprendere lavori di riabilitazione e restauro durante il movimento. Le strutture meno danneggiabili possono essere mantenute con frequenti lavori di riabilitazione se il movimento totale non è troppo grande durante una particolare fase di accelerazione. |
| 2                      | Molto lenta         | 5·10<br>5·10 <sup>-7</sup>          | 1,6 m/anno<br>16 mm/anno | Alcune strutture non permanenti possono essere danneggiate dal movimento.  |
| 1 \                    | Estremamente lenta  | J - 10                              | TO IIIII/ aIIII0         | Impercettibile senza strumenti di monitoraggio.<br>Costruzione di edifici possibile con precauzioni.   |

Tabella 2.3: Scala delle velocità delle frane (Cruden e Varnes 1996).

#### 2.1.2 Classificazione di Hungr et al. (2001)

I numerosi limiti della classificazione di Varnes, basata unicamente sulla determinazione della tipologia di materiale e di cinematismo, la rendono poco adatta alla descrizione dei fenomeni di colata detritica, come affermato da Hungr et al. (2001). Gli stessi hanno dunque proposto un nuovo sistema di classificazione più esaustivo e dettagliato rispetto a quello di Varnes.

I fenomeni di flusso vengono classificati in funzione di molteplici parametri che tengono in considerazione i meccanismi di movimento, la velocità della frana e alcune proprietà rilevanti del materiale mobilitato, ovvero il contenuto d'acqua e ulteriori condizioni speciali, come riportato in tabella 2.4 e 2.5.

I valori del contenuto d'acqua, corrispondenti a stati fisici ben definiti, sono noti come limiti di consistenza o limiti di Atterberg. In particolare, i valori del contenuto d'acqua che delimitano il campo di comportamento plastico del materiale, sono definiti limite liquido e limite plastico e sono indicati con i simboli w<sub>L</sub> e w<sub>P</sub>. Il termine plasticità indica in questo contesto l'attitudine del materiale ad essere modellato e deformato in modo irreversibile senza rompersi o fratturarsi (Lancellotta, 2014).

L'intervallo all'interno del quale il materiale esibisce questo comportamento plastico è definito dall'indice di plasticità PI che viene espresso come

$$PI = w_L - w_P. (2.1)$$

**Tabella 2.4:** Classificazione dei fenomeni franosi di tipo flusso secondo Hungr et al. (2001); in rosso sono evidenziate le frane di tipo flusso che coinvolgono materiale detritico.

| MATERIALE                                   | CONTENUTO<br>D'ACQUA                  | CONDIZIONI SPECIALI   | VELOCITA'   | NOME (italiano –inglese)  |
|---|---------------------------------------|---|---|---|
| Limi, sabbie,<br>ghiaie, detriti<br>(talus) | Asciutto, umido o saturo              | -Pressione interstiziale non eccessiva Varie -volume limitato                 |   | Colate di sabbia (limo, ghiaia,<br>detrito) non liquefatta/o.<br>Non-liquified sand (silt, gravel o<br>debris) flow |
| Limi, sabbie,<br>detriti, rocce<br>tenere   | Saturo                                | -Materiale liquefacibile<br>-acqua costante                                   | Estremamente rapide Scorrimenti di flusso di sabbia mo, detrito, roccia tenera). Sand (silt, debris, weak rock) slide |   |
| Argille sensitive                           | Pari o superiore<br>al limite liquido | -Liquefazione in situ<br>-contenuto di acqua costante                         | Estremamente rapide   | Scorrimenti di flusso in argilla.<br>Clay flow slide  |
| Torbe                                       | Saturo                                | -Eccesso di pressione interstiziale   | Da lente a<br>molto rapide  | Colate di Torbe.<br>Peat flow   |
| Argille o terre                             | Prossimo al<br>limite plastico        | -Movimenti lenti<br>-plug flow  | < Rapide  | Colate di terra.<br>Earth flow  |
| Detriti                                     | Saturo                                | -Canale definito<br>-incremento del contenuto<br>d'acqua                      | Estremamente rapide   | Colate di detrito.<br>Debris flow   |
| Mud   | Pari o superiore<br>al limite liquido | -Colata di detrito a grana<br>fine  | > molto rapide  | Colata di fango.<br>Mud flow  |
| Detriti                                     | Presente acqua libera                 | -Alluvione  | Estremamente rapide   | Debris flood.<br>Debris flood   |
| Detriti                                     | Saturo o<br>parzialmente<br>saturo    | -No canale definito<br>-relativamente superficiale<br>-zona di innesco ripida | Estremamente rapide   | Valanghe di detrito.<br>Debris avalanche  |
| Roccia<br>frammentata                       | Vario,<br>principalmente<br>asciutto  | -Roccia intatta all'innesco<br>-grandi volumi                                 | Estremamente rapide   | Valanghe di roccia.<br>Rock avalanche   |

Tabella 2.5: Caratteristiche del materiale coinvolto nelle frane di tipo flusso (Hungr et al. 2001);

in rosso sono evidenziati i materiali tipici coinvolti nei fenomeni di flusso.

| ORIGINE  | CARATTERISTICHE                       | CONDIZIONI  | NOME (italiano –inglese)                                  |
|--|---------------------------------------|---|---|
| Classato (marina, lacustre, fluviale, eolica, vulcanica, | Non coesivo<br>(indice plastico < 5%) | Secco o saturato                                      | -Ghiaia (Gravel)<br>-sabbia (sand)<br>-limo (silt)        |
| antropogenica)   | Coesivo (indice plastico > 5%)        | -Plastico ( $w_L < 0.5$ )<br>-Liquido ( $w_L > 0.5$ ) | -Argilla (Clay)<br>-Argilla sensitiva (sensitive<br>clay) |
| Non classato (residua, collu-                            | Non coesivo (indice plastico < 5%)    | Secco o saturato                                      | -Detrito (Debris)   |
| viale, glaciale, vulcanica,<br>antropogenica)            | Coesivo (indice plastico > 5%)        | -Plastico ( $w_L < 0.5$ )<br>-Liquido ( $w_L > 0.5$ ) | -Terra (Earth)<br>-Fango (mud)                            |
| Torba  | Organico                              | Saturata  | -Torba (Peat)   |
| Roccia   | frammentata                           | Secca o saturata                                      | -Roccia (Rock)  |

In rosso, nelle tabelle 2.4 e 2.5 sono stati evidenziati i principali tipi di flusso che, in accordo alla classificazione di Hungr et al. (2001), sono descritti come:

- Colata di detrito (debris flow): flusso molto rapido o estremamente rapido di detriti saturi non plastici che scorre lungo un canale acclive ben definito. L'indice di plasticità risulta inferiore al 5% (tabella 2.5).
- Colata di fango (mud flow): flusso estremamente rapido di materiale detritico saturo e plastico lungo un canale, che coinvolge un contenuto d'acqua al limite liquido o superiore ad esso. L'indice di plasticità è superiore al 5%. Durante il deflusso, la colata può incrementare il proprio contenuto d'acqua fino a superare il limite liquido.
- **Debris flood**: flusso estremamente rapido di detrito con elevati contenuti di acqua che scorre lungo un canale ripido. E' presente acqua libera, per cui la velocità di tale fenomeno è comparabile a quella raggiunta dall'acqua in condizione di piena.
- Valanga di detrito (debris avalanche): flusso superficiale estremamente rapido di materiale detritico saturo o parzialmente saturo che si mobilita lungo versanti acclivi non confinati.

#### 2.1.3 Ulteriori sistemi di classificazione

Esiste in letteratura una grande varietà di sistemi di classificazione dei fenomeni di colata. I metodi presentati nei sotto-paragrafi precedenti si basano quasi unicamente su caratteristiche fisiche macroscopiche quali la velocità, il tipo di movimento e alcune caratteristiche del materiale, tralasciando le interazioni microscopiche che influenzano il comportamento globale del flusso composto da materiale solido e acqua.

Uno dei più completi sistemi di classificazione è stato realizzato da Pierson e Costa (1987). Tale sistema considera come parametri fondamentali la concentrazione dei sedimenti e la distribuzione granulometrica per distinguere reologicamente i fenomeni di colata detritica rispetto ad altri fenomeni di tipo flusso (Marchelli, 2018); inoltre considera la velocità media del flusso, ritenuta un parametro fondamentale.

Takahashi (2007) ha introdotto un sistema di classificazione di tipo meccanico delle colate detritiche sulla base della prevalenza, all'interno del flusso, di uno o più stati tensionali, stimabile tramite l'utilizzo di rapporti adimensionali (figura 2.2). In particolare, per la classificazione delle colate detritiche dinamiche, evidenziate in

In particolare, per la classificazione delle colate detritiche dinamiche, evidenziate ir rosso nella figura 2.2, utilizza i rapporti adimensionali  $T_{sq}/T$ ,  $T_c/T$ ,  $T_t/T$  e  $T_{fq}/T$  in cui:

- $T_{sq}$  è la tensione attritiva di Coulomb quasi statica, cioè la tensione solida quasi-statica dovuta alle forze di attrito tra le particelle.
- T<sub>c</sub> è la tensione inerziale dei grani, cioè la tensione dovuta alle collisioni tra le particelle più grossolane della massa detritica della colata.

- T<sub>t</sub> è la tensione inerziale del fluido o tensione di turbolenza, ossia la tensione dovuta alla turbolenza della miscela fluida della colata, comprendente il fluido e le particelle più fini della massa.
- $T_{fq}$  è la tensione Newtoniana quasi-statica o tensione viscosa, ovvero la tensione fluida quasi-statica dovuta alla deformazione della miscela composta da fluido e particelle fini.
- T rappresenta invece la tensione totale.

Vengono individuati in questo modo tre differenti tipologie di colate detritiche:

- Stony type: quando prevalgono le tensioni inerziali dei grani T<sub>c</sub>.
- Turbolent muddy flow: quando prevalgono le tensioni inerziali del fluido T<sub>t</sub>.
- Viscous type: quando prevalgono le tensioni viscose  $T_{fq}$ .

Per la valutazione della prevalenza di uno di questi stati tensionali rispetto agli altri vengono identificati tre rapporti adimensionali rappresentati nel triangolo inferiore di figura 2.2, ovvero:

• il **numero di Reynolds** (Re):  $T_t/T_{fq}$ . Questo numero permette di stabilire se il flusso è turbolento o laminare. Viene espresso come

$$Re = \frac{\rho_f u_f h}{\eta}, \qquad (2.2)$$

in cui  $\rho_f$  è la densità del flusso,  $u_f$  la velocità media, h l'altezza totale del flusso e  $\eta$  la viscosità dinamica del fluido.

• il **numero di Bagnold** (Ba):  $T_c/T_{fq}$ . Se Ba > 200, le tensioni dovute alle collisioni prevalgono rispetto a quelle viscose. Viene espresso come

$$Ba = \frac{\rho_f d_p \lambda(C) \dot{\gamma}}{\eta}, \qquad (2.3)$$

in cui  $\dot{\gamma}$  è la velocità di deformazione,  $d_p$  il diametro delle particelle e  $\lambda(C)$  è una funzione della frazione solida definita da Bagnold come

$$\lambda(C) = \frac{1}{(C_{\text{max}}/C)^{1/3} - 1},$$
(2.4)

dove C<sub>max</sub> è la massima frazione solida.

• il **numero di massa** (Ma):  $T_c/T_t$ . questo numero è uguale al rapporto tra l'altezza caratteristica del flusso  $h_d$  e il diametro rappresentativo delle particelle  $d_p$ .

Infine si descrive il parametro caratterizzante la concentrazione in volume dei sedimenti C, detto anche frazione solida, come definito in precedenza. Tale parametro permette l'identificazione delle varie tipologie di flusso ed è esprimibile come il rapporto tra il volume della fase granulare solida e il volume totale:

$$C = \frac{V_p}{V_p + V_f},\tag{2.5}$$

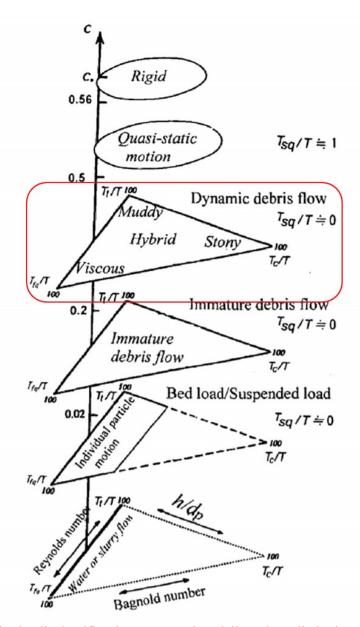
in cui i pedici p ed f si riferiscono rispettivamente alle particelle della fase solida e alla parte fluida. Con riferimento a quest'ultimo parametro, le colate detritiche si posizionano in un intervallo compreso tra circa 0,2 e 0,5.

Con il termine colata detritica immatura (Immature debris flow) viene indicata una tipologia di flusso simile all'alluvione di detriti (debris flood) della classificazione di Hungr et al. (2001), mentre invece il termine moto quasi-statico (quasi-static motion) è assimilabile ai flussi di terra (earth flow) della stessa classificazione.

Un sistema di classificazione basato invece sul comportamento reologico, piuttosto che meccanico, è proposto da Coussot e Meunier (1996). Esistono inoltre sistemi misti, che tengono in considerazione sia aspetti meccanici che reologici come quelli sviluppati da Ancey (2001) e da Bardou et al. (2003). Quest'ultimo distingue tre differenti tipologie di flusso:

- Muddy debris flow: tipologia di flusso caratterizzata da un comportamento visco-plastico determinato dall'elevato contenuto di materiale fine presente, comprendente argilla. La presenza della miscela acqua e particelle fini, lubrifica i contatti tra i grani più grossolani. La matrice risulta diluita, per cui generalmente questo tipo di flusso percorre elevate distanze di propagazione. La forma del deposito è caratterizzata da una distribuzione casuale di grani grossolani in una matrice fine, avente limiti ben definiti ed arrotondati.
- Granular debris flow: tipologia di flusso caratterizzata dalla presenza di materiale grossolano e contenuto limitato di materiale fine. Il comportamento meccanico è di tipo collisionale ed attritivo, con una dissipazione generalmente più elevata rispetto al caso precedente; percorrono generalmente distanze minori rispetto al precedente.
- Fluid debris flow: tipologia caratterizzata da un elevato contenuto di fini che
  conferisce al flusso un comportamento di tipo attritivo-viscoso. Questi materiali
  fini contengono prevalentemente materiali come il limo mentre registrano una

scarsa presenza di argilla. Anche in questo caso la distanza di propagazione può risultare elevata.



**Figura 2.2:** Criterio di classificazione meccanico delle colate di detrito secondo Takahashi (2007).

Vista la complessità del fenomeno e la sua variabilità, esistono come si è visto numerosi metodi per classificare e attribuire una nomenclatura specifica ai fenomeni franosi.

Il comportamento risulta fortemente influenzato dalla concentrazione volumetrica di sedimenti solidi e la loro distribuzione granulometrica; inoltre gioca un ruolo molto importante la presenza di acqua nel flusso. Nel paragrafo successivo si descrive da un punto di vista fenomenologico la dinamica di una colata detritica.

## 2.2 Colata di detrito: descrizione fenomenologica

Questo paragrafo è dedicato alla descrizione delle caratteristiche principali delle colate detritiche durante il loro percorso, cioè dall'innesco fino all'arresto della massa.

La colata detritica può in generale essere descritta come una massa eterogenea di sedimenti mescolati con acqua che per effetto della gravità scorre lungo un canale ben definito. Tale ammasso è molto complesso da un punto di vista granulometrico essendo caratterizzato da particelle solide molto fini, come argille e limi ma allo stesso tempo da particelle di grandi dimensioni come blocchi e massi che possono raggiungere alcuni metri di diametro.

Si tratta di un fenomeno che può essere suddiviso in alcune fasi essenziali, lungo il percorso seguito dalla massa durante il movimento. In particolare, si possono distinguere tre zone principali: la zona di inizializzazione o di innesco che identifica la zona da cui ha inizio la colata detritica; una zona centrale di trasporto ed eventuale erosione in cui il flusso si sviluppa e raggiunge le velocità maggiori; infine una zona finale detta zona di deposito o di deposizione, in cui il materiale detritico arresta il suo moto depositandosi nel cosiddetto conoide o debris fan. In figura 2.3 è rappresentato un ipotetico profilo del percorso seguito da una colata detritica lungo un canale con la suddivisione nelle fasi principali.

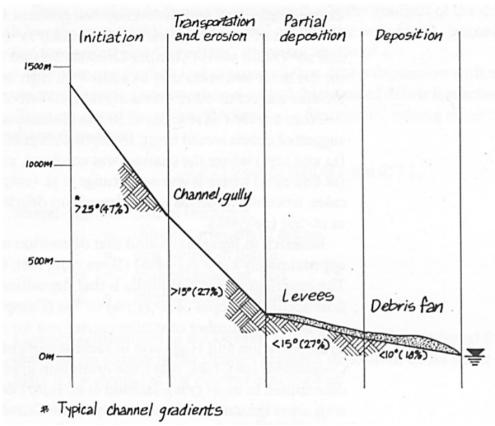


Figura 2.3: Zone caratteristiche di una colata detritica (VanDine, 1996).

### 2.2.1 Zona di innesco e relative cause

Le cause che determinano la mobilizzazione di una colata detritica possono essere distinte in cause predisponenti, ossia quelle condizioni che rendono suscettibile una determinata zona piuttosto che altre al fenomeno, e in cause scatenanti, ossia quelle cause che innescano il movimento causando una perturbazione dalla condizione di equilibrio.

- Abbondante presenza di detrito: ascrivibile alle cause predisponenti, è una condizione essenziale affinché si sviluppi il fenomeno. Grandi quantità di materiale non consolidato, materiale detritico e roccia finemente fratturata sia nella zona di innesco che lungo il canale è necessaria allo sviluppo del fenomeno.
- Pendenza elevata: anche questa condizione è necessaria e propedeutica allo sviluppo del fenomeno. Questa caratteristica facilita la mobilizzazione della colata promuovendo l'instabilità del detrito. Più il canale risulta ripido e maggiore sarà la velocità raggiunta dal flusso. In funzione anche del volume di materiale in movimento ed ulteriori caratteristiche, la velocità del fronte può raggiungere anche i 28 m/s (Rickenmann, 1999). Secondo VanDine (1996) la pendenza nella zona di inizializzazione dev'essere maggiore al 47% corrispondente ad un angolo di 25° (figura 2.3). Altri autori invece attribuiscono differenti valori alla pendenza necessaria all'innesco della colata. In tabella 2.6 è riportato un confronto dei valori forniti da diversi autori, comparando anche la zona geografica di origine dell'autore e delle osservazioni dei fenomeni.
- Mancanza di vegetazione: questa condizione può essere il risultato di fenomeni precedenti o incendi. La mancanza di vegetazione lungo il canale incrementa la suscettibilità al fenomeno della colata detritica.
- Apporto sufficiente di acqua: una sufficiente quantità di acqua necessaria alla mobilitazione dei detriti è la principale causa scatenante che provoca l'innesco del fenomeno. Tale apporto può derivare da precipitazioni intense, scioglimento delle nevi e dei ghiacciai, alluvioni. In generale, la situazione più ricorrente è rappresentata dal verificarsi di abbondanti e prolungate precipitazioni che causano una parziale saturazione dei sedimenti. In seguito ad un successivo evento meteorologico di elevata intensità, che provoca la saturazione completa, si ha l'innesco della colata.

Ulteriori cause scatenanti possono essere eventi sismici, forti vibrazioni indotte da eruzioni vulcaniche o attività antropiche, rottura di sbarramenti naturali e impatto di frane. Un altro processo con il quale si può sviluppare una colata detritica è la progressiva transizione da una frana di scivolamento a colata detritica nelle successive fasi di evoluzione. Siccome le frane da scivolamento permettono un certo grado di deformazione interna, affinché avvenga questa transizione è necessario che un quantitativo sufficiente di energia potenziale si trasformi in energia cinetica interna. Questa conversione di energia può derivare da un incremento di pendenza o da un approvvigionamento di acqua (Marchelli, 2018).

**Tabella 2.6:** Confronto tra i valori di pendenza della zona di innesco forniti da diversi autori (Marchelli, 2018).

| Authors             | Steephess Saserven Hamilton  |   | Authors's origin area | Note  |  |
|---------------------|--|---|-----------------------|---|--|
| Takahashi (1978)    | 15°-23°  | China and<br>Japan  | Japan                 | From infinite slope<br>theory, inertial<br>regime according<br>to (Bagnold, 1971) |  |
| Costa (1984)        | >15°-20°,<br>commonly<br>exceeding<br>30°  | All the world   | USA                   | From observation of real cases  |  |
| Ancey (2001)        | >11°   | All the world   | France                | From laboratory experiments   |  |
| Hungr et al. (2005) | 20°-45° In<br>steeper slope<br>the required<br>amount of<br>debris is not<br>in general<br>sufficient. | Not<br>specified,<br>examples<br>from Canada<br>and Nepal | Canada and<br>Spain   | From field observations.  |  |
| Iverson (2014)      | >25°<br>(generally<br>25°-30°)   | Not<br>specified,<br>examples<br>from USA                 | USA                   | From observations of real cases   |  |

Questi requisiti di innesco caratterizzano morfologicamente la zona di inizializzazione che risulta essere intensamente fratturata o con abbondante presenza di detrito e con elevata pendenza.

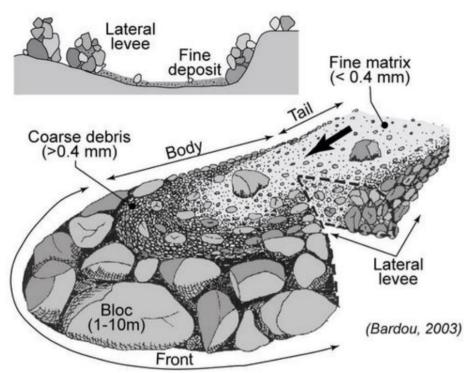
## 2.2.2 Zona di trasporto e erosione

Questa zona è costituita dalla via canalizzata entro cui scorre la colata detritica trasportando il materiale verso valle. Generalmente si tratta di un alveo torrentizio caratterizzato da un letto di roccia fratturata o ricoperto da materiale erodibile che può essere inglobato dal flusso con il conseguente accrescimento del suo volume, fino a valori di dieci volte superiori al volume iniziale (Iverson, 2014). Oltre al letto del canale, una zona che contribuisce notevolmente, data la sua attitudine all'erosione, è la zona spondale e arginale del canale, fortemente instabile.

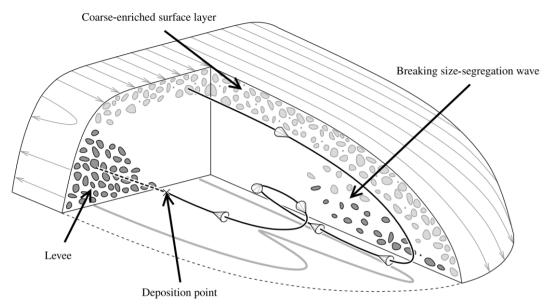
La pendenza di questo tratto è generalmente superiore ai 10°-15°; secondo VanDine in tale intervallo si può già sviluppare un parziale deposito in forma di argini laterali. Durante questa fase la velocità del flusso aumenta, in funzione di diversi fattori quali la distribuzione granulometrica, la dimensione dei grani, la sezione del canale e la concen-

trazione dei sedimenti, variando in un intervallo generalmente compreso tra 0,5 e 20 m/s. Tale velocità non è uniforme, bensì esiste un gradiente verticale, caratterizzato da velocità più elevate sulla superficie libera e decrescente verso il fondo del flusso. Inoltre, durante il moto si verifica una segregazione del materiale più fine verso il basso e conseguente sospensione del materiale più grossolano verso la superficie libera (figura 2.5). La combinazione di queste due caratteristiche determina una composizione caratteristica della colata che vede i blocchi più grossolani a formare il fronte, spinti dalle più elevate velocità superficiali e una coda più diluita, comprendente i materiali più fini. A questo movimento longitudinale, si affianca un movimento trasversale che porta i blocchi più grossolani a spostarsi verso i lati esterni del flusso, che poi depositandosi formano degli argini laterali (figura 2.4).

La colata detritica così formata è caratterizzata da due comportamenti distinti, quello del fronte regolato maggiormente da un comportamento attritivo e dotato di elevata permeabilità che viene spinto in avanti dal corpo della colata avente un comportamento più simile ad un fluido e caratterizzato da bassa permeabilità. Questa differenza, spiega anche il comportamento ad intermittenza tipico delle colate detritiche, che si sviluppano generalmente con una serie di ondate successive.



**Figura 2.4:** Rappresentazione della configurazione geometrica dei blocchi assunta dalla colata durante il moto (Bardou, 2003).



**Figura 2.5:** Rappresentazione tridimensionale del moto interno al flusso seguito dai grani più grossolani (Johnson et al., 2012).

### 2.2.3 Zona di deposizione

Il processo di deposizione inizia quando l'energia cinetica della colata detritica decresce oltre un certo limite, fino al raggiungimento dell'arresto completo quando l'energia è pari a zero. Questa riduzione di energia è dovuta alla combinazione di alcune condizioni, che tuttavia possono contribuire anche singolarmente: la riduzione progressiva o repentina della pendenza del canale, la perdita del confinamento laterale ed eventuali impedimenti che ostacolano il flusso, sia naturali che artificiali (VanDine, 1996; Ancey, 2001).

La zona di deposizione è detta generalmente conoide per la forma a cono caratteristica del cumulo. La pendenza critica che determina la diminuzione di velocità e l'inizio della deposizione è funzione di diversi fattori, quali la distribuzione granulometrica, la concentrazione, la densità ecc. per cui diversi autori propongono valori differenti.

VanDine (1996) afferma che un deposito parziale in forma di argini si verifica tra i 15° e i 10° di pendenza, mentre la deposizione in conoide avviene con pendenze inferiori ai 10° (figura 2.3). Altri autori quali Hungr et al. (2001) propongono invece come inizio di deposizione una pendenza compresa tra gli 8° e 12° per canali confinati e tra 10° e 14° quando non vi è il confinamento. In generale si può affermare che la pendenza del conoide può variare in un intervallo compreso tra 5° e 20° (Hungr et al., 2001).

Oltre al naturale decremento di velocità causato dalla riduzione di pendenza, il confinamento laterale gioca un ruolo molto importante. Quando il flusso perde il contenimento fornito dal canale che lo delimita, il corpo centrale più diluito collassa per l'espansione subita, smettendo così di esercitare una spinta idraulica sul fronte. Quindi, il fronte composto da grani più grossolani rallenta fino ad arrestarsi quando la resistenza attritiva supera un certo valore limite.

Questo susseguirsi di fenomeni, caratterizza la forma finale del deposito. Infatti il materiale più grossolano del fronte tende ad accumularsi sotto forma di argini, ovvero creste formate da blocchi e grani di dimensione maggiore. Molto spesso invece il materiale più fine prosegue la sua corsa espandendosi sotto forma di lobi.

Un certo tasso di deposizione può verificarsi anche prima della perdita del confinamento laterale, con la formazione di argini di materiale ai bordi del canale.

Un'ulteriore possibilità è la deposizione in conoide senza la perdita del confinamento. In questo caso, il materiale più fine tende ad espandersi in lobi, mentre invece il materiale detritico restante può occupare la sezione del canale sia parzialmente che interamente oppure formare degli argini aggiuntivi (figura 2.6).

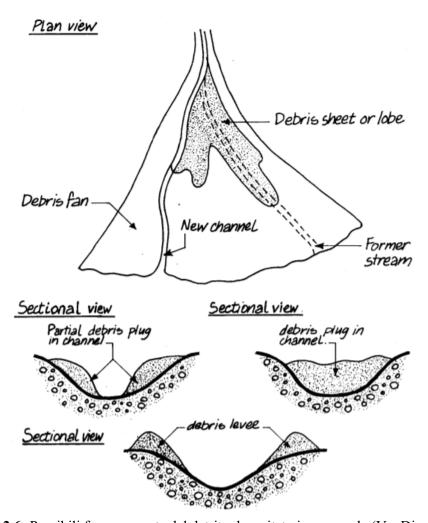


Figura 2.6: Possibili forme assunte dal detrito depositato in un canale (VanDine, 1996).

## 2.3 Misure di mitigazione per le colate detritiche

Le colate detritiche sono dei fenomeni franosi particolarmente pericolosi a causa della loro velocità di azione ed elevata forza di impatto, complice anche la disposizione assunta dai detriti durante il moto. A questo si aggiunge il fatto che questi fenomeni sono di natura intermittente e difficilmente prevedibili.

Interventi di mitigazione del rischio sono necessari qualora vi sia la possibilità di danni causati dal verificarsi di questi fenomeni franosi, come perdite di vite umane e ingenti danni economici. In altre parole, sono necessari qualora siano presenti elementi esposti e vulnerabili come insediamenti umani, abitazioni e infrastrutture viarie che trovandosi in una zona pericolosa, potenzialmente soggetta a colate detritiche, possono subire dei danni anche gravi.

La pericolosità può essere definita come la probabilità che si verifichi una colata detritica di data intensità, in una certa zona e in un determinato periodo di tempo. Tipicamente, in ambiente montano, a causa delle difficoltà nella costruzione lungo pendii ripidi, specialmente in passato si è costruito nelle zone più pianeggianti, lungo la valle e sugli apici dei conoidi. Quest'ultimo luogo in particolare può essere altamente pericoloso qualora sia la zona di deposizione di un fenomeno di flusso.

Il rischio R può quindi essere valutato come il prodotto, in senso lato, tra la probabilità che si verifichi un evento P e l'entità del danno D, definibile come il prodotto tra il valore degli elementi esposti E con la loro vulnerabilità V (grado di vulnerabilità degli elementi esposti):

$$R = P \times D = P \times E \times V. \tag{2.6}$$

In questo frangente è possibile identificare due diverse tipologie di misure di mitigazione: passive e attive. Nel seguito vengono illustrate queste due categorie con particolare riguardo verso gli interventi di mitigazione attiva.

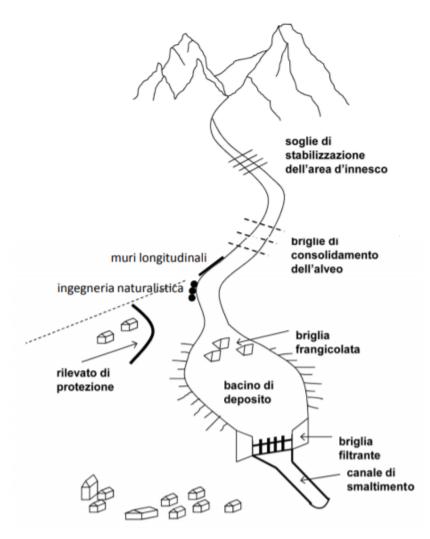
## 2.3.1 Misure di mitigazione passive

Sono dette passive in quanto non riguardano la realizzazione di opere strutturali che intervengono direttamente sulla massa in frana, ma agiscono sui fattori di esposizione degli elementi e la loro vulnerabilità. Ad esempio, l'attuazione di una pianificazione territoriale e politiche atte alla salvaguardia dell'ambiente e della popolazione, tramite le quali vengono imposti dei vincoli costruttivi e regolamentazioni d'uso del territorio, agiscono riducendo l'esposizione al rischio. La realizzazione di piani di emergenza ed evacuazione, in combinazione con sistemi di monitoraggio e allerta, e con un'adeguata informazione, formazione ed addestramento della popolazione esposta, contribuisce efficacemente alla mitigazione del rischio, riducendo la vulnerabilità degli elementi esposti. Attraverso questi strumenti, una volta determinate le zone a rischio, è possibile limitare e ridurre al minimo eventuali pericoli, agendo sull'esposizione e sulla vulnerabilità degli elementi sensibili, con una notevole efficacia e costi complessivamente ridotti.

### 2.3.2 Misure di mitigazione attive

Nel caso in cui le misure di mitigazione passive non fossero sufficienti o applicabili, come nel caso di interi paesi costruiti in zone a rischio in passato e non trasferibili in un luogo più sicuro è possibile attuare misure di mitigazione attive.

Si tratta di vere e proprie opere di difesa strutturali, progettate per agire direttamente sul corpo della frana, riducendo la pericolosità del fenomeno e/o la probabilità di accadimento. A seconda della loro funzione, si possono ulteriormente suddividere in opere di difesa attive e passive. Entrambe sono riferite ad opere strutturali, le prime però intervengono consolidando e stabilizzando il corpo frana, riducendo la probabilità che si verifichi il fenomeno. Le ultime invece, sono mirate al controllo dei movimenti della massa in frana, ad innesco già avvenuto. Sono delle vere e proprie opere difensive interposte tra la frana e gli elementi esposti, lungo il probabile percorso seguito dalla massa in movimento.



**Figura 2.7:** Schema delle principali opere di difesa attuabili contro le colate detritiche (D'Agostino, 2005).

Ad esempio, nel caso specifico di opere di protezione contro le colate detritiche, appartengono alla prima categoria le soglie di stabilizzazione dell'area di innesco e briglie di consolidamento dell'alveo, impiegate soprattutto per evitare il fenomeno dell'erosione fondale. Nella difesa contro le colate detritiche, vista la canalizzazione del fenomeno, sono più comunemente impiegate opere strutturali passive come rilevati di protezione, muri longitudinali, briglie frangicolata e filtranti allo scopo di convogliare il flusso nella direzione voluta e a gestirlo tramite la riduzione progressiva dell'energia in gioco.

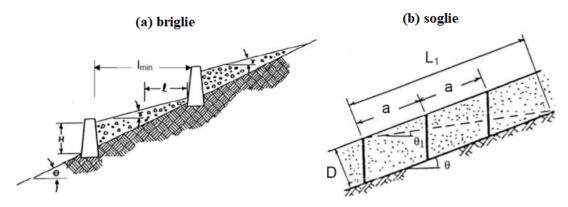
Nella figura 2.7, sono rappresentate le principali opere di difesa appena elencate, tuttavia occorre specificare che si tratta di uno schema idealizzato; spesso infatti, tali opere sono adottate in parte, o con un differente ordine e numero, in funzione della morfologia del canale e l'eventuale presenza di bacini più o meno pianeggianti.

Perciò ogni singola situazione necessita di uno studio attento ed una progettazione mirata, senza l'applicazione in serie di tali opere difensive, come rappresentate in figura 2.7. Nei sotto-paragrafi successivi vengono descritti brevemente queste tipologie di intervento, evidenziandone le principali funzioni.

### 2.3.2.1 Soglie di stabilizzazione e briglie di consolidamento

Sono opere di stabilizzazione poste trasversalmente rispetto al canale, aventi la duplice funzione di evitare l'innesco e la mobilitazione dei detriti instabili e di impedire l'arretramento verso monte dell'incisione. Possono essere collocate nella zona di innesco o nella testata del canale. Le briglie di consolidamento possono essere collocate anche nella parte centrale del canale al fine di ridurre la pendenza, innalzare il fondo e consolidare i sedimenti. La riduzione di pendenza causa un rallentamento del flusso e può essere realizzata con lo scopo di arrestare la parte più grossolana della colata, evitando la deposizione del materiale più fine. Per questo motivo la pendenza viene generalmente realizzata con valori compresi tra 5° e 15°.

Le soglie di stabilizzazione invece sono caratterizzate da una modesta altezza e non fuoriescono generalmente dal fondo del canale. Hanno la funzione primaria di evitare lo scavo e l'erosione del fondo (figura 2.8).



**Figura 2.8**: (a) Schema di disposizione delle briglie di consolidamento (VanDine, 1996); (b) disposizione delle soglie di stabilizzazione lungo un profilo longitudinale del canale (D'Agostino, 2005).

### 2.3.2.2 Opere di consolidamento nella parte centrale del canale

Si è visto nel sotto-paragrafo 2.2.2 che i canali in cui si verificano le colate detritiche spesso sono caratterizzati o ricoperti da materiale erodibile che contribuisce all'incremento del volume del corpo frana, con conseguente aumento del potenziale distruttivo del fenomeno. Per queste ragioni spesso è indispensabile la realizzazione di opere a protezione dell'erosione del fondo e delle sponde, particolarmente sensibili.

In tale categoria si collocano le opere di stabilizzazione trasversale come le briglie di consolidamento dedite alla protezione del letto dell'alveo e opere longitudinali dedite alla protezione delle sponde. Queste ultime sono disposte parallelamente alla direzione del flusso, lungo il canale, come muri longitudinali ed opere di ingegneria naturalistica. Tali opere hanno anche la funzione di indirizzare il flusso e convogliarlo in una direzione prestabilita, proteggendo eventuali zone vulnerabili (figura 2.7). Possono essere realizzate in calcestruzzo armato, pietrame, muratura e nel caso di opere naturalistiche con piante vive e morte.

### 2.3.2.3 Briglie frangicolata

Queste opere sono realizzate con lo scopo di "rompere" la colata, ossia ridurne la velocità ed il livello energetico in modo tale da favorirne la deposizione nel bacino di deposito posto più a valle. Sono inoltre preposte a bloccare la parte più grossolana del fronte della colata. Tali opere sono generalmente concepite e progettate come delle briglie il cui filtro è composto da grossi contrafforti in calcestruzzo armato (figura 2.9); questi speroni di forma triangolare ed indipendenti tra di loro, sono generalmente rivestiti sul lato a monte, in cui avviene l'impatto, con rivestimenti in gomma o acciaio.

Tali briglie sono usualmente collocate in apice di conoide a monte rispetto ad un bacino di deposito.

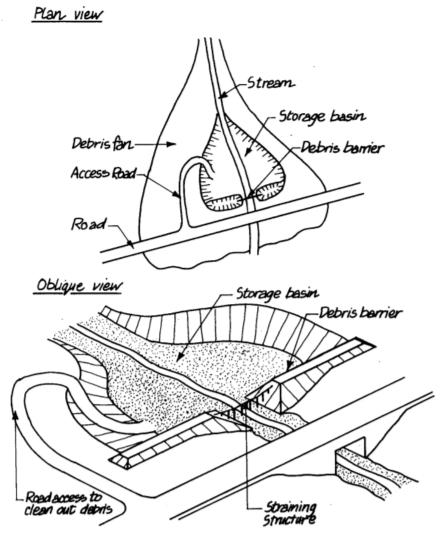


Figura 2.9: Briglia frangicolata situata in località Chenaux, Valle d'Aosta.

### 2.3.2.4 Bacino di deposito

Si tratta di un area dedicata al deposito del materiale detritico lasciando passare la sola componente fine diluita, più facilmente gestibile e controllabile. Per migliorare questa funzionalità possono essere chiuse tramite delle briglie filtranti (figura 2.10).

Possono essere ricavate sfruttando la morfologia naturale della valle, ove siano presenti zone di allargamento dell'alveo relativamente pianeggianti (specialmente nel tratto che precede l'ingresso in conoide). In alternativa, possono essere realizzati artificialmente mediante l'impiego di macchine movimento terra. Quando non vi è la possibilità di realizzare grandi bacini una soluzione è quella di eseguire più bacini di dimensioni ridotte in successione.



**Figura 2.10:** Vista in pianta e in assonometria di uno schema di bacino di deposito in conoide (VanDine, 1996).

Tale opera deve essere progettata e dimensionata correttamente, in termini di altezza di trattenuta della briglia di chiusura e di capacità di invaso, in modo tale da contenere almeno il 40-50% del volume solido della colata di progetto.

Al fine di garantire la deposizione, la pendenza del fondo dev'essere opportunamente valutata, in funzione delle caratteristiche della colata attesa e dell'azione filtrante esercitata dalla briglia di chiusura. Generalmente per fenomeni di colata, l'angolo di deposito è compreso tra 3° e 8°. Inoltre, allo stesso scopo, possono essere adottate alcune accortezze costruttive quali una pendenza della piazza del deposito pari alla metà dell'inclinazione del canale in ingresso ed una sezione di deflusso avente larghezza pari a circa 3-4 volte la sezione del canale entrante.

Il bacino di deposito, così come le altre principali opere di trattenuta del materiale devono essere raggiungibili da macchine di movimento terra per effettuare manutenzione e per asportare il materiale sedimentato prima che si verifichi un nuovo fenomeno franoso. Per tale motivo, il progetto deve tenere in considerazione la necessità di realizzare piste d'accesso alle zone interessate, agibili anche dopo la realizzazione della struttura.

#### 2.3.2.5 Canale di smaltimento

Il canale di smaltimento è il tratto di canale compreso tra l'ultima briglia di trattenuta e la confluenza nel torrente di fondovalle.

Dev'essere progettato in modo tale da smaltire flussi contenenti elevate concentrazioni solide, anche nell'ipotesi di funzionamento ottimale delle strutture poste a monte aventi lo scopo di trattenere il materiale più grossolano.

Le sezioni trasversali del canale più funzionali hanno una forma parabolica o semicircolare o ad U. Tali forme favoriscono infatti una migliore distribuzione degli sforzi tangenziali, limitando la formazione di depositi sul fondo e agevolando l'auto-pulizia durante le fasi ordinarie di morbida. E' inoltre consigliabile un rivestimento in blocchi lapidei per evitare fenomeni di erosione spondale e fondale.

Ulteriori indicazioni progettuali, da un punto di vista planimetrico, sono la realizzazione di tracciati il più possibile rettilinei, evitando curve strette che favoriscano la sedimentazione. Nel caso di cambi di direzione è necessario utilizzare curve aventi ampi raggi. Da un punto di vista altimetrico invece è consigliabile, ove possibile, l'utilizzo di una pendenza costante, evitando brusche variazioni di sezione o l'inserimento di briglie di consolidamento che possono rallentare il flusso e causare la deposizione dei sedimenti, con la conseguenza di una possibile fuoriuscita della colata dalla sede.

### 2.3.2.6 Briglie filtranti

Le briglie filtranti, dette anche selettive, sono delle opere di protezione contro le colate detritiche che fanno parte della famiglia più ampia delle barriere. Le principali funzioni ed obiettivi raggiungibili mediante l'utilizzo di barriere sono:

- la **ritenzione**, ossia la trattenuta di materiale e di sedimenti, da asportare meccanicamente una volta terminato il flusso;
- il **dosaggio**, ossia una ritenzione temporanea di sedimenti che verranno asportati naturalmente una volta cessata la colata dal regolare flusso del torrente;
- **filtraggio**, ossia la filtrazione e deposizione del materiale più grossolano permettendo il passaggio dell'acqua e dei sedimenti più fini;
- dissipazione energetica, ossia la riduzione dell'elevata energia posseduta dalla colata, con conseguente rallentamento e deposizione del materiale più grossolano contenuto nel fronte della frana.

Esistono due tipologie di barriere: quelle chiuse e quelle aperte. La prima tipologia è stata utilizzata fino alla fine degli anni '60 e prevedeva la realizzazione di imponenti strutture prive di aperture ed efficienti fino ad un completo riempimento.

Sono state gradualmente sostituite dalle barriere aperte, prima tramite l'inserimento di piccole aperture e finestre capaci di lasciar passare la componente fluida della colata ed eliminare in tal modo la spinta idraulica, con un conseguente risparmio economico e di impatto ambientale. In seguito si sono sviluppate ulteriori barriere di svariate forme, caratterizzate dalla presenza di una o più aperture di maggior dimensione o addirittura formate da strutture reticolari.

La scelta del grado di apertura deriva da un compromesso tra la necessità di intercettare ed arrestare il detrito più grossolano e l'esigenza di evitare una completa occlusione del filtro durante lo svolgimento della colata, tornando in tal caso ad una configurazione simile alle barriere chiuse. La presenza di un'ampia varietà di barriere permette la selezione delle più efficaci ed efficienti, in funzione delle caratteristiche del corso d'acqua a regime, della morfologia dell'alveo e delle caratteristiche della colata detritica.

Alcune tipologie di barriere aperte sono rappresentate in figura 2.11, in cui è possibile distinguere le seguenti categorie:

- barriere a finestra (slot barriers);
- barriere a fessura (slit barriers);
- barriere a pettine (sectional barriers);
- barriere a reticolo (lattice barriers, net barriers).

Tra queste tipologie, le barriere aventi grandi aperture come le barriere a finestra e a fessura sono generalmente impiegate per la funzione di dosaggio e dissipazione energetica, mentre barriere a pettine e a reticolo per il filtraggio e la dissipazione.

Le prime due tipologie, in modo particolare le briglie a fessura, vengono progettate in maniera tale da lasciar transitare, senza un apprezzabile disturbo, le portate ordinarie del torrente in alveo. In occasione di eventi di piena provocano un rigurgito che causa una riduzione della velocità della corrente e la conseguente deposizione del materiale di medie e grandi dimensioni.

Una volta terminata la piena, teoricamente la corrente di morbida asporta il materiale di medie dimensioni, ridistribuendolo più a valle. Tale funzionalità, definita come autopulente, non sempre si verifica, soprattutto nel caso delle briglie a finestre, che possono rimanere ostruite.

Le briglie a reticolo e a pettine invece vengono progettate per intercettare ed arrestare il materiale solido trasportato dal flusso. Oltre ai sedimenti, permettono inoltre di intercettare i materiali galleggianti, come i tronchi, che possono creare problemi a strutture più a valle, tipicamente i ponti. A differenza delle tipologie precedenti, necessitano quindi di una manutenzione al termine di ciascun evento, in quanto vengono completamente ostruite dal materiale intercettato.

Tali opere devono essere progettate nell'ipotesi che la barriera si riempia prima del passaggio della portata di picco. Quindi è necessario prevedere l'inserimento di una gaveta al di sopra della barriera, opportunamente dimensionata in funzione della portata di picco. Si tratta di una sagomatura, generalmente di forma trapezoidale, della parte sommitale della barriera, che permette di convogliare il flusso in una determinata direzione, tipicamente centrale rispetto alla sezione del canale, per far fronte a problemi di erosione spondale.

Nel capitolo successivo vengono affrontati i problemi legati all'interazione tra le colate detritiche e le opere di difesa, con riferimento particolare alle barriere.

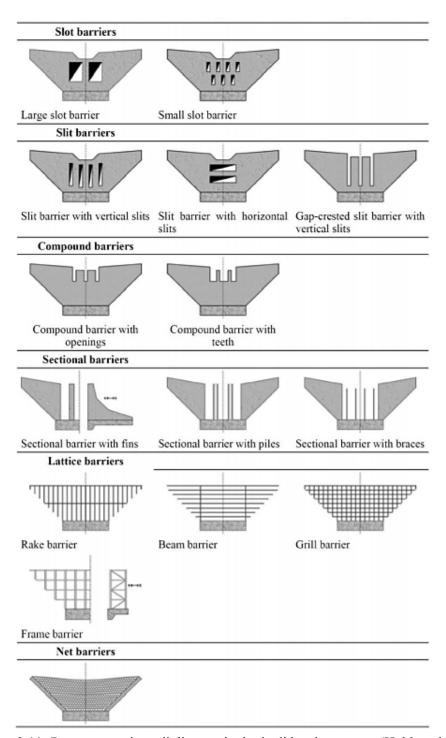


Figura 2.11: Rappresentazione di diverse tipologie di barriere aperte (Hubl et al., 2003).

## Capitolo 3

# Modellazione dell'interazione tra colata detritica e barriera

Attualmente, non esiste una normativa specifica che regoli la progettazione delle barriere di difesa contro le colate detritiche. Per questo motivo, spesso vengono adottati degli approcci semplificati per la valutazione delle azioni esercitate dalla colata, basate su formulazioni sviluppate originariamente per applicazioni idrauliche.

Un'alternativa, raramente seguita nella progettazione, è l'adozione di metodi numerici avanzati che hanno visto un enorme sviluppo a partire dagli anni '90 e che hanno contribuito ad un importante progresso nella comprensione di tali fenomeni.

Questo capitolo è dedicato agli approcci esistenti per la modellazione dell'interazione tra le colate detritiche e le barriere di difesa. In particolare, nel paragrafo 3.1 viene fornita una visione d'insieme di tali metodi poi approfondita nei paragrafi 3.2 e 3.3 riguardanti rispettivamente i modelli basati su un approccio idraulico e la determinazione di forze di impatto. Nel paragrafo 3.4 vengono fornite alcune indicazioni riguardanti la progettazione, con riferimento alle linee guida austriache (ONR 248XX); infine nel paragrafo 3.5 viene descritto l'approccio seguito in questa tesi per la modellazione dell'interazione tra flusso e barriera attraverso modelli numerici.

## 3.1 Panoramica dei modelli di interazione

Come accennato, la strada più seguita per la modellazione è l'utilizzo di approcci semplificati basati sulla teoria dell'idraulica classica. Questo modo di procedere può essere giustificato dal comportamento della colata detritica, che sotto certi aspetti è simile a quello di un fluido. Tuttavia, la colata detritica non è un liquido puro, bensì una miscela di sedimenti e acqua che scorre lungo un canale generalmente ad elevate velocità. Per cui, è necessario l'utilizzo di fattori correttivi che tengano in considerazione l'elevata concentrazione solida e la forte dinamicità del fenomeno.

Questi fattori correttivi, di natura empirica, derivano da prove di laboratorio su piccola scala e dall'osservazione di fenomeni avvenuti in passato. Tuttavia sono per loro natura approssimativi e influenzati da una serie di problematiche; ad esempio lo studio dei fenomeni passati di colate detritiche è spesso incompleto a causa di una descrizione frammentaria dei fenomeni con la mancanza di dettagli importanti e di interesse ingegneristico.

Le prove di laboratorio sono invece influenzate da problemi di scala, essendo generalmente effettuate in piccola scala per questioni legate al costo e alle difficoltà esecutive. Per cui i risultati ottenuti sono spesso contrastanti rispetto a quelli risultati attesi, ricavati dall'osservazione di fenomeni naturali reali. Inoltre la scelta del materiale da utilizzare per simulare la colata detritica può essere irrealistico e incapace di rappresentare correttamente la natura complessa del flusso. A questo si aggiunge la limitata possibilità di effettuare un certo numero di esperimenti, limitando la rappresentatività delle prove e la ripetibilità dei risultati.

Lo sviluppo di strumenti per la modellazione numerica ha consentito di far fronte almeno in parte ad alcune di queste problematiche, in particolare la possibilità di eseguire numerose simulazioni, con l'esecuzione di analisi parametriche complete.

Tale sviluppo, reso possibile anche dalla crescita nel corso degli anni della capacità di calcolo dei calcolatori, ha permesso un notevole incremento del bagaglio di conoscenze relative al fenomeno delle colate detritiche.

Con la prospettiva e l'obiettivo della mitigazione del rischio di questi fenomeni, sono state realizzate negli anni un numero significativo di simulazioni, sulla base di diversi approcci dinamici, capaci di descrivere il percorso seguito dalla massa in movimento attraverso l'integrazione numerica delle equazioni del moto.

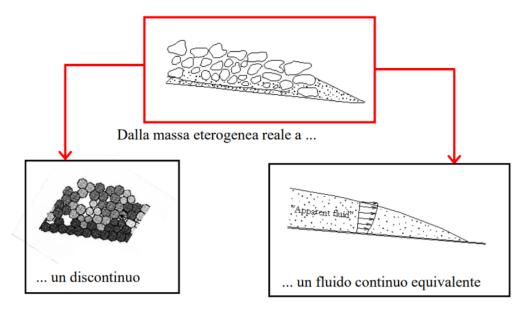
Tali metodi si differenziano tra loro essenzialmente in funzione delle equazioni costitutive implementate, le semplificazioni e le assunzioni adottate, ma anche in base alle differenti condizioni iniziali e numero di fasi considerate.

In particolare, due approcci fondamentali possono essere individuati: l'approccio al continuo e l'approccio al discontinuo anche detto al discreto. Entrambi largamente adottati nello studio delle colate detritiche differiscono nel modo di considerare la massa eterogenea del flusso.

Il primo approccio considera la massa della colata, composta nella realtà da materiale solido, acqua e aria come una massa continua che può essere sia monofasica che bifasica. Il secondo invece tiene in considerazione la natura discreta del flusso, caratterizzato da una componente solida granulare tramite la rappresentazione di ciascun singolo grano trattato separatamente con una propria massa e momento di inerzia (figura 3.1).

Questi due modi differenti di affrontare il problema possono essere in una certa misura complementari, in quanto suppliscono vicendevolmente ad alcune considerazioni limitanti. L'approccio al continuo permette di simulare efficacemente la colata detritica lungo il proprio percorso, necessario ad esempio per la valutazione della massima distanza di propagazione e dell'estensione del fenomeno, utili per valutare le potenziali aree a rischio. Tuttavia non permette di considerare altri aspetti importanti come le collisioni che si verificano all'interno del flusso e la nascita di catene stabili tra i grani, specialmente nei confronti dell'interazione con possibili opere di difesa.

Queste condizioni sono invece valutabili mediante l'utilizzo di un approccio discreto che permette inoltre di mantenere la tridimensionalità spaziale del problema, elemento importante nello studio dell'interazione con una barriera. Tuttavia un approccio discreto non permette di valutare l'interazione tra la fase solida e la fase liquida.



**Figura 3.1:** Differenza principale tra l'approccio al continuo e al discontinuo nella rappresentazione della massa del flusso (Pirulli, 2014).

## 3.2 Modelli di impatto idraulici

I modelli idraulici sono i modelli comunemente utilizzati per via della loro semplicità. Si basano su formulazioni semplificate dedotte dalla teoria classica dell'idraulica e su fattori empirici. Possono essere distinti in due categorie: i modelli cosiddetti idrostatici e quelli idrodinamici. Nei primi la pressione massima dell'impatto è assunta proporzionale alla pressione statica esercitata sulla barriera, ovvero è proporzionale all'altezza del flusso. Nei modelli idrodinamici viene invece assunta una pressione proporzionale ad un'altra caratteristica fondamentale del flusso, la sua velocità, che viene elevata al quadrato. Esistono inoltre i modelli definiti misti, in quanto considerano sia un contributo idrostatico che idrodinamico nella valutazione della pressione.

A fronte della loro semplicità procedurale si contrappone una difficile valutazione del fattore empirico utilizzato per introdurre le differenze tra una colata detritica e un fluido puro.

### 3.2.1 Modello idrostatico

Modelli idrostatici tipici sono quelli descritti da Armanini (1997) e Lichtenhahn (1973). Questi modelli considerano una distribuzione di pressione triangolare lungo l'altezza della barriera che viene incrementata tramite un fattore empirico k per considerare la componente dinamica. La pressione massima viene espressa come

$$p_{\text{max}} = k \rho_{\text{d}} g h_{\text{d}}, \tag{3.1}$$

in cui  $\rho_d$  è la densità della colata detritica, g è l'accelerazione di gravità e  $h_d$  è l'altezza della colata detritica. Siccome spesso in fase di progettazione non si conosce tale parametro viene utilizzata in maniera cautelativa l'altezza della barriera. In tal caso l'unico parametro incognito risulta essere la densità della colata detritica che tuttavia assume valori poco variabili (tabella 3.1).

**Tabella 3.1:** Intervalli di variazione della densità e della concentrazione solida in volume, secondo la classificazione di Pierson e Costa, (1987).

| Fenomeno               | C <sub>v</sub> [%] | Densità [g/cm <sup>3</sup> ] |
|------------------------|--------------------|------------------------------|
| Trasporto di fondo     | 0-20               | 1,0-1,33                     |
| Flusso iperconcentrato | 20-47              | 1,33-1,8                     |
| Colata detritica       | 47-77              | 1,8-2,3                      |

Nota la distribuzione di pressione di forma triangolare è possibile valutare la forza di impatto  $F_d$  agente sulla struttura come

$$F_{d} = \frac{1}{2} p_{max} h_{d} = \frac{1}{2} k \rho_{d} g h_{d}^{2}, \qquad (3.2)$$

Applicata ad un terzo dell'altezza della colata detritica.

Siccome il modello idrostatico non tiene in considerazione la velocità con cui si muove il flusso, Kwan (2012) suggerisce il suo utilizzo solamente nel caso in cui la velocità sia ridotta.

Per quanto riguarda il fattore di amplificazione k, in letteratura sono presenti diversi valori compresi in un intervallo di variazione piuttosto ampio (tabella 3.2). Questo comporta la principale limitazione di questo metodo, infatti nel caso in cui il fattore k non sia sufficientemente elevato, la forza di impatto di una colata detritica può essere drammaticamente sottostimata (Armanini et al., 2010).

**Tabella 3.2:** Valori del coefficiente empirico k per la valutazione della forza di impatto idrostatica secondo diversi autori.

| Modello Idrostatico             |                                  |   |  |  |  |
|---------------------------------|----------------------------------|---|--|--|--|
| $p_d^{} = k \rho_d^{} g h_d^{}$ |                                  |   |  |  |  |
| Autore                          | Valore del fattore<br>empirico k | Note  |  |  |  |
| Lichtenhahn (1973)              | 2,8 ÷ 4,4 poi 7 ÷ 11             | Per piccole velocità del flusso;<br>valore del coefficiente empirico<br>finale basato su ricalcoli. |  |  |  |
| Armanini e Scotton (1993)       | 9                                | Basato su piccole velocità del flusso.  |  |  |  |
| Armanini (1997)                 | 5                                | Basato su analisi teoriche di impatto dinamico condotte da Armanini e Scotton (1993).               |  |  |  |
| Scotton e Deganutti (1997)      | 2,5 ÷ 7,5                        | Prove eseguite su modelli sperimentali a piccola scala di colate detritiche.                        |  |  |  |
| Hubl et al. (2009)              | 0 ÷ 35                           | Sulla base di 8 eventi reali<br>(Costa, 1984); valore medio<br>compreso tra 6 e 7                   |  |  |  |
| Suda et al. (2010)              | 3 ÷ 6                            | Modello basato sulle<br>ONR 24801 austriache  |  |  |  |
| Proske et al. (2011)            | 3 ÷ 5                            | Intervallo suggerito per la pratica.  |  |  |  |

Con riferimento alla tabella 3.2, Lichtenhahn (1973) propone un fattore empirico compreso tra 7 e 11 sulla base di ricalcoli rispetto a quanto proposto in precedenza. Armanini e Scotton (1993) e Armanini (1997), quest'ultimo sulla base delle analisi di impatto dinamico condotte nel 1993, propongono rispettivamente una forza di impatto 9 e 5 volte superiore a quella idrostatica. Hubl et al. (2009) sulla base di otto eventi reali di colate detritiche descritte da Costa (1984) propongono valori decisamente elevati compresi tra 0 e 35 con valori medi tra 6 e 7.

Come è possibile notare da questi dati, la variabilità del fattore k in letteratura è decisamente elevata, per cui Proske et al. (2011) suggeriscono un intervallo di valori compreso tra 3 e 5 per l'utilizzo del modello in applicazioni pratiche; anche Suda et al. (2010) nel descrivere il modello semplice previsto nelle ONR 24801 suggerisce un intervallo simile, compreso tra 3 e 6.

### 3.2.2 Modello idrodinamico

Il modello idrodinamico, a differenza del precedente, assume una distribuzione di pressione uniforme, espressa dalla relazione

$$p_{d} = \alpha \rho_{d} v_{d}^{2}, \tag{3.3}$$

in cui  $v_d$  è la velocità della colata detritica mentre  $\alpha$  è il coefficiente di amplificazione empirico che assume valori generalmente compresi tra 2 e 5 (Armanini, 1997).

Nota la distribuzione di pressione di forma rettangolare è possibile valutare la forza di impatto  $F_d$  come

$$F_d = p_d h_d = \alpha \rho_d v_d^2 h_d, \qquad (3.4)$$

agente a metà dell'altezza del flusso.

Anche in questo caso, il valore del coefficiente empirico rappresenta le maggiori criticità, variando in un intervallo piuttosto ampio (tabella 3.3).

Watanabe e Ikeya (1981) ad esempio forniscono un valore pari a 2, Hungr et al. (1984) suggeriscono invece un fattore unitario con alcune considerazioni particolari circa l'area di applicazione del carico, valore confermato in seguito anche da VanDine (1996).

Alcuni autori suggeriscono invece valori più elevati: Du et al. (1987) e Lo (2000) sulla base di esperimenti su grande scala eseguiti in Cina suggeriscono un valore pari a 3, mentre Zhang (1993) indica un intervallo di variazione tra 3 e 5.

Kwan (2012) raccoglie diversi fattori ricavati da codici normativi esteri tra cui le linee guida austriache che prevedono l'utilizzo della formulazione proposta da Hubl e Holzinger (2003) descritta nel seguito. Tale formulazione è equivalente ad una formulazione idrodinamica con coefficiente compreso tra 0,5 e 2,2. Egli (2000) suggerisce un intervallo tra 2 e 4 per materiali a granulometria grossolana.

**Tabella 3.3:** Valori del coefficiente empirico  $\alpha$  per la valutazione della forza di impatto idrodinamica secondo diversi autori.

| Modello Idrodinamico $p_d = \alpha \rho_d v_d^2$ |                                  |   |  |  |  |
|--|----------------------------------|---|--|--|--|
| Autore   | Valore del fattore<br>empirico k | Note  |  |  |  |
| Watanabe e Ikeya (1981)                          | 2                                | Basato su misurazioni di campo con flusso laminare caratterizzato da sedimenti fini.  |  |  |  |
| Hungr et al. (1984)                              | 1                                | L'area di carico dev'essere di-<br>stribuita su un'area pari a quella<br>di progetto della colata detritica<br>ma con un'altezza amplificata di<br>un fattore pari a 1,5 per conside-<br>rare la formazione di un cuneo<br>stagnante al piede della barriera. |  |  |  |
| Du et al. (1987)                                 | 3                                |   |  |  |  |
| Zhang (1993)                                     | 3 ÷ 5                            | Sulla base di eventi in scala reale avvenuti in Cina.   |  |  |  |
| VanDine (1996)                                   | 1                                | In accordo con la valutazione proposta da Hungr et al. (1984).  |  |  |  |
| Egli (2000)                                      | 2 ÷ 4                            | Per densità comprese tra 1800 kg/m³ e 2200 kg/m³  |  |  |  |
| Lo (2000)  | 3                                |   |  |  |  |
| Wendeler (2008)                                  | 0,7 ÷ 2                          | Sulla base di prove eseguite in scala reale a Illgraben (Svizzera) e prove di laboratorio. Le prove sono state eseguite su barriere flessibili.   |  |  |  |
| Proske et al. (2011)                             | 1 ÷ 2,5                          | Intervallo di valori valido per<br>barriere filtranti basato su valori<br>di letteratura.   |  |  |  |
| Bugnion et al. (2012)                            | 0,4 ÷ 2                          | Prove eseguite in scala reale di colate detritiche impattanti piccoli ostacoli.   |  |  |  |
| Kwan (2012)                                      | 0,5 ÷ 2,2                        | Linee guida austriache ONR2480XX  |  |  |  |

Nella letteratura scientifica esistono altre formulazioni derivanti da un approccio idrodinamico. In particolare si riporta quella ricavata da Hubl e Holzinger (2003):

$$p_{d} = 4.5 \rho_{d} v_{d}^{0.8} (gh_{d})^{0.6}. \tag{3.5}$$

Si tratta di una formulazione che permette di considerare sia il contributo legato all'altezza della massa impattante che quello relativo alla velocità del flusso; per questo motivo supera in una certa misura le limitazioni legate alla modellazione idrostatica e idrodinamica.

La relazione (3.5) è stata ricavata a partire da risultati di prove sperimentali in laboratorio attraverso i seguenti passaggi:

• determinazione per via sperimentale della pressione di impatto p<sub>mis</sub> successivamente normalizzata rispetto alla pressione idrodinamica:

$$K = \frac{p_{\text{mis}}}{\rho_{\text{d}} v_{\text{d}}^2},\tag{3.6}$$

• determinazione del numero di Froude utilizzato per eliminare la dipendenza da fattori di scala, definito come:

$$F_{\rm r} = \frac{\rm v}{\sqrt{\rm gh}},\tag{3.7}$$

• tramite un'analisi di regressione sui valori ricavati è possibile stimare i coefficienti di regressione a e b, essendo la struttura iniziale della formulazione:

$$K = aF_r^b, (3.8)$$

• infine esplicitando il termine della pressione sperimentale e sostituendo ai coefficienti a e b i valori ricavati si ottiene la formulazione (3.5).

Esiste inoltre tutta una serie di formulazioni definite miste in quanto considerano sia il contributo idrostatico, legato all'altezza del flusso che il contributo idrodinamico relativo alla velocità dello stesso. Ad esempio Arrattano e Franzi (2003) propongono la seguente relazione per la valutazione della forza di impatto (per unità di larghezza):

$$F = \rho Qv + \frac{1}{2}\rho gh^2, \tag{3.9}$$

in cui Q è la portata del flusso.

Dal confronto tra i modelli analizzati è possibile affermare che i modelli idrostatici rappresentano opportunamente quei fenomeni caratterizzati da basse velocità del flusso, in cui il comportamento è prevalentemente regolato dall'altezza. Per contro, le colate detritiche caratterizzate da elevate velocità e spessori contenuti sono rappresentate in maniera più significativa dai modelli idrodinamici.

Tuttavia durante un fenomeno di colata sia forze statiche che dinamiche si verificano allo stesso tempo. Perciò l'utilizzo di metodi misti che considerino entrambi i contributi può essere un buon compromesso per una valutazione migliore. In particolare in questa tesi si fa riferimento alla formulazione (3.5) proposta da Hubl e Holzinger (2003).

## 3.3 Forze d'impatto di blocchi

Oltre alle forze di impatto dovute all'azione della colata detritica vista come una pressione distribuita, è necessario considerare che le colate detritiche possono contenere pietre, tronchi e grossi blocchi che possono causare all'impatto delle forze impulsive concentrate in aree ristrette dell'opera. Queste azioni sono da tenere in considerazione, in quanto possono causare gravi danni alla struttura.

Per quanto riguarda l'impatto dei massi, i principali modelli si basano sull'equazione di Hertz (1881) ricavata a partire dalla teoria dell'elasticità. Diversi autori tra cui Van-Dine (1996) e Hungr et al. (1984) raccomandano l'utilizzo dell'equazione di Hertz, ma suggeriscono l'utilizzo di un fattore correttivo K<sub>c</sub> per tenere in considerazione la perdita di energia associata alle deformazioni plastiche. Hungr et al. (1984) suggeriscono un valore di K<sub>c</sub> pari a 0,1.

L'equazione di Hertz, riformulata da Zhang et al. (1996) per la valutazione della forza di impatto viene espressa come

$$F_{\rm B} = K_{\rm c} n \alpha^{1.5}, \tag{3.10}$$

in cui  $F_B$  è l'intensità della forza di impatto del masso,  $K_c$  è il fattore adimensionale di riduzione del carico, mentre  $\alpha$  e n sono coefficienti che dipendono sia dalle caratteristiche del masso che della barriera e sono definiti come

$$\alpha = \left(\frac{5m_{\rm B}v_{\rm B}^2}{4n}\right)^{0.4},\tag{3.11}$$

in cui  $m_B$  è la massa del masso (pedice B maiuscolo si riferisce al masso dall'inglese boulder), mentre  $v_B$  è la componente di velocità del masso normale alla barriera. Invece il coefficiente n è uguale a

$$n = \frac{4r_{\rm B}^{0.5}}{3\pi(k_{\rm b} + k_{\rm B})},\tag{3.12}$$

in cui r<sub>B</sub> è il raggio del masso impattante, mentre k<sub>B</sub> e k<sub>b</sub> sono definiti come

$$k_{\rm B} = \frac{\left(1 - v_{\rm B}^2\right)}{\left(\pi \cdot E_{\rm B}\right)},$$

$$k_{\rm b} = \frac{\left(1 - v_{b}^2\right)}{\left(\pi \cdot E_{b}\right)},$$
(3.13)

dove  $v_B$  e  $v_b$  sono i coefficienti di Poisson (pedice b minuscolo è riferito alla barriera) mentre  $E_B$  ed  $E_b$  sono i moduli di elasticità rispettivamente del masso e della barriera.

La massa e il raggio del masso sono valutati empiricamente, in particolare per quest'ultimo si assume generalmente un valore pari a metà dell'altezza del flusso:  $r_{\rm B} = h_{\rm d}/2$ .

L'equazione (3.10) può essere riscritta come

$$F_{\rm B} = \widehat{K}_{\rm c} v_{\rm B}^{1,2} r_{\rm B}^2, \tag{3.14}$$

in cui  $\hat{K}_c$  è un fattore che considera sia il fattore di riduzione  $K_c$ , sia le proprietà meccaniche del masso e della barriera;  $v_B$  è invece la velocità del masso normale alla barriera.

Come suggerito da Hungr et al. (1984) spesso il valore del fattore  $K_c$  è assunto pari a 0,1 tuttavia altri autori suggeriscono fattori differenti come riportato in tabella 3.4.

**Tabella 3.4:** Elenco di formulazioni per la valutazione della forza di impatto di massi, proposta da Huang et al. (2007).

| Authors             | Formula  | $K_{\mathbf{c}}$ | Note   |
|---------------------|--|------------------|--|
| Mizuvama (1979)     | $F_{\rm B} = 241 v_{\rm B}^{1.2} r_{\rm B}^2$  | _                | Based on elastic collision theory                |
| Mizuyama (1979)     | $F_{\rm B} = 48.2 v_{\rm B}^{1.2} r_{\rm B}^2$ | 0.2              | Modified by Mt. Yakedake's field data            |
| Yamaguchi (1985)    | $F_{\rm B} = 426 v_{\rm B}^{1.2} r_{\rm B}^2$  | _                | Based on elastic collision theory                |
|                     | $F_{\rm B} = 50 v_{\rm B}^{1.2} r_{\rm B}^2$   | 0.1              | Modified by Myoukou Plateau's field data         |
| Lien (2002)         | $F_{\rm B} = 80.8 v_{\rm B}^{1.2} r_{\rm B}^2$ | 0.2              | Based on elastic collision theory                |
| Huang et al. (2007) | $F_{\rm B} = 30.8_{\rm B}^{1.2} r_{\rm B}^2$   | 0.06             | Based on flume experimental data on open barrier |

## 3.4 Linee guida austriache

Siccome non è presente una normativa di riferimento ben definita per la progettazione delle barriere, data la loro funzione di ritenuta e la conformazione strutturale che le caratterizza, spesso sono assimilate alle opere di sostegno tradizionali, con l'adozione della normativa relativa, ovvero le NTC2018 in ambito nazionale italiano e gli eurocodici in ambito europeo.

Esiste tuttavia tra le due tipologie strutturali una differenza sostanziale: la barriera infatti, oltre a sostenere l'eventuale materiale depositato a tergo dell'opera, come per un classico muro di sostegno, deve sopportare anche l'azione dinamica che scaturisce dall'impatto della colata detritica.

A tale proposito sono state sviluppate negli anni delle linee guida per la progettazione che illustrano possibili combinazioni di carico da adottare per valutare correttamente le azioni agenti sulla barriera. Le prime considerazioni tecniche relative alla progettazione di barriere contro le colate detritiche sono state sviluppate a Hong Kong da Lo (2000) sulla base della letteratura scientifica disponibile negli anni novanta.

In seguito, lo studio è stato ripreso ed esteso fino all'ultima versione pubblicata nel GEO report n.270 da Kwan (2012), che racchiude il quadro conoscitivo completo, comprendente anche gli studi compiuti in precedenza. A partire dalle linee guida di Hong Kong si sono sviluppate negli anni altri codici di riferimento a cura di altri Paesi, tra cui:

- Criteri di progettazione austriaci;
- Criteri di progettazione cinesi (MLR, 2006);
- Criteri di progettazione giapponesi (NLIM, 2007);
- Manuale tecnico di Taiwan (SWCB, 2005).

In particolare nel presente paragrafo vengono approfonditi i criteri progettuali sviluppati in Austria, le cui combinazioni di carico verranno utilizzate nella presente tesi per la valutazione delle azioni agenti sulla briglia di Saint Vincent (AO).

Le linee guida austriache sono state il risultato di un lavoro svolto dall'Austrian Standards Institute ASI, fondato nel 2006 da un gruppo di lavoro interdisciplinare avente lo scopo di sviluppare nuovi criteri di progetto per le opere di difesa torrentizie.

Il risultato è una raccolta di criteri che prendono il nome di ONR 248XX, citate in Marchelli (2018) e Melfi (n.d.) e strutturate nel seguente modo:

- ONR 24800 Terminologia, definizioni e classificazione delle opere;
- ONR 24801 Azioni sulle strutture;
- ONR 24802 Progetto delle strutture;
- ONR 24803 Costruzione, monitoraggio e manutenzione.

### 3.4.1 ONR 24800

Questa parte è dedicata alla definizione di una terminologia di base per la comprensione del testo e delle opere di difesa torrentizie, allo scopo di indicare con esattezza la funzione che ciascuna tipologia deve esplicare. Tali opere vengono classificate in base alla loro funzione nel seguente modo:

- Opere di stabilizzazione e consolidamento,
- Opere di ritenzione,
- Opere di dosaggio e filtraggio,
- Opere finalizzate alla dissipazione energetica,

in accordo con quanto definito al sotto-paragrafo 2.3.2.6 del capitolo precedente. Le sollecitazioni che agiscono sull'opera strutturale sono dovute essenzialmente all'azione dell'acqua, alla spinta del terreno e l'azione dinamica e statica della colata detritica. In alcune combinazioni particolari è inoltre necessario considerare azioni eccezionali quali valanghe, caduta massi e azioni sismiche. Le azioni fondamentali vengono invece definite in base alla tipologia di processo che può caratterizzare il torrente. Vengono individuate quattro categorie di processo:

- Flood (Alluvione),
- Fluviatile sediment discharge (Trasporto di materiale fluviale),
- Debris flow (Colata di detrito),
- Debris flood,

che possono essere identificate in base alla densità del flusso, l'ordine di grandezza della dimensione massima dei grani, la concentrazione in volume dei sedimenti, il comportamento del flusso e altre caratteristiche (tabella 3.5).

**Tabella 3.5:** Differenti caratteristiche delle tipologie di processo definite nelle ONR 24800 (Suda et al., 2010).

| discharge type                | flood types                                    |   | debris flow types   |          |  |  |
|-------------------------------|--|---|---|----------|--|--|
| discharge process             | flood  | fluviatile sediment<br>discharge        | debris flood  |          | debris flow  |  |
| type of process               | water  | low sedimen                             | t transport   | high     | debris flow  |  |
| rheology                      | n  | ewtonic                                 | approximately   | newtonic | non newtonic   |  |
| vol. solid concentration      | order of parts per<br>thousand.                | 0 - 20 %                                | 20 - 40 %   |          | > 40%  |  |
| Max. grain size               | mm-cm  | -dm                                     | -m  |          | -m   |  |
| specific gravity              | 1000 kg/m³                                     | < 1300 kg/m³                            | 1300 - 1700 kg/m³   |          | > 1700 kg/m³   |  |
| relevant forces               | turbulen                                       | ce, shear stress                        | buoyant forces, turbulence,<br>shear stress, dispersive<br>pressure |          | buoyant forces, dispersive<br>pressure, viscose und<br>frictional forces |  |
| solids dispersion in          | solids transported near riverbed and suspended |   | solids and suspended solids   |          | solids distributed in cross  |  |
| cross section                 | solids distributed in cross section            |   | distributed in cross section  |          | section  |  |
| responsible damage components | water and<br>suspended solids                  | water, suspended solids<br>and bed load | solids and water  |          | solids (less water)  |  |

### 3.4.2 ONR 24801

Questa parte delle linee guida è dedicata alla definizione delle azioni principali e alle combinazioni di carico. Possono essere utilizzati i modelli idraulici visti nel paragrafo 3.2 sia idrostatici che idrodinamici oppure in alternativa formulazioni derivanti da analisi sperimentali.

Tuttavia le linee guida suggeriscono l'utilizzo di un modello di impatto standard, il modello di Hubl e Holzinger (2003), che combina la pressione statica e la pressione dinamica derivante dall'interazione con la colata detritica.

Nella figura 3.2 vengono rappresentate tutte le principali azioni che possono agire sull'opera e che sono da considerare nel dimensionamento o nelle verifiche. In particolare esse sono:

- Pressione statica esercitata dalla colata detritica p<sub>st</sub>,
- Pressione dinamica esercitata dalla colata detritica p<sub>dyn</sub>,
- Sovraccarico p<sub>a</sub> generato dalla colata detritica,
- Forza di impatto del singolo blocco F<sub>e</sub>.

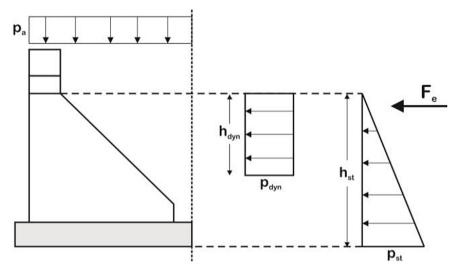


Figura 3.2: Modello di carico per le colate detritiche (Hubl, 2017).

In accordo con l'eurocodice EC0 e le NTC2018, i valori di progetto della forza di impatto e della pressione sono calcolate come:

$$P_{d} = (P_{dvn} + P_{st})\gamma_{G}, \qquad (3.15)$$

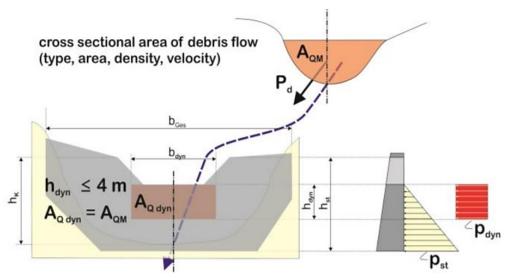
$$p_{d} = \frac{P_{d}}{A_{Q,dyn}}, \qquad (3.16)$$

in cui con la P maiuscola indica la risultante della distribuzione di pressione (figura 3.2) e  $\gamma_G$  è il coefficiente di sicurezza parziale che assume differenti valori a seconda della combinazione considerata.  $A_{Q,dyn}$  rappresenta invece l'area di impatto dinamica della colata detritica; tale parametro viene determinato proiettando sulla barriera l'area della sezione trasversale del canale  $A_{QM}$  (figura 3.3), siccome generalmente la colata detritica occupa per intero la sede del canale durante il suo movimento. L'area di progetto dell'impatto  $A_{Q,dyn}$  è approssimata ad una forma rettangolare, con altezza  $h_{dyn}$  compresa tra 2 e 4 m a seconda del tipo di colata analizzata. In particolare è assunta pari a 2 m per le colate detritiche maggiormente diluite (muddy debris flow) e 4 m per le colate con materiale più grossolano (coarse grained debris flow). Per cui deve risultare

$$A_{Q,dyn} = h_{dyn} \cdot b_{dyn}, \tag{3.17}$$

con

$$A_{Q,dyn} = A_{QM}$$
  $e$   $2 m \le h_{dyn} \le 4 m.$  (3.18)



**Figura 3.3**: Proiezione dell'area trasversale di impatto della colata detritica sulla barriera per la determinazione dell'area di impatto dinamica (Hubl, 2017).

### 3.4.3 ONR 24802

Questa parte delle linee guida è dedicata alla definizione degli stati limite per le verifiche di stabilità delle opere di difesa torrentizie. I criteri si ispirano all'eurocodice EC7 riguardante la progettazione geotecnica; ne consegue che le verifiche da eseguire sono le stesse delle opere di sostegno classiche. Devono quindi essere verificati i seguenti stati limite ultimi SLU:

- EQU: stato limite ultimo per perdita di equilibrio della struttura, del terreno o dell'insieme terreno struttura considerati come corpi rigidi;
- GEO: stato limite ultimo geotecnico per rottura o eccessiva deformazione del terreno;
- UPL: stato limite ultimo per perdita di equilibrio della struttura per effetto della sottospinta idraulica;
- STR: stato limite ultimo per rottura strutturale dell'opera o degli elementi strutturali che la costituiscono.

In figura 3.4 sono schematizzate le possibili modalità di rottura cui può essere soggetta un'opera di difesa torrentizia, facenti riferimento ai diversi stati limite ultimi.

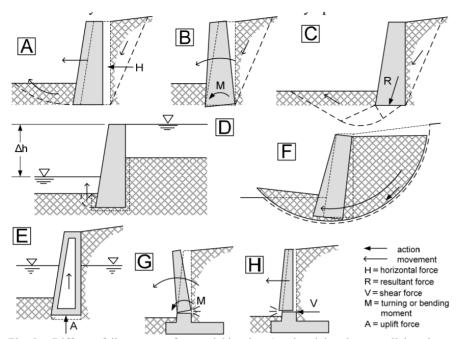
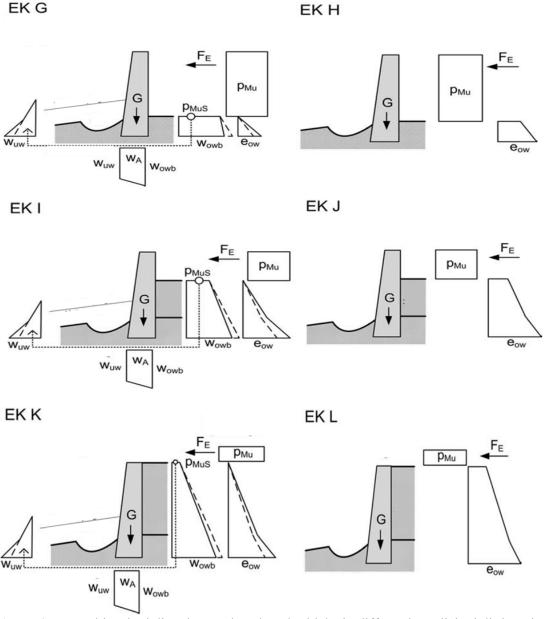


Figura 3.4: Differenti tipologie di collasso delle barriere di difesa torrentizia: (A) rottura per scorrimento alla base; (B) rottura per ribaltamento; (C) rottura per superamento della capacità portante del terreno sotto la fondazione; (D) rottura per sifonamento (E) rottura per sollevamento; (F) perdita di stabilità generale; (G) rottura strutturale per flessione; (H) rottura strutturale per taglio (Suda et al., 2010).

Le azioni che possono agire sulla struttura e da tenere in considerazione durante la fase progettuale dell'opera sono le seguenti:

- peso proprio
- pressione dell'acqua:
  - idrostatica
  - dinamica
  - moto di filtrazione
  - carico dell'acqua agente sopra l'opera
  - idrostatica a valle
  - spinta di galleggiamento
- spinta del terreno
- erosione
- pressione dinamica esercitata dalla colata detritica
- azioni eccezionali (valanghe, caduta massi, sisma)
- azioni indirette (ritiro del calcestruzzo, variazioni di temperatura)

In funzione del processo predominante le ONR 24802 stabiliscono la combinazione delle azioni corrispondente. In particolare, i processi vengono suddivisi in tre stati/livelli, in base al comportamento predominante del flusso: il primo stato è il trasporto fluviale, il secondo comprende i fenomeni di debris flow e debris flood e il terzo stato coinvolge gli eventi eccezionali. Vengono stabilite dodici differenti combinazioni di carico indicate con la nomenclatura EK. Le prime sei combinazioni (EK A – EK F) riguardano il primo stato mentre le restanti sei (EK G – EK L) riguardano il secondo stato. Queste ultime, riportate in figura 3.5, sono le combinazioni di interesse nella presente tesi, siccome riguardano le colate detritiche.



**Figura 3.5:** Combinazioni di carico per le colate detritiche in differenti condizioni di riempimento del bacino di deposito a tergo dell'opera.

Prendendo come riferimento la combinazione EK G è possibile identificare le seguenti azioni:

- pressione dinamica esercitata dalla colata detritica p<sub>Mu</sub> la cui intensità dipende dal modello di impatto utilizzato nell'analisi;
- forza di impatto del blocco singolo F<sub>e</sub> valutabile mediante l'utilizzo dell'equazione di Hertz;
- pressione esercitata dall'acqua w<sub>owb</sub> e dal terreno e<sub>ow</sub> a tergo dell'opera. In particolare la pressione esercitata dall'acqua non parte da un valore nullo in quanto
  considera il sovraccarico esercitato dalla componente dinamica della colata detritica;
- sottospinta idraulica, ossia una spinta verso l'alto esercitata dall'acqua al di sotto del piano di fondazione W<sub>A</sub>. La distribuzione della pressione dipende dalla pressione a monte w<sub>owb</sub> e a valle dell'opera w<sub>uw</sub>. E' dovuta alla presenza di un moto di filtrazione da monte verso valle (freccia tratteggiata). Questo moto comporta una riduzione della pressione a monte con conseguente aumento della spinta del terreno per incremento delle tensioni efficaci, mentre a valle, dove il moto procede dal basso verso l'alto si ha un incremento della pressione;
- la spinta dell'acqua a valle dell'opera non viene considerata a fini cautelativi, tuttavia è necessaria per la valutazione della sottospinta idraulica.

Le combinazioni rappresentate in figura 3.5 considerano differenti fasi in cui può venire a trovarsi un'opera di difesa durante l'occorrenza di una colata detritica. Trattandosi di un fenomeno caratterizzato da una successione di ondate che impattano contro l'opera, le ONR 24802 identificano tre fasi particolari dell'evoluzione del fenomeno.

Le combinazioni EK G ed EK H si riferiscono alla situazione in cui il bacino di deposito a monte dell'opera è ancora vuoto; si tratta dunque della prima ondata della colata che impatta contro l'opera. Le due combinazioni si riferiscono al caso in cui sia presente il moto di filtrazione (EK G) oppure sia assente (EK H).

Le combinazioni EK I ed EK J si riferiscono invece alla fase successiva, ovvero con il bacino di deposito parzialmente riempito dall'ondata o dalle ondate precedenti. Anche in questo caso le due combinazioni fanno riferimento alla presenza o assenza del moto di filtrazione.

Infine le ultime due combinazioni EK K ed EK L si riferiscono alla condizione di bacino completamente riempito dalle ondate precedenti del fenomeno, per cui la colata detritica sovrasta l'opera di difesa generando un azione di trascinamento sulla stessa.

La tabella 3.6 contiene tutte le combinazioni individuate dalle linee guida. Tali combinazioni risultano individuate a partire dalla tipologia di processo (alluvione, colata detritica), dalla funzione predominante dell'opera di difesa e dalla situazione del progetto (permanente, transitoria o accidentale).

**Tabella 3.6:** Tabella riassuntiva contenente tutte le combinazioni di carico individuate dalle linee guida austriache (Melfi, n.d.).

| STRESS COMBINATION (FUNCTION-DISCHARGE PROCESSES) |                          |         |         |                   |                   |         |  |
|---|--------------------------|---------|---------|-------------------|-------------------|---------|--|
| Distance and a second                             |                          |         |         |                   |                   |         |  |
| Function  | Discharge<br>Flood types |         |         | Debris flow types |                   |         |  |
|   | LF 1                     | LF 2    | LF 3    | LF 1              | LF 2              | LF 3    |  |
| Consolidation                                     | E∩F <sup>1)</sup>        | A∩B∩C∩D | M,N,O,P | K∩L               | B∩H <sup>2)</sup> | M,N,O,P |  |
| Retention   | A∩B                      |         | M,N,O,P | GNH + INJ         |                   | M,N,O,P |  |
| Dosing  | A∩B                      |         | M,N,O,P | GNH + INJ         |                   | M,N,O,P |  |
| Sorting   | A∩B                      |         | M,N,O,P | GNH + INJ         |                   | M,N,O,P |  |
| Energy dissipation (crash barriers)               |                          |         |         | K∩L               | B∩H <sup>2)</sup> | M,N,O,P |  |
| Energy dissipation (debris flow breaker)          |                          |         |         | GNH + INJ         |                   | M,N,O,P |  |

LF1: persistent design situation

LF2: transient design situation

LF3: accidental design situation

A unfilled storing basin, percolation flow, high water flow

B unfilled storing basin, no percolation flow, high water flow

C partially filled storing basin, percolation flow, high water flow

D partially filled storing basin, no percolation flow, high water flow

E filled storing basin, percolation flow, high water flow

F filled storing basin, no percolation flow, high water flow

G unfilled storing basin, percolation flow, debris flow

H unfilled storing basin, no percolation flow, debris flow

I partially filled storing basin, percolation flow, debris flow

J partially filled storing basin, no percolation flow, debris flow

K filled storing basin, percolation flow, debris flow

L filled storing basin, no percolation flow, debris flow

M rockfall

N avalanche

O lateral slope instability

P earthquake

Nel caso specifico delle colate detritiche con situazione di progetto permanente, si osserva come per le opere di difesa caratterizzate dalla funzione di consolidamento siano previste alternativamente la combinazione K o L, ossia con bacino pieno e tracimazione dell'opera da parte del flusso. Come descritto nel paragrafo 2.3.2.1 del capitolo precedente, si tratta generalmente di opere in calcestruzzo armato con lo scopo di innalzare il fondo dell'alveo e di ridurne la pendenza. Vengono realizzate per limitare l'erosione e non per arrestare il flusso della colata detritica che generalmente sovrasta l'opera, da cui questa combinazione.

Per quanto riguarda invece le opere aventi funzione di ritenzione, dosaggio, filtraggio e dissipazione energetica vengono indicate le combinazioni G o H (a seconda della presenza/assenza di filtrazione) e I oppure J . Si tratta delle combinazioni che prevedono il graduale riempimento del bacino di deposito. Si tratta infatti di opere poste più a valle

<sup>1)</sup> the resistance of lateral slope pressure must be durable in time. It is considered in combination EK O

<sup>2)</sup> transient design situation: after the construction phase the storing basin is unfilled. In the serviceability phase the storing basin is filled.

lungo il canale della colata, rispetto alle briglie di consolidamento. Lo scopo principale è quello di intercettare il materiale grossolano trasportato dal flusso, per cui si adottano le combinazioni di bacino vuoto e bacino parzialmente riempito.

Teoricamente, una volta terminato il fenomeno, il materiale depositato viene asportato meccanicamente. Tuttavia, nel caso di eventi particolarmente significativi, può capitare che la briglia venga ostruita completamente, con la conseguente perdita di funzionalità e possibile tracimazione da parte del flusso. Risulta quindi opportuno, in fase progettuale, tenere in considerazione anche le combinazioni K ed L che prevedono questa possibilità.

### 3.4.4 ONR 24803

Quest'ultima parte delle linee guida austriache tratta della fondamentale azione di manutenzione e di monitoraggio dell'opera, necessaria al fine di garantirne la funzionalità e l'efficacia, assicurando un adeguato livello di sicurezza.

Tali operazioni, se non eseguite, possono pregiudicare l'opera rendendola inefficace, basti pensare alla mancata asportazione del materiale depositato a monte delle briglie filtranti; nel caso in cui si verificasse un ulteriore fenomeno di colata non potrebbe espletare la propria funzione di ritenzione e filtraggio, con la concreta possibilità di peggiorare la situazione.

Le ONR 24803 contengono una serie di indicazioni e criteri in materia di monitoraggio e manutenzione utili per permettere all'opera di mantenere la sua funzionalità durante tutta la vita utile per cui è stata progettata.

## 3.5 Analisi dell'impatto tramite modelli numerici

Recentemente, con l'incremento delle risorse di calcolo disponibili, sono state svolte da diversi autori analisi parametriche tramite simulazioni numeriche per la valutazione dell'influenza dei parametri geometrici, dei parametri meccanici e reologici del flusso, sia in termini di intensità che di distribuzione spaziale della forza di impatto contro barriere (Marchelli, 2018).

Diversi autori hanno eseguito analisi DEM considerando un flusso granulare secco impattante contro un muro rigido. In particolare Calvetti et al. (2016) hanno notato come l'attrito interno tra le particelle sia il fattore più influente sul comportamento del flusso. Per alti valori di attrito, la massa ha un comportamento simile a quello di un solido, mentre per valori bassi è più simile a quello di un fluido. Con valori intermedi, invece, la massa assume un comportamento misto, ossia simile ad un fluido nella parte del flusso vicina alla superficie libera, simile ad un solido altrove.

Hanno inoltre osservato che durante l'impatto contro la barriera possono essere individuate tre zone: uno strato inferiore in cui la massa è praticamente ferma, uno strato intermedio con comportamento simile ad un solido con la nascita di catene di forze tra i grani ed infine uno strato superficiale fluidizzato, in cui i grani si comportano caoticamente e dissipano energia a seguito delle numerose collisioni che si verificano.

Gli stessi autori hanno inoltre osservato che la massima forza di impatto decresce rapidamente nel caso di masse granulari caratterizzate da elevate porosità, che assumono un comportamento simile a quello di un gas. Inoltre affermano che la massima forza di impatto aumenta con un incremento dell'altezza del flusso, della sua velocità e dell'inclinazione del fronte appena prima dell'impatto contro la barriera.

Ceccato e Simonini (2016) e Ceccato et al (2017), hanno evidenziato come l'inclinazione del fronte influenzi le forze di impatto sulla barriera e la loro evoluzione temporale. In particolare, con un fronte del flusso parallelo alla barriera, hanno osservato un incremento lineare delle forze esercitate su di essa in funzione della velocità.

Partendo da configurazioni iniziali differenti rispetto ai casi precedenti, simili invece tra loro, altri autori hanno riportato che la forza di impatto esercitata da un flusso granulare secco contro una barriera rigida chiusa aumenta con l'aumentare della pendenza del canale.

Nel panorama della letteratura tuttavia esistono poche analisi effettuate su barriere rigide aperte per stimare la forza di impatto esercitata dal flusso. Alcuni studi sono stati effettuati nei confronti di opere di dissipazione energetica come la presenza di ostacoli lungo il percorso del flusso.

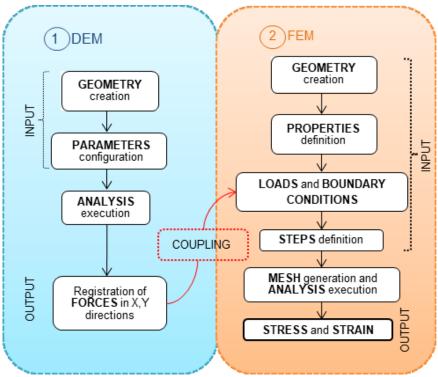
Data l'efficacia che sembrano avere le barriere aperte nella riduzione del danno e nel prevenire la perdita di vite umane negli eventi di colata detritica, il numero insufficiente di studi sulla dinamica e sulle forze esercitate dal flusso contro la barriera è un problema che richiede un'attenzione urgente (Marchelli, 2018).

In questo lavoro di tesi, la valutazione della forza di impatto sulla barriera rigida aperta viene eseguito tramite l'utilizzo di un codice agli elementi discreti (DEM) sviluppato da Leonardi (2005) in cui la massa della colata detritica viene rappresentata come una massa granulare secca. Le forze d'impatto e la loro evoluzione temporale registrata per ciascun punto di interesse sulla barriera vengono poi utilizzate come storia di carico in un codice agli elementi finiti (FEM), in particolare il codice Abaqus/CAE, attraverso il quale viene modellata la barriera aperta e ne viene analizzata la risposta strutturale.

Si tratta quindi di un accoppiamento DEM-FEM per lo studio dell'interazione tra una colata detritica secca ed una barriera aperta, in cui le forze registrate tramite il DEM (output DEM) diventano la storia di carico per il codice FEM (input FEM).

Può essere dunque considerato come un particolare modello ibrido implementato non in un unico codice ma tramite l'utilizzo di due differenti codici interagenti tra loro. Uno schema logico a blocchi dell'accoppiamento tra i due diversi metodi è riportato in figura 3 6

Nei capitoli 4 e 5 vengono approfonditi gli aspetti peculiari di entrambi i modelli, rispettivamente il DEM e il FEM, in cui vengono descritti nel dettaglio anche i blocchi riportati in figura 3.6 riguardanti i due diversi approcci.



**Figura 3.6:** Schema a blocchi dell'accoppiamento DEM-FEM utilizzato per l'analisi dell'interazione flusso detritico/opera di difesa.

# Capitolo 4

# Approccio DEM per la modellazione di flussi granulari

In questo capitolo si illustra il metodo agli elementi discreti, dall'inglese DEM (Discrete Element Method) implementato nel codice sviluppato da Alessandro Leonardi (2015). Tale approccio consiste nel rappresentare il flusso granulare come un insieme di particelle interagenti tra loro tramite forze di contatto. Il metodo viene descritto nel paragrafo 4.1, mentre nei paragrafi 4.2 e 4.3 vengono definite rispettivamente le forze di contatto in direzione normale e tangenziale e il coefficiente di attrito al rotolamento. Infine nel paragrafo 4.4 viene illustrata la modellazione di un caso semplice quale l'impatto di una singola sfera contro un muro per la validazione del metodo.

## 4.1 DEM: Il metodo agli elementi discreti

Questo metodo numerico è stato sviluppato solamente negli ultimi decenni durante i quali il notevole incremento della potenza di calcolo dei calcolatori elettronici ha permesso lo sviluppo di codici molto utili per la simulazione di problemi geotecnici legati al comportamento di materiali granulari.

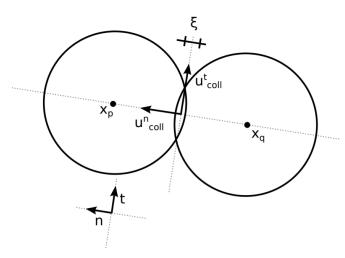
In tale approccio, i singoli grani dell'assemblaggio vengono idealizzati come delle particelle p caratterizzate da una massa  $m_p$  e da un momento di inerzia  $J_p$ . Ciascuna particella possiede nello spazio sei gradi di libertà che vengono continuamente calcolati tramite la risoluzione numerica delle equazioni del moto di Newton:

$$m_{\rm p} \frac{\mathrm{d}^2 \mathbf{x}_{\rm p}}{\mathrm{d}t} = \mathbf{F}_{\rm p},\tag{4.1}$$

$$\mathbf{J}_{p} \frac{\mathrm{d}^{2} \mathbf{\theta}_{p}}{\mathrm{d}t} = \mathbf{M}_{p} - \frac{\mathrm{d} \mathbf{\theta}_{p}}{\mathrm{d}t} \times \left( \mathbf{J}_{p} \frac{\mathrm{d} \mathbf{\theta}_{p}}{\mathrm{d}t} \right). \tag{4.2}$$

In cui con  $\mathbf{x}_p$  e  $\boldsymbol{\theta}_p$  si sono indicate rispettivamente la posizione e l'orientazione della particella, cioè i tre gradi di libertà traslazionali e rotazionali. Con  $\mathbf{F}_p$  e  $\mathbf{M}_p$  si sono indicati invece le forze e i momenti risultanti che agiscono sulla particella dovuti all'interazione con le altre particelle (collisioni) e all'azione di altre forzanti esterne, come il campo gravitazionale. Queste azioni risultanti dipendono in generale, oltre che dalla posizione e orientazione delle particelle, anche dalla loro velocità lineare  $\mathbf{u}_p$  e velocità angolare  $\boldsymbol{\omega}_p$ .

Durante una collisione le particelle si scambiano delle forze repulsive che vengono calcolate secondo diversi modelli, tra cui il modello lineare ed hertziano per il contatto normale e il modello viscoso per il contatto tangenziale. Tali modelli vengono descritti nel paragrafo 4.2.



**Figura 4.1:** Rappresentazione geometrica della collisione tra due particelle e del sistema di riferimento locale (Leonardi, 2015).

Affinché avvenga una collisione, due particelle  $p_1$  e  $p_2$  devono entrare in contatto tra di loro, permettendo una piccola sovrapposizione per la valutazione delle forze. Assumendo il caso più semplice di particelle di forma sferica di raggio  $r_{p1}$  e  $r_{p2}$  è possibile definire la sovrapposizione come

$$\xi = r_{p1} + r_{p2} - d_{p1,p2}, \tag{4.3}$$

in cui  $d_{p1,p2}$  definisce il modulo del vettore  $\mathbf{d}_{p1,p2} = \mathbf{x}_{p2} - \mathbf{x}_{p1}$  che rappresenta la distanza tra i centri delle due particelle. Tale vettore permette inoltre la definizione del sistema di riferimento locale di collisione (figura 4.1), la cui componente normale  $\mathbf{n}$  è definita come

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{d}_{p1,p2}}{\mathbf{d}_{p1,p2}},\tag{4.4}$$

mentre la componente tangenziale  $\mathbf{t}$  e la componente binormale  $\mathbf{b}$  sono definite in accordo con le componenti del vettore velocità di collisione  $\mathbf{u}_{coll}$ . La componente normale di tale vettore  $\mathbf{u}_{coll}^n$ , parallela al versore  $\mathbf{n}$ , viene definita come funzione delle velocità traslazionali delle due particelle  $\mathbf{u}_{p1}$  e  $\mathbf{u}_{p2}$ 

$$\mathbf{u}_{\text{coll}}^{\text{n}} = \left( \left( \mathbf{u}_{\text{p2}} - \mathbf{u}_{\text{p1}} \right) \cdot \mathbf{n} \right) \mathbf{n}, \tag{4.5}$$

mentre la componente tangenziale della velocità di collisione  $\mathbf{u}_{\text{coll}}^{t}$ , parallela al versore  $\mathbf{t}$ , è funzione anche delle velocità rotazionali delle particelle  $\boldsymbol{\omega}_{p1}$  e  $\boldsymbol{\omega}_{p2}$ 

$$\mathbf{u}_{\text{coll}}^{\text{t}} = \mathbf{u}_{\text{p2}} - \mathbf{u}_{\text{p1}} - \mathbf{u}_{\text{coll}}^{\text{n}} - r_{\text{p1}} \mathbf{\omega}_{\text{p1}} \times \mathbf{n} - r_{\text{p2}} \mathbf{\omega}_{\text{p2}} \times \mathbf{n}. \tag{4.6}$$

Attraverso il vettore  $\mathbf{u}_{\text{coll}}^{t}$ è possibile definire le due restanti componenti del sistema di riferimento locale come

$$\mathbf{t} = \mathbf{u}_{\text{coll}}^{\text{t}} / \mathbf{u}_{\text{coll}}^{\text{t}},$$

$$\mathbf{b} = \mathbf{n} \times \mathbf{t}.$$
(4.7)

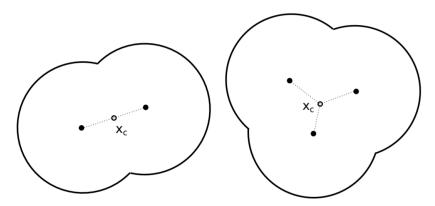


Figura 4.2: Rappresentazione di cluster composti da due e da tre sfere (Leonardi, 2015).

La sovrapposizione  $\xi$  rappresenta la deformazione elastica delle particelle che collidono. Affinché si verifichi la collisione,  $\xi$  deve essere una quantità positiva. In tale situazione, le particelle si scambiano una forza repulsiva  $\mathbf{F}_{\text{coll}}$  uguale e contraria in accordo del terzo principio della dinamica di Newton. L'espressione che definisce la forza di collisione o di repulsione è funzione della sovrapposizione  $\xi$ , secondo il modello costitutivo del contatto adoperato.

L'uso di particelle sferiche per la descrizione del materiale granulare è una forte semplificazione, in quanto qualsiasi grano, essendo un materiale naturale, possiede un certo grado di scabrezza superficiale e una forma geometricamente irregolare. Tale ipotesi semplificativa permette in prima approssimazione, un notevole risparmio in termini di costo di calcolo e di durata delle simulazioni. Una possibilità per superare questa semplificazione consiste nel rappresentare i grani come dei cluster, ossia dei raggruppamenti di particelle sferiche rigidamente connesse, preservando così la semplicità dell'equazione (4.3) ma con un comportamento più simile a quello reale (figura 4.2).

Una seconda possibilità consiste nell'adoperare un coefficiente d'attrito al rotolamento che permetta di simulare numericamente la rugosità e l'irregolarità, senza cambiare fisicamente la geometria sferica delle particelle. Tale approccio viene descritto nel paragrafo 4.3 e rappresenta il metodo impiegato in tutte le simulazione effettuate.

La forza di collisione  $\mathbf{F}_{\text{coll}}$  viene calcolata nelle sue due componenti normale  $\mathbf{F}_{\text{coll}}^n$  e tangenziale  $\mathbf{F}_{\text{coll}}^t$  in funzione del modello costitutivo impiegato. Il sistema finale di forze e momenti che due particelle si scambiano durante una collisione è il seguente:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{\text{coll},p1} &= -\mathbf{F}_{\text{coll}}^{\text{n}} \mathbf{n} + \mathbf{F}_{\text{coll}}^{\text{t}} \mathbf{t}; \\ \mathbf{F}_{\text{coll},p2} &= \mathbf{F}_{\text{coll}}^{\text{n}} \mathbf{n} - \mathbf{F}_{\text{coll}}^{\text{t}} \mathbf{t}; \\ \mathbf{M}_{\text{coll},p1} &= r_{\text{p1}} \mathbf{F}_{\text{coll}}^{\text{t}} \mathbf{b}; \\ \mathbf{M}_{\text{coll},p2} &= r_{\text{p2}} \mathbf{F}_{\text{coll}}^{\text{t}} \mathbf{b}. \end{aligned} \tag{4.8}$$

Questo sistema è valido per particelle di forma sferica, in cui soltanto la componente tangenziale della forza di collisione genera un momento. Nel caso invece di particelle di forma non sferica, il sistema di equazioni (4.8) deve essere modificato in modo da considerare l'ulteriore contributo di momento generato dalla componente normale della forza di collisione.

## 4.2 Modelli di contatto delle particelle

In questo paragrafo vengono descritti i modelli di contatto implementati nel codice che permettono di definire la componente normale e tangenziale della forza di collisione tra due particelle: il modello lineare, hertziano, il modello viscoso e quello di Cundall e Strack. Si tratta di modelli costituiti dall'accoppiamento di molle e smorzatori che riproducono rispettivamente il comportamento elastico e l'energia dissipata durante la collisione tra le particelle, assumendo un comportamento viscoso.

In questi modelli si considerano le particelle come sfere rigide, a meno di piccole deformazioni necessarie per la valutazione delle forze; viene quindi ipotizzata la conservazione della forma sferica delle particelle anche in seguito alle collisioni. Tale ipotesi può essere giustificata a seconda delle caratteristiche del materiale simulato, ma non sempre è accettabile.

#### 4.2.1 Modello lineare

Il modello lineare è uno tra i modelli sviluppati più semplici che idealizza il contatto tramite l'accoppiamento in parallelo di una molla con rigidezza  $k_L^n$  e uno smorzatore con coefficiente di smorzamento viscoso  $\alpha_L^n$ . Uno schema del modello è rappresentato nella figura 4.3. La forza di collisione che agisce normalmente alla superficie di contatto delle sfere, cioè nella direzione  $\mathbf{n}$ , viene calcolata come

$$F_{\text{coll}}^{n} = k_{\text{L}}^{n} \xi + 2\alpha_{\text{L}}^{n} \sqrt{k_{\text{L}}^{n} \widetilde{m}} \dot{\xi}, \tag{4.9}$$

dove m è la massa effettiva definita come

$$\widetilde{m} = \frac{m_{\rm p1} \cdot m_{\rm p2}}{\left(m_{\rm p1} + m_{\rm p2}\right)}.\tag{4.10}$$

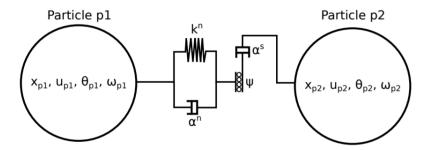


Figura 4.3: Rappresentazione del modello di contatto tra due sfere (Leonardi, 2015).

La sovrapposizione è governata dall'equazione di un oscillatore armonico smorzato

$$\ddot{\xi} + 2\gamma_{\mathrm{L}}\dot{\xi} + \omega_{\mathrm{L}}^2\xi = 0, \tag{4.11}$$

dove  $\gamma_L = \alpha_L^n \sqrt{k_L^n/\widetilde{m}}$  è il rapporto di smorzamento e  $\omega_L = \sqrt{k_L^n/\widetilde{m}}$  è la pulsazione naturale dell'oscillatore. Il coefficiente di restituzione  $\zeta$ , definito come il rapporto tra la velocità delle particelle prima e dopo la collisione è espresso come

$$\zeta = exp\left(-\frac{\pi\gamma_{\rm L}}{\sqrt{\omega_{\rm L}^2 - \gamma_{\rm L}^2}}\right),\tag{4.12}$$

se il sistema non è sovrasmorzato.

Da un punto di vista fisico, il coefficiente di restituzione varia, sebbene non drasticamente, al variare della velocità di impatto delle particelle, come dimostrato da analisi sperimentali. Tuttavia viene assunto costante per i vantaggi che ne risultano da un punto di vista pratico. Infatti dal coefficiente di restituzione, facilmente determinabile sperimentalmente, si ricava  $\gamma_L$  e il coefficiente di smorzamento  $\alpha_L^n$ .

In questo modello anche il tempo di contatto o di collisione tra le particelle è costante ed è espresso dalla relazione

$$t_{\text{coll,L}} = \frac{\pi}{\sqrt{\omega_{\text{L}}^2 - \gamma_{\text{L}}^2}}.$$
(4.13)

Il tempo di collisione è inversamente proporzionale alla pulsazione e quindi anche alla rigidezza dell'oscillatore. Il valore di  $k_L^n$  deve quindi essere scelto in modo appropriato soprattutto in funzione di considerazioni numeriche. Ulteriori dettagli sulla scelta di  $k_L^n$  sono forniti nel paragrafo 4.4.

L'intervallo temporale usato dal codice è calcolato come una frazione del tempo di collisione in modo che risulti

$$\Delta t^{\text{DEM}} = \frac{1}{n} t_{\text{coll,L}} < \frac{1}{10} t_{\text{coll,L}}. \tag{4.14}$$

Spesso il fattore n utilizzato ha un valore superiore a dieci, in modo tale da rappresentare con un buon grado di accuratezza il tempo di collisione, a discapito però della maggior durata delle analisi.

#### 4.2.2 Modello hertziano

Il modello hertziano a differenza del modello lineare ha il vantaggio di essere espresso in termini di proprietà fisiche del materiale, cioè in funzione del modulo di Young  $E_p$  e del coefficiente di Poisson  $\nu_p$ . Inoltre, nel caso di particelle sferiche, considera in maniera corretta la dipendenza della sovrapposizione  $\xi$  dalla forma delle particelle, in accordo con la teoria di Hertz. La relazione che definisce la forza di collisione è

$$F_{\text{coll}}^{\text{n}} = k_{\text{H}}^{\text{n}} \xi + 2\alpha_{\text{H}}^{\text{n}} \sqrt{k_{\text{H}}^{\text{n}} \widetilde{m}} \dot{\xi}, \tag{4.15}$$

dove la rigidezza normale k<sup>n</sup><sub>H</sub> è ora funzione dei parametri del materiale, della sovrapposizione e della geometria delle particelle secondo la relazione

$$k_{\rm H}^{\rm n} = \frac{2}{3} \frac{E_{\rm p}}{(1 - v_{\rm p})} \sqrt{\tilde{r}} \xi^{1/2}, \tag{4.16}$$

in cui  $\tilde{r}$  è il raggio effettivo definito come

$$\tilde{r} = \frac{r_{\text{p1}} \cdot r_{\text{p2}}}{\left(r_{\text{p1}} + r_{\text{p2}}\right)}.$$
(4.17)

L'equazione (4.16) è differente rispetto alla teoria classica di Hertz in quanto è stata leggermente modificata al fine di ottenere un coefficiente di restituzione  $\zeta$  costante. Il modello pseudo-hertziano così ottenuto, permette di valutare il coefficiente di smorzamento  $\alpha_H^n$  a partire dal coefficiente  $\zeta$  come

$$\alpha_{\rm H}^{\rm n} = \frac{-\sqrt{5}\ln\zeta}{\sqrt{\ln^2\zeta + \pi^2}}.\tag{4.18}$$

In questo modello risulta più complessa la valutazione del tempo di contatto che a differenza del modello lineare non è più costante, ma è funzione della velocità di collisione normale; puè essere valutato tramite la relazione

$$t_{\text{coll,H}} \simeq 1.1 \left(\frac{E_p}{1-\nu_p} \rho_p\right)^{2/5} \frac{\tilde{r}}{\left(u_{\text{coll}}^n\right)^{1/5}}.$$
 (4.19)

La valutazione del tempo di collisione è effettuata usando la massima velocità del sistema di particelle o la massima velocità che può essere predetta all'istante iniziale.

Si ottiene in questo modo un intervallo temporale costante, una semplificazione che si traduce in una migliore prestazione del metodo e che permette di controllare con più facilità il grado di accuratezza attraverso l'equazione (4.14).

#### 4.2.3 Modello viscoso

La forza di contatto in direzione tangenziale è assunta proporzionale alla velocità di collisione tangenziale tra le particelle, inoltre la massima forza che può essere trasmessa è data dal criterio attritivo di Coulomb. Pertanto viene espressa come

$$F_{\text{coll}}^{t} = -\min\left(2\alpha_{s}^{t}\sqrt{k^{t}\widetilde{m}}u_{\text{coll}}^{t},\mu_{d}F_{\text{coll}}^{n}\right),\tag{4.20}$$

in cui  $\alpha_s^t$  è il coefficiente di smorzamento tangenziale,  $\mu_d$  il coefficiente di attrito dinamico e  $k^t$  la rigidezza tangenziale definita in base al modello di contatto normale impiegato, come espresso nell'equazione (4.21).

$$k^{t} = \begin{cases} k_{L}^{n} & \text{se il modello normale è lineare,} \\ \frac{2E_{p}}{\left(2-\nu_{p}\right)\left(1+\nu_{p}\right)} \sqrt{\tilde{r}} (F_{coll}^{n})^{-1/3} & \text{se il modello normale è hertziano.} \end{cases}$$
(4.21)

Questo modello, sviluppato originariamente da Haff e Warner (1986) permette di rappresentare solamente il comportamento viscoso della forza di taglio e trascura la componente statica dell'attrito. La scelta di trascurare l'attrito statico è motivata dalla semplicità e da considerazioni riguardanti la modellazione di alcuni fenomeni, come le colate detritiche, caratterizzati da una forte componente dinamica che rappresenta la parte più rilevante del fenomeno. Tale semplificazione non permette di simulare alcuni comportamenti tipici dei materiali granulari come ad esempio la formazione di cumuli, poiché tra le particelle non possono nascere forze stabili, inoltre le particelle non sono in grado di arrestare il proprio moto.

#### 4.2.4 Modello di Cundall e Strack

Alcuni modelli, come quello sviluppato da Cundall e Strack (1979), tengono in considerazione sia la componente statica che la componente dinamica dell'attrito. In questo modello, uno tra i primi realizzati, la forza tangenziale di collisione è espressa come

$$F_{\text{coll}}^{t} = \min\left(k^{t} \epsilon + 2\alpha_{s}^{t} \sqrt{k^{t} \widetilde{m}} \frac{d\epsilon}{dt}, \mu F_{\text{coll}}^{n}\right). \tag{4.22}$$

In questa relazione, molto simile alla relazione (4.20),la rigidezza tangenziale k<sup>t</sup> non ha la stessa definizione dell'equazione (4.21) ma generalmente viene assunta pari ad una frazione della rigidezza normale k<sup>n</sup>.

La condizione statica è simulata da una molla che collega i punti di contatto tra le particelle e che agisce in direzione tangenziale rispetto al piano di contatto. L'elongazione di tale molla è definita come

$$\epsilon = \int_{t_{in}}^{t} \mathbf{u}_{coll}^{t} \, \mathrm{d}t, \tag{4.23}$$

in funzione della velocità tangenziale relativa ed agente dall'istante iniziale  $t_{in}$  in cui si verifica il primo contatto, fino all'istante di separazione delle due particelle. Insieme alla molla è collegato in parallelo uno smorzatore avente coefficiente di smorzamento  $\alpha_s^t$ . In questo modello, la forza tangenziale  $F_{coll}^t$  agente nella stessa direzione della molla  $\mathbf{t} = \boldsymbol{\epsilon}/\boldsymbol{\epsilon}$ , è limitata in modulo dalla forza normale  $F_{coll}^n$  secondo il criterio di Newton:

$$F_{coll}^{t} \begin{cases} \leq \mu_{s} F_{coll}^{n} & \text{in condizioni statiche,} \\ = \mu_{d} F_{coll}^{n} & \text{in condizioni dinamiche.} \end{cases}$$
 (4.24)

Il coefficiente di attrito statico  $\mu_s$  e dinamico  $\mu_d$  della relazione (4.24) devono rispettare la condizione  $\mu_d \leq \mu_s$ , per cui generalmente si impiega  $\mu_d = 0.9\mu_s$ , come risultato da una serie di esperimenti su materiali granulari, che hanno mostrato come tali coefficienti abbiano valori simili tra loro.

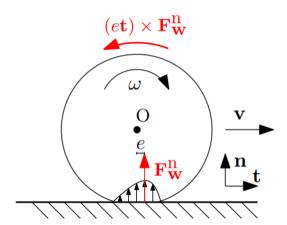
Il modello descritto permette la nascita di forze tangenziali in condizioni statiche, cioè anche quando non ci sia moto relativo tra le particelle. Si genera quindi una rete di forze in grado di simulare situazioni in equilibrio statico, ma tuttavia non è in grado di simulare l'arresto di particelle sferiche in movimento lungo un piano inclinato.

#### 4.3 Coefficiente di rotolamento

Il coefficiente d'attrito al rotolamento o semplicemente coefficiente di rotolamento è un parametro necessario per la definizione di un modello di resistenza al rotolamento, che assume una particolare importanza nella modellazione DEM.

Infatti senza tale modello, a causa della forma sferica delle particelle e dei modelli di contatto che non permettono l'arresto del moto, non è possibile una simulazione corretta del comportamento di materiali granulari in movimento.

Da un punto di vista fisico del problema, quando due particelle collidono nasce una deformazione che permette lo sviluppo della forza normale di collisione. Tale forza, a causa della deformazione, non agisce in un unico punto ma si sviluppa su una superficie di contatto, generando così un momento che si oppone al movimento rotazionale della sfera (figura 4.4).



**Figura 4.4:** Rappresentazione del momento resistente generato dalla forza normale che nasce dal contatto della sfera con un muro (Marchelli, 2018).

L'attrito al rotolamento è dovuto principalmente alle deformazioni plastiche ma comprende anche il contributo di altre forme di dissipazione energetica quali microscorrimenti e l'attrito sulle superfici di contatto, isteresi viscosa e adesione superficiale.

Inoltre contribuisce alla resistenza al rotolamento la forma delle particelle: solamente nel caso di sfere perfettamente rigide non esiste l'attrito al rotolamento.

Permette quindi di considerare l'irregolarità e la rugosità delle particelle accrescendo la resistenza al rotolamento e simulare così il comportamento di materiali naturali granula-ri (Marchelli, 2018).

I diversi metodi che permettono di implementare nel DEM la resistenza al rotolamento possono essere divisi in due famiglie principali: i modelli di momento, in cui viene introdotto un momento fittizio contrastante il moto rotazionale delle particelle e i modelli di correzione della velocità angolare. In questi ultimi, la rotazione viene controllata tramite l'applicazione di coefficienti empirici di ritardo, proporzionali al numero di contatti, e un tempo di ritardo, per cui la velocità angolare della particella si riduce nel passo temporale successivo (Marchelli, 2018).

Nel codice DEM impiegato per le simulazioni è implementato il modello di momento direzionale costante, un modello semplice, regolato da un unico parametro empirico, il coefficiente di rotolamento c, che permette una facile calibrazione rispetto ad altri modelli multi-parametrici.

Questo metodo, consiste nell'applicazione di un momento costante M<sup>r</sup> che si oppone alla rotazione relativa di due particelle i e j in contatto tra loro (Girolami et al 2012), secondo la relazione

$$\mathbf{M}_{i}^{r} = -c\mathbf{F}_{coll}^{n} \frac{\mathbf{\omega}_{rel}}{\omega_{rel}} \mathbf{A}_{r},$$

$$\mathbf{M}_{j}^{r} = +c\mathbf{F}_{coll}^{n} \frac{\mathbf{\omega}_{rel}}{\omega_{rel}} \mathbf{A}_{r},$$
(4.25)

in cui A<sub>r</sub> è il raggio di rotolamento definito come

$$A_r = \frac{r_i r_j}{(r_i + r_i)}. (4.26)$$

## 4.4 Simulazione DEM dell'impatto sfera-muro

In questo paragrafo si descrive l'utilizzo del metodo DEM per la simulazione di un caso semplice di impatto tra una singola sfera ed un muro, allo scopo di analizzare i risultati ottenuti e validare il modello tramite il confronto con la soluzione analitica fornita dalla teoria di Hertz.

La configurazione geometrica della simulazione è caratterizzata da un muro composto da una fila unica di sfere di diametro 0,08 m, di larghezza pari a 0,5 m e altezza di 0,7 m. La sfera impattante di diametro 0,1 m parte da una posizione centrale rispetto al muro, ad una altezza di 0,65 m ed una distanza di 1,5 m (figura 4.5).

Le diverse simulazioni effettuate usano sia il metodo lineare che il metodo hertziano per la modellazione del contatto normale.

La sfera, avente velocità iniziale di 5 m/s, ha una densità di 2630 kg/m³ ed è soggetta all'azione dell'accelerazione di gravità con inclinazione di 30° rispetto alla verticale e modulo di 9,81 m/s². In questo modo è possibile simulare la pendenza del canale.

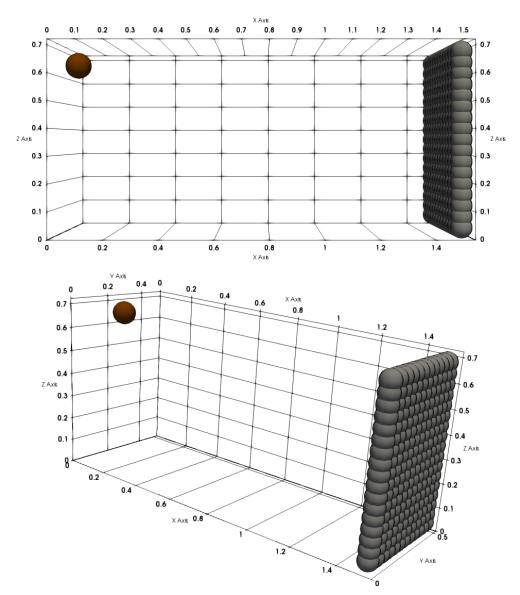


Figura 4.5: Rappresentazione geometrica dell'impatto sfera contro muro tramite due differenti viste tridimensionali.

Il codice DEM riceve le informazioni riguardanti la distribuzione spaziale delle varie particelle da due file di testo denominati particleFile e objectFile contenenti rispettivamente le indicazioni sulle particelle in grado di muoversi (la sfera impattante) e le particelle fisse (il muro).

Questi file sono strutturati con un numero iniziale nella prima riga, che indica il numero totale di particelle, seguito da una suddivisione in colonne contenenti tutti i dati necessari per la definizione della configurazione spaziale e delle condizioni iniziali. Un esempio di tali file è riportato nell'appendice A.1. La creazione di questi file, contenenti numerose righe di dati è stata effettuata con il codice MatLab.

Da un file di testo di configurazione il codice riceve invece tutti i parametri necessari per la definizione dei modelli implementati, le dimensioni del dominio, le componenti dell'accelerazione di gravità e ulteriori informazioni. Una migliore descrizione del file di configurazione è trattata nell'appendice A.2.

La visualizzazione dei risultati è stata effettuata con l'appoggio del codice Paraview che permette una rappresentazione tridimensionale di problemi spaziali.

#### 4.4.1 Simulazioni con modello lineare

Le prime simulazioni sono state realizzate con il modello lineare, più semplice, descritto nel sotto-paragrafo 4.2.1. Le analisi sono state effettuate con i parametri riportati in tabella 4.1.

**Tabella 4.1:** Parametri usati nella simulazione con modello lineare.

| Parametri  | Valore             |
|--|--------------------|
| Densità (kg/m³)  | 2630               |
| Modulo di Young E (N/m²)                                 | -                  |
| Coefficiente di Poisson v (-)                            | -                  |
| Rigidezza normale k <sub>n</sub> (N/m)                   | $5,00 \times 10^5$ |
| Coefficiente di restituzione $\zeta$ (-)                 | 0,8                |
| Coeff. di smorzamento tangenziale $\alpha_t$ (-)         | 0,5                |
| Coeff. di attrito tra particelle $\mu_{s,pp}$ (-)        | 0,20               |
| Coeff. di attrito tra particelle e muro $\mu_{s,pm}$ (-) | 0,20               |
| Coeff. di attrito al rotolamento c (-)                   | 0,0                |

Nella figura 4.6 sono rappresentati alcuni degli istanti più significativi della sequenza temporale della simulazione. La sfera impattante è colorata in funzione dell'intensità della velocità istantanea, mentre il muro è colorato secondo la massima forza che le particelle si scambiano durante tutta la simulazione. Non si tratta quindi della forza istantanea ma la massima registrata durante tutto il processo. Tale rappresentazione è utile per capire l'evoluzione del fenomeno e la localizzazione dei punti di collisione.

All'istante iniziale (a) tutto si trova secondo la configurazione iniziale con la sfera avente una velocità iniziale di 5 m/s (colore rosso). L'istante temporale (b) è immediatamente successivo all'impatto contro il muro, che coinvolge due particelle dello stesso ed è quello in cui la forza scambiata ha la massima intensità. In seguito a questo primo urto, la sfera rimbalza indietro (c) per poi colpire nuovamente il muro (d). Questo si ripete con rimbalzi sempre meno ampi man mano che si dissipa energia negli urti contro il bordo inferiore del dominio e il muro, fino a risultare molto ravvicinati tra loro e di lieve entità. L'istante temporale (e) è immediatamente successivo al terzo impatto contro il muro, mentre l'istante (d) rappresenta il susseguirsi di impatti molto ravvicinati tra loro, fino all'arresto finale della sfera contro il muro con velocità nulla (colore blu).

In questa simulazione la sfera si arresta a causa della presenza del ostacolo, altrimenti siccome il coefficiente di rotolamento ha valore nullo l'arresto non sarebbe possibile.

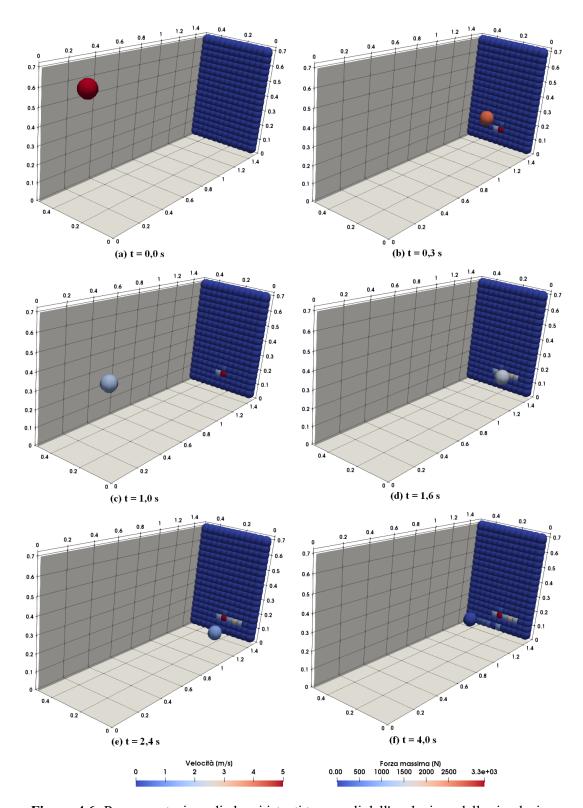
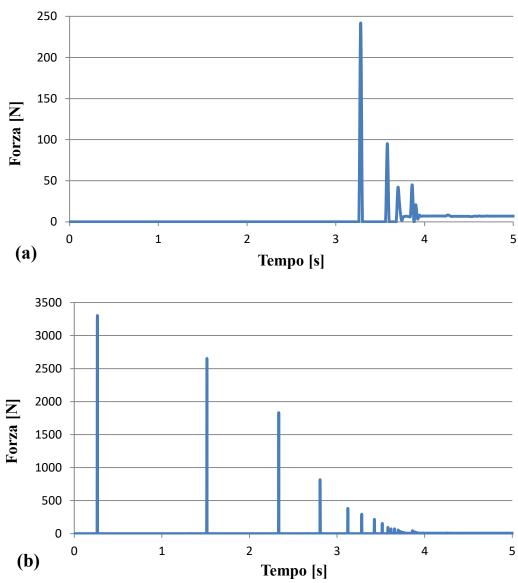


Figura 4.6: Rappresentazione di alcuni istanti temporali dell'evoluzione della simulazione.

Si sono effettuate diverse simulazioni nelle quali si è registrata la storia temporale della forza globale agente sul muro, in direzione ortogonale ad esso, variando il tempo di registrazione dei risultati  $\Delta t^{\text{out}}$  e l'intervallo temporale di calcolo utilizzato dal DEM  $\Delta t^{\text{DEM}}$ . I parametri contenuti nella tabella 4.1 sono rimasti invariati.

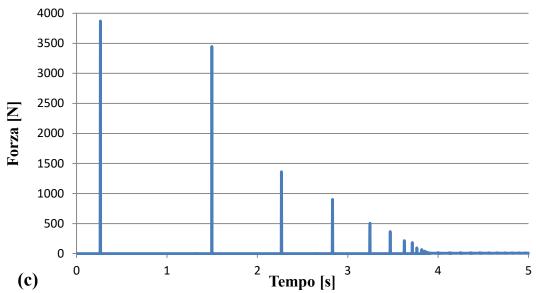
In tal modo è stato possibile valutare l'influenza del  $\Delta t^{\rm out}$  confrontato rispetto al tempo di collisione  $t_{\rm coll}$  valutato secondo la relazione (4.13) e pari a 0,0052 s. Nella simulazione (a) è stato utilizzato  $\Delta t^{\rm out} = 0,02 \, s$  suepriore alla durata di collisione che non ha permesso una corretta visualizzazione dei primi impulsi determinati dall'impatto contro il muro. Tale situazione risulta evidente dal confronto con la simulazione (b) caratterizzata invece da una risoluzione maggiore con  $\Delta t^{\rm out} = 0,002 \, s$ , inferiore al  $t_{\rm coll}$  (figura 4.7).



**Figura 4.7:** Evoluzione temporale della forza impulsiva agente contro il muro registrata con  $\Delta t^{\text{out}} = 0.02 \text{ s caso (a) e } \Delta t^{\text{out}} = 0.002 \text{ s caso (b)}.$ 

Risulta evidente la necessità di una scelta opportuna del  $\Delta t^{\rm out}$  per una corretta interpretazione dei risultati. La simulazione successiva è stata effettuata mantenendo  $\Delta t^{\rm out} = 0,002$  s e variando il rapporto critico definito come il rapporto tra l'intervallo temporale  $\Delta t^{\rm DEM}$  e la durata della collisione  $t_{\rm coll}$ . Tale parametro rappresenta dunque la frazione 1/n definita nell'equazione (4.14) che regola l'accuratezza della simulazione.

Nelle simulazioni (a) e (b) il rapporto critico è pari a 0,002 corrispondente a n = 500, mentre nella simulazione (c) tale parametro è stato impostato pari 0,0002 cioè n = 5000. Questo si traduce in un differente valore del  $\Delta t^{\rm DEM}$  utilizzato dal codice, essendo  $t_{\rm coll} = 0,052$  s costante e funzione solamente dei parametri rimasti invariati.



**Figura 4.8:** Evoluzione temporale della forza di impatto contro il muro con rapporto critico pari a 0,0002.

Da un confrono tra la figura 4.7 e 4.8 si nota che la maggiore accuratezza della simulazione provoca un leggero incremento dei primi picchi impulsivi a fronte però, di un incremento della durata complessiva della simulazione. Per tanto si ritiene un buon compromesso tra accuratezza e durata, un valore di rapporto critico pari a 0,002 soprattutto in vista di modelli più complessi, costituiti da un numero molto più elevato di particelle.

#### 4.4.2 Simulazioni con modello hertziano

Le simulazioni svolte dell'impatto sfera-muro con il modello di contatto normale hertziano mostrano tendenzialmente la stessa successione di impulsi del precedente modello lineare come mostrato in figura 4.6. I parametri usati per le simulazioni sono riportati in tabella 4.2.

| <b>Tabella 4.2:</b> Parametri usati | nella simulazione | con modello hertziano. |
|-------------------------------------|-------------------|------------------------|
|-------------------------------------|-------------------|------------------------|

| Parametri  | Valore            |
|--|-------------------|
| Densità (kg/m³)  | 2630              |
| Modulo di Young E (N/m²)                                 | $1,0\times10^{8}$ |
| Coefficiente di Poisson v (-)                            | 0,3               |
| Rigidezza normale k <sub>n</sub> (N/m)                   | -                 |
| Coefficiente di restituzione $\zeta$ (-)                 | 0,8               |
| Coeff. di smorzamento tangenziale $\alpha_t$ (-)         | 0,5               |
| Coeff. di attrito tra particelle $\mu_{s,pp}$ (-)        | 0,20              |
| Coeff. di attrito tra particelle e muro $\mu_{s,pm}$ (-) | 0,20              |
| Coeff. di attrito al rotolamento c (-)                   | 0,0               |

Anche con il modello hertziano si sono appurate le stesse conclusioni ottenute con il modello lineare, circa l'intervallo di temporale di registrazione  $\Delta t^{\rm out}$  e il rapporto critico. Nella figura 4.9 si riporta l'andamento della forza trasmessa dagli impatti della sfera contro il muro, in direzione ortogonale ad esso. In questo caso il tempo di collisione stimato dal codice è pari a 0,0049 s, con  $\Delta t^{\rm out} = 0,001$  s e rapporto critico 0,002.

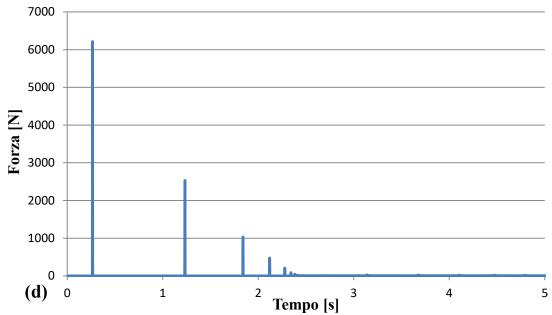
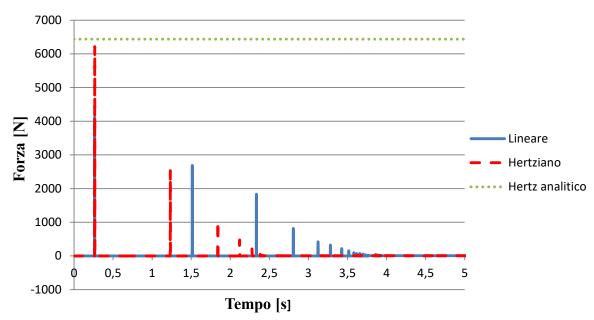


Figura 4.9: Evoluzione temporale della forza di impatto contro il muro con il modello hertziano.

Nel sotto-paragrafo seguente, si confrontano i risultati ottenuti con in due metodi.

#### 4.4.3 Confronto dei risultati

Dal confronto tra i due modelli in figura 4.10 si osserva come il modello hertziano sia caratterizzato da picchi più elevati (forza massima pari a 6213 N) che vengono smorzati molto più rapidamente rispetto al caso lineare, per cui la durata complessiva del moto della sfera risulta essere inferiore. Infatti dopo circa 2,5 s la sfera può essere considerata come ferma mentre nel caso lineare impiega quasi 4 s ad arrestarsi completamente. Solamente il primo impatto avviene nel medesimo istante.



**Figura 4.10:** Confronto della forza normale al muro registrata con il modello lineare (linea blu) e il modello hertziano (linea rossa tratteggiata).

Tale confronto, di tipo qualitativo, risulta essere tuttavia poco significativo in quanto i parametri utilizzati per i due modelli sono differenti e non sono correlati tra loro.

Più interessante è invece il confronto dei risultati ottenuti con il modello hertziano e il modello di Hertz analitico che tratta il problema della collisione tra corpi elastici. Questo confronto è necessario per ottenere dei riscontri numerici, permettendo la validazione del modello DEM. In particolare vengono adottate formulazioni differenti rispetto a quelle descritte nel paragrafo 3.3 ma del tutto analoghe (Jòhannesson et al., 2009). In accordo con la teoria di Hertz, la forza di impatto può essere espressa come

$$F_{\rm I} = \frac{4}{3} R^{1/2} E^* \delta^{3/2}, \tag{4.27}$$

dove  $1/R = 1/R_B + 1/R_w$ , e  $1/E^* = (1 - v_B^2)/E_B + (1 - v_w^2)/E_w$ . In cui  $E_B$  e  $E_w$  sono rispettivamente i moduli elastici della sfera impattante e del muro,  $v_B$  e  $v_w$  i rispettivi coefficienti di Poisson e infine  $R_B$  e  $R_w$  sono i raggi o le dimensioni caratteristiche della

sfera e del muro. In questo caso, in cui si studia l'impatto contro un muro piano  $R_{\rm w}=\infty$  e  $R\approx R_{\rm B}$ . Il parametro  $\delta$  indica la compressione durante l'impatto, il cui valore massimo è espresso come

$$\delta^* = \left(\frac{15}{16} \frac{mu^2}{R^{1/2} E^*}\right)^{2/5},\tag{4.28}$$

In cui  $1/m = 1/m_B + 1/m_w$  è il reciproco della massa effettiva e u è la velocità all'impatto. Inoltre il tempo di impatto totale è dato dall'equazione

$$t_{\rm I} = 2.87 \left(\frac{m^2}{{\rm RE}^{*2}u}\right)^{1/5},$$
 (4.29)

La valutazione della forza di impatto è stata effettuata per il primo picco, ossia la massima forza registrata. Siccome il modello DEM non permette la diversificazione del modulo elastico del muro rispetto alla sfera impattante, si è usato  $E_B = E_w = 1.0 \times 10^8$  e  $v_B = v_w = 0.3$ . Allo stesso modo le masse della sfera e del muro sono state valutate moltiplicando il volume di ciascuna sfera per il numero totale di sfere (nel caso del muro) e per una massa volumica  $\rho_v$  pari a 2630 kg/m³ senza distinzione tra sfera e muro.

Infine la velocità di impatto è stata ricavata dai risultati della simulazione DEM pari a 4,5 m/s inferiore rispetto alla velocità iniziale di 5 m/s in quanto la sfera subisce l'azione della forza di gravità e rimbalza sul bordo inferiore del dominio prima di impattare contro il muro. Utilizzando questi valori come parametri di input si ricavano i risultati riportati in tabella 4.3.

|   | THE COLUMN TERMINAL CONTINUE C |                   |  |  |  |
|---|--|-------------------|--|--|--|
| $R_B[m]$  | raggio della sfera   | 0,05              |  |  |  |
| m <sub>B</sub> [kg]                                     | [kg] massa della sfera   |                   |  |  |  |
| m <sub>w</sub> [kg]                                     | massa del muro   | 143,83            |  |  |  |
| 1/E* [Pa <sup>-1</sup> ]                                | /E* [Pa <sup>-1</sup> ] reciproco del modulo Young effettivo   |                   |  |  |  |
| E* [Pa]   | modulo Young effettivo   | $5,5 \times 10^7$ |  |  |  |
| 1/m [kg <sup>-1</sup> ] reciproco della massa effettiva |  | 0,948             |  |  |  |
| $v_B [m/s]$   | velocità di impatto normale al muro  | 4,5               |  |  |  |
| δ* [m]  | * [m] massima compressione durante l'impatto 5,4   |                   |  |  |  |
| <b>F</b> <sub>I</sub> [N]                               | F <sub>I</sub> [N] forza di impatto  |                   |  |  |  |
| $t_{I}[s]$  | tempo totale di impatto  | 0,0035            |  |  |  |

**Tabella 4.3:** Risultati ottenuti con l'applicazione della teoria di Hertz.

Il risultato ottenuto, riportato in figura 4.10 con una linea a punti, è molto simile a quello ottenuto numericamente via DEM. A fronte di tale riscontro positivo, il modello di contatto hertziano è assunto come valido e viene quindi usato nel seguito di questa tesi per le successive simulazioni.

# Capitolo 5

# Approccio FEM per l'analisi della

# risposta strutturale

In questo capitolo viene trattato l'approccio agli elementi finiti, dall'inglese FEM (Finite Element Method) che viene usato per lo studio della risposta dinamica delle strutture analizzate. Infatti con il metodo DEM prima descritto non è possibile valutare come reagisce una struttura, essendo questa rappresentata da un assemblaggio rigido di sfere bloccate nella loro posizione iniziale.

Il metodo FEM, a differenza del metodo DEM, è basato su un approccio al continuo, ossia il dominio del problema viene suddiviso in elementi di volume finito caratterizzati da forme geometriche semplici (triangoli, parallelepipedi) connessi tra di loro tramite un numero finito di punti detti nodi. Nella sua versione più semplice questi elementi non possono compenetrarsi o separarsi, tuttavia esistono codici più avanzati, come quello adottato, che permettono la formazione di fratture e contatti tra gli elementi.

Nel paragrafo 5.1 viene descritto il codice agli elementi finiti Abaqus (versione 6.14) impiegato per la risoluzione delle analisi numeriche, mentre nel paragrafo 5.2 vengono illustrati i principali metodi di integrazione al passo nel tempo utilizzabili per la risoluzione delle equazioni del moto.

Infine nel paragrafo 5.3 viene ripreso il caso applicativo di impatto sfera-muro, descritto nel paragrafo 4.4 del capitolo precedente, analizzando la risposta strutturale del muro soggetto alla forza impulsiva.

## 5.1 Descrizione del codice Abaqus

Il sistema agli elementi finiti Abaqus comprende diversi codici tra cui Abaqus/Standard di uso generale, Abaqus/Explicit per analisi dinamiche esplicite, Abaqus/CFD un programma per problemi di fluidodinamica e Abaqus/CAE che rappresenta l'ambiente interattivo con cui realizzare i modelli e visualizzare i risultati.

Quest'ultimo codice è suddiviso nei seguenti moduli, che devono essere compilati in maniera ordinata per la creazione del modello e la sua analisi.

- Part module: questo modulo viene utilizzato per creare, modificare e gestire le parti, ovvero gli elementi costitutivi di un modello in Abaqus. E' possibile creare parti deformabili o rigide, aventi differenti caratteristiche (solidi, gusci, fili ecc.) che ne definiscono la geometria. Queste parti possono essere realizzate a partire dal disegno di un profilo o una sezione dell'elemento, che tramite estrusione, rivoluzione o trascinamento determinano la geometria dell'elemento.
- Property module: in questo modulo è possibile specificare le proprietà di una parte o di una regione di parte tramite l'assegnazione di una sezione. Una sezione comprende la definizione del materiale ed eventualmente nel caso di elementi beam la definizione del profilo, ovvero la sezione trasversale della trave. La definizione del materiale comprende una serie di possibilità che permettono di specificare le proprietà caratteristiche del materiale che ne definiscono il comportamento, tra cui la densità, le proprietà meccaniche, lo smorzamento e criteri di rottura e di danneggiamento. La definizione di un profilo invece, determina le caratteristiche della sezione della trave, per esempio area della sezione trasversale e momenti di inerzia. Esiste una serie di forme selezionabili che permettono la definizione di una geometria comune (scatolare, rettangolare, circolare, a I a T ecc.) oppure arbitraria come rappresentato in figura 5.1.

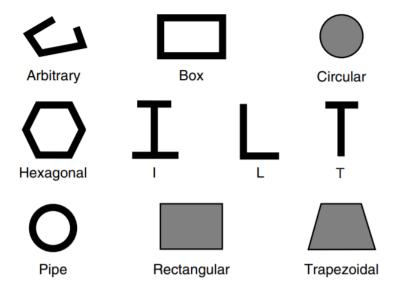
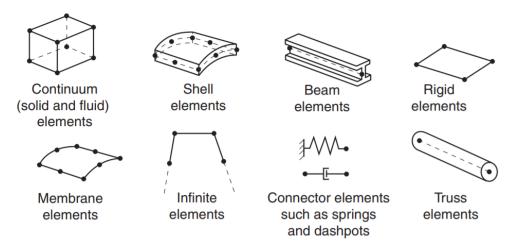


Figura 5.1: Forme geometriche disponibili (Abaqus/CAE user's guide).

• Assembly module: quando viene creata una parte, questa esiste nelle sue coordinate locali, indipendentemente dalle altre parti create. Questo modulo permette di creare istanze delle parti e posizionarle una rispetto all'altra in un sistema di coordinate globali, creando così l'assemblaggio. Ciascuna parte può essere inserita più volte nel modello principale dell'assemblaggio, fino a creare modelli con molte istanze. Nel caso di un modello avente una sola parte è comunque necessario la creazione di un assemblaggio avente una sola istanza, in quanto le con-

dizioni di carico, le condizioni al contorno e la discretizzazione sono applicabili solamente al modello assemblato.

- Step module: in questo modulo è possibile la creazione degli step dell'analisi, ossia le varie fasi o sequenze temporali dell'analisi in cui il modello subisce delle variazioni. Questa sequenza di fasi fornisce un modo conveniente per rappresentare cambiamenti nel modello, come ad esempio la variazione delle condizioni di carico oppure delle condizioni al contorno o l'aggiunta/rimozione di parti ed ogni altra variazione che può verificarsi nel modello. Questo modulo è inoltre dedicato alla richiesta dei risultati voluti attraverso ciascuno step. E' necessario definire le variabili che si vogliono ottenere dall'analisi e in quale parte del modello, ad esempio si possono ottenere gli interi campi di spostamento del modello o l'evoluzione temporale di una forza in un punto specifico.
- Interaction module: il modulo di interazione permette di creare e gestire le proprietà necessarie per la definizione dei contatti tra le diverse porzioni del modello e le loro interazioni. E' possibile definire le interazioni meccaniche e termiche tra regioni di un modello o tra una regione e i suoi dintorni e gestire vincoli di analisi. Abaqus è uno strumento molto potente in grado di simulare molteplici fenomeni non solo strutturali per cui questo modulo contiene numerose possibilità differenti.
- Load module: lo scopo principale di questo modulo è la definizione e gestione delle condizioni di carico e delle condizioni al contorno. Queste condizioni sono dipendenti dallo step in cui vengono create ed è quindi necessario selezionare lo step corretto in cui agiscono. Ad esempio le condizioni di vincolo esterno possono essere inizializzate nel primo step e successivamente propagate negli step successivi. Esistono numerose possibilità per la definizione dei carichi in funzione del tipo di analisi, come ad esempio forze concentrate, carichi distribuiti e pressioni variabili sia nel tempo che nello spazio, ma anche carichi termici o elettromagnetici o acustici. In maniera analoga esistono molteplici condizioni al contorno come vincoli di spostamento/rotazione nelle analisi alle tensioni, ma anche di temperatura in problemi di trasferimento del calore, potenziale elettrico nel caso di analisi accoppiate termo-elettriche o pressione acustica in problemi di acustica.
- Mesh module: questo modulo contiene gli strumenti necessari per la creazione della mesh sulle parti e sugli assemblaggi creati. Sono disponibili diversi livelli di automazione e personalizzazione che permettono di creare mesh adeguate a qualsiasi forma geometrica e in funzione delle diverse tipologie di problema. Ad esempio è possibile addensare la mesh in posizioni in cui si prevedono concentrazioni degli sforzi dovuti ad una variazione di geometria o all'applicazione di un carico, oppure in posizioni in cui si vuole un risultato con un maggior grado di dettaglio. In questa sezione è inoltre necessario definire il tipo di elemento con cui discretizzare il modello. In una analisi alle tensioni le principali famiglie di elementi che possono essere utilizzati sono riportati in figura 5.2.



**Figura 5.2:** Famiglie di elementi comunemente usati nelle analisi (Abaqus analysis user's guide vol. IV)

• **Job module**: una volta terminati tutti i compiti necessari per la definizione del modello, è possibile tramite questo modulo eseguire la sua analisi, creando un nuovo lavoro.

# 5.2 Metodi di integrazione diretta nel tempo

Assumendo il caso semplice di un sistema con un solo grado di libertà l'equazione del moto può essere descritta dall'espressione

$$m\ddot{\mathbf{u}} + c\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{k}\mathbf{u} = \mathbf{p},\tag{5.1}$$

in cui m rappresenta la massa, c lo smorzamento e k la rigidezza del sistema. In generale, le funzioni spostamento u(t), velocità  $\dot{u}(t)$  ed accelerazione  $\ddot{u}(t)$ , così come la forzante p(t) sono funzioni continue del tempo, ma che nell'ambito delle analisi numeriche vengono discretizzate nel tempo e assumono la seguente forma vettoriale:

$$\mathbf{\ddot{u}} = [\ddot{u}_0 \ \ddot{u}_1 \ \ddot{u}_2 \dots \ddot{u}_{i-1} \ \ddot{u}_i \ \ddot{u}_{i+1} \dots \ddot{u}_n], 
\mathbf{\dot{u}} = [\ddot{u}_0 \ \dot{u}_1 \ \dot{u}_2 \dots \dot{u}_{i-1} \ \dot{u}_i \ \dot{u}_{i+1} \dots \dot{u}_n], 
\mathbf{u} = [u_0 \ u_1 \ u_2 \dots u_{i-1} \ u_i \ u_{i+1} \dots u_n], 
\mathbf{p} = [p_0 \ p_1 \ p_2 \dots p_{i-1} \ p_i \ p_{i+1} \dots p_n],$$
(5.2)

in cui l'indice i rappresenta il passo temporale utilizzato per la discretizzazione fino ad n l'ultimo istante considerato. Inoltre il vettore della forzante esterna  $\mathbf{p}$  è assunto come noto.

Lo scopo è quello di risolvere l'equazione del moto e conoscere la risposta del sistema in termini di spostamento e se richiesto, velocità ed accelerazione per ogni istante di tempo discreto, partendo da condizioni iniziali note.

La risposta del sistema all'istante temporale i+1 è calcolata a partire dalle equazioni del moto, da espressioni alle differenze e dalla risposta nota ad uno o più istanti temporali precedenti. L'equazione del moto, descritta all'istante i-esimo e all'istante i+1 assume le seguenti espressioni:

$$m\ddot{\mathbf{u}}_{i} + c\dot{\mathbf{u}}_{i} + k\mathbf{u}_{i} = \mathbf{p}_{i}, \tag{5.3}$$

$$m\ddot{\mathbf{u}}_{i+1} + c\dot{\mathbf{u}}_{i+1} + k\mathbf{u}_{i+1} = \mathbf{p}_{i+1},$$
 (5.4)

I metodi di integrazione diretta possono essere divisi in due gruppi: i metodi espliciti, tra cui il metodo alle differenze centrali, e i metodi impliciti. La differenza sostanziale tra i gruppi di metodi consiste nelle equazioni alle differenze utilizzate: un algoritmo esplicito usa un'espressione generale del tipo

$$\mathbf{u}_{i+1} = \mathbf{f}(\mathbf{u}_i, \dot{\mathbf{u}}_i, \ddot{\mathbf{u}}_i, \mathbf{u}_{i-1}, \dot{\mathbf{u}}_{i-1}, \dots), \tag{5.5}$$

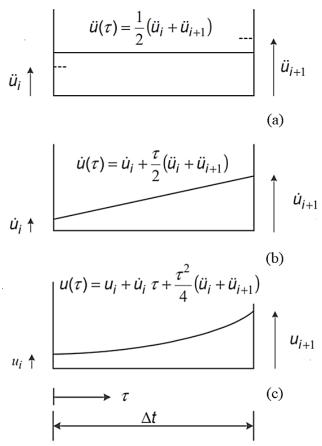
in cui la risposta ad un istante successivo i+1 è funzione solamente delle risposte note in uno o più istanti precedenti. Tale espressione viene combinata con l'equazione del moto nella forma (5.3). Un algoritmo implicito usa invece delle equazioni alle differenze nella forma generale:

$$\mathbf{u}_{i+1} = \mathbf{f}(\dot{\mathbf{u}}_{i+1}, \ddot{\mathbf{u}}_{i+1}, \mathbf{u}_{i}, \dot{\mathbf{u}}_{i}, \ddot{\mathbf{u}}_{i}, \mathbf{u}_{i-1}...), \tag{5.6}$$

dove la risposta all'istante considerato è funzione dell'istante stesso, oltre che dalla risposta negli istanti precedenti. Questa espressione viene combinata con l'equazione del moto (5.4). Nel sotto-paragrafo 5.2.1 vengono descritti in maniera più dettagliata alcuni metodi impiliciti, mentre nel sotto-paragrafo 5.2.2 viene trattato il metodo esplicito delle differenze centrali.

#### 5.2.1 Metodi impliciti: metodo dell'accelerazione media

Come descritto in precedenza, per l'implementazione dei metodi di integrazione diretta sono necessari tre ingredienti: l'equazione del moto, le espressioni alle differenze e le condizioni iniziali. Uno dei metodi impliciti più semplici è il metodo dell'accelerazione media, in cui nell'intervallo temporale Δt compreso tra gli istanti di tempo i ed i+1 l'accelerazione viene assunta costante. Tale assunzione, integrata nel tempo, comporta un andamento lineare della velocità e un andamento quadratico dello spostamento nel medesimo intervallo (figura 5.3).



**Figura 5.3:** Andamento nell'intervallo temporale dell'accelerazione, velocità e spostamento (Ceravolo R., 2018).

Da queste considerazioni, si ottengono le espressioni alle differenze come

$$\begin{split} \dot{u}_{i+1} &= \dot{u}_i + \frac{\Delta t}{2} (\ddot{u}_i + \ddot{u}_{i+1}), \\ u_{i+1} &= u_i + \dot{u}_i \Delta t + \frac{(\Delta t)^2}{4} (\ddot{u}_i + \ddot{u}_{i+1}). \end{split} \tag{5.7}$$

Le equazioni (5.7), insieme all'equazione del moto (5.4) costituiscono un sistema di tre equazioni nelle incognite  $\ddot{u}_{i+1}$ ,  $\dot{u}_{i+1}$  e  $u_{i+1}$ , la cui soluzione può essere calcolata come

$$u_{i+1} = \frac{\hat{\mathbf{p}}_i}{\hat{k}},\tag{5.8}$$

$$\dot{\mathbf{u}}_{i+1} = \frac{2}{\Lambda t} (\mathbf{u}_{i+1} - \mathbf{u}_i) - \dot{\mathbf{u}}_i, \tag{5.9}$$

$$\ddot{\mathbf{u}}_{i+1} = \frac{1}{m} (\mathbf{p}_{i+1} - c\dot{\mathbf{u}}_{i+1} - k\mathbf{u}_{i+1}), \tag{5.10}$$

avendo posto:

$$\hat{\mathbf{k}} = \mathbf{k} + \frac{2c}{\Delta t} + \frac{4m}{(\Delta t)^2},$$

$$\hat{\mathbf{p}}_i = \mathbf{p}_{i+1} + c \left[ \frac{2\mathbf{u}_i}{\Delta t} + \dot{\mathbf{u}}_i \right] + m \left[ \frac{4\mathbf{u}_i}{(\Delta t)^2} + \frac{4\dot{\mathbf{u}}_i}{\Delta t} + \ddot{\mathbf{u}}_i \right],$$
(5.11)

note le condizioni iniziali  $\mathbf{u}_0$ ,  $\dot{\mathbf{u}}_0$  da cui è possibile ricavare  $\ddot{\mathbf{u}}_0 = (\mathbf{p}_0 - c\dot{\mathbf{u}}_0 - \mathbf{k}\mathbf{u}_0)/m$ .

Il ciclo viene ripetuto per tutti gli istanti successivi fino al termine dell'intervallo di tempo globale considerato.

Un altro gruppo di metodi impliciti molto utilizzati sono quelli basati sul metodo di Newmark, in cui le equazioni alle differenze assumono la seguente forma:

$$\dot{\mathbf{u}}_{i+1} = \dot{\mathbf{u}}_{i} + [(1 - \gamma)\Delta t]\ddot{\mathbf{u}}_{i} + (\gamma \Delta t)\ddot{\mathbf{u}}_{i+1},$$

$$\mathbf{u}_{i+1} = \mathbf{u}_{i} + \dot{\mathbf{u}}_{i}\Delta t + [(0.5 - \beta)(\Delta t)^{2}]\ddot{\mathbf{u}}_{i} + [\beta(\Delta t)^{2}\ddot{\mathbf{u}}_{i+1}].$$
(5.12)

I parametri  $\beta$  e  $\gamma$  definiscono il modo con cui l'accelerazione varia nell'intervallo di tempo considerato e che governano l'accuratezza e la stabilità del metodo. Per questo motivo devono rispettare certi limiti. Generalmente  $\gamma$  assume un valore pari a 0,5 mentre  $\beta$  assume valori compresi tra 1/6 e 1/4.

Il metodo dell'accelerazione media è uno dei metodi appartenenti alla famiglia di metodi di Newmark, ottenibile assegnando i parametri  $\beta=1/4$  e  $\gamma=0.5$ ; con  $\beta=1/6$  e  $\gamma=0.5$  si ottiene invece il metodo dell'accelerazione lineare.

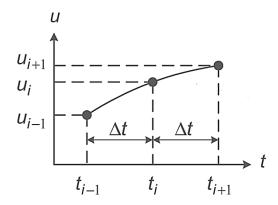
Risolvendo il sistema composto dalle equazioni (5.12) e (5.4) è possibile ricavare l'algoritmo di calcolo per implementare il metodo.

Abaqus/Standard implementa tuttavia un altro metodo implicito, il metodo  $\alpha$  di Hilber-Hughes e Taylor che rappresenta un ulteriore estensione del metodo di Newmark, in cui le equazioni alle differenze (5.12) restano invariate, ma cambia l'espressione del moto che diventa

$$m\ddot{\mathbf{u}}_{i+1} + (1+\alpha)c\dot{\mathbf{u}}_{i+1} - \alpha c\dot{\mathbf{u}}_{i} + (1+\alpha)k\mathbf{u}_{i+1} - \alpha k\mathbf{u}_{i} = \mathbf{p}_{i+(1+\alpha)}.$$
 (5.13)

Con  $\alpha = 0$  si ottiene esattamente il metodo di Newmark. Tali metodi per una scelta opportuna dei parametri entro determinati limiti sono incondizionatamente stabili, a differenza dei metodi espliciti, in cui l'intervallo di tempo deve essere sufficientemente ridotto per garantire la stabilità.

#### 5.2.2 Metodi espliciti: metodo delle differenze centrali



**Figura 5.4:** Discretizzazione della risposta spostamento secondo il metodo delle differenze centrali (Ceravolo R., 2018).

Il metodo delle differenze centrali è un metodo esplicito che usa le seguenti espressioni alle differenze, ottenute a partire dallo schema riportato in figura 5.4:

$$\begin{split} \dot{u}_i &= \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2\Delta t}, \\ \ddot{u}_i &= \frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{(\Delta t)^2}. \end{split} \tag{5.7}$$

Gli spostamenti incogniti  $u_{i+1}$  al tempo i+1 si ricavano introducendo le espressioni (5.7) nell'equazione del moto al tempo  $t_i$  (5.3). Si ricava in questo modo l'equazione

$$\hat{\mathbf{k}}\mathbf{u}_{i+1} = \hat{\mathbf{p}}_i,\tag{5.8}$$

avendo posto:

$$\hat{\mathbf{k}} = \frac{m}{(\Delta t)^2} + \frac{c}{2\Delta t},$$

$$\hat{\mathbf{p}}_i = \mathbf{p}_i - \left[ \frac{m}{(\Delta t)^2} - \frac{c}{2\Delta t} \right] \mathbf{u}_{i-1} - \left[ \mathbf{k} - \frac{2m}{(\Delta t)^2} \right] \mathbf{u}_i.$$
(5.9)

Dall'equazione (5.8) si ricava lo spostamento incognito  $u_{i+1}$  invertendo la soluzione. Se richiesto è possibile ricavare  $\dot{u}_i$  e  $\ddot{u}_i$  tramite le equazioni (5.7). Per implementare automaticamente l'algoritmo occorre risolvere il problema dell'inizializzazione. Infatti  $u_0$  e  $u_{-1}$  sono richiesti per il calcolo di  $u_1$  ma le condizioni iniziali note sono  $u_0$  e  $\dot{u}_0$ .

Per risolvere tale problema è necessario scrivere le espressioni alle differenze (5.7) al tempo i = 1 e sostituendo la seconda condizione nella prima, si ottiene

$$u_{-1} = u_0 - \Delta t \dot{u}_0 + \frac{(\Delta t)^2}{2} \ddot{u}_0,$$
 (5.10)

in cui l'accelerazione all'istante iniziale  $\ddot{u}_0$  è ricavabile a partire dall'equazione del moto (5.7) come

$$\ddot{\mathbf{u}}_0 = \frac{\mathbf{p}_0 - c\dot{\mathbf{u}}_0 - \mathbf{k}\mathbf{u}_0}{m}.\tag{5.11}$$

Una volta inizializzato attraverso le condizioni iniziali e la condizione (5.10), l'algoritmo si ripete per i passi temporali successivi fino al raggiungimento dell'ultimo istante considerato n.

I metodi espliciti sono condizionatamente stabili. E' necessario quindi che il passo temporale  $\Delta t$ , detto anche limite di stabilità, sia sufficientemente piccolo in modo tale che la soluzione sia stabile oltre che accurata. Una scelta generalmente valida è

$$\Delta t \le \Delta t_{\rm cr} = \frac{T_{\rm n}}{\pi} = \frac{2}{\omega_{\rm n}}.$$
 (5.12)

Questo metodo è implementato in Abaqus/explicit, il codice usato in questa tesi per le analisi numeriche che considera a denominatore la massima frequenza del sistema  $\omega_{max}$ .

La frequenza massima è funzione di diversi fattori, per cui non è possibile conoscere il suo valore esatto in ciascun incremento temporale. Per cui, il limite di stabilità viene stimato come il minor tempo di transito di un onda di dilatazione attraverso ciascun elemento della mesh (Abaqus analysis user's guide vol. II):

$$\Delta t \approx \frac{L_{\min}}{c_{\rm d}}.$$
 (5.13)

Dove  $L_{min}$  è la minor dimensione del più piccolo elemento della mesh e  $c_d$  è la velocità dell'onda di dilatazione. Nel caso di materiali elastici viene calcolata come

$$c_{d} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}},\tag{5.14}$$

in cui  $\rho$  è la densità del materiale, mentre  $\lambda$  e  $\mu$  sono le costanti elastiche di Lamè esprimibili in termini di modulo di Young e coefficiente di Poisson come:

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)},$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}.$$
(5.15)

Questa stima del limite di stabilità è una approssimazione che nella maggior parte dei casi non è conservativa. Per cui Abaqus/Explicit applica un fattore di sicurezza compreso tra  $1/\sqrt{2}$  e 1 per modelli bidimensionali e tra  $1/\sqrt{3}$  e 1 per modelli tridimensionali.

Il passaggio da un sistema con un solo grado di libertà a un sistema a più gradi di libertà, avviene semplicemente sostituendo agli scalari m, k, c le corrispondenti matrici di massa [M], di rigidezza [K] e smorzamento [C] e ai valori istantanei di spostamento u, velocità ù e accelerazione  $\ddot{u}$  i corrispondenti vettori, contenenti tutti i gradi di libertà del sistema. Questo passaggio è possibile per entrambi i metodi descritti.

Nei metodi espliciti, con l'adozione di una matrice delle masse diagonale (lumped mass matrix) non è necessaria la soluzione simultanea delle equazioni, con un notevole risparmio di tempo di calcolo, cosa non possibile con i metodi impliciti in cui è necessario invertire tali matrici. Abaqus/Explicit utilizza proprio una matrice di massa di questo tipo, risultando più veloce nell'eseguire analisi dinamiche con molti gradi di libertà in presenza di non linearità geometriche e fisiche.

#### 5.2.3 Lo smorzamento del materiale

Particolare attenzione merita la matrice di smorzamento [C] necessaria per definire uno smorzamento del moto come avviene in tutti i principali problemi fisici.

In Abaqus/Explicit è possibile definire come smorzamento del materiale, uno smorzamento proporzionale, o di Rayleigh, secondo il quale la matrice [C] è ottenuta come combinazione lineare della matrice delle masse [M] e la matrice di rigidezza [K] ovvero:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K], \tag{5.16}$$

dove  $\alpha$  e  $\beta$  sono dette costanti di smorzamento di Rayleigh. Questa matrice per il modo in cui è ottenuta risulta essere ortogonale semplificando notevolmente l'analisi.

Tale approccio semplifica la realtà fisica del fenomeno, in cui lo smorzamento strutturale è dovuto principalmente a fenomeni di isteresi e di attrito, assumendo uno smorzamento viscoso, definito tramite il rapporto di smorzamento  $\xi$  il cui valore dipende dal tipo di materiale e dal livello tensionale. Per acciai può assumere valori compresi tra 0,5% per bassi livelli di tensione fino a 5% con alti livelli tensionali. Inoltre dipende dalla tipologia strutturale e dalle tipologie di connessione tra gli elementi (Gugliotta, 2002).

La relazione che lega i coefficienti  $\alpha$  e  $\beta$  al rapporto di smorzamento  $\xi$  è

$$\xi_{i} = \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha}{\omega_{i}} + \beta \omega_{i} \right), \tag{5.17}$$

con riferimento a ciascuna pulsazione propria  $\omega_i$  della struttura. Come rappresentato in figura 5.5, il contributo di smorzamento proporzionale alla massa, che può rappresentare uno smorzamento attritivo, agisce principalmente sulle basse frequenze, mentre il contributo proporzionale alla rigidezza, che può rappresentare uno smorzamento interno del materiale agisce sulle frequenze più alte.

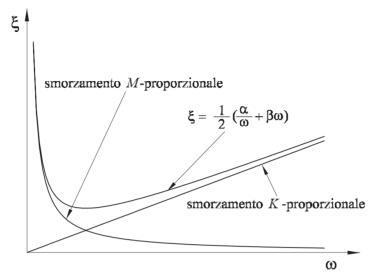


Figura 5.5: Funzione dello smorzamento proporzionale (Gugliotta, 2002).

Le costanti  $\alpha$  e  $\beta$  possono essere ricavate a partire dalla conoscenza di due coppie di valori ( $\xi_i$ ,  $\omega_i$ ) tramite le relazioni:

$$\alpha = 2 \frac{\omega_1 \omega_2 (\omega_2 \xi_1 - \omega_1 \xi_2)}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \qquad \beta = 2 \frac{\omega_2 \xi_2 - \omega_1 \xi_1}{\omega_2^2 - \omega_1^2}.$$
 (5.18)

L'implementazione in Abaqus/Explicit dello smorzamento proporzionale, modifica la valutazione del limite di stabilità, infatti l'equazione (5.12) diventa

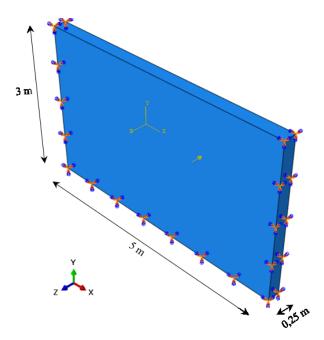
$$\Delta t \le \frac{2}{\omega_{\text{max}}} \left( \sqrt{1 + \xi_{\text{max}}^2} - \xi_{\text{max}} \right), \tag{5.19}$$

Dove  $\xi_{max}$  indica il rapporto di smorzamento per il modo più alto. L'effetto dello smorzamento si traduce quindi in un decremento del limite di stabilità, specialmente nei con-

fronti dello smorzamento proporzionale alla rigidezza, in accordo con l'equazione (5.12). Per questo motivo è generalmente preferibile smorzare la risposta alle basse frequenze con uno smorzamento proporzionale alla massa piuttosto che alla rigidezza. Tuttavia, lo smorzamento proporzionale alla massa può influenzare significativamente il moto della struttura, per cui valori troppo elevati di  $\alpha$  non sono consigliati. Inoltre, per evitare una riduzione drastica del tempo di incremento stabile, il fattore proporzionale alla rigidezza  $\beta$  dovrebbe essere inferiore o dello stesso ordine di grandezza del tempo di incremento stabile in assenza di smorzamento come suggerito dalla guida di Abaqus (Abaqus analysis user's guide vol. II).

## 5.3 Analisi FEM: risposta strutturale del muro

In questo paragrafo si riprende l'esempio applicativo svolto nel paragrafo 4.4 riguardante l'impatto di una sfera contro un muro. In questo ambito, l'attenzione viene focalizzata non più sul moto seguito dalla sfera impattante, ma sulla risposta strutturale del muro a seguito dell'impatto. E' stato realizzato un modello con il codice Abaqus seguendo i passaggi descritti al paragrafo 5.1. Il muro, di dimensioni 5 m di larghezza per 3 m di altezza e spessore di 0,25 m, è l'unica parte del modello. La sezione assegnata è solida, omogenea mentre il materiale ha le seguenti proprietà meccaniche, E = 30 GPa, v = 0,15 e densità 2500 kg/m³ per simulare un calcestruzzo armato con comportamento elastico lineare e isotropo. Si tratta di un modello molto semplice, incastrato su tre lati (base e bordi laterali), a cui è applicata in una posizione leggermente decentrata una forza concentrata, più precisamente ad una altezza di 1,8 m e 1,6 m rispetto al bordo destro (figura 5.6).



**Figura 5.6:** Rappresentazione geometrica del muro, della condizione di incastro ai bordi e della forza concentrata.

Questo carico puntuale, varia nel tempo secondo l'evoluzione temporale registrata dal muro di particelle costruito nell'analisi DEM e riportato in figura 4.9 del capitolo precedente. Questo schema di carico non riproduce fedelmente l'analisi DEM con la sfera che impatta posizioni differenti del muro, in quanto non realizzabile avendo una sola registrazione della forza globale sul muro. Per questa ragione, la posizione scelta non è correlata con le posizioni ottenute con l'analisi precedente, siccome lo scopo principale è di capire che tipo di risposta strutturale si ottiene con le forze impulsive ricavate dal DEM.

La mesh regolare, è stata realizzata con elementi solidi continui di tipo brick con 8 nodi, denominati C3D8R di dimensione 0,1 x 0,1 x 0,08 m (figura 5.7).

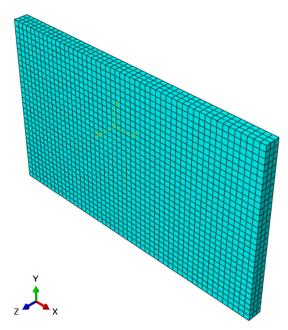


Figura 5.7: Rappresentazione della suddivisione in elementi finiti (mesh) del modello.

L'analisi ha una durata complessiva di 8,5 s ed è stata effettuata con Abaqus/Explicit. La risposta strutturale del muro nei confronti della forza impulsiva, è studiata a partire dall'analisi della variabile spostamento u<sub>3</sub> nella direzione di applicazione della forza, cioè ortogonalmente al muro.

Nella figura 5.8 è rappresentata la soluzione ottenuta per alcuni istanti temporali sull'intero modello. Si tratta di spostamenti molto piccoli dell'ordine del centesimo e millesimo di millimetro, quindi del tutto trascurabili, che forniscono tuttavia interessanti conclusioni da un punto di vista comportamentale del codice e di risposta del muro.

Questi spostamenti sono causati da una sollecitazione molto piccola, rappresentante l'impatto di una singola sfera contro un muro di calcestruzzo è risulta comprensibile il piccolo spostamento ortogonale. In particolare, nella figura 5.8 sono rappresentati gli stessi istanti temporali analizzati nel paragrafo 4.4 del capitolo precedente, corrispondenti ad istanti immediatamente successivi all'impatto della sfera, a meno dell'istante (f) che rappresenta la condizione statica finale.

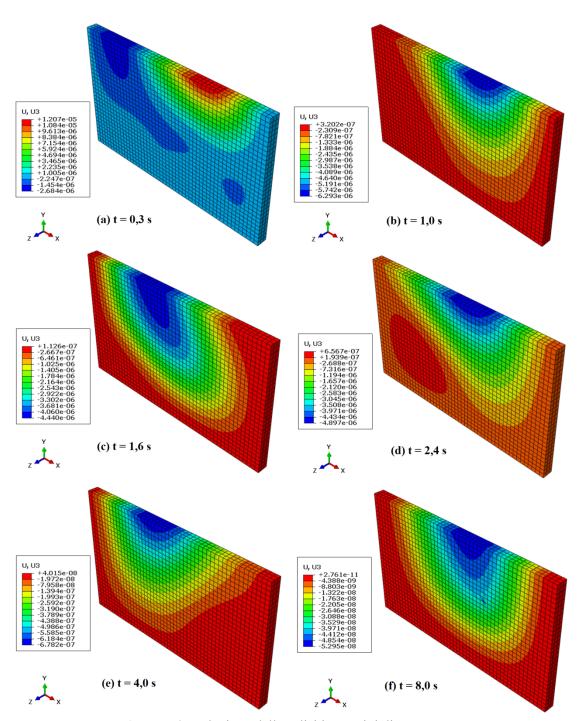


Figura 5.8: Soluzione dell'analisi in termini di spostamento u<sub>3</sub>.

In seguito all'azione impulsiva, il muro inizia ad oscillare, con spostamenti massimi nella parte centrale meno vincolata. Tale comportamento, simile a quello di una trave doppiamente incastrata è visibile maggiormente in figura 5.9 in cui è rappresentata l'evoluzione temporale dello spostamento u<sub>3</sub> nel punto di applicazione della forza.

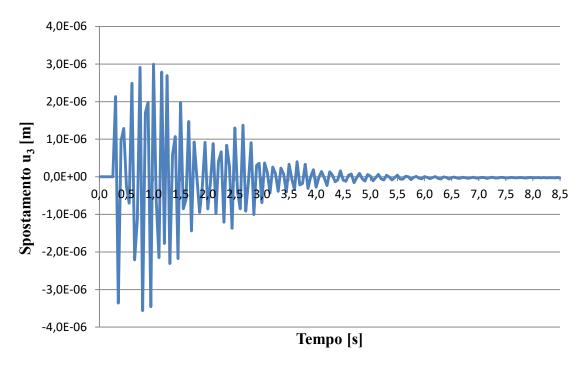


Figura 5.9: Evoluzione temporale degli spostamenti u<sub>3</sub> nel punto di applicazione della forza.

Si osserva come la risposta oscillatoria del muro sia diversa da zero solamente in seguito all'istante in cui si sviluppa l'impulso e di intensità via via decrescente al diminuire dell'intensità degli impulsi (figura 5.9).

Da un confronto tra la risposta e la storia di carico è interessante osservare come nell'intorno di circa 2,5 s la risposta oscillatoria tenda ad aumentare per poi smorzarsi nuovamente, nonostante la drastica riduzione dell'intensità degli impulsi scambiati. Tuttavia, tali impulsi avvengono con una frequenza molto maggiore, più simile alla frequenza naturale del muro, avvicinandosi alla condizione di risonanza. E' stata realizzata a questo scopo, un'analisi modale della struttura con Abaqus/Standard che ha fornito le frequenze proprie della struttura per i primi cinque modi di vibrare riportati in tabella 5.1.

I primi modi di vibrare, riportati in figura 5.10, rappresentano i modi principali, i più importanti per la struttura, che vengono maggiormente attivati in presenza di azioni irregolari nel tempo. Nel caso in analisi, la forza concentrata impulsiva attiva principalmente i primi due modi di vibrare, come è visibile in figura 5.11 in cui sono rappresentati gli spostamenti u<sub>3</sub> lungo l'intera larghezza del muro nella parte sommitale libera. Tali spostamenti hanno un andamento spaziale analogo ai primi modi di vibrare ottenuti dall'analisi modale della struttura.

Tabella 5.1: Frequenze proprie del muro.

| Modo di vibrare | Frequenza [Hz] |
|-----------------|----------------|
| 1° modo         | 42,73          |
| 2° modo         | 100,17         |
| 3° modo         | 113,04         |
| 4° modo         | 170,64         |
| 5° modo         | 183,02         |

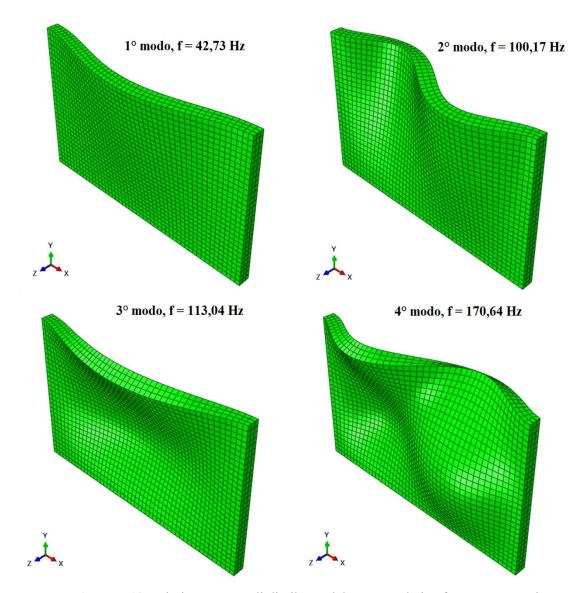
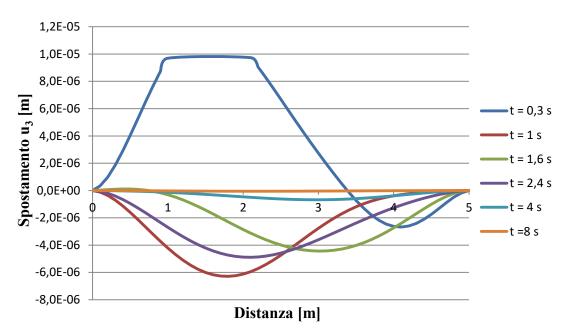


Figura 5.10: Primi quattro modi di vibrare del muro e relative frequenze proprie.

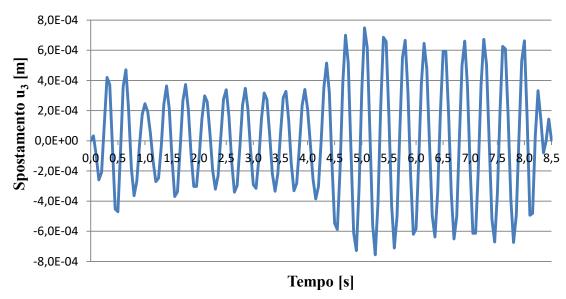


**Figura 5.11:** Spostamenti u<sub>3</sub> lungo l'intera larghezza della parte sommitale del muro; la forzante impulsiva è applicata a 1,7 m dall'origine.

In seguito è stata ripetuta l'analisi strutturale sollecitando il muro nello stesso punto di applicazione precedente ma con una forzante sinusoidale avente intensità pari alla massima intensità della risposta impulsiva precedente e frequenza centrata sulla prima frequenza naturale del muro.

La risposta oscillatoria in termini di spostamento u<sub>3</sub> nel punto di applicazione della forza è riportato in figura 5.12. Tralasciando il comportamento oscillatorio differente, figlio di una storia di carico sinusoidale della durata di 8 s, come da aspettativa, la risposta risulta notevolmente incrementata, fino a due ordini di grandezza superiore rispetto al caso precedente, siccome si ricade in una condizione di risonanza del muro.

Nel caso quindi, di analisi dinamiche con azioni impulsive, risulta molto importante oltre che l'intensità del carico, anche la frequenza con cui esso viene applicato sulla struttura.



**Figura 5.12:** Evoluzione temporale degli spostamenti u<sub>3</sub> nel punto di applicazione della forzante sinusoidale.

# Capitolo 6

## Descrizione del caso studio di Saint

# Vincent (AO)

Il caso studio descritto in questo capitolo riguarda la briglia filtrante posta in località Perrierè, nel comune di Saint Vincent in Valle d'Aosta. Nel paragrafo 6.1 viene descritto il sito in cui è ubicata l'opera con riferimento al bacino idrografico e la sua geomorfologia. Il paragrafo 6.2 è dedicato alle opere di difesa costruite nel tempo per far fronte ai fenomeni di colata detritica a cui è soggetta la zona; il paragrafo 6.3 illustra brevemente, anche tramite l'ausilio di una serie di fotografie gli eventi di colata che si sono verificati nel tempo. Infine nel paragrafo 6.4 viene descritta la configurazione geometrica e struturale della briglia filtrante a pettine e il sistema di monitoraggio installato su di essa.

## 6.1 Descrizione generale del sito

Ai piedi del monte Zerbion si trova il centro abitato del comune di Saint Vincent da cui prende il nome il bacino idrografico di interesse, risultato dalla confluenza di tre aste torrentizie: il torrente Saint Valentin, il torrente Biegnè e il torrente Grand Valey lungo il cui alveo è costruita la briglia filtrante (figura 6.1 e figura 6.2).

Il torrente Grand Valey nasce a circa duemila metri di altitudine sulle pendici del monte Zerbion. E' il risultato di acque piovane e di rigagnoli generati dallo scioglimento dei nevai, per cui per buona parte dell'anno risulta secco. Durante eventi di intensa precipitazione le acque si raccolgono velocemente e scorrono a valle, complice anche la forte pendenza e la scarsa permeabilità della zona. Durante questi eventi è possibile l'attivazione di colate detritiche lungo l'asta del torrente.

Il bacino del Grand Valey ha un'estensione superficiale di 5,22 km² e rappresenta circa il 50% dell'intera estensione del bacino di Saint Vincent. E' delimitato dallo spartiacque orientato in direzione sudovest-nordest definito dalla dorsale che parte dalla località Champ Mort a quota 700 m e che raggiunge la punta del Mont Je Tire a quota 2141 m. Lo spartiacque prosegue poi in direzione nordovest fino alla cima del monte

Zerbion a 2730 m punto di massima quota del bacino per poi scendere in direzione sudovest lungo la dorsale di Noirsaz-Travaz fino alla sezione di chiusura.

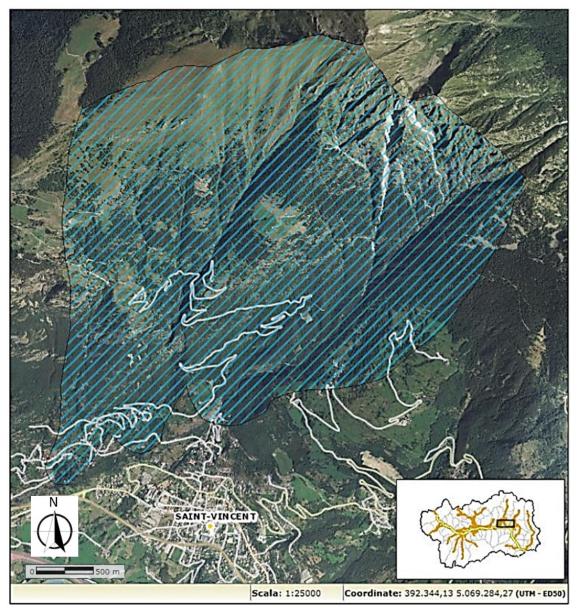
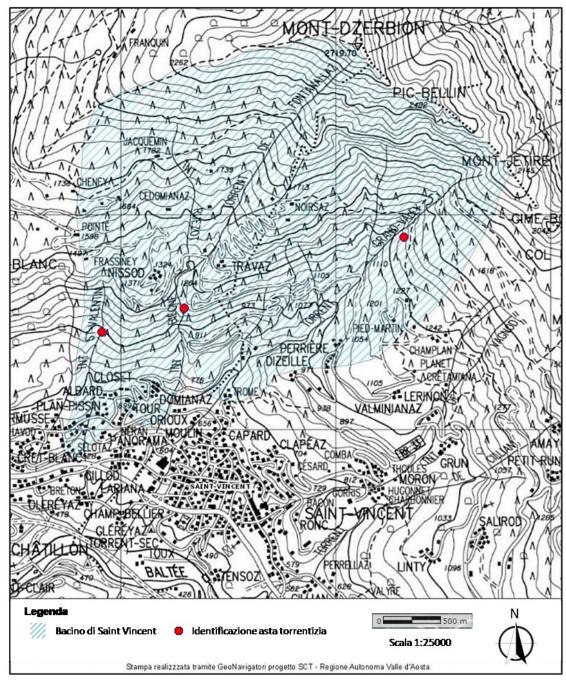


Figura 6.1: Delimitazione del bacino Saint Vincent (campitura a righe azzurre). Elaborazione tramite GeoNavigatore cartografico SCT della Regione Autonoma Valle d'Aosta (Melfi, n.d.).

Le particolari caratteristiche morfologiche e geologiche del bacino del Grand Valey lo rendono suscettibile ai fenomeni di colata detritica. L'elevata pendenza delle direttrici di drenaggio favorisce uno scorrimento molto rapido delle acque meteorologiche verso le aste torrentizie che convogliano il flusso verso valle.

Sono inoltre presenti diversi settori dell'alveo caratterizzati da processi di erosione e crollo di materiale lapideo con la presenza di litotipi particolarmente fratturati con la conseguente presenza di detrito che può mobilitarsi sotto l'azione dell'acqua corrente.



**Figura 6.2:** Delimitazione del bacino Saint Vincent e individuazione delle tre aste torrentizie: Grand Valey, Biegnè, Saint Valentin. Elaborazione tramite GeoNavigatore cartografico SCT della Regione Autonoma Valle d'Aosta (Melfi, n.d.).

La briglia filtrante a pettine oggetto di studio della presente tesi, è situata lungo l'asta principale del torrente Grand Valey, lungo il tratto che parte dall'apice del conoide a quota 720 m fino a quota 1075 m in località Perrière. Il tratto è prevalentemente composto da depositi detritici e le sponde evidenziano la presenza di un substrato roccioso coerente soggetto a frequenti fenomeni di crollo. Al di sopra dei 970 m sono presenti strati

di roccia particolarmente alterata inglobata in depositi detritici incoerenti. La copertura del substrato e caratterizzata prevalentemente da depositi di sabbia limosa e ciottoli ad esclusione della struttura sedimentaria del conoide.

### 6.2 Evoluzione e descrizione degli interventi strutturali

Nel corso degli anni in seguito ai danneggiamenti e i crolli verificatisi a causa di colate detritiche particolarmente intense, le opere strutturali di difesa costruite lungo l'alveo del torrente Grand Valey hanno subito modifiche e variazioni.

Negli anni '80, sono stati realizzati interventi di sistemazione dell'alveo tramite arginatura del canale, realizzata con una muratura in pietra e malta ed un sottofondo in pietrame per convogliare il flusso verso valle e limitare l'erosione. In seguito tale sistemazione è stata estesa per un ulteriore tratto lungo il conoide.

Una briglia filtrante a pettine realizzata tramite profilati in acciaio è stata realizzata a 690 m di altitudine sul livello del mare. A causa di un mancato immorsamento delle sponde, tale opera ha avuto problemi di erosione spondale con la creazione di un varco in prossimità delle estremità della briglia. A fronte di questa carenza, nel 2011 la briglia è stata integrata con due deviatori laterali in cemento armato con fondazione ed immorsamento spondale. Inoltre è stato realizzato un innalzamento dell'arginatura spondale nei pressi della zona di maggiore deviazione dell'asta torrentizia.

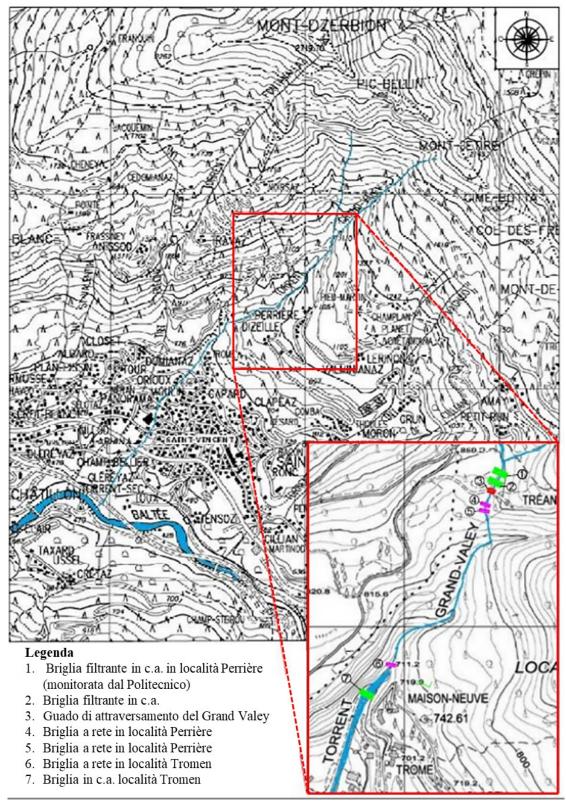
In seguito alla colata detritica avvenuta nel 2004, che evidenziò una capacità di contenimento insufficiente della sola briglia filtrante con materiale detritico trasportato fino nelle vicinanze del centro abitato, sono state realizzate due briglie a rete a valle dell'opera esistente. Tale sistema difensivo costituito dalla briglia filtrante a pettine seguita dalle briglie a rete è risultato tuttavia inefficace. Infatti gli eventi verificatisi tra il 2007 e il 2008 hanno evidenziato come la briglia filtrante a monte una volta ostruita si comportasse da trampolino per i massi trasportati dalla colata, con conseguente inefficacia della briglia a rete immediatamente successiva e rottura della seconda.

Attualmente, il sistema difensivo lungo il torrente Grand Valey è costituito da due briglie filtranti a pettine, costruite nel 2008 per superare i difetti riscontrati nella precedente configurazione e due briglie a rete posizionate più a valle. Queste opere situate in località Perrière sono separate da un guado di attraversamento del torrente.

In località Tromen più a valle rispetto alle opere precedenti, è stata realizzata un'ulteriore briglia a rete seguita da una briglia in calcestruzzo armato.

La briglia di monte, in località Perrière e stata ricostruita a seguito del crollo strutturale avvenuto nel luglio 2014 sulla quale è installato un sistema di monitoraggio delle deformazioni a cura del Politecnico di Torino.

In figura 6.3 è riportata la posizione attuale delle opere di difesa lungo l'asta principale del bacino del Grand Valey. Successivamente vengono descritte brevemente le caratteristiche principali di ciascun opera difensiva, con maggior grado di dettaglio per la briglia filtrante a pettine in località Perrière.



**Figura 6.3**: Posizione delle opere di difesa contro le colate detritiche lungo il torrente del Grand Valey.

#### 6.2.1 Briglie a rete

Lungo l'alveo sono posizionate tre briglie di questa tipologia in sequenza. In particolare le due briglie posizionate in località Perrière, a valle del guado di attraversamento sono dotate di dissipatori di energia ad anello, che si attivano in seguito a colate di intensità elevata (figura 6.4). Per quanto riguarda il sistema di ancoraggio, la briglia a monte è ancorata tramite funi di ancoraggio agli argini del torrente, consolidati mediante blocchi di pietra di 2-3 m³ opportunamente forati. La seconda briglia, è invece ancorata a due pali di fondazione infissi nel terreno. Caratteristiche analoghe si riscontrano nella briglia in località Tromen.



**Figura 6.4:** Briglie a rete in località Perrière; (a) briglia a monte con particolare degli anelli di dissipazione; (b) briglia a valle fondata su pali (Melfi, n.d.).

#### 6.2.2 Briglia in c.a. in località Tromen

Si tratta di una briglia filtrante posizionata in apice di conoide per arrestare il materiale che a seguito di eventi particolarmente importanti non è stato trattenuto dalle opere più a monte. Si trova in località Tromen immediatamente nelle vicinanze del centro abitato di Saint Vincent. La briglia, di notevoli dimensioni, è stata progettata al fine di contenere 15000 m<sup>3</sup> di materiale e raggiunge un'altezza di 14 m.

E' formata da muri in calcestruzzo armato dello spessore di 2 m ammorsati lateralmente nella roccia attraverso una trave di ripartizione. Nella parte centrale sono presenti tre speroni rivestiti in acciaio finalizzati a ridurre drasticamente l'energia del flusso e ad agire come filtro nei confronti del materiale più grossolano. La spaziatura tra i muri laterali e il contrafforte centrale è pari a 4 m (figura 6.5).





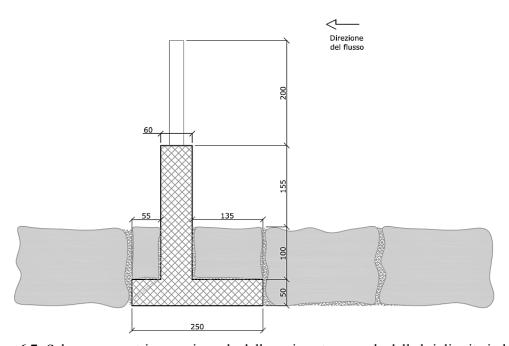
**Figura 6.5:** Briglia in c.a. posta in località Tromen; (a) vista frontale; (b) vista posteriore con gli speroni centrali in evidenza (Melfi, n.d.).

#### 6.2.3 Briglia filtrante strumentata in località Perrière

La briglia oggetto di studio della tesi è una briglia filtrante a pettine, realizzata con un basamento in calcestruzzo armato, nel quale sono inseriti dei profilati IPE 270 di acciaio aventi una lunghezza di 3 m. I profilati hanno un interasse di 0,5 m e proseguono oltre la soglia del calcestruzzo per circa 2 m. La larghezza complessiva dell'opera è di circa 9 m. In figura 6.6 è rappresentata la briglia mentre in figura 6.7 si riporta uno schema geometrico della stessa.



Figura 6.6: Fotografia della briglia strumentata in località Perrière (Regione Valle d'Aosta).



**Figura 6.7:** Schema geometrico non in scala della sezione trasversale della briglia sita in località Perrière (misure in cm).

#### 6.2.3.1 Profilati in acciaio

Profilati in acciaio IPE 270 sono stati adoperati per la realizzazione dei pettini della briglia. Hanno una lunghezza complessiva di 3 m di cui un terzo è inserito nel basamento in calcestruzzo tramite uno scatolare metallico riempito di sabbia. Non risultano quindi direttamente immerse nel conglomerato cementizio. Questa soluzione è stata realizzata per scopi manutentivi, in modo tale da consentire una sostituzione dei profilati danneggiati in seguito a eventi di colata detritica. Nella figura 6.8 è riportato uno schema geometrico della sezione del profilato, mentre in tabella 6.1 sono riportate le caratteristiche geometriche e meccaniche della sezione.

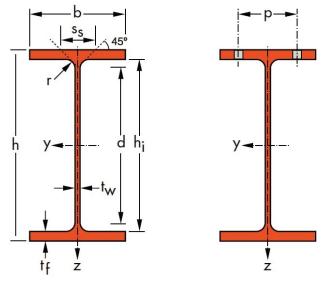


Figura 6.8: Schema della sezione di un profilato IPE 270 (Beruzzi, 2011).

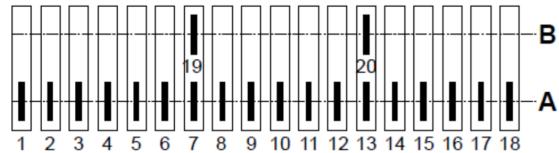
**Tabella 6.1:** Caratteristiche del profilato IPE 270 con riferimento alla figura 6.8.

| Peso lineare | Dimensioni |        |         |                     |        | Area               | Dimensio<br>dettag  |        |
|--------------|------------|--------|---------|---------------------|--------|--------------------|---------------------|--------|
| G [kg/m]     | h [mm]     | b [mm] | tw [mm] | t <sub>f</sub> [mm] | r [mm] | A [mm]             | h <sub>i</sub> [mm] | d [mm] |
| 36,1         | 270        | 135    | 6,6     | 10,2                | 15,0   | $45.9 \times 10^2$ | 249,6               | 219,6  |

|                        | orietà della sezion           | Proprietà della sezione |                   |                               |
|------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------------|
|                        | Asse forte y-y                | Asse debole z-z         |                   |                               |
| $I_y [mm^4]$           | $W_{pl,y}$ [mm <sup>3</sup> ] | $A_{vz} [mm^2]$         | $I_z [mm^4]$      | $W_{pl,z}$ [mm <sup>3</sup> ] |
| 5790 x 10 <sup>4</sup> | $429 \times 10^3$             | $22,1 \times 10^2$      | $420 \times 10^4$ | $97.0 \times 10^3$            |

#### 6.2.3.2 Strumentazione di monitoraggio

Nel 2012 è stato installato sull'opera un sistema di monitoraggio in grado di rilevare e registrare lo stato di deformazione che subiscono i profilati metallici durante l'impatto con una colata detritica. Nel dettaglio, si tratta di trasduttori di deformazione (SLB700A) collocati alla base di ciascun profilato, secondo lo schema riportato in figura 6.9. In particolare è posizionato un trasduttore su ogni profilato alla base, nella posizione denominata A e due trasduttori in posizione più elevata denominata posizione B. Attualmente lo schema di disposizione è leggermente modificato con gli estensimetri 6 e 14 in posizione B. Ciascun trasduttore è costituito da una lastra sottile di metallo di dimensioni 84x25,4x6,4 mm, fissata all'ala del profilato attraverso 4 viti di classe di resistenza 8,8 (figura 6.10).



**Figura 6.9:** Schema della disposizione dei trasduttori sui profilati con numerazione progressiva (Borri, 2012).



**Figura 6.10:** Fotografia del trasduttore in posizione A, assicurato all'ala del profilato tramite le viti di serraggio (Borri, 2012).

Con riferimento allo schema di figura 6.9, in totale sono stati installati 20 trasduttori, collocati sull'ala sinistra (con riferimento alla direzione del flusso) rivolta verso valle, per evitare il loro danneggiamento in seguito all'impatto della colata. l'asse baricentrico dello strumento dista circa 34 mm rispetto all'asse del profilato.

Sono identificate due posizioni: la posizione A conta 18 dispositivi posti ad una altezza di circa 150 mm rispetto alla soglia del calcestruzzo (baricentro dello strumento); la posizione B conta invece due dispositivi posti ad una altezza di circa 650 mm dalla soglia del basamento in calcestruzzo.

Siccome lo strumento rileva le deformazioni del profilato, è necessario che esso sia il più possibile solidale con esso. La deformazione viene infatti trasmessa per attrito ed è quindi necessario conferire un serraggio ottimale; in particolare la coppia di serraggio utilizzata è pari a 8 N m. I trasduttori sono infine protetti tramite uno scatolare plastico fissato al profilato tramite adesivo sigillante; i cavi che permettono il collegamento con i dispositivi sono intubati e fissati alla struttura.

Al fine di garantire un fornimento adeguato di energia elettrica e copertura telefonica, è stato realizzato un cavidotto interrato collegato alla frazione di Perrière distante circa 700 m dalla struttura. Ciò ha permesso di avere un sistema automatico, alimentato elettricamente e in grado di registrare dati su un archivio di memoria rimovibile, periodicamente recuperabile.

Ciascun trasduttore è composto da 4 estensimetri applicati alla lastrina metallica a formare un circuito a ponte in grado di alimentare il trasduttore stesso. Viene fornita quindi una tensione proporzionale alla variazione di resistenza del circuito. Tale variazione corrispondente ad una variazione di lunghezza degli estensimetri è strettamente legata alla deformazione subita dal profilato, nella sezione in cui è applicato lo strumento. I trasduttori sono collegati tramite un cavo passante in un tubo di protezione all'apparato di registrazione dei dati posizionato in un armadio in acciaio inossidabile sulla parete di un grosso masso nei pressi della briglia. Nello stesso contenitore è anche riposta l'apparecchiatura di alimentazione della strumentazione (figura 6.11).

La cadenza temporale di registrazione garantita dalla strumentazione è pari a 1 s.





**Figura 6.11**: Armadio protettivo in acciaio inossidabile contenente il quadro elettrico (Borri, 2012).

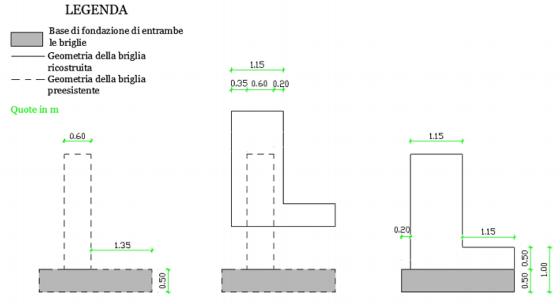
L'attrezzatura di monitoraggio, nonostante la posizione a valle rispetto al flusso e le precauzioni adottate, ha subito danneggiamenti a seguito dei fenomeni di colata detritica più rilevanti.

La struttura stessa, così come descritta, riguarda la configurazione adottata prima del 20 luglio 2014, data in cui si è verificata una colata detritica particolarmente intensa che ne ha causato il collasso strutturale. Tale opera è stata successivamente ripristinata con caratteristiche geometriche e strutturali leggermente differenti rispetto a quelle descritte.

In particolare è stato realizzato un basamento in calcestruzzo armato di maggiore spessore, 1,15 m rispetto a 0,60 m della struttura precedente; un maggior quantitativo di armatura longitudinale ( $\Phi$ 20) per conferire una miglior resistenza a flessione e rendere la briglia più monolitica. Inoltre è stato adottato un calcestruzzo di classe superiore, passando da una classe C25/30 a C35/45.

Per quanto riguarda il sistema di fondazione, non sono state realizzate variazioni rispetto all'opera precedente. Inoltre, sono stati inseriti dei blocchi in pietra cementati sulla suola di fondazione per conferire maggiore robustezza alla struttura.

In figura 6.12 è riportato uno schema della variazione geometrica subita dall'opera in seguito al collasso strutturale avvenuto nel luglio 2014.



**Figura 6.12:** Confronto della configurazione geometrica della briglia prima e dopo il collasso del 2014 (Melfi, n.d.).

## 6.3 Sequenza temporale degli eventi

In questo paragrafo vengono descritti i principali eventi franosi conosciuti verificatisi nel corso degli anni nel bacino del Grand Valey. Tale raccolta di eventi storici è stata costruita dalla regione Valle d'Aosta nonostante le difficoltà nel reperire informazioni su eventi passati riguardanti la localizzazione e le caratteristiche, soprattutto per quanto riguarda i fenomeni di modesta intensità a causa anche della ridotta estensione del bacino.

Le informazioni ricavate, seppur relative a una breve sequenza temporale permettono di affermare che il bacino del Grand Valey è uno dei più attivi della bassa Valle d'Aosta, soggetto ad improvvisi fenomeni di colata in seguito a precipitazioni brevi ed intense o a fenomeni di disgelo. Inoltre, l'elevata pendenza delle incanalature di alimentazione che convogliano l'acqua nell'asta torrentizia principale favoriscono il trasporto di discreti volumi di roccia e detrito.

In tabella 6.2 si riporta una breve descrizione degli eventi meno recenti avvenuti fino all'anno 2002 di cui si hanno meno informazioni.

**Tabella 6.2:** Cronistoria degli eventi noti che hanno interessato il bacino del Grand Valey fino al 2002 (Melfi, n.d.).

| Data Evento          | Descrizione   |  |  |  |  |
|----------------------|---|--|--|--|--|
| 1892                 | Formazione di un argine gigantesco ai piedi della chiesetta Tromen da parte delle a del Grand Valey in piena in seguito a piogge torrentizie  |  |  |  |  |
| 8-9 ottobre, 1893    | Inondazione di acqua e detriti del paese Saint Vincent a seguito di una pioggia fitta durata un pomeriggio  |  |  |  |  |
| 1954                 | Svolgimento di un'inchiesta sull'erosione del suolo nella valle del Grand Valey   |  |  |  |  |
| 19 agosto del 1958   | Registrati 154 mm di pioggia in un giorno (picco di 40 mm in 50 minuti). Da aerofotografie successive è visibile la notevole dilatazione del Grand Valey prodotta dalla piena e l'area di deposito dei materiali fuoriusciti dell'alveo in corrispondenza del tronco medio-inferiore del conoide  |  |  |  |  |
| 1 settembre del 1987 | Danni causati dal torrente straripato nelle vicinanze della strada Châtillon- Perrière e in zona Biègne a seguito di tre esondazioni  |  |  |  |  |
| 23-24 settembre 1993 | Forte e continuo apporto di materiale nei pressi della frazione di Maison Neuve, nel<br>Grand Valey. Nei pressi della frazione di Panorama, lungo la sponda destra del Grand<br>Valey, cede il piede di una parte di muro. Il pluviometro di Châtillon registra 143 mm di<br>pioggia in 24 ore, con massima intensità oraria di 25 mm   |  |  |  |  |
| 5-6 novembre 1994    | Crollo di una parte di argine costruito con gabbioni a causa dell'erosione provocata dal<br>Grand Valey   |  |  |  |  |
| 5 giugno del 2002    | Il pluviometro di Salirod (Saint Vincent) registra 89 mm di pioggia in 24 ore, con valori significativi di 10 mm tra le 14 e le 15, 15 mm tra le 15 e le 16 e 11 mm tra le 20 e le 21. Colate detritiche di alcune migliaia di metri cubi si sarebbero verificate durante la notte in un periodo di 30 minuti. I materiali si sono accumulati lungo le incisioni stesse e la zona di confluenza presso la località Perrière, senza raggiungere il fondo valle |  |  |  |  |

Nel seguito si riportano invece gli eventi avvenuti successivamente al 2002 con un maggior grado di dettaglio, fino all'evento più importante avvenuto il 20 luglio del 2014 che ha causato il crollo strutturale della briglia a pettine. Tale evento è anche il motivo principale da cui è scaturito il presente lavoro di tesi, per incrementare le conoscenze circa la progettazione di tali opere ed il loro comportamento strutturale.

#### Evento del 7 agosto 2004

In data 7 agosto 2004, a seguito di un temporale molto intenso, si è innescata una colata detritica che ha trasportato materiale a valle per un volume stimato di circa 3000 m<sup>3</sup> che ha parzialmente ostruito alcuni tratti dell'alveo torrentizio del Grand Valey.

La forte precipitazione, avvenuta sul versante del monte Zerbion, complice la bassa permeabilità del suolo, si è incanalata ad elevata velocità lungo le aste del bacino movimentando il detrito presente in alveo (figura 6.13). Lungo il percorso, il flusso caratterizzato da elevata energia ha incrementato il trasporto di materiale solido erodendo l'alveo torrentizio, che in alcuni punti ha presentato fronti di scavo fino a 4 - 5 metri.

La colata detritica ha causato la completa ostruzione della briglia filtrante a pettine posta più a monte, in località Perrierè, causando un collasso parziale dell'opera. Poco più a valle, dove l'alveo devia bruscamente, il torrente è esondato, interessando la parte superiore del centro abitato (figura 6.14).

Nonostante la grande quantità di materiale detritico trasportato verso valle non sono stati rilevati danni importanti a beni immobili. Il materiale composto prevalentemente da blocchi, massi e ciottoli è stato in buona parte trattenuto dalle opere di difesa installate lungo il percorso che hanno svolto efficacemente la propria funzione.



**Figura 6.13:** Fotografia scattata da elicottero che mostra un canale del bacino subito dopo l'evento del 2004 (fotografia ing. Gaudio).



**Figura 6.14**: Fotografia che mostra una parte del deposito nei pressi del centro abitato di Saint Vincent in seguito all'evento del 2004 (fotografia Ing. Gaudio).

#### Evento del 3 marzo 2008

Il 3 marzo del 2008, analogamente al caso precedente, si è instaurato un fenomeno di colata detritica a seguito di abbondanti precipitazioni che ha portato all'intasamento della briglia di monte posizionata nelle vicinanze della località di Perrière.

La briglia a pettine ha efficacemente svolto la propria funzione di trattenuta, arrestando detriti per un volume pari a circa 400 m<sup>3</sup> su un totale stimato di 600 m<sup>3</sup> di materiale (figura 6.15 a). La sponda destra del canale, in prossimità della briglia ha subito un processo di erosione; successivamente all'evento è stata ripristinata e consolidata. Poco più a valle il materiale ha ostruito parzialmente il guado di attraversamento dell'asta torrentizia (figura 6.15 b).



**Figura 6.15:** Fotografie successive alla colata detritica del marzo 2008; (a) briglia a pettine di monte ostruita dal materiale con evidente erosione della sponda destra orografica; (b) guado parzialmente ostruito dai detriti (Regione Valle d'Aosta).

#### Evento del 27 maggio 2008

L'evento del 27 maggio 2008 è stato particolarmente dannoso nei riguardi delle opere di difesa localizzate lungo l'asta del torrente Grand Valey. Le opere maggiormente colpite sono state la briglia a pettine di monte in località Perrière, nuovamente ostruita con erosione della sponda destra orografica (figura 6.16) e le briglie a rete posizionate più a valle. In particolare una briglia a rete è stata solo parzialmente interessata dal fenomeno con lievi danni (figura 6.17 a) mentre quella posta più a valle in località Perrière è stata completamente distrutta (figura 6.17 b e c).



**Figura 6.16:** Fotografia della briglia a pettine in località Perrière completamente ostruita e parzialmente danneggiata, con evidente erosione della sponda destra (Regione Valle d'Aosta).

In località Tromen, la colata detritica ha causato l'intasamento di una briglia filtrante di piccole dimensioni. Il materiale detritico, stimato per un volume complessivo di circa 6000 m<sup>3</sup> ha raggiunto la zona di valle nei pressi del ponte ferroviario e del viadotto autostradale.



**Figura 6.17**: Fotografie delle briglie a rete in seguito all'evento del maggio 2008; (a) briglia parzialmente interessata con poco materiale depositato e lievi danni; (b) e (c) briglia a rete completamente distrutta dalla colata (Regione Valle d'Aosta).

#### Evento dell' 8 giugno 2008

Evento di colata detritica a seguito di abbondanti precipitazioni che ha causato l'intasamento delle varie opere di difesa poste lungo l'alveo del torrente. Volume stimato del materiale detritico pari a 800 m<sup>3</sup>.

#### Evento del 12 luglio 2008

Evento che ha portato al riempimento della briglia di monte in località Perrière, con erosione della sponda destra e ha danneggiato la briglia a rete posta più a valle. Questa successione di eventi con cadenza quasi mensile testimonia l'elevato grado di attività del bacino idrico di Saint Vincent.

#### Evento dell' 8 maggio 2009

In tale data e nei giorni successivi si sono verificati fenomeni di colata detritica con volume complessivo stimato di 2400 m<sup>3</sup> di materiale solido. Vista la frequenza di accadimento di tali fenomeni, nel 2009 sono state realizzate nuove opere di difesa e mitigazione.

#### Evento del 6 giugno 2011

A seguito di intense precipitazioni, in data 6 giugno 2011 si è verificato un fenomeno di colata di volume pari a circa 5000 m<sup>3</sup> di materiale efficacemente trattenuto dalle opere di difesa realizzate nell'anno 2009 (figura 6.18).



**Figura 6.18:** Fotografie delle opere di mitigazione realizzate nel 2009 interessate dall'evento del 6 giugno 2011; (a) vista in sequenza delle due briglie filtranti a monte del guado; (b) briglia a pettine di monte completamente ostruita dal materiale detritico (Regione Valle d'Aosta).

#### Eventi del 6-27 agosto 2012

Nel periodo compreso tra il 6 e il 27 agosto dell'anno 2012 si sono verificati una serie di fenomeni di colata detritica causate da precipitazioni abbondanti. Il materiale detritico movimentato, pari a circa 4000 m³, è stato trattenuto efficacemente dalle briglie filtranti ma ha parzialmente danneggiato il sistema di monitoraggio delle deformazioni collocato sulla briglia di monte, in corrispondenza della base delle travi di acciaio (figura 6.19).





**Figura 6.19:** Fotografie dei danni causati dall'evento franoso; (a) briglia di monte in località Perrière completamente ostruita e danneggiamento della strumentazione di monitoraggio; (b) particolare del danno subito dalla strumentazione di monitoraggio delle deformazioni (Regione Valle d'Aosta).

#### Evento del 17 luglio 2013

Evento caratterizzato da un volume stimato di circa 5000 m³ di materiale mobilitato a seguito di eventi meteorologici intensi. Il materiale è stato efficacemente trattenuto dalle opere di difesa con un parziale danneggiamento della strumentazione di monitoraggio posti sulla barriera a monte.

#### Evento del 29 luglio 2013

Evento caratterizzato da un volume di circa 5000 m<sup>3</sup> di materiale efficacemente trattenuto dalle opere di difesa.

#### Evento del 30 maggio 2014

Fenomeno franoso per crollo avvenuto sul versante del monte Zerbion che ha portato al riempimento della briglia di monte in località Perrière per un volume stimato di circa 3500 m<sup>3</sup> (figura 6.20).



**Figura 6.20:** Fotografia del settore di distacco della frana da crollo e del percorso di propagazione incanalato (Regione Valle d'Aosta, Catasto Dissesti Regionale CST).

#### Evento del 20 luglio 2014

Evento causato da precipitazioni intense con trasporto di circa 4600 m<sup>3</sup> di materiale solido che ha ostruito parzialmente alcuni tratti del torrente Grand Valey. La colata detritica ha causato il collasso strutturale della briglia a pettine di monte in località Perrière (figura 6.21).

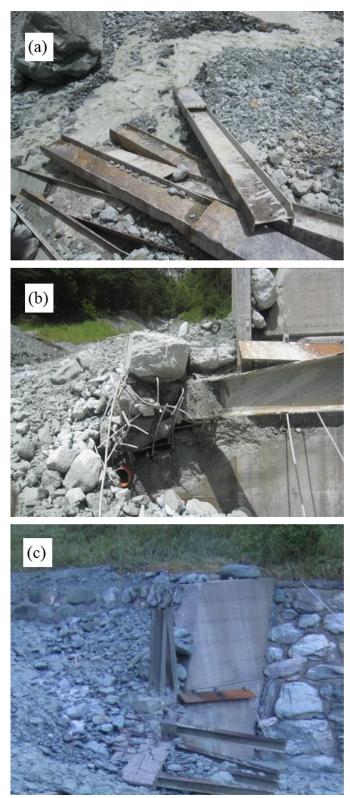


**Figura 6.21:** Fotografia del collasso strutturale della briglia di monte in località Perrière (cortesia Regione Autonoma Valle d'Aosta).

L'azione di natura impulsiva esercitata dal flusso ha causato il distacco delle travi di acciaio che realizzavano il pettine della briglia, senza però causarne un eccessivo danneggiamento (figura 6.22 a).

L'opera è andata in crisi nella zone di collegamento di tali travi con il basamento di calcestruzzo (figura 6.22 b) causato anche dalla carente presenza di armatura di collegamento tra la parte superiore del basamento in calcestruzzo e la parte inferiore fondata nel terreno.

Il collasso non ha interessato il basamento di calcestruzzo armato e le sponde laterali che sono rimaste intatte (figura 6.22 c).



**Figura 6.22**: Particolari del collasso strutturale; (a) profilati in acciaio della briglia; (b) zona di collegamento tra profilato e basamento di calcestruzzo; (c) sponda laterale destra della briglia (cortesia Regione Autonoma Valle d'Aosta).

In seguito a tale evento, con la ricostruzione della briglia con differenti caratteristiche geometriche si sono verificati ulteriori fenomeni di colata detritica alcune caratterizzate da notevole trasporto di materiale.

In particolare l'11 luglio del 2016 ingenti quantità di materiale lapideo depositatosi a causa di una frana sul monte Zerbion con volume stimato intorno ai 7200 m<sup>3</sup> sono stati efficacemente trattenuti dal sistema difensivo lungo l'alveo senza subire particolari danneggiamenti, sebbene il volume fosse superiore rispetto a quello che ne ha causato il collasso strutturale nel 2014 (figura 6.23).



**Figura 6.23:** Completa ostruzione di entrambe le briglie filtranti a pettine senza danni evidenti (Regione Valle d'Aosta, Catasto Dissesti Regionale CST).

# Capitolo 7

## **Modellazione DEM-FEM**

# dell'interazione tra flusso granulare e briglia filtrante

In questo capitolo viene descritto il procedimento utilizzato per la modellazione della colata detritica e della briglia filtrante a pettine in località Perrière. In particolare è stato adottato un approccio ibrido con l'implementazione di un metodo agli elementi discreti DEM e un metodo agli elementi finiti FEM separatamente, attraverso l'utilizzo di due differenti codici. Nel paragrafo 7.1 viene quindi illustrata la modellazione e i risultati ottenuti dall'analisi DEM; nel paragrafo 7.2 viene descritto invece il modello FEM che utilizzando i risultati prodotti dal DEM permette di effettuare un'analisi della risposta strutturale della briglia, con riferimento particolare al pettine. Infine nel paragrafo 7.3 sono illustrati i risultati finali della modellazione FEM e il loro confronto con i risultati sperimentali ricavati dalla strumentazione di monitoraggio della briglia.

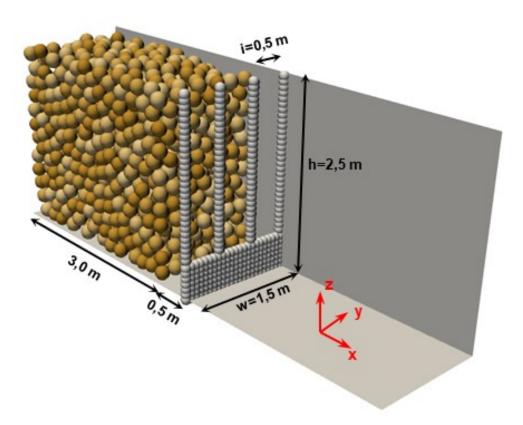
#### 7.1 Modellazione DEM dell'interazione

La modellazione discreta di una colata detritica è utile per la determinazione dell'azione esercitata dal flusso su un'opera strutturale interposta lungo il suo percorso. Come descritto in maggior dettaglio nel capitolo 4 è stato utilizzato il codice sviluppato da Leonardi (2005) che ha permesso di simulare l'impatto di un flusso granulare composto da particelle sferiche contro una briglia rigida e indeformabile, formata anch'essa da una successione di particelle.

La configurazione geometrica del modello, rappresentata in figura 7.1 cerca di simulare in modo particolare la fase finale del percorso seguito dalla colata detritica, ovvero poco prima che avvenga l'impatto contro la barriera. Per tale motivo la distanza tra il punto di partenza del flusso e la posizione della barriera è di 0,5 m.

L'interesse principale è infatti valutare l'azione impulsiva generata dal flusso sulle aste del pettine, che rappresentano idealmente i profilati d'acciaio della briglia reale.

Nei sotto-paragrafi 7.1.1 e 7.1.2 vengono forniti ulteriori dettagli riguardo la modellazione del flusso e della briglia, mentre nel sotto-paragrafo 7.1.3 vengono illustrati i risultati ottenuti.



**Figura 7.1:** Configurazione geometrica del modello DEM, visualizzata con il programma ParaView.

#### 7.1.1 Modellazione del flusso granulare

La simulazione della colata detritica è stata realizzata attraverso un flusso granulare secco composto da un determinato numero di particelle interagenti tra loro mediante i modelli di contatto descritti nel capitolo 4.

Il codice DEM utilizzato distingue due tipologie di particelle denominate "particle" e "object"; le prime sono destinate alla simulazione del flusso mentre le seconde sono ferme e non cambiano la loro posizione durante la simulazione, sono quindi impiegate per la modellazione della barriera rigida aperta.

Il codice, in particolare, ricava tutte le informazioni riguardanti le due tipologie di particelle da due rispettivi file di testo denominati particleFile e objectFile. Questi file, di cui un esempio è riportato in appendice A, sono realizzati tramite un codice scritto

con il programma MatLab e contengono, ordinatamente ed incolonnati le seguenti caratteristiche:

- il numero totale di particelle;
- un indice progressivo di identificazione della particella;
- il valore di particelle associate nel formare un cluster, come definito in precedenza nel paragrafo 4.1; in questa modellazione non sono presenti, per cui tale colonna è composta da valori unitari;
- il valore del raggio della particella;
- la posizione iniziale di ciascuna particella, indicata in coordinate x, y e z rispetto al sistema di riferimento del modello;
- la velocità iniziale di ciascuna particella, indicata tramite le componenti di velocità in x, y e z.
- la velocità angolare iniziale di ciascuna particella, indicata tramite le sue componenti in x, y e z.
- ulteriori parametri che definiscono l'orientamento iniziale delle particelle; utili nel caso di cluster ma nel modello utilizzato, con particelle sferiche si traducono in valori unitari e nulli.

Tramite questa procedura, si ottiene una distribuzione di particelle ordinate e circa equispaziate tra loro, come mostrato in figura 7.2.

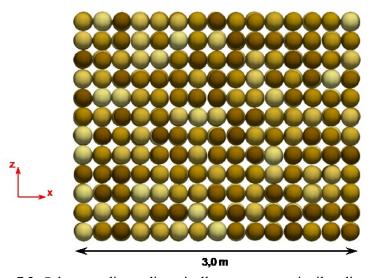


Figura 7.2: Schema ordinato di particelle ottenuto tramite il codice Matlab.

Alla configurazione spaziale così ottenuta segue una simulazione senza la presenza della briglia sotto l'unica azione della forza di gravità agente in direzione verticale allo scopo di ottenere una sorta di sedimentazione ed una configurazione spaziale di partenza più realistica, come quella mostrata in figura 7.1.

Le particelle di forma sferica sono caratterizzate da un diametro medio D pari ad una determinata frazione dell'interasse i dei pettini della briglia pari a 0,5 m, distanza caratteristica su cui è impostato il modello; in particolare sono state eseguite analisi con D pari a 0,165 m, 0,2 m e 0,25 m corrispondenti rispettivamente a  $\frac{1}{3}$ i,  $\frac{1}{2,5}$ i e  $\frac{1}{2}$ i; sono tuttavia caratterizzate da diametri aventi una piccola dispersione casuale del  $\pm 5\%$  e anche le posizioni x, y, z sono caratterizzate dallo stesso valore di dispersione al fine di rendere più realistico il flusso granulare e la sua sedimentazione. L'adozione di un certo grado di dispersione permette anche di limitare fenomeni di cristallizzazione, tuttavia un certo grado di cristallizzazione si verifica ugualmente nello strato inferiore del flusso, a causa del contatto con la superficie piana.

Le particelle risultano inscritte in un parallelepipedo di lunghezza pari a 3 m, ovvero 15D considerando un valore medio di D pari a 0,2 m; 1,5 m di larghezza pari alla larghezza w della briglia e altezza variabile, funzione del processo di sedimentazione.

In generale, si è assunta un'altezza della configurazione di partenza (figura 7.2) in modo tale da raggiungere, una volta sedimentato il flusso, un'altezza circa pari a 2,5 m corrispondente all'altezza del modello della briglia.

Terminata la simulazione della sedimentazione, cioè quando le particelle assumono una configurazione stabile e con velocità trascurabile, il ParticleFile relativo viene riutilizzato come input nella simulazione dell'interazione con la briglia. In particolare, vengono azzerate le velocità residue e viene attribuito a ciascuna particella un valore di velocità iniziale pari ad 1 m/s nella direzione x, parallela alla direzione di scorrimento del flusso.

#### 7.1.2 Modellazione della briglia filtrante

La briglia filtrante a pettine viene modellata nel DEM attraverso 281 particelle sovrapposte tra loro di una quantità pari a mezzo diametro, nel tentativo di creare una superficie il più possibile liscia e priva di scanalature, per simulare la reale superficie della barriera.

Come risulta evidente dalla figura 7.1 non è stata modellata la briglia nella sua interezza, ma sono state apportate semplificazioni per limitare il numero di particelle totale, che incide significativamente sulla durata della simulazione.

L'interesse principale della simulazione è quello di valutare l'effetto della colata detritica sui pettini della briglia, rappresentati dai profilati di acciaio. Per questo motivo, la barriera è caratterizzata da un'altezza pari a 2,5 m che considera i 2 m di profilato che prosegue oltre la soglia del calcestruzzo e 0,5 m di basamento in calcestruzzo, a fronte di 1,55 m di altezza reale. In tal modo, si limita il numero di particelle del flusso che impattano il basamento e che subendo un arresto vengono sovrastate dal flusso di interesse che impatta le aste del pettine.

Allo stesso scopo, la briglia viene modellata in larghezza considerando 4 pettini, ossia 1,5 m corrispondenti a 3i, semplificando notevolmente il modello, senza tuttavia perdere troppe informazioni, trattandosi di un problema simmetrico (figura 7.3).



Figura 7.3: Individuazione della parte di briglia filtrante modellata via DEM.

A differenza delle particelle create per rappresentare la colata detritica, le particelle che realizzano la briglia rigida sono caratterizzate da un diametro costante pari a 0,135 m; questo valore corrisponde alla larghezza del profilato IPE 270 nella direzione trasversale al flusso, ossia la lunghezza dell'ala. In questo modo viene rispettata la configurazione geometrica reale, garantendo lo stesso rapporto di apertura tra i pettini.

Lo spessore della barriera è invece pari a 0,135 m, in quanto si considera una sola fila di particelle svincolandosi dal reale spessore della briglia; tale semplificazione, necessaria ai fini di una corretta valutazione e registrazione delle forze scambiate tra flusso e barriera, risulta giustificata dal fatto che nel modello la barriera è rigida e indeformabile.

La briglia, distante 0,5 m dal fronte del flusso granulare, viene introdotta nel codice tramite l'objectFile avente la stessa struttura e le stesse informazioni del particleFile descritto nel sotto-paragrafo 7.1.1.

#### 7.1.3 Esecuzione dell'analisi e risultati

Per l'esecuzione dell'analisi è necessario compilare un'ulteriore file di testo di configurazione contenente tutti i parametri necessari alla simulazione, descritti nel capitolo 4.

Le particelle, aventi una data velocità iniziale, sono soggette all'accelerazione di gravità considerata inclinata di 60° rispetto all'orizzontale, a simulare una pendenza del canale di 30°. Il dominio geometrico del DEM è delimitato da piani rigidi, che realizzano un parallelepipedo di dimensioni 6,5×1,5×4,0 m. Il modello di contatto normale utiliz-

zato è il modello hertziano, con intervallo di risoluzione del risultato  $\Delta t^{out}$  pari a 0,02 s e rapporto critico di 0,002, sulla base delle considerazioni effettuate nel paragrafo 4.4. I parametri utilizzati nel DEM sono riportati in tabella 7.1.

Tabella 7.1: Parametri usati nella simulazione DEM.

| Parametri  | Valore            |
|--|-------------------|
| Densità (kg/m³)  | 2630              |
| Modulo di Young E (N/m²)                                 | $1,2\times10^{9}$ |
| Coefficiente di Poisson v (-)                            | 0,2               |
| Coefficiente di restituzione $\zeta$ (-)                 | 0,8               |
| Coeff. di smorzamento tangenziale $\alpha_t$ (-)         | 0,5               |
| Coeff. di attrito tra particelle $\mu_{s,pp}$ (-)        | 0,577             |
| Coeff. di attrito tra particelle e muro $\mu_{s,pm}$ (-) | 0,577             |
| Coeff. di attrito al rotolamento c (-)                   | 0,0678            |

Siccome nel codice DEM non è possibile distinguere diversi valori per caratterizzare differenti proprietà meccaniche di particelle appartenenti a materiali differenti, è stato attribuito un valore medio del coefficiente di Poisson tra quello del calcestruzzo assunto pari a 0,1 e quello dell'acciaio assunto pari a 0,3. Per quanto riguarda il modulo elastico, assumendo un valore del modulo del calcestruzzo di 30 GPa e dell'acciaio di 210 GPa, si ottiene un valore medio pari a 120 GPa; tale valore è stato ridotto a 1,2 GPa per considerazioni di natura numerica, al fine di limitare la durata complessiva della simulazione, altrimenti eccessiva.

Il coefficiente di attrito assunto, sia per l'attrito tra particelle che tra particelle e muro delimitante il dominio, così come il coefficiente di rotolamento derivano invece da considerazioni fisiche. Il coefficiente di attrito statico scelto corrisponde infatti ad assumere una colata detritica tipica, caratterizzata da un angolo di riposo di  $\Phi = 30^{\circ}$ ; il coefficiente di rotolamento deriva invece dall'inversione della relazione:

$$\Phi = 151, 7\sqrt{\mu_{\rm s} \cdot c},\tag{7.1}$$

con l'approssimazione  $\tan \Phi \approx \mu_s$ . L'equazione (7.1) deriva da un'analisi parametrica effettuata da Marchelli (2018) tramite 209 simulazioni numeriche riguardanti la formazione di un cumulo di sfere monodimensionali. Dalla soluzione del problema di regressione tridimensionale, in cui sono stati combinati valori di coefficienti d'attrito statico tra 0,1 e 1 con passo di 0,05, e coefficienti al rotolamento tra 0,0 e 0,2 con passo di 0,02 si è ottenuta la relazione empirica capace di fornire un collegamento tra un parametro fisico facilmente identificabile come l'angolo di riposo  $\Phi$  e i parametri interni  $\mu_s$  e c.

In particolare la relazione ricavata dalla regressione è espressa come

$$\Phi = \sqrt{\mu_{\rm s} \cdot a(c)},\tag{7.2}$$

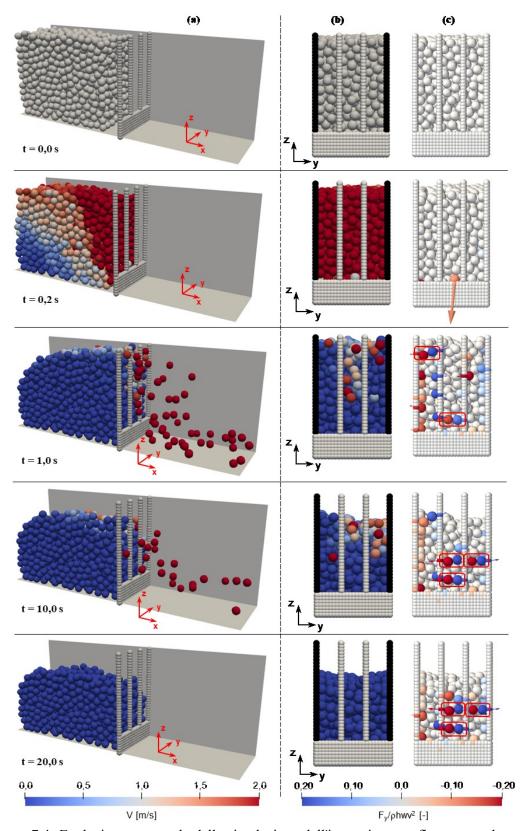
con

$$a(c) = \begin{cases} 23004c & \text{per } c \le 0,12\\ 2813 & \text{per } c > 0,12. \end{cases}$$
 (7.3)

Restringendo il dominio di validità a c  $\leq$  0,12 e  $\mu_s \leq$  0,7 si ottiene la formulazione semplificata (7.1) adottata per la valutazione del coefficiente di rotolamento.

Una volta eseguita l'analisi, i risultati sono stati visualizzati con il programma Para-View, con cui è stato possibile valutare l'evoluzione temporale del flusso nel tempo e di valutare la variazione di differenti parametri come ad esempio la velocità del flusso. Inoltre ha permesso di valutare graficamente la formazione di catene di forze stabili tra le particelle e di valutare qualitativamente l'efficacia della barriera nella sua capacità di trattenuta del flusso granulare.

Nel seguito vengono riportati i risultati ottenuti dalla simulazione con diametro medio del flusso pari a 0,2 m, composto da 1440 particelle. In particolare in figura 7.4 è visualizzata l'evoluzione temporale del fenomeno e altre caratteristiche dell'interazione con la briglia filtrante.



**Figura 7.4:** Evoluzione temporale della simulazione dell'interazione tra flusso granulare e briglia a pettine.

In figura 7.4 sono riportati nelle righe alcuni istanti della simulazione caratterizzata da una durata complessiva di circa 20 s. Nella colonna (a) è rappresentata in assonometria l'evoluzione del fenomeno; in particolare all'istante t=0.0 s è possibile osservare la configurazione iniziale con le particelle sedimentate aventi una velocità di partenza di 1.0 m/s (colore bianco), mentre all'istante t=20.0 s è visibile la configurazione finale del cumulo trattenuto dalla briglia, con velocità nulla (colore blu).

Nella colonna (b) è rappresentata invece una visione frontale della briglia e del flusso a monte in cui è possibile osservare le aperture preferenziali del pettine attraverso cui le particelle oltrepassano la briglia, l'altezza di impatto e l'altezza finale del cumulo una volta raggiunta la condizione stabile.

Nella colonna (c) si osservano invece le forze scambiate tra le particelle del flusso e la briglia nel piano y-z; tale rappresentazione è utile per sottolineare come l'azione del flusso non agisca solamente nella direzione ortogonale alla barriera ma esiste una forza trasversale non trascurabile agente secondo l'asse y. Sono inoltre evidenziati gli archi di particelle che si formano con i pettini della barriera, ossia quando nasce una catena di forze stabile per cui le particelle si arrestano e vengono trattenute (rettangolo rosso), occludendo il filtro e causando il rallentamento o l'arresto del flusso retrostante.

La forza agente riportata è adimensionale secondo il rapporto:

$$\frac{F_{y}}{\rho hwv^{2}}$$
 (7.4)

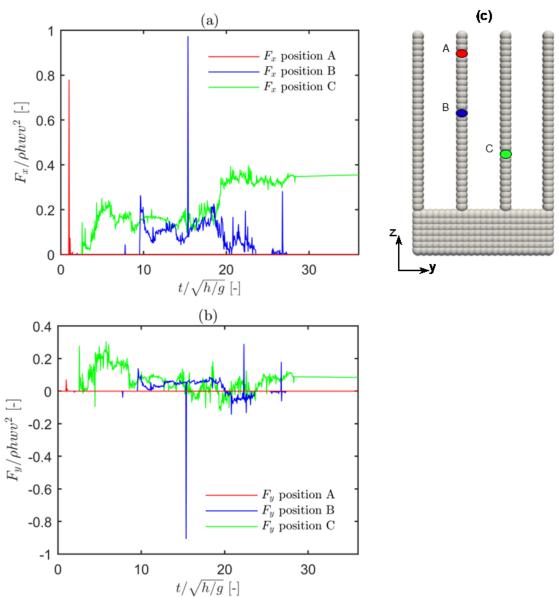
In cui  $F_y$  è la forza in direzione y agente sulla briglia,  $\rho$  è la densità del flusso, h e w sono le caratteristiche geometriche, ossia l'altezza e la larghezza della briglia (figura 7.1), mentre v è la velocità iniziale del flusso.

Un altro risultato molto importante, che deriva dall'approccio dinamico adottato per la stima della forza, è rappresentato dall'intensità della forza di impatto agente sui pettini della briglia. In particolare, ai fini dell'analisi dell'interazione, sono state considerate solamente le due aste centrali del pettine, per tale ragione nella colonna (b) sono rappresentate in bianco, mentre quelle laterali, non considerate nell'analisi della risposta strutturale, sono di colore nero.

Le aste centrali sono caratterizzate da un numero totale di 60 particelle, 30 per asta, di cui sono state registrate le forze di impatto occorse durante la simulazione. Il codice è programmato per restituire dei file di testo contenente la storia temporale delle forze in direzione x, y e z per un numero specificato di particelle, in funzione del loro indice. La componente in z ai fini della valutazione della risposta strutturale è stata trascurata rispetto alle componenti in x e y. In figura 7.5 sono riportati tre segnali tipici registrati in tre differenti posizioni definite A, B e C evidenziate nello schema (c). Anche in questo caso si ricorre ad una variabile di tempo adimensionale secondo il rapporto:

$$\frac{t}{\sqrt{h/g'}},\tag{7.5}$$

in cui t è il tempo progressivo di evoluzione del fenomeno mentre g è l'accelerazione di gravità.



**Figura 7.5:** Risultati DEM i termini di forze scambiate tra il flusso granulare e la briglia in tre posizioni rappresentative A, B e C.

In particolare, con riferimento al grafico (a) rappresentante le forze in x, si osserva come il segnale in rosso, ossia quello registrato dalla particella in posizione A, sia caratterizzato da un impulso iniziale, determinato dal primo impatto del flusso sulla barriera immediatamente successivo all'istante t=0.2 s della figura 7.4, per poi divenire nullo. Questo comportamento è dovuto alla posizione di registrazione elevata, per cui a meno dell'impatto iniziale, non viene più interessata dalle particelle del flusso.

Il segnale blu invece è caratterizzato da una forza che si sviluppa nella fase centrale della durata delle simulazione, essendo registrata in una posizione centrale dell'asta, per poi diventare nulla nella parte conclusiva. La posizione C infine, essendo più in basso rispetto alle precedenti è caratterizzata da un segnale che raggiunge un valore statico verso la conclusione dell'analisi, a causa del flusso depositatosi a monte della briglia. I restanti segnali, registrati per ciascuna particella, possono essere considerati come una combinazione di questi tre segnali rappresentativi. Per quanto riguarda invece le forze registrate in direzione y (grafico (b) della figura 7.5) è possibile notare come rispecchino a grandi linee l'andamento appena descritto per le forze in x, con la caratteristica di subire inversioni di segno durante l'evoluzione del fenomeno.

Inoltre hanno un valore della forza in termini di modulo all'incirca dello stesso ordine di grandezza delle forze in direzione x. Questo risultato è fortemente contro intuitivo, siccome il flusso della colata arriva con una data velocità secondo una direzione parallela all'asse x; ci si aspetterebbe quindi in tale direzione l'azione massima e principale del flusso, che colpisce la barriera ortogonalmente. Lo stesso ragionamento viene fatto erroneamente dalle linee guida che considerano solamente un'azione derivante dal flusso in direzione ortogonale alla barriera.

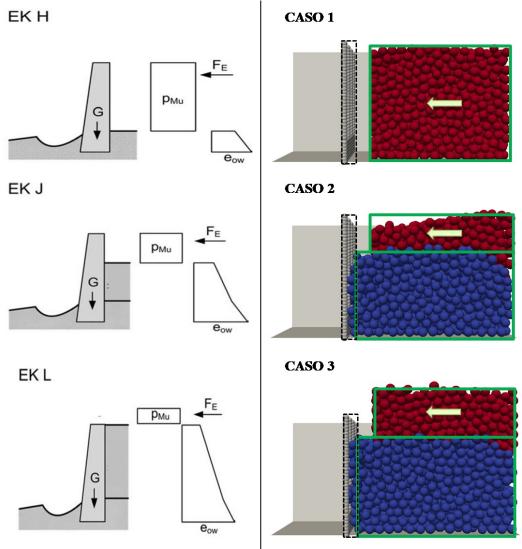
Allo scopo di realizzare delle configurazioni spaziali coerenti e confrontabili con le combinazioni di carico delle linee guida austriache ONR 24802, descritte nel paragrafo 3.4, sono state realizzate tre differenti simulazioni consequenziali, rappresentanti le tre configurazioni descritte dalle linee guida.

Queste configurazioni, che cercano di riprodurre le situazioni di bacino di deposito vuoto, parzialmente riempito e tracimazione della barriera, sono state realizzate attraverso i seguenti passi:

- simulazione della sedimentazione delle particelle del primo strato, allo scopo di realizzare una prima ondata della colata, con altezza circa pari a quella della barriera;
- esecuzione della simulazione di impatto tra il flusso precedentemente sedimentato e la barriera, conferendo una componente di velocità in direzione x V<sub>x</sub> pari a 1 m/s; tale analisi che vuole riprodurre la combinazione EK H, viene definita caso 1 nella discussione dei risultati;
- creazione ed esecuzione della sedimentazione di un secondo strato al di sopra del cumulo di particelle che sono state trattenute dalla briglia a pettine al termine dell'analisi precedente; l'altezza dello strato di particelle al termine della sedimentazione è circa pari all'altezza totale della briglia;
- esecuzione dell'analisi dell'impatto con la barriera, in cui alle particelle sedimentate al passo precedente viene conferita una velocità V<sub>x</sub> pari a 1 m/s; le particelle sottostanti, trattenute dalla briglia nell'analisi precedente, hanno invece velocità nulla; tale configurazione, rappresenta la combinazione EK J e viene definita caso 2;

- esecuzione della sedimentazione del terzo ed ultimo strato (o sovraflusso) al di sopra del cumulo risultante dal caso 2; al termine di questa fase di sedimentazione si cerca infatti di ottenere un'altezza del flusso superiore a quella della barriera di circa 0,5 m;
- esecuzione ed analisi della terza simulazione che rappresenta la combinazione austriaca EK L caratterizzata dalla tracimazione della barriera; tale analisi viene denominata caso 3.

Nella figura 7.6 viene riportato uno schema delle configurazioni consequenziali appena descritte confrontate con le combinazioni di carico austriache; in rosso sono indicate le particelle caratterizzate da una velocità iniziale  $V_x$  pari a 1 m/s mentre in blu quelle con velocità nulla, essendo le particelle trattenute dalla briglia nel caso antecedente.



**Figura 7.6:** Confronto tra le combinazioni delle ONR 24802 e le configurazioni iniziali nei tre casi delle simulazioni DEM.

In totale sono state realizzate nove simulazioni numeriche: i tre casi rappresentanti le diverse situazioni di riempimento del bacino per tre differenti tipologie di flusso granulare caratterizzato da valori di diametro medio D = 0.25 m, D = 0.2 m e D = 0.165 m.

Una caratteristica dei materiali granulari consiste nella creazione di strutture stabili formate da diverse particelle in grado di resistere a pressioni; tali strutture vengono dette generalmente archi o ponti nel caso di configurazioni bidimensionali o cupole nel caso tridimensionale. Questo fenomeno può verificarsi quando una colata detritica, in questo caso, un flusso granulare incontra un ostacolo come il filtro della briglia causandone un'occlusione temporanea o permanente.

Interessante è quindi valutare come varia l'altezza del flusso depositato a monte della barriera, in funzione della variazione del diametro medio. Si ricorda che i valori utilizzati di diametro corrispondono a determinate frazioni dell'interasse i = 0,5 m, ovvero l'interasse i è pari rispettivamente a 2D, 2,5D e 3D; il valore assunto dal rapporto i/D influenza significativamente la capacità di ritenuta del filtro del pettine e viene generalmente utilizzato come parametro di progetto.

Infatti il problema del filtraggio si riduce generalmente alla valutazione di tale rapporto  $R=i/D_{max}$ , in cui si confronta il valore minimo dell'apertura del filtro con il diametro massimo caratteristico della colata detritica attesa.

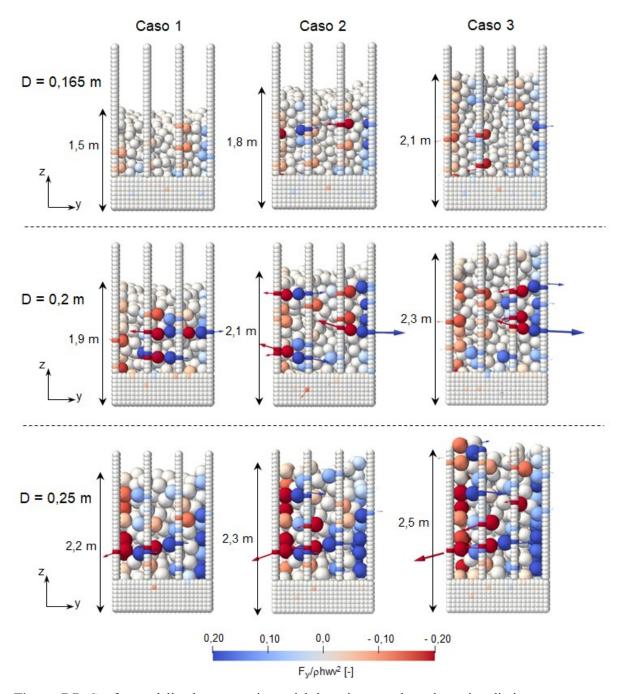
Nonostante la possibilità di analisi numeriche avanzate, studi completi ed esaustivi riguardanti questo problema non sono ancora stati effettuati, per cui generalmente le indicazioni principali riguardanti tale rapporto sono basate su osservazioni di fenomeni di colata occorsi in passato.

Alcune indicazioni sono fornite dalle linee guida internazionali; ad esempio quelle cinesi (MLR 2006) suggeriscono di utilizzare nella progettazione un valore di R compreso tra 2 e 4. Le linee guida giapponesi (NLIM 2007) invece suggeriscono un valore circa pari a 1,5, simile a quanto indicato nelle SWCB (2005) di Taiwan con valori di R compresi tra 1,5 e 2.

Altre indicazioni sono fornite da alcuni autori in letteratura, ad esempio Watanabe et al. (1980) affermano che per R < 2 il volume della colata detritica a valle della barriera può essere ridotto di circa il 50 %. Solamente negli ultimi decenni sono state realizzate alcune analisi numeriche riguardanti tali problemi, con configurazioni spaziali principalmente bidimensionali, ricavando intervalli di valori del rapporto R simili a quelli riportati.

I valori utilizzati per le simulazioni DEM sono dunque confrontabili con quelli suggeriti dalle linee guida internazionali e da alcuni autori in letteratura.

In figura 7.7 si riporta un confronto tra le diverse altezze raggiunte dal flusso al termine della simulazione numerica di ciascun caso, ossia raggiunta una configurazione di equilibrio. Come da aspettativa, riducendo il valore del rapporto critico R si ha un progressivo incremento dell'occlusione del filtro. In particolare, con R = 2,5 e R = 2 si ha praticamente il completo riempimento della barriera, al termine delle tre ondate successive. Tali situazioni risultano inoltre le più realistiche da un confronto con le fotografie riportate nel paragrafo 6.3, in cui al termine degli eventi di colata detritica il filtro della briglia è risultato quasi sempre completamente riempito.



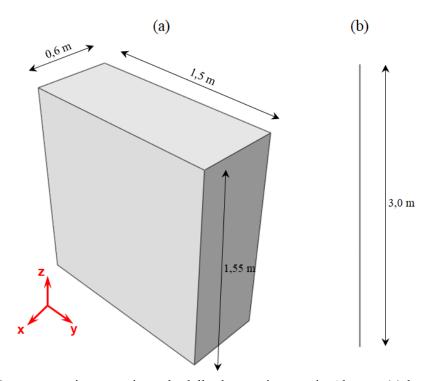
**Figura 7.7:** Confronto delle altezze raggiunte dal deposito granulare al termine di ciascun caso di analisi, per differenti valori del diametro D.

## 7.2 Modellazione FEM dell'interazione

La modellazione FEM della briglia a pettine è stata realizzata tramite il codice Abaqus/CAE mentre l'analisi è stata eseguita tramite il codice Abaqus/explicit secondo quanto descritto nel capitolo 5. In tale contesto viene ripreso ed approfondito l'iter necessario alla creazione del modello, già descritto in maniera generale nel paragrafo 5.1, applicato alla modellazione della briglia.

#### 7.2.1 Part module

Il primo passo consiste nella creazione delle diverse parti che compongono il modello, in uno spazio di modellazione tridimensionale. Nel caso della briglia sono state modellate due parti distinte: il basamento in calcestruzzo armato, modellato come un corpo solido deformabile, ottenuto per estrusione, e il profilato in acciaio IPE 270, modellato come un elemento filo deformabile (wire). La geometria del basamento riproduce fedelmente la geometria della briglia di Saint Vincent prima del crollo strutturale del luglio 2014, ossia con un'altezza pari a 1,55 m e uno spessore pari a 0,60 m. Per quanto riguarda la larghezza, si è modellata una porzione pari a 1,5 m come la dimensione della barriera modellata nel DEM. La parte rappresentante il profilato IPE è invece caratterizzata da una lunghezza pari a 3 m (figura 7.8).



**Figura 7.8:** Rappresentazione non in scala delle due parti create in Abaqus; (a) basamento in calcestruzzo armato; (b) asta rappresentante il profilato d'acciaio.

## 7.2.2 Property module

Questo modulo, successivo alla creazione delle parti, è dedicato principalmente alla definizione delle proprietà dei differenti materiali costituenti il modello. In questo caso sono state utilizzate leggi costitutive elastiche sia per il calcestruzzo che per l'acciaio; le proprietà meccaniche e di smorzamento sono riportate nella tabella 7.2.

| Tabella 7.2: | Proprietà d  | dei materiali   | utilizzati nel | modello FEM.     |
|--------------|--------------|-----------------|----------------|------------------|
| rabena /.2.  | I IODIICia i | uci illatellali | uniizzan nei   | IIIOGCIIO I LIVI |

| Materiale                             | Calcestruzzo       | Acciaio              |
|---------------------------------------|--------------------|----------------------|
| Densità (kg/m³)                       | 2500               | 7850                 |
| Modulo di Young E (N/m <sup>2</sup> ) | $3,0\times10^{10}$ | $2,1\times10^{11}$   |
| Coefficiente di Poisson v (-)         | 0,15               | 0,3                  |
| Fattore di smorzamento $\alpha$       | 2,5 e 100          | 2,5 e 100            |
| Fattore di smorzamento β              | $1,0\times10^{-8}$ | 1,0×10 <sup>-8</sup> |

Definite le proprietà dei materiali, queste vengono attribuite tramite la creazione di sezioni da assegnare alle relative parti del modello. Per quanto riguarda il basamento in calcestruzzo si è attribuita una sezione solida omogenea. Per la sezione dell'asta del profilato è invece necessario definire un profilo, ossia la sua sezione trasversale, mentre nel caso del basamento le dimensioni sono state impostate durante la creazione della parte.

La sezione assegnata all'asta è quella del profilato IPE 270 attraverso la finestra di dialogo riportata in figura 7.9, in cui sono inserite le dimensioni in metri del profilato d'acciaio utilizzato a Saint Vincent.

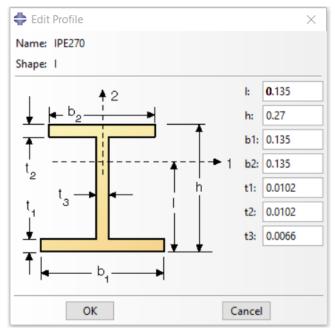


Figura 7.9: Finestra di dialogo di Abaqus per l'assegnazione del profilo di una sezione.

Una precisazione dev'essere fatta per quanto riguarda i fattori di smorzamento utilizzati per caratterizzare i materiali. Mentre infatti gli altri parametri sono valori medi tipici dei materiali considerati, più complicata è l'individuazione dei parametri ottimali di smorzamento di Rayleigh.

Una stima iniziale è stata realizzata tramite l'utilizzo delle formulazioni (5.18) che richiedono la conoscenza di due frequenze naturali o proprie della struttura e i due valori di smorzamento corrispondenti. Per tale motivo, è stata realizzata preventivamente un'analisi modale della struttura tramite il codice Abaqus/Standard che ha fornito le frequenze naturali relative ai primi 5 modi di vibrare, riportate in tabella 7.3.

**Tabella 7.3:** Risultati derivanti dall'analisi modale della struttura eseguita con Abaqus/Standard; in rosso sono indicati i valori utilizzati per la valutazione.

| Modo di vibrare | Frequenza f [Hz] | Pulsazione ω [Hz] |
|-----------------|------------------|-------------------|
| 1° modo         | 18,08            | 113,60            |
| 2° modo         | 22,19            | 139,42            |
| 3° modo         | 54,20            | 340,55            |
| 4° modo         | 76,74            | 482,17            |
| 5° modo         | 90,16            | 566,49            |

Utilizzando i valori relativi ai primi due modi di vibrare evidenziati in rosso, ossia i più importanti in termini di partecipazione della struttura, assieme ad un valore di smorzamento costante  $\xi$  pari al 2% rappresentativo per strutture in acciaio, si sono ricavati tramite le equazioni (5.18) i fattori di smorzamento  $\alpha = 2.5$  e  $\beta = 1.58 \times 10^{-4}$ .

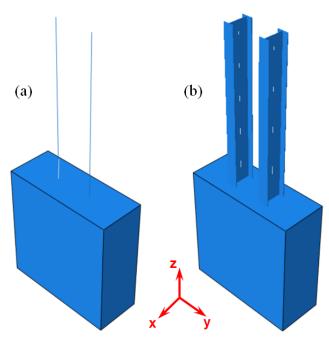
Tuttavia, per considerazioni numeriche, è necessario utilizzare un fattore  $\beta$  minore o al limite dello stesso ordine di grandezza del limite di incremento stabile valutato in assenza di smorzamento; nel caso in esame tale valore è pari a circa  $3.1\times10^{-6}$ . Inoltre Abaqus suggerisce di utilizzare gli stessi valori per tutti i materiali modellati. Per tali ragioni si è utilizzato, in combinazione con  $\alpha = 2.5$  un valore di  $\beta$  pari a  $1.0\times10^{-8}$  (Abaqus analysis user's guide vol. II).

Successivamente le stesse analisi sono state ripetute con un fattore  $\alpha=100$  mantenendo costante il valore di  $\beta$ ; questa scelta è stata dettata da un'eccessiva oscillazione dei profilati in acciaio poco realistica, visualizzata nei risultati ottenuti. Per questo motivo, sono stati provati valori più elevati del fattore  $\alpha$  allo scopo di ridurre questa eccessiva oscillazione dei risultati; con un valore pari a 100 si è osservata una risposta più realistica con i picchi di sollecitazione comunque poco ridotti rispetto alla situazione precedente. Questo comportamento può essere giustificato dall'effetto della colata detritica a monte che smorza notevolmente il comportamento oscillatorio dei profilati, che non sono liberi di oscillare attorno alla posizione di equilibrio, proprio per la presenza del materiale che arriva a tergo dell'opera e ne contrasta il movimento.

Nel sotto-paragrafo 7.3 ove non diversamente specificato, sono riportati i risultati corrispondenti alle analisi caratterizzate da  $\alpha = 100$  e  $\beta = 1.0 \times 10^{-8}$ .

## 7.2.3 Assembly module

In questo modulo dell'iter procedurale di modellazione è necessario creare il modello nella sua interezza tramite l'assemblaggio delle parti create in precedenza. In particolare, l'asta rappresentante il profilato è stata duplicata al fine di modellare i due profilati centrali del modello DEM. Successivamente è stata realizzata una partizione delle aste ad un metro di altezza per poterle inserire per tale lunghezza all'interno del basamento in calcestruzzo. In figura 7.10 si riporta la visualizzazione del modello assemblato così realizzato.



**Figura 7.10:** Modello assemblato della briglia filtrante a pettine; (a) assemblaggio con i profilati visualizzati come "fili"; (b) profilati visualizzati con la sezione IPE assegnata.

## 7.2.4 Step module

In questo modulo vengono definiti gli step dell'analisi ovvero le varie fasi in cui viene a trovarsi il modello con dei possibili cambiamenti. In questo caso, è utilizzato per modellare le tre differenti ondate della colata definite in precedenza caso 1, caso 2 e caso 3. Viene così eseguita un'unica analisi della risposta strutturale in cui ciascuna fase risulta collegata alla precedente. In particolare vengono definiti quattro step, di cui quello iniziale rappresenta il modello scarico con l'applicazione delle sole condizioni di vincolo, propagate poi durante l'analisi agli step successivi. Nei tre step successivi, il modello non subisce variazioni nella sua configurazione geometrica, bensì varia la sua condizione di carico sulla base dei risultati ricavati dalle analisi DEM, per le tre configurazioni di carico.

Un passaggio molto importante di questo modulo consiste nella definizione della durata di ciascuno step e la definizione delle richieste da visualizzare come risultati al termine dell'analisi.

La durata relativa di ciascuno step, da cui dipende chiaramente la durata complessiva della simulazione, è definita in base ad un confronto con l'evoluzione del fenomeno visibile dall'analisi DEM; quindi viene valutata una durata in base al tempo di raggiungimento dell'arresto completo del flusso granulare al quale vengono aggiunti circa due secondi per collegare la condizione statica raggiunta allo step successivo.

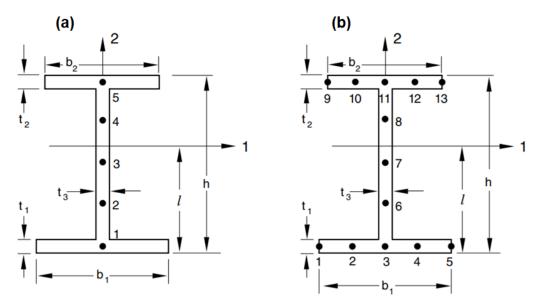
Per quanto riguarda invece le richieste da visualizzare, da definire singolarmente per ciascuno step, si sono selezionate le seguenti caratteristiche:

- tensioni S: componenti delle tensioni e invarianti;
- deformazioni NE: componenti di deformazione nominali;
- spostamenti U: traslazioni e rotazioni;
- reazioni vincolari RF: forze di reazione e momenti di reazione;
- caratteristiche di sollecitazione SF (section forces): forze e momenti agenti sulle sezioni del profilato.

E' inoltre necessario definire soprattutto per le deformazioni, i punti della sezione nei quali si vuole visualizzare il risultato. Come è visibile in figura 7.11, Abaqus è in grado di integrare la soluzione in un dato numero di punti (5 nel caso di travi nel piano e 13 nello spazio); nel caso di trave nello spazio, come nel modello creato, di default vengono restituiti i valori nei quattro punti estremi della sezione, ossia i punti 1,5,9 e 13.

Siccome un obiettivo della tesi è di confrontare il risultato ottenuto dalla risposta strutturale del modello con i dati sperimentali registrati dal sistema di monitoraggio, viene aggiunto il punto 10 della sezione, ossia un punto al centro dell'ala posizionata verso valle rispetto alla direzione del flusso, in cui è applicato lo strumento di misura.

Infine è necessario definire la risoluzione dei risultati suddividendo la durata di ciascuno step in un numero determinato di intervalli temporali equi spaziati. Tale valore, variabile in funzione della durata di ciascuno step, è stato impostato in modo da ottenere una risoluzione di 0,05 s.



**Figura 7.11:** Schema di sezione a I con indicazione dei punti di integrazione; (a) trave nel piano; (b) trave nello spazio (Abaqus analysis user's guide vol. IV).

#### 7.2.5 Interaction module

Successivamente è necessario definire le proprietà dell'interazione tra la varie parti del modello assemblato. Nella realizzazione del modello questo modulo è stato utilizzato allo scopo di definire il grado di vincolo esercitato dal basamento in calcestruzzo nei confronti dei due profilati in acciaio inseriti al suo interno.

In particolare è stato utilizzato un vincolo definito "embedded region" letteralmente regione incorporata; tale vincolo interno è usato per specificare un elemento o un gruppo di elementi che sono incorporati in una regione di elementi contenitore "host", la cui risposta viene utilizzata per vincolare i gradi di libertà di traslazione dei nodi incorporati (figura 7.12). Può essere usato per modellare un insieme di membrane rinforzate con armature di rinforzo, gusci o elementi di superficie che giacciono incorporati in un insieme di elementi tridimensionali (continuum) solidi; una serie di elementi a traliccio o trave che giacciono incorporati in un insieme di elementi solidi; o un insieme di elementi solidi che giacciono incorporati in un altro insieme di elementi solidi; non vincola tuttavia i gradi di libertà rotazionali dei nodi incorporati quando elementi "shell" o "beam" sono incorporati in elementi solidi (Abaqus analysis user's guide vol. V).

In figura 7.12 è possibile osservare la regione contenitore evidenziata da un contorno viola e gli elementi incorporati in colore rosso, ossia la partizione delle aste che sono inserite all'interno del basamento.

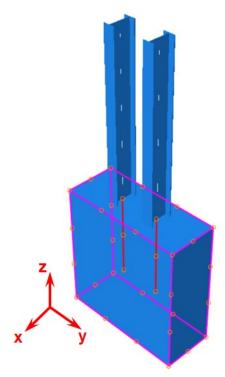


Figura 7.12: Rappresentazione del vincolo interno "embedded region".

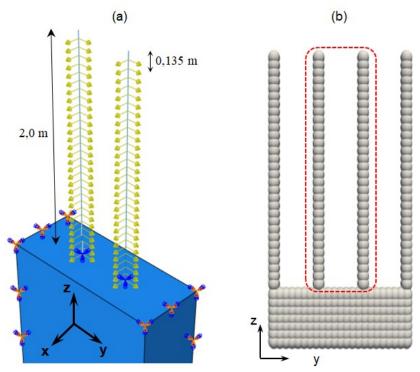
#### 7.2.6 Load module

Questo modulo è di importanza fondamentale per la creazione della storia di carico agente sulla struttura e le condizioni al contorno, ovvero i vincoli esterni.

Nel modello della briglia, i carichi derivanti dalla colata detritica ed in particolare dai risultati delle analisi DEM, sono inseriti come forze concentrate applicate in corrispondenza di punti precisi sulle aste dei profilati. Infatti lo scopo principale di questa tesi e quello di valutare la risposta dei profilati, piuttosto che la risposta complessiva della briglia nella sua interezza; per tale motivo non viene applicata nessuna pressione a livello del basamento.

La struttura rigida a pettine modellata attraverso il DEM, con riferimento alle due aste centrali, può essere vista come una successione di sensori che registrano la storia di carico in quello specifico punto. Infatti come precedentemente descritto, dall'analisi DEM si ricavano le storie temporali delle forze agenti in direzione x e y ( $F_x$  e  $F_y$ ) per ciascuna delle 60 particelle che formano le due aste centrali. Si tratta dunque di inserire in Abaqus 120 storie di carico per ciascuna analisi DEM effettuata, ovvero 360 segnali per ciascuna analisi FEM.

Siccome tali forze concentrate sono registrate da ciascuna particella che viene assimilata ad un sensore, nel modello FEM sono applicate con passo pari a D/2, ossia nel centro di ciascuna particella del modello DEM. (figura 7.13).



**Figura 7.13:** Schema non in scala dell'accoppiamento DEM-FEM dell'interazione; (a) applicazione delle forze concentrate sui profilati; (b) modello DEM della barriera con evidenziate le aste centrali.

Per quanto riguarda le condizioni al contorno, è stato applicato un vincolo di incastro alla base inferiore del basamento in calcestruzzo fondato nel terreno e alle sue facce laterali; inoltre è stato attribuito un vincolo di impedimento alla rotazione delle aste, nel tratto in cui sono inserite nel basamento, siccome l'interazione definita attraverso la regione incorporata "embedded region" non è in grado di bloccare tale movimento, chiaramente impedito dalla presenza del calcestruzzo.

#### 7.2.7 Mesh module

La creazione della mesh, ossia della maglia di elementi finiti nei cui nodi vengono risolte le equazioni governanti il problema, è un punto cruciale per una corretta simulazione FEM. Nel modello realizzato sono stati utilizzati due differenti tipologie di elemento per il basamento in calcestruzzo e per i profilati in acciaio. Per il primo sono stati usati elementi C3D8R ossia degli elementi brick, di tipo solido, continuo con 8 nodi, aventi una forma cubica di lato 0,05 m. Le aste sono invece discretizzate tramite elementi B31 ossia degli elementi di tipo beam, lineari aventi una lunghezza di 0,0675 m, dimensione pari a mezzo diametro delle particelle DEM della briglia, per poter assegnare correttamente le forze nei nodi desiderati. Nella figura 7.14 è rappresentato il modello con la mesh assegnata, visibile con chiarezza solamente per gli elementi brick tridimensionali del basamento, ma presente anche nei profilati che assumono una colorazione differente.

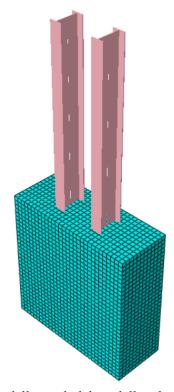


Figura 7.14: Visualizzazione della mesh del modello e la sua discretizzazione in elementi.

#### 7.2.8 Job module

Infine attraverso quest'ultimo modulo si crea il lavoro da svolgere, ossia le impostazioni generali con cui si intende effettuare l'analisi per ottimizzare il processo. In particolare sono state lasciate le impostazioni di default.

Una volta lanciata l'analisi dinamica esplicita, è possibile monitorare il procedimento e vedere alcune informazioni riguardanti l'evoluzione dell'analisi, tra cui lo step, il numero di incremento, il tempo raggiunto, l'energia cinetica e ulteriori informazioni.

## 7.3 Risultati della modellazione FEM

La risposta strutturale è focalizzata sull'analisi dei profilati in acciaio; riassumendo, sono state eseguite tre differenti analisi caratterizzate da diametro medio della colata D pari a 0,165 m, 0,2 m e 0,25 m in ognuna delle quali sono individuabili tre step, derivanti dall'azione di tre ondate successive del flusso granulare. Nel seguito si riportano le variabili ritenute più significative con riferimento a ciascuna delle tre analisi effettuate.

#### 7.3.1 Risultati dell'analisi con i/D = 3

Questa analisi è caratterizzata da una durata complessiva di 48 s composta dalle durate parziali dei tre step, pari a 20 s per il caso 1 e 14 s per il caso 2 e 3. In figura 7.15 sono riportate le deformazioni in alcuni istanti temporali caratteristici della simulazione.

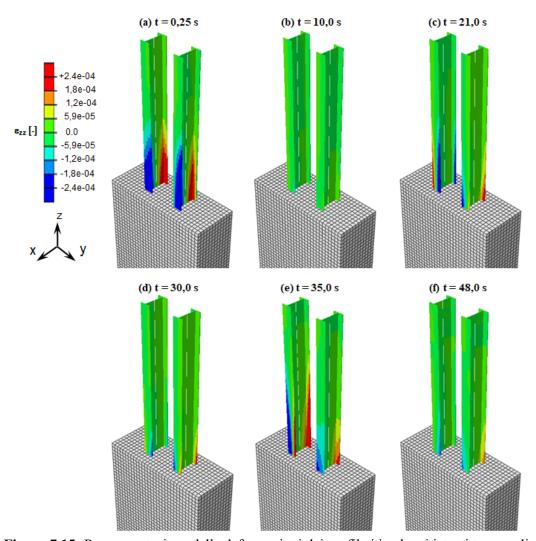
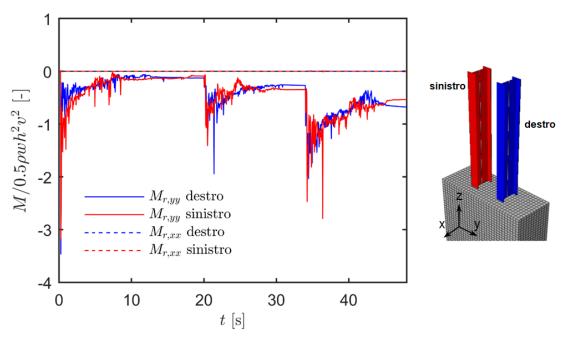


Figura 7.15: Rappresentazione delle deformazioni dei profilati in alcuni istanti temporali.

Le deformazioni sono visualizzate sulla struttura deformata amplificata di 2,5 volte rispetto alla deformazione reale. Sono stati selezionati due istanti per ciascuno step dell'analisi, ossia per ciascuna ondata successiva del flusso granulare. Il primo istante (a) è immediatamente successivo all'impatto con la colata, per cui è possibile osservare come i profilati siano prevalentemente compressi nell'ala rivolta verso valle e tesi verso monte, a fronte proprio dell'azione impulsiva esercitata prevalentemente in direzione ortogonale alla barriera. L'istante successivo (b) è relativo al raggiungimento della condizione statica della prima ondata, come è possibile osservare anche nei grafici successivi. Gli istanti (c) e (d) si riferiscono al secondo step e sono rispettivamente subito dopo l'azione impulsiva della seconda ondata e nella condizione statica al termine dello step; considerazioni analoghe sono state fatte per la terza ed ultima ondata, ovvero quella relativa alla tracimazione della barriera da parte del flusso.

Si osserva inoltre come in alcuni istanti, il flusso tende a chiudere i profilati uno verso l'altro come in (c), in cui le fibre compresse e le fibre tese delle due sezioni dei profilati sono rivolte rispettivamente verso l'interno e verso l'esterno, con riferimento all'asse di simmetria del modello. In altri istanti prevale invece una azione divaricatrice, che tende ad allontanare i due profilati, con zone tese all'interno e compresse all'esterno; nell'istante (e) è possibile notare tale effetto sul profilato sinistro, mentre il destro tende a piegarsi verso l'interno. Durante la simulazione non sono infatti rari, istanti misti in cui non vi è una convergenza o divergenza di entrambi i profilati ma un comportamento misto, come quest'ultimo.

Come già notato dall'analisi DEM, le forze trasversali F<sub>y</sub> non sono trascurabili, infatti a meno del primo istante di impatto e delle condizioni di equilibrio al termine di ciascuna ondata, in cui prevalgono azioni ortogonali, negli altri istanti tali azioni governano e regolano lo stato deformativo e tensionale dei profilati.



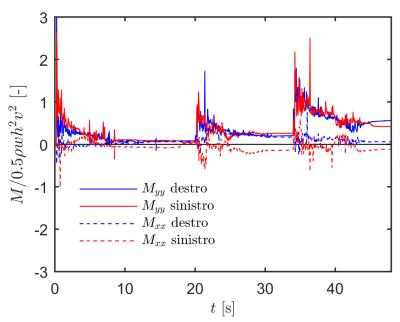
**Figura 7.16:** Evoluzione del momento di reazione all'incastro del profilato sinistro e destro, evidenziati rispettivamente in rosso e blu.

In figura 7.16 è rappresentato l'andamento delle reazioni di momento flettente agenti all'incastro del profilati, ossia a livello della soglia di calcestruzzo, a circa un metro di lunghezza della trave. Al di sotto di tale zona di piccola estensione, non sono presenti tensioni e deformazioni significativi. Lo stesso basamento in calcestruzzo è soggetto a tensioni concentrate nelle facce esterne di incastro che scaricano le azioni del flusso e soprattutto nei punti di inserimento dei profilati sulla faccia superiore, proseguendo all'interno del basamento per un tratto ristretto.

Il momento è reso adimensionale tramite il rapporto

$$\frac{M}{\rho h^2 w v^2} \tag{7.6}$$

allo scopo di confrontare le intensità in modulo ricavate dalle tre differenti analisi. Dalla figura 7.16 si osserva come, per entrambi i profilati, evidenziati con due differenti colori, rosso per il profilato sinistro e blu per il destro (convenzione mantenuta per tutti i risultati), le reazioni di momento si oppongono all'azione ortogonale del flusso, agendo attorno all'asse y, mentre invece i momenti agenti attorno all'asse x sono praticamente nulli per tutta la simulazione. Tuttavia i momenti sollecitanti  $M_{xx}$ , valutati ad una altezza di circa 15 cm dalla soglia di calcestruzzo, ossia circa nel punto di applicazione della strumentazione di monitoraggio, non sono nulli e subiscono variazioni di segno come mostrato in figura 7.17.



**Figura 7.17:** Andamento temporale dei momenti flettenti agenti sui profilati circa nel punto di applicazione del monitoraggio.

Tale risultato mette in evidenza le considerazioni fatte in precedenza, sull'azione di divaricazione o di chiusura del flusso granulare sui profilati di acciaio. Per completezza si riportano nella figura 7.18 le sollecitazioni di taglio e in figura 7.19 le deformazioni as-

siali nel punto 10 della sezione, con riferimento alla figura 7.11 (b), entrambe valutate a circa 15 cm di altezza dal basamento. Nel primo caso, come per le reazioni di momento, le forze di taglio agenti nella direzione trasversale sono trascurabili rispetto al taglio agente nella direzione del flusso. Per quanto riguarda le deformazioni viene messo in risalto l'alternanza di trazione e compressione che si verifica durante la simulazione.

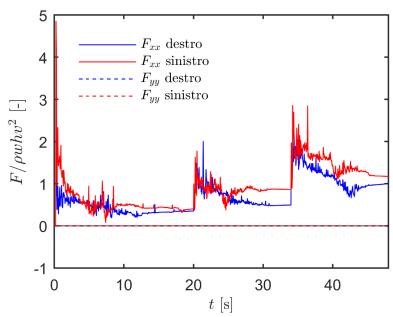


Figura 7.18: Andamento temporale del taglio sollecitante nella sezione di interesse.

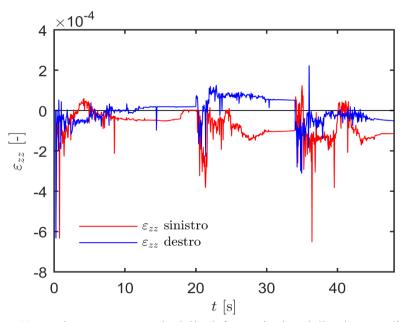
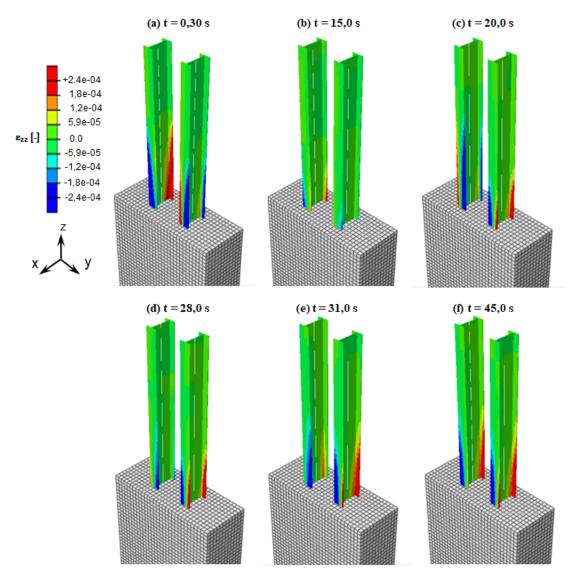


Figura 7.19: Andamento temporale delle deformazioni assiali nel punto di interesse.

## 7.3.2 Risultati dell'analisi con i/D = 2,5

Questa analisi è caratterizzata da una durata complessiva di 45 s composta dalle durate parziali di 19 s per il caso 1, 10 s per il caso 2 e 16 s per il caso 3. Si riportano nel seguito i risultati dell'analisi secondo l'ordine utilizzato nell'analisi precedente.



**Figura 7.20:** Rappresentazione delle deformazioni dei profilati in alcuni istanti temporali rappresentativi, amplificate di un fattore 2,5.

Anche in questo caso, gli istanti temporali di figura 7.20 si riferiscono ad un istante prossimo all'impulso di un'ondata del flusso e al raggiungimento della condizione statica di equilibrio. Negli istanti riportati si osservano sia azioni di chiusura dei profilati l'uno verso l'altro negli instanti (c), (d) ed (e), sia di divaricazione e allontanamento negli istanti (a) e (b). nell'istante (f) ossia l'ultimo della simulazione al raggiungimento

della configurazione stabile finale, si osserva una configurazione mista con entrambi i profilati compressi sullo stesso lato. Nelle figure 7.21 e 7.22 sono riportati i momenti reagenti all'incastro e i momenti flettenti nella posizione monitorata.

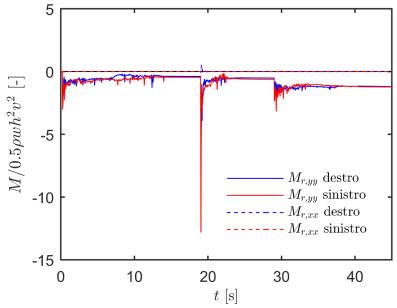


Figura 7.21: Andamento temporale dei momenti reagenti nella sezione di incastro.

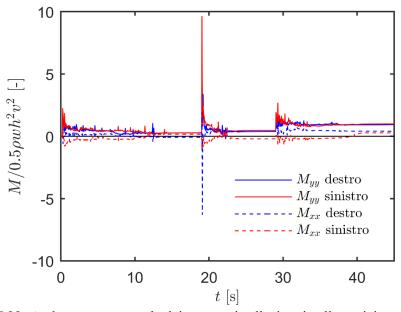
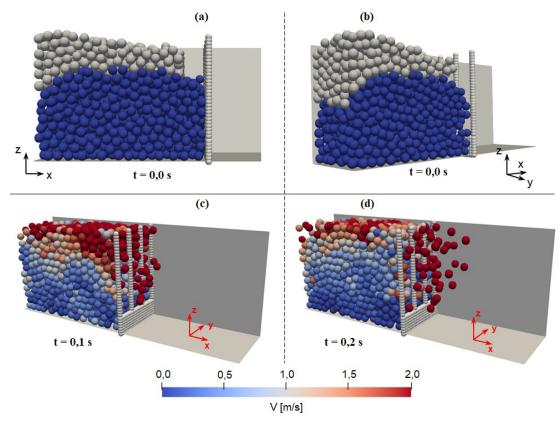


Figura 7.22: Andamento temporale dei momenti sollecitanti nella posizione monitorata.

E' evidente un picco centrale molto pronunciato a fronte dell'impatto della seconda ondata del flusso granulare. Tale picco non presente nella simulazione precedente può essere spiegato dall'osservazione della simulazione DEM e la sua configurazione spaziale. Infatti, in tale configurazione denominata caso 2, le particelle della seconda ondata vengono fatte sedimentare sul deposito a monte della barriera derivante dalla prima ondata. Nel caso specifico dell'analisi con D=0,2 la sedimentazione genera un cumulo di particelle retrostanti parte del flusso già sedimentato causandone la riattivazione (figura 7.23).



**Figura 7.23:** Rappresentazione del fenomeno di riattivazione del cumulo di deposito; (a) e (b) particolari della sedimentazione del secondo strato di particelle che causa la riattivazione del deposito sottostante; (c) e (d) istanti successivi in cui avviene la riattivazione.

Questo comportamento di riattivazione di una parte del cumulo non è riscontrato nelle altre analisi, per cui questa massa esercita un'azione impulsiva maggiore rispetto agli altri casi. Tale impulso risulta addirittura superiore a quello della prima ondata, in cui il volume di materiale granulare coinvolto è maggiore; probabilmente ciò è dovuto al contatto già presente tra la massa depositata riattivata e la barriera.

Si tratta di un fenomeno poco probabile nel caso di colate detritiche reali, per cui è poco rappresentativo essendo causato dalla diposizione casuale delle particelle a fine sedimentazione e dalla sfericità dei grani, per la quale a fronte di una piccola perturbazione si verifica il movimento, mentre nella realtà sono fortemente irregolari. Inoltre tale picco è rilevato principalmente da un'unica asta, la sinistra, frutto proprio delle considerazioni riguardanti la disposizione geometrica delle particelle.

Nelle figure 7.24 e 7.25 sono riportati i grafici delle forze di taglio agenti nella sezione considerata e le deformazioni assiali nel punto di applicazione del monitoraggio.

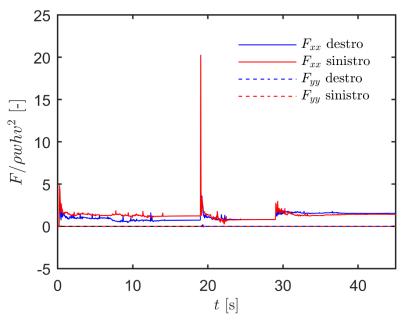


Figura 7.24: Andamento temporale del taglio sollecitante nella sezione di interesse.

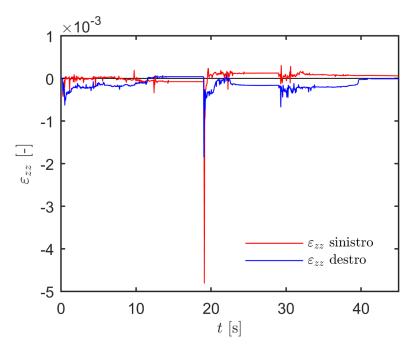


Figura 7.25: Andamento temporale delle deformazioni assiali nel punto di interesse.

Tralasciando il valore poco significativo del picco, i valori registrati sono di intensità simili a quelli ricavati nella simulazione precedente.

### 7.3.3 Risultati dell'analisi con i/D = 2

Questa terza ed ultima analisi è caratterizzata da una durata complessiva di 33 s composta dalle durate parziali di 10 s per il caso 1, 12 s per il caso 2 e 11 s per il caso 3. In figura 7.26 si riportano le deformazioni dei profilati con fattore di amplificazione di 2,5.

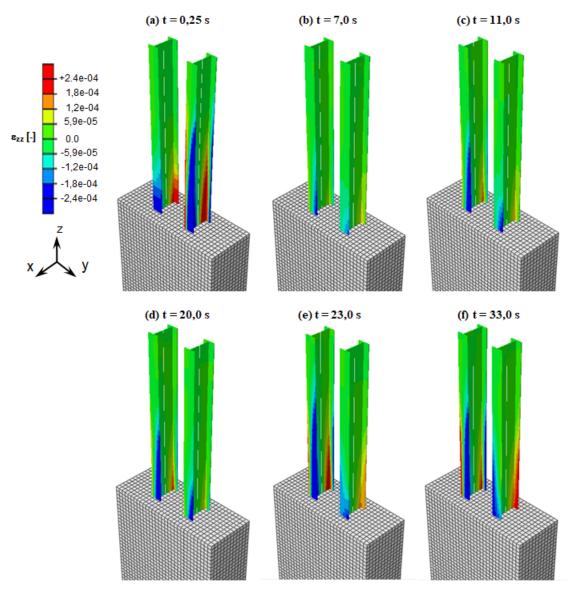


Figura 7.26: Rappresentazione delle deformazioni dei profilati in alcuni istanti temporali rappresentativi.

Anche in questo caso la risposta dei profilati d'acciaio al flusso granulare vede le flange a valle prevalentemente compresse, ma che vanno in trazione in alcuni istanti o fasi temporali, a seconda che il flusso tenda ad aprire o chiudere i profilati. Tale comportamento risulta ancora più evidente osservando l'alternanza di segno dei momenti sollecitanti  $M_{xx}$  (figura 7.28), mentre invece i momenti reagenti  $M_{r,xx}$  nella sezione di incastro risultano trascurabili come nelle analisi precedenti (figura 7.27).

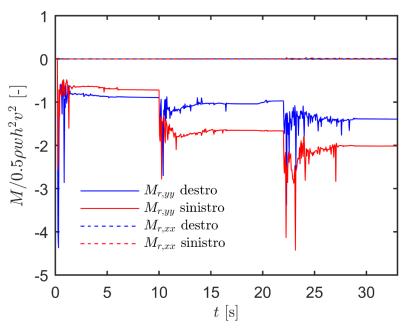


Figura 7.27: Andamento temporale dei momenti reagenti nella sezione di incastro.

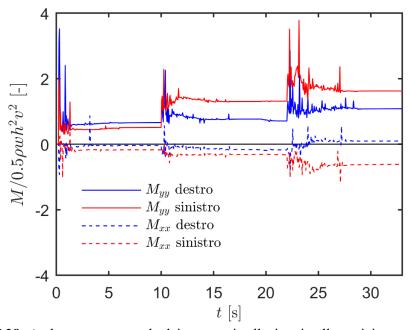


Figura 7.28: Andamento temporale dei momenti sollecitanti nella posizione monitorata.

Infine si riportano i tagli sollecitanti in figura 7.29, mentre in figura 7.30 si riporta il grafico delle deformazioni assiali nella posizione strumentata, che tuttavia non eviden-

zia situazioni particolarmente rilevanti di trazione, se non istantaneamente attraverso alcuni picchi discreti.

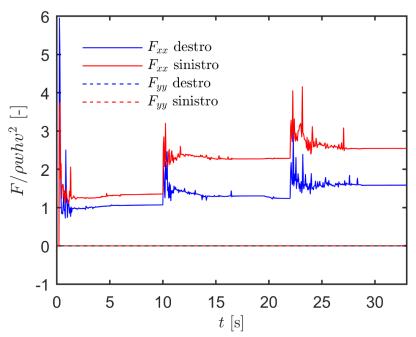


Figura 7.29: Andamento temporale del taglio sollecitante nella sezione di interesse.

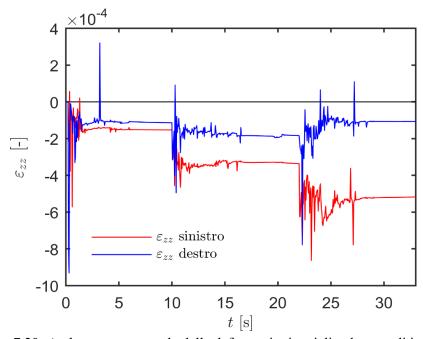
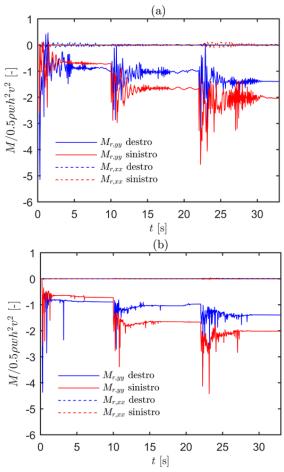


Figura 7.30: Andamento temporale delle deformazioni assiali nel punto di interesse.

Per completezza, per quest'ultima analisi si riporta in figura 7.31 il risultato di momento flettente resistente risultante dalla stessa analisi eseguita con fattore di smorzamento  $\alpha$  pari a 2,5 e l'influenza del tempo di risoluzione del segnale sull'accuratezza.



**Figura 7.31:** Confronto dei risultati di momento reagente all'incastro; (a) fattore di smorzamento  $\alpha = 2.5$ ; (b) tempo di risoluzione  $\Delta t_{out} = 0.025$  s.

Come si può osservare, rispetto al caso precedente con  $\alpha=100$  la risposta risulta essere molto più oscillante, comportamento poco probabile per effetto della presenza del materiale granulare depositato, che limita il movimento dei profilati; per quanto riguarda l'intensità, si osserva come lo smorzamento maggiore agisce prevalentemente sulla frequenza di oscillazione del segnale, smorzando solo lievemente i picchi dei maggiore intensità. La risposta ricavata invece con un tempo di risoluzione pari a 0,025 s, ossia metà del tempo precedente, è utile per vedere l'influenza del tempo di campionamento sull'accuratezza del segnale ottenuto. Si osserva come la risposta risulti molto simile a quella ricavata in precedenza, per cui si ritiene appropriata la scelta effettuata di utilizzare un tempo  $\Delta t_{out}=0,05$  s per la valutazione della risposta.

L'utilizzo di un tempo di campionamento eccessivamente ridotto, comporta infatti un notevole incremento della durata di analisi oltre ad un enorme quantitativo di valori numerici difficili da gestire.

## 7.3.4 Confronto con i risultati sperimentali

In questo ultimo sotto-paragrafo si vuole effettuare un confronto, seppur qualitativo, con le misurazioni di deformazione ricavate dal sistema di monitoraggio posto sui pettini della briglia a Saint Vincent (AO). In particolare si cerca di valutare l'ordine di grandezza delle due storie temporali di deformazione, siccome non vi è ragione per cui debbano essere uguali. Le simulazioni infatti sono state realizzate seguendo le combinazioni suggerite dalle linee guida austriache, così come i principali parametri selezionati dal DEM dipendono da considerazioni numeriche. Tuttavia sono in grado di spiegare le situazioni di trazione registrate in sito e inattese pensando solamente ad una azione ortogonale del flusso.

In figura 7.32 si riportano le storie di deformazione rilevate dagli estensimetri, numerati da 1 a 20, relative ad un evento di colata detritica.

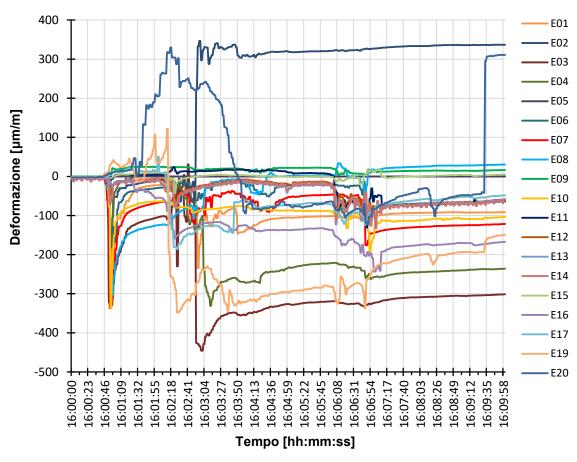


Figura 7.32: Storie di deformazione sperimentali durante una colata detritica a Saint Vincent.

Risulta evidente come alcuni estensimetri misurino durante l'evento delle elevate deformazioni di trazione, addirittura quasi dello stesso valore di quelle registrate in compressione (E02, E20) mentre alcuni rimangono in trazione anche al termine dell'evento, al raggiungimento della condizione statica (E08, E09, E15).

La durata dell'evento monitorato dal Politecnico di Torino attraverso il sistema di estensimetri ha una durata complessiva 9 minuti e 58 s per cui, per poter confrontare questi segnali con quelli ottenuti numericamente è necessario rendere adimensionale l'asse dei tempi; per fare ciò si utilizza il rapporto (7.5) già adottato in questo capitolo.

In figura 7.33 è riportato un confronto tra la registrazione di tre estensimetri campione, E01 posizionato su un profilato di estremo, E09 e E10 posizionati alla base di profilati centrali, con i risultati dell'analisi numerica con D = 0,2 m, analisi intermedia tra quelle effettuate. Siccome le durate sono fortemente differenti, così come la risoluzione del segnale pari a 0,05 s per l'analisi numerica e 1 s per la registrazione in sito, il confronto è puramente qualitativo. Si è per tale ragione indicato con linea continua i risultati numerici mentre con punti discreti i risultati sperimentali, non conoscendo la loro variazione nell'intervallo. Il grafico fa riferimento alla prima ondata, ossia il caso 1 prima del raggiungimento del secondo picco. Per quanto riguarda i risultati sperimentali, si riporta invece l'intervallo temporale compreso tra 16:00:55 e 16:01:16 ovvero a cavallo del primo picco di ondata, per una durata di 20 s.

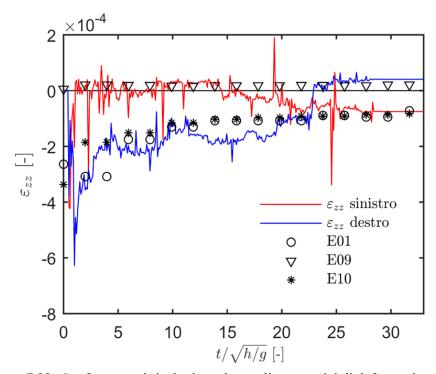


Figura 7.33: Confronto tra i risultati sperimentali e numerici di deformazione assiale.

Si osserva un'ottima corrispondenza dei risultati, per cui le iniziali perplessità riguardo la registrazione di deformazioni di trazione sulle flange a valle sono spiegabili a fronte dell'azione trasversale esercitata dal flusso sui profilati, causandone sollecitazioni di flessione biassiale. Tuttavia si è poco sicuri delle misurazioni effettuate dalla strumentazione durante la fase dinamica della colata detritica a causa della complessità e del forte comportamento caotico del fenomeno. A tal scopo si sono confrontati i risultati relativi alla fase finale, cioè al raggiungimento della condizione statica, più ragionevolmente corretta (figura 7.34).

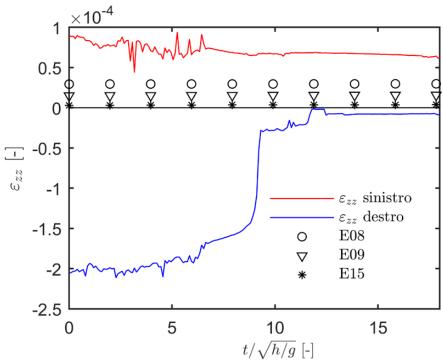


Figura 7.34: Confronto tra i risultati numerici e sperimentali di deformazione, nella fase finale.

In particolare si sono confrontati i risultati DEM dell'analisi D = 0,2 m con tre estensimetri di cui due in posizione centrale (E08, E09; E15). Sono pochi gli estensimetri che al termine della colata sono in una situazione di trazione, infatti, escludendo l'estensimetro E20 in posizione più elevata rispetto agli altri, sono solamente quattro.

Anche nelle analisi numeriche si è riscontrato un unico caso caratterizzato da una trazione nella condizione di equilibrio, si tratta in particolare del profilato sinistro come riportato in figura 7.34.

Tale situazione è infatti particolare e difficilmente spiegabile senza opportune analisi numeriche, siccome a deposizione avvenuta la configurazione spaziale prevede un cumulo di detriti spingente in direzione ortogonale, causando una compressione delle flange a valle. Tuttavia tale situazione, registrata sperimentalmente è stata osservata anche nelle analisi numeriche. Inoltre il rapporto tra estensimetri in trazione rispetto al totale è circa lo stesso delle simulazioni numeriche; nel primo caso, trascurando i due estensimetri in posizione sopraelevata B, si ottiene 4/18 estensimetri in trazione. Per quanto riguarda le analisi numeriche, considerando due profilati per simulazione si ottiene 1/6. Se poi si considera che l'estensimetro E15 è praticamente indeformato, il rapporto è lo stesso per entrambi i casi. Per quanto riguarda le intensità, anche in questo caso l'ordine di grandezza è circa lo stesso.

# Capitolo 8

# Verifiche strutturali dei profilati

In questo capitolo per dare un riscontro pratico alla presente tesi e per confrontare le combinazioni austriache con i risultati delle analisi numeriche, si vuole verificare tramite la normativa vigente in ambito italiano, ossia le norme tecniche per le costruzioni del 2018 (NTC2018) la resistenza strutturale dei profilati d'acciaio.

L'obiettivo principale del presente capitolo risulta quindi quello di effettuare le verifiche a stato limite ultimo STR dei profilati in acciaio che formano il pettine della briglia, soggetti alle sollecitazioni derivanti dalle combinazioni austriache e dalle analisi numeriche DEM-FEM. Nel paragrafo 8.1 vengono riportati i richiami alla normativa tecnica necessari per effettuare le verifiche strutturali che vengono riportate nel paragrafo 8.2. Infine nel paragrafo 8.3 viene realizzato un confronto tra i risultati ottenuti delle verifiche, con riguardo particolare verso i due differenti approcci seguiti per la determinazione delle sollecitazioni di progetto.

## 8.1 Richiami sulla normativa italiana (NTC2018)

Con riferimento alle norme tecniche delle costruzioni 2018, in particolar modo al capitolo 6 dedicato alla progettazione geotecnica e il capitolo 4 riguardante le costruzioni civili ed industriali, con riferimento specifico al paragrafo 4.2 sulle costruzioni in acciaio, si riportano di seguito alcuni passi fondamentali per l'esecuzione delle verifiche strutturali dei profilati.

#### 8.1.1 Verifiche di sicurezza

Le verifiche di sicurezza e delle prestazioni di opere geotecniche come la briglia filtrante a pettine, devono essere effettuate nei confronti di una serie di stati limite ultimi e di esercizio. Con riferimento al capitolo 6 delle NTC2018, affinché la verifica risulti soddisfatta deve risultare:

$$E_{d} \le R_{d}, \tag{8.1}$$

in cui  $E_d$  è il valore di progetto dell'azione o dell'effetto dell'azione mentre  $R_d$  è il valore di progetto della resistenza del sistema geotecnico o della struttura; entrambi sono funzione delle azioni di progetto  $\gamma_F F_k$ , dei parametri geotecnici di progetto  $X_k/\gamma_M$  e dei parametri geometrici di progetto  $a_d$ , secondo le seguenti relazioni:

$$E_{d} = E\left[\gamma_{F}F_{k}; \frac{X_{k}}{\gamma_{M}}; a_{d}\right] \quad \text{oppure} \quad E_{d} = \gamma_{E} \cdot E\left[F_{k}; \frac{X_{k}}{\gamma_{M}}; a_{d}\right], \tag{8.2}$$

$$R_{d} = \frac{1}{\gamma_{R}} R \left[ \gamma_{F} F_{k}; \frac{X_{k}}{\gamma_{M}}; a_{d} \right], \tag{8.3}$$

con  $\gamma_R$  coefficiente parziale di sicurezza che opera direttamente sulla resistenza del sistema. La verifica della condizione (8.1) deve essere effettuata impiegando diverse combinazioni di gruppi di coefficienti di sicurezza parziali, rispettivamente definiti per le azioni (A1 e A2), per i parametri geotecnici (M1 e M2) e per le resistenze (R1, R2 e R3). I diversi gruppi di coefficienti di sicurezza parziali sono poi selezionati nell'ambito di due approcci progettuali differenti. Nell'approccio 1 le verifiche si eseguono con due diverse combinazioni di gruppi di coefficienti ognuna delle quali può essere critica per differenti aspetti del progetto. Nell'approccio 2 invece si impiega un'unica combinazione di gruppi di coefficienti.

Siccome la briglia è un opera di trattenuta viene assimilata alle opere di sostegno, in mancanza di una normativa tecnica di riferimento specifica; per cui secondo le indicazioni inerenti le opere di sostegno la verifica a stato limite ultimo strutturale STR deve essere condotta secondo l'approccio 2 caratterizzato dall'unica combinazione A1+M1+R3. Di seguito si riportano i valori dei coefficienti parziali di sicurezza da adottare per tale combinazione (tabelle 8.1, 8.2 e 8.3).

**Tabella 8.1:** Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni (Tab. 6.2.I delle NTC2008).

|                           | Effetto     | Coefficiente Parziale $\gamma_{\scriptscriptstyle F}$ (o $\gamma_{\scriptscriptstyle E}$ ) | EQU | (A1) | (A2) |
|---------------------------|-------------|--|-----|------|------|
| Carichi permanenti G1     | Favorevole  | $\gamma_{G1}$  | 0,9 | 1,0  | 1,0  |
|                           | Sfavorevole |  | 1,1 | 1,3  | 1,0  |
| Carichi permanenti G2 (1) | Favorevole  | $\gamma_{G2}$  | 0,8 | 0,8  | 0,8  |
|                           | Sfavorevole |  | 1,5 | 1,5  | 1,3  |
| Azioni variabili Q        | Favorevole  | $\gamma_{\mathrm{Qi}}$   | 0,0 | 0,0  | 0,0  |
|                           | Sfavorevole |  | 1,5 | 1,5  | 1,3  |

Il terreno e l'acqua vengono considerati come carichi permanenti (strutturali) in accordo con quanto indicato nella normativa tecnica, siccome contribuiscono al comportamento dell'opera con le loro caratteristiche di peso, resistenza e rigidezza.

**Tabella 8.2:** Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno (Tab. 6.2.II delle NTC2008).

| Parametro   | Grandezza alla quale<br>applicare il coefficiente parziale | Coefficiente parziale $\gamma_M$ | (M1) | (M2) |
|---|--|----------------------------------|------|------|
| Tangente dell'angolo di resi-<br>stenza al taglio | $	an {\phi'}_k$  | $\gamma_{\phi'}$                 | 1,0  | 1,25 |
| Coesione efficace                                 | c′ <sub>k</sub>  | $\gamma_{c'}$                    | 1,0  | 1,25 |
| Resistenza non drenata                            | $c_{uk}$   | $\gamma_{cu}$                    | 1,0  | 1,4  |
| Peso dell'unità di volume                         | γγ   | $\gamma_{\gamma}$                | 1,0  | 1,0  |

**Tabella 8.3**: Coefficienti parziali per le verifiche agli stati limite ultimi di muri di sostegno (Tab. 6.5.I delle NTC2008).

| Verifica                           | Coefficiente<br>parziale<br>(R3) |
|------------------------------------|----------------------------------|
| Capacità portante della fondazione | $\gamma_R = 1.4$                 |
| Scorrimento                        | $\gamma_R = 1.1$                 |
| Ribaltamento                       | $\gamma_R = 1.15$                |
| Resistenza del terreno a valle     | $\gamma_R = 1.4$                 |

Siccome non vengono eseguite verifiche tipiche di carattere geotecnico, ma solamente le verifiche strutturali con riferimento ai profilati, gli unici coefficienti parziali necessari al fine della presente tesi, sono quelli per le azioni (A1).

#### 8.1.1 Valutazione della sicurezza

Con riferimento alle costruzioni in acciaio, paragrafo 4.2 delle NTC2018, la sicurezza, ovvero i requisiti di resistenza, funzionalità, durabilità e robustezza, vengono garantiti verificando il rispetto degli stati limite ultimi e di esercizio della struttura, dei componenti strutturali e dei collegamenti. Nella presente tesi, le verifiche sono limitate alle verifiche di resistenza dei profilati in acciaio che compongono il pettine della briglia filtrante. Lo stato limite analizzato è dunque quello di collasso, corrispondente al raggiungimento della tensione di snervamento oppure delle deformazioni ultime del materiale e quindi della crisi o eccessiva deformazione di una sezione, o all'instaurarsi di fenomeni di instabilità dell'equilibrio negli elementi componenti o nella struttura nel suo insieme.

Nelle costruzioni in acciaio, le sezioni trasversali degli elementi strutturali vengono classificate in funzione della loro capacità rotazionale, ovvero della loro capacità di deformarsi in campo plastico; si distinguono quattro differenti classi. In particolare, la classe 1, a cui appartiene la sezione in esame, viene descritta come una sezione in grado di sviluppare una cerniera plastica avente la capacità rotazionale richiesta per l'analisi strutturale condotta con il metodo plastico. Tali sezioni vengono definite duttili.

Per le forme comuni delle sezioni, la normativa fornisce delle tabelle utili per la determinazione della classe corrispondente in funzione della geometria e delle modalità di sollecitazione (tabella 8.4).

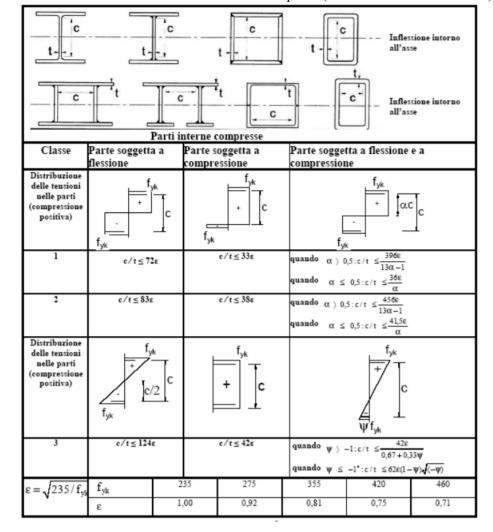


Tabella 8.4: Classificazione di alcune sezioni tipiche (Tab. 4.2.III delle NTC2008).

Ipotizzando una parte soggetta prevalentemente ad una sollecitazione di flessione, con acciaio strutturale S235 caratterizzato da una tensione caratteristica di snervamento  $f_{yk}$  pari a 235 MPa, a cui corrisponde  $\epsilon = 1,00$  si ricade in classe 1; risulta infatti verificata la seguente condizione:

$$\frac{c}{t} = \frac{219.6}{6.6} = 33.3 < 72\varepsilon. \tag{8.4}$$

Di seguito si riportano le verifiche utilizzate nella presente tesi per la verifica dei profilati, in riferimento a diverse tipologie di sollecitazione.

#### 8.1.2 Flessione retta

Il momento flettente di progetto M<sub>Ed</sub> deve rispettare la condizione

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \le 1, \tag{8.5}$$

in cui la resistenza di progetto a flessione retta della sezione  $M_{c,Rd}$  è valutata secondo la relazione

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_{yk}}{\gamma_{M0}},$$
 (8.6)

valida per le sezioni di classe 1 e 2, in cui W<sub>pl</sub> rappresenta il modulo di resistenza plastico della sezione.

## 8.1.3 Taglio

Il valore di progetto dell'azione tagliante V<sub>Ed</sub> deve soddisfare la condizione

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \le 1, \tag{8.7}$$

dove la resistenza di progetto a taglio V<sub>c,Rd</sub>, in assenza di torsione vale

$$V_{c,Rd} = \frac{A_v \cdot f_{yk}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}, \tag{8.8}$$

dove A<sub>v</sub> è l'area resistente a taglio, esprimibile come

$$A_v = A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f, (8.9)$$

per profilati ad I e ad H caricati nel piano dell'anima; in cui A è l'area lorda della sezione del profilato, b è la larghezza delle ali,  $t_f$  è lo spessore delle ali,  $t_w$  lo spessore dell'anima ed r è il raggio di raccordo tra anima ed ala.

In presenza di torsione, la resistenza al taglio deve essere opportunamente ridotta; per le sezioni ad I o H la resistenza di progetto a taglio ridotta è data dalla relazione

$$V_{c,Rd,red} = V_{c,Rd} \sqrt{1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{1,25 \cdot f_{yk} / (\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0})}},$$
 (8.10)

in cui  $\tau_{t,Ed}$  è la tensione tangenziale massima dovuta alla torsione uniforme. Ulteriori considerazioni devono essere fatte sulla compresenza del taglio e della flessione. Se il taglio di progetto  $V_{Ed}$  risulta inferiore a metà della resistenza di progetto a taglio  $V_{c,Rd}$  allora è possibile trascurare l'effetto del taglio sulla resistenza a flessione. Nel caso in cui risulti superiore è necessario ridurre la resistenza a flessione tramite apposite formulazioni.

#### 8.1.4 Presso o tenso-flessione biassiale

Per le sezioni ad I o ad H di classe 1 e 2 doppiamente simmetriche, soggette a presso o tenso-flessione biassiale, nel caso in cui  $n=N_{Ed}/N_{pl,Rd} < 0.2$ , la verifica di resistenza può cautelativamente essere condotta attraverso la condizione

$$\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,v,Rd}}\right) + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Rd}}\right) \le 1,$$
 (8.11)

in cui  $M_{y,Ed}$  e  $M_{z,Ed}$  sono i momenti sollecitanti di progetto nelle due direzioni mentre  $M_{N,y,Rd}$  e  $M_{N,z,Rd}$  sono le resistenze convenzionali di progetto a flessione retta, in cui l'asse y identifica sezioni soggette a presso o tenso-flessione nel piano dell'anima e l'asse z individua sollecitazioni agenti nel piano delle ali. Possono essere valutati come:

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} (1 - n)/(1 - 0.5a) \le M_{pl,y,Rd},$$
 (8.12)

$$M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} \quad \text{per } n \le a$$

$$M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} \left[ 1 - \left( \frac{n-a}{1-a} \right)^2 \right] \text{ per } n > a,$$
(8.13)

Dove M<sub>pl,y,Rd</sub> e M<sub>pl,z,Rd</sub> sono rispettivamente il momento resistente plastico di progetto a flessione semplice nel piano dell'anima e nel piano delle ali, mentre a è definita come

$$a = \frac{(A - 2bt_f)}{A} \le 0.5. \tag{8.14}$$

## 8.2 Verifiche strutturali

Le verifiche strutturali dei profilati in acciaio sono state effettuate considerando sia le sollecitazioni derivanti dall'applicazione delle linee guida austriache, sia quelle derivanti dall'analisi numerica DEM-FEM. In particolare, le combinazioni di carico descritte nelle ONR 24802 si riferiscono ad un problema bidimensionale, per cui le sollecitazioni di momento flettente e taglio che si ricavano agiscono nella direzione ortogonale alla barriera, ossia secondo l'asse forte dei profilati. Tuttavia, come si è riscontrato nelle analisi DEM-FEM tridimensionali non è trascurabile il momento flettente agente secondo l'asse debole; per questo motivo, le verifiche eseguite sono rispettivamente di flessione retta e flessione biassiale. Per quanto riguarda il taglio, dalle simulazioni numeriche emerge che la sollecitazione secondo l'asse debole dei profilati risulta trascurabile.

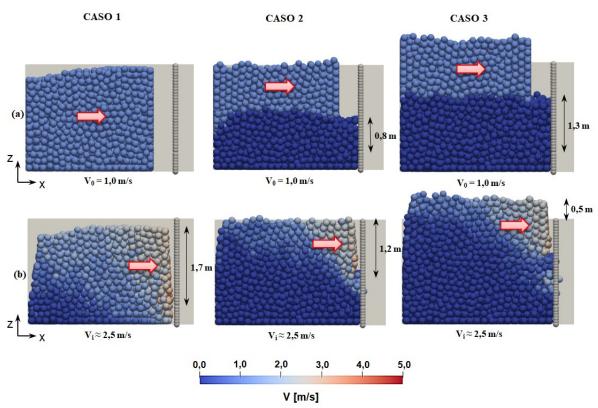
Lo schema strutturale adottato per la valutazione delle sollecitazioni è di trave incastrata ad una estremità, nel punto di intersezione con il basamento in calcestruzzo armato, caratterizzata da una lunghezza libera di 2 m. Nel seguito si riportano i risultati delle verifiche effettuate per ciascuna analisi.

#### 8.2.1 Analisi con i/D = 3

Questa analisi è relativa al flusso granulare caratterizzato da un diametro medio di 0,165 m; con riferimento a quanto descritto dalle combinazioni di carico austriache e quanto definito nel paragrafo 7.1, si individuano 3 casi di carico, corrispondenti a fasi successive del fenomeno di colata detritica. Il caso 1 relativo alla prima ondata, con bacino di deposito vuoto, il caso 2 con bacino di deposito parzialmente riempito e il caso 3 di sovraflusso (overtopping). Queste configurazioni, sono riportate in figura 8.1 con riferimento all'analisi specifica. In particolare, nella riga (a) e riportata la condizione iniziale di partenza con velocità iniziale di 1 m/s per lo strato considerato e l'eventuale altezza del deposito a tergo della barriera; nella riga (b) è riportato invece l'istante immediatamente precedente all'impatto contro la barriera, con la valutazione della velocità di impatto del flusso  $v_i$  è l'altezza del flusso impattante, parametri necessari per la valutazione delle azioni agenti. Siccome si fa riferimento ai soli profilati, l'altezza del deposito e del flusso impattante, ove necessario, è valutata al netto del basamento. Nella tabella 8.5 si riportano i parametri utilizzati nella valutazione delle azioni.

**Tabella 8.5:** Parametri generali impiegati nella valutazione delle azioni.

| parametro                 | descrizione                             | valore |
|---------------------------|---|--------|
| Φ' [°]                    | angolo di resistenza al taglio          | 30     |
| $\rho_d [kg/m^3]$         | densità della colata detritica          | 1940   |
| $\gamma_d  [kN/m^3]$      | peso specifico della colata detritica   | 19     |
| $\gamma_{\rm w} [kN/m^3]$ | peso specifico dell'acqua               | 10     |
| $g [m/s^2]$               | costante di accelerazione di gravità    | 9,81   |
| i [m]                     | interasse tra i profilati della briglia | 0,5    |



**Figura 8.1:** Configurazioni geometriche del flusso granulare; fila (a) configurazione iniziale; fila (b) configurazione assunta immediatamente prima dell'impatto.

Una considerazione è necessaria per quanto riguarda il caso 3; infatti tramite simulazione DEM non si è riusciti a rappresentare fedelmente la combinazione di carico austriaca EK L, ossia con bacino completamente riempito e sovraflusso. Infatti risulta dall'analisi precedente, un deposito a tergo della barriera di altezza inferiore ad essa; tuttavia nel calcolo delle azioni si è fatto riferimento alla configurazione con bacino completamente riempito e sovraflusso di altezza 0,5 m, svincolandosi dalla configurazione assunta dalle particelle.

Per quanto riguarda i parametri di tabella 8.5 l'angolo di resistenza al taglio Φ' e il peso specifico della colata detritica sono valori medi rappresentativi. In particolare, per un materiale composto prevalentemente da sabbia, ghiaia e ciottoli Lancellotta (2014) suggerisce valori di Φ' compresi tra 30° e 46° in funzione del grado di addensamento; a fini cautelativi e in congruenza con quanto fatto in precedenza nella modellazione DEM, si assume un valore di 30°. La densità della colata invece è stata ricavata a partire dal peso specifico assunto pari a 19 kN/m³, nota la costante di accelerazione gravitazionale g. Tale valore è compreso nell'intervallo suggerito da Pierson e Costa (1987) per le colate detritiche (tabella 3.1).

In tabella 8.6 sono riportati i risultati dei calcoli eseguiti per la valutazione delle sollecitazioni di momento flettente e taglio agenti nella sezione di incastro di un singolo profilato di acciaio; i tre differenti casi si riferiscono alle tre configurazioni di carico suggerite dalle linee guida austriache.

**Tabella 8.6:** Valutazione delle azioni e delle sollecitazioni agenti nella sezione di incastro per i tre casi analizzati.

| CASO 1                |        |  |  |
|-----------------------|--------|--|--|
| h <sub>d</sub> [m]    | 1,7    |  |  |
| v [m/s]               | 2,5    |  |  |
| $p_{Mu}[kN/m^2]$      | 98,32  |  |  |
| $\gamma_{G1}(A1)$     | 1,30   |  |  |
| V <sub>Ed</sub> [kN]  | 108,64 |  |  |
| M <sub>Ed</sub> [kNm] | 92,35  |  |  |

| CASO 2                          |       |  |  |  |
|---------------------------------|-------|--|--|--|
| h <sub>d</sub> [m]              | 1,2   |  |  |  |
| h <sub>dep</sub> [m]            | 0,8   |  |  |  |
| v [m/s]                         | 2,5   |  |  |  |
| $p_{Mu}[kN/m^2]$                | 79,78 |  |  |  |
| $q_d [kN/m^2]$                  | 7,61  |  |  |  |
| $e_{ow}[kN/m^2]$                | 12,69 |  |  |  |
| $\gamma_{G1}(A1)$               | 1,30  |  |  |  |
| V <sub>Ed</sub> [kN]            | 67,50 |  |  |  |
| M <sub>Ed</sub> [kNm]           | 89,05 |  |  |  |
| $p_{MuS}[kN/m^2]$               | 22,84 |  |  |  |
| $w_{\text{ow,b}} [kN/m^2]$      | 30,84 |  |  |  |
| $e_{ow}[kN/m^2]$                | 2,41  |  |  |  |
| V <sub>Ed</sub> [kN] con acqua  | 76,81 |  |  |  |
| M <sub>Ed</sub> [kNm] con acqua | 92,59 |  |  |  |

| CASO 3                          |       |  |  |
|---------------------------------|-------|--|--|
| h <sub>d</sub> [m]              | 0,5   |  |  |
| h <sub>dep</sub> [m]            | 2     |  |  |
| v [m/s]                         | 2,5   |  |  |
| $\Phi_{\mathrm{e}}[^{\circ}]$   | 20    |  |  |
| $\tau_{Mu} [kN/m^2]$            | 3,46  |  |  |
| L <sub>tr</sub> [m]             | 1,35  |  |  |
| F <sub>tr</sub> [kN/m]          | 4,68  |  |  |
| $q_d [kN/m^2]$                  | 3,17  |  |  |
| $e_{ow}[kN/m^2]$                | 15,86 |  |  |
| $\gamma_{G1}(A1)$               | 1,30  |  |  |
| V <sub>Ed</sub> [kN]            | 15,41 |  |  |
| M <sub>Ed</sub> [kNm]           | 15,70 |  |  |
| $p_{MuS}[kN/m^2]$               | 9,52  |  |  |
| $w_{\text{ow,b}} [kN/m^2]$      | 29,52 |  |  |
| $e_{ow}[kN/m^2]$                | 6,02  |  |  |
| V <sub>Ed</sub> [kN] con acqua  | 32,32 |  |  |
| M <sub>Ed</sub> [kNm] con acqua | 29,72 |  |  |

Nel seguito vengono illustrate le formulazioni e le considerazioni adottate per la valutazione delle sollecitazioni, riportate in tabella 8.6.

I parametri  $h_d$ ,  $h_{dep}$  si riferiscono rispettivamente all'altezza del flusso impattante o del flusso sovrastante la barriera (caso 3) e all'altezza del flusso depositato a monte della barriera al netto dell'altezza del basamento; invece v indica la velocità media di impatto delle particelle contro la barriera. I valori di questi parametri sono ricavati dall'osservazione in vista prospettica del fenomeno simulato mediante DEM e riportati

in figura 8.1. La pressione dinamica della colata detritica  $p_{Mu}$  è stata valutata nel caso 1 e nel caso 2 con la formulazione (3.5) proposta da Hubl e Holzinger (2003).

Nel caso 2 oltre alla pressione dinamica è presente anche la spinta esercitata dal deposito parziale del flusso; si sono differenziate due configurazioni come suggerito dalle combinazioni austriache: una caratterizzata dalla presenza di materiale secco e l'altra con la presenza della spinta idrostatica dell'acqua. Nel primo caso la pressione statica del terreno e stata valutata come una distribuzione trapezoidale con una pressione iniziale diversa da zero q<sub>d</sub> a causa della sovrapressione esercitata dal flusso sovrastrante. Nella seconda configurazione invece, la sovrapressione del flusso è assorbita dall'acqua con la pressione p<sub>MuS</sub> mentre la pressione del terreno depositato è di forma triangolare. Per la loro valutazione si sono utilizzate le formule (8.15) nel caso senza presenza di acqua e (8.16) con la spinta dell'acqua:

$$q_{d} = K_{a}h_{d}\gamma_{d}$$

$$e_{ow} = q_{d} + K_{a}h_{dep}\gamma_{d},$$
(8.15)

$$\begin{aligned} p_{MuS} &= \rho_{d}gh_{d} \\ w_{ow,b} &= p_{MuS} + h_{dep}\gamma_{w} \\ e_{ow} &= K_{a}h_{dep}(\gamma_{d} - \gamma_{w}). \end{aligned} \tag{8.16}$$

in cui K<sub>a</sub> è il coefficiente di spinta attiva calcolato tramite la teoria di Rankine, che considera un materiale orizzontalmente omogeneo e puramente attritivo, ossia privo di coesione, con la relazione

$$K_{a} = \frac{1 - \sin \Phi'}{1 + \sin \Phi'} = 0{,}333. \tag{8.17}$$

Infine note tutte le distribuzioni di pressione agenti sui profilati, si è calcolato il taglio sollecitante come sommatoria di tutte le forze orizzontali e il momento flettente nella sezione di incastro considerando i bracci di ciascuna forza; tali valori sono stati moltiplicati per il coefficiente parziale  $\gamma_{G1}$  relativamente alla colonna A1 e per l'interasse dei profilati i per ricavare le sollecitazioni di progetto su un unico profilato, in accordo con la normativa di riferimento.

Nel caso 3 invece, che rappresenta la configurazione di tracimazione della barriera, il flusso non esercita una pressione dinamica ma una forza di trascinamento  $F_{tr}$  valutata attraverso la relazione

$$F_{tr} = \tau_{Mu} \cdot L_{tr} = \rho_d g h_d \tan \Phi_e, \qquad (8.18)$$

in cui  $L_{tr}$  è la lunghezza della porzione di deposito sulla quale è esercitata la tensione di trascinamento  $\tau_{Mu}$ , assunta pari alla suola di fondazione della briglia di 1,35 m;  $\Phi_e$  è l'angolo di attrito equivalente assunto pari a 20°, pari cioè a 2/3 dell'angolo di resisten-

za al taglio  $\Phi$ '. Oltre a questa forza, agisce la spinta del deposito a tergo dei profilati e la spinta dell'acqua, differenziati nelle due combinazioni da cui si sono valutate le sollecitazioni come descritto in precedenza. Questo modo di procedere fa riferimento alle combinazioni austriache di figura 3.5 con alcune semplificazioni: non viene preso in considerazione il moto di filtrazione, in quanto si ipotizza la presenza di un rivestimento impermeabile sia a monte che a valle dell'opera, allo scopo di limitare l'erosione spondale e fondale; inoltre non si considera l'eventualità della presenza di forza concentrate  $F_E$  causate da blocchi isolati di maggiori dimensioni, a fronte anche di una modellazione numerica priva di un'elevata dispersione della dimensioni dei grani. Vengono inoltre trascurate possibili azioni accidentali come l'azione sismica.

A fini cautelativi, la spinta esercitata dall'acqua è stata calcolata considerando il muro come fosse una barriera chiusa, senza riduzioni dovute alla possibilità di filtrazione verso valle dell'acqua. Questo è a favore di sicurezza, data la reale possibilità di intasamento completo del pettine. Per quanto riguarda invece le sollecitazioni derivanti dall'analisi DEM-FEM si sono utilizzati i valori massimi dell'analisi di taglio e momento flettente secondo l'asse forte e l'asse debole del profilato, indicati nelle NTC2018 rispettivamente asse y e asse z. Tali valori, riportati in tabella 8.7, fanno riferimento allo stesso profilato sinistro o destro su cui agiscono, tuttavia a fini cautelativi si sono abbinati i valori massimi nelle due direzioni nonostante non si verifichino sempre nel medesimo istante. Inoltre sono moltiplicati per il coefficiente parziale (A1) pari a 1,3 per ottenere le sollecitazioni di progetto.

**Tabella 8.7:** Sollecitazioni di progetto dei profilati ricavate dall'analisi DEM-FEM.

|                          | profilato sinistro | profilato destro |
|--------------------------|--------------------|------------------|
| M <sub>y,Ed</sub> [kN m] | 42,21              | 47,72            |
| M <sub>z,Ed</sub> [kN m] | 16,29              | 12,01            |
| V <sub>y,Ed</sub> [kN]   | 62,21              | 60,85            |
| V <sub>z,Ed</sub> [kN]   | 0,03               | 0,08             |

Si può osservare come il taglio agente secondo l'asse debole del profilato, ossia nel piano delle ali, sia trascurabile per cui le verifiche sono relative a un taglio semplice; ciò non è valido per il momento flettente, di intensità minore rispetto a quello agente nella direzione principale, ma non trascurabile, per cui sono necessarie verifiche a flessione biassiale.

Vengono quindi realizzate verifiche a taglio semplice sia per le sollecitazioni derivanti dalle combinazioni austriache che dall'analisi numerica, mentre per quanto riguarda il momento flettente, vengono svolte verifiche a momento semplice per le prime e momento biassiale per le seconde.

In tabella 8.8 sono riportate alcune caratteristiche del profilato in acciaio necessarie per effettuare la verifica strutturale e comuni a tutte le analisi.

Tabella 8.8: Parametri geometrici e di resistenza del profilato di acciaio.

| parametro             | descrizione                                      | valore  |
|-----------------------|--|---------|
| f <sub>yk</sub> [Mpa] | tensione di snervamento caratteristica           | 235     |
| $W_{pl,y}[mm^3]$      | modulo resistente plastico secondo l'asse forte  | 429000  |
| $W_{pl,z}[mm^3]$      | modulo resistente plastico secondo l'asse debole | 97000   |
| γм0                   | coefficiente di sicurezza                        | 1,05    |
| $A [mm^2]$            | area lorda                                       | 4590    |
| b [mm]                | larghezza delle ali                              | 135     |
| $t_f[mm]$             | spessore delle ali                               | 10,2    |
| $h_w[mm]$             | altezza dell'anima                               | 219,6   |
| $t_{\rm w}$ [mm]      | spessore dell'anima                              | 6,6     |
| r [mm]                | raggio di curvatura del raccordo anima-ala       | 15      |
| $A_v [mm^2]$          | area resistente a taglio                         | 2209,32 |
| a [-]                 | coefficiente funzione di parametri geometrici    | 0,4     |

Di seguito vengono riportati i risultati delle verifiche strutturali dei profilati con riferimento a quanto descritto nel paragrafo 8.1.

## 8.2.1.1 Taglio

In tabella 8.9 sono riportati gli esiti delle verifiche a taglio della sezione di incastro dei profilati, con riferimento al sotto-paragrafo 8.1.3.

Tabella 8.9: Risultati delle verifiche a taglio.

| comb. austriache   | V <sub>Ed</sub> [kN] | V <sub>c,Rd</sub> [kN] | verifica   |
|--------------------|----------------------|------------------------|------------|
| caso 1             | 108,64               | 285,48                 | verificato |
| caso 2             | 67,50                | 285,48                 | verificato |
| caso 3             | 15,41                | 285,48                 | verificato |
| caso 2 (con acqua) | 76,81                | 285,48                 | verificato |
| caso 3 (con acqua) | 32,32                | 285,48                 | verificato |

| analisi DEM-FEM    | V <sub>Ed</sub> [kN] | V <sub>c,Rd</sub> [kN] | verifica   |
|--------------------|----------------------|------------------------|------------|
| profilato sinistro | 62,21                | 285,48                 | verificato |
| profilato destro   | 60,85                | 285,48                 | verificato |

### 8.2.1.2 Flessione semplice e flessione biassiale

Nella tabella 8.10 e 8.11 sono riportati rispettivamente i risultati delle verifiche eseguite nei confronti della flessione semplice, per il caso delle combinazioni austriache e le verifiche a flessione biassiale per le sollecitazioni ricavate dall'analisi numerica.

| Tabella | 8.10: | Risultati | delle | verifiche | a fl | essione | semplice. |
|---------|-------|-----------|-------|-----------|------|---------|-----------|
|---------|-------|-----------|-------|-----------|------|---------|-----------|

| combinazioni<br>austriache | M <sub>Ed</sub> [kN m] | condizione $V_{Ed}$ <0,5 $V_{c,Rd}$ | M <sub>c,Rd</sub> [kN m] | verifica   |
|----------------------------|------------------------|-------------------------------------|--------------------------|------------|
| caso 1                     | 92,35                  | verificata                          | 96,01                    | verificato |
| caso 2                     | 89,05                  | verificata                          | 96,01                    | verificato |
| caso 3                     | 15,70                  | verificata                          | 96,01                    | verificato |
| caso 2 (con acqua)         | 92,59                  | verificata                          | 96,01                    | verificato |
| caso 3 (con acqua)         | 29,72                  | verificata                          | 96,01                    | verificato |

**Tabella 8.11:** Risultati delle verifiche a flessione biassiale.

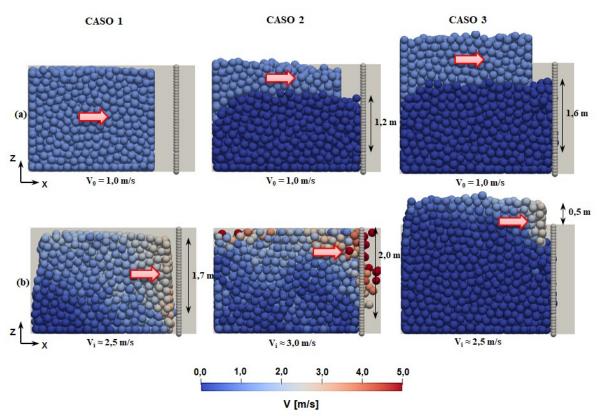
| analisi<br>DEM-FEM | M <sub>y,Ed</sub><br>[kN m] | M <sub>z,Ed</sub> [kN m] | M <sub>N,y,Rd</sub><br>[kN m] | M <sub>N,z,Rd</sub><br>[kN m] | verifica          |
|--------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------|
| profilato sinistro | 42,21                       | 16,29                    | 96,01                         | 21,71                         | non<br>verificato |
| profilato destro   | 47,72                       | 12,01                    | 96,01                         | 21,71                         | non<br>verificato |

Si osserva come nel caso di flessione semplice risulti tutto verificato, ma quando si passa ad una flessione biassiale la verifica non risulta più soddisfatta. Nonostante i momenti sollecitanti ricavati numericamente siano simili come intensità a quelli derivanti dalle linee guida, se non addirittura inferiori, la presenza di un momento agente secondo l'asse debole manda in crisi il profilato.

### 8.2.2 Analisi con i/D = 2.5

In questa analisi valgono le medesime considerazioni fatte nel caso precedente. In figura 8.2 si riportano le visioni prospettiche del risultato ottenuto dall'analisi DEM con la configurazione iniziale e di deposito nella fila (a) e l'istante immediatamente antecedente o durante l'impatto con la barriera nella fila (b); sono inoltre indicati i parametri necessari per la valutazione dell'azione dinamica della colata detritica sui profilati.

Rispetto al caso precedente si osserva una altezza maggiore raggiunta dal deposito granulare al termine di ciascuna fase, proprio in virtù del diametro maggiore dei grani; di conseguenza risulta ridotta l'altezza del flusso impattante posto al di sopra del deposito. Inoltre risulta evidente come nel caso 2 il flusso superiore, avente velocità iniziale di 1 m/s metta in movimento anche le particelle già sedimentate, comportamento molto meno marcato nelle altre analisi.



**Figura 8.2:** Configurazioni geometriche del flusso granulare; fila (a) configurazione iniziale; fila (b) configurazione assunta immediatamente prima o durante l'impatto.

**Tabella 8.12:** Valutazione delle azioni e delle sollecitazioni per il caso 1 e il caso 2.

| CASO 1                 |        |  |
|------------------------|--------|--|
| h <sub>d</sub> [m]     | 1,7    |  |
| v [m/s]                | 2,5    |  |
| $p_{Mu}[kN/m^2]$       | 98,32  |  |
| $\gamma_{G1}(A1)$      | 1,30   |  |
| V <sub>Ed</sub> [kN]   | 108,64 |  |
| M <sub>Ed</sub> [kN m] | 92,35  |  |

| CASO 2                           |       |  |  |  |
|----------------------------------|-------|--|--|--|
| h <sub>d</sub> [m]               | 0,8   |  |  |  |
| h <sub>dep</sub> [m]             | 1,2   |  |  |  |
| v [m/s]                          | 3     |  |  |  |
| $p_{Mu}[kN/m^2]$                 | 72,37 |  |  |  |
| $q_d [kN/m^2]$                   | 5,08  |  |  |  |
| $e_{\rm ow}[kN/m^2]$             | 5,08  |  |  |  |
| $\gamma_{G1}(A1)$                | 1,30  |  |  |  |
| V <sub>Ed</sub> [kN]             | 41,59 |  |  |  |
| M <sub>Ed</sub> [kN m]           | 62,59 |  |  |  |
| $p_{MuS}[kN/m^2]$                | 15,23 |  |  |  |
| $w_{\text{ow,b}} [kN/m^2]$       | 27,23 |  |  |  |
| $e_{ow}[kN/m^2]$                 | 3,61  |  |  |  |
| V <sub>Ed</sub> [kN] con acqua   | 55,60 |  |  |  |
| M <sub>Ed</sub> [kN m] con acqua | 69,77 |  |  |  |

**Tabella 8.13:** Valutazione delle azioni e delle sollecitazioni per il caso 3.

| CASO 3                           |       |  |  |
|----------------------------------|-------|--|--|
| h <sub>d</sub> [m]               | 0,5   |  |  |
| h <sub>dep</sub> [m]             | 2     |  |  |
| v [m/s]                          | 2,5   |  |  |
| $\Phi_{ m e} [^{\circ}]$         | 20    |  |  |
| $\tau_{Mu} [kN/m^2]$             | 3,46  |  |  |
| L <sub>tr</sub> [m]              | 1,35  |  |  |
| F <sub>tr</sub> [kN/m]           | 4,68  |  |  |
| $q_d [kN/m^2]$                   | 3,17  |  |  |
| $e_{ow}[kN/m^2]$                 | 15,86 |  |  |
| $\gamma_{G1}(A1)$                | 1,30  |  |  |
| V <sub>Ed</sub> [kN]             | 15,41 |  |  |
| M <sub>Ed</sub> [kN m]           | 15,70 |  |  |
| $p_{MuS}[kN/m^2]$                | 9,52  |  |  |
| $w_{\text{ow,b}}[kN/m^2]$        | 29,52 |  |  |
| $e_{ow}[kN/m^2]$                 | 6,02  |  |  |
| V <sub>Ed</sub> [kN] con acqua   | 32,32 |  |  |
| M <sub>Ed</sub> [kN m] con acqua | 29,72 |  |  |

In tabella 8.12 e 8.13 sono riportate le sollecitazioni determinate secondo i due approcci descritti nella precedente analisi. Con riferimento al caso 2, in cui si verifica la mobilitazione del flusso già depositato si è comunque fatto riferimento alla configurazione austriaca, per cui si è ipotizzato il deposito fermo, con un'altezza del flusso impattante pari a 0,8m. I risultati dell'analisi numerica, in termini di sollecitazioni sono invece riportate in tabella 8.14.

Tabella 8.14: Sollecitazioni di progetto dei profilati ricavate dall'analisi DEM-FEM.

|                          | profilato sinistro | profilato destro |
|--------------------------|--------------------|------------------|
| M <sub>y,Ed</sub> [kN m] | 60,62              | 56,47            |
| M <sub>z,Ed</sub> [kN m] | 18,94              | 14,87            |
| V <sub>y,Ed</sub> [kN]   | 53,35              | 76,34            |
| V <sub>z,Ed</sub> [kN]   | 0,05               | 0,09             |

Anche in questo caso continuano a valere le considerazioni fatte nell'analisi precedente. Si riportano infine i risultati delle verifiche per l'analisi considerata.

## 8.2.2.1 Taglio

In tabella 8.15 sono riportati gli esiti delle verifiche a taglio della sezione di incastro dei profilati, con riferimento al sotto-paragrafo 8.1.3.

Tabella 8.15: Risultati delle verifiche a taglio.

| comb. austriache   | V <sub>Ed</sub> [kN] | V <sub>c,Rd</sub> [kN] | verifica   |
|--------------------|----------------------|------------------------|------------|
| caso 1             | 108,64               | 285,48                 | verificato |
| caso 2             | 41,59                | 285,48                 | verificato |
| caso 3             | 15,41                | 285,48                 | verificato |
| caso 2 (con acqua) | 55,60                | 285,48                 | verificato |
| caso 3 (con acqua) | 32,32                | 285,48                 | verificato |

| analisi DEM-FEM    | $V_{Ed}$ [kN] | V <sub>c,Rd</sub> [kN] | verifica   |
|--------------------|---------------|------------------------|------------|
| profilato sinistro | 259,58        | 285,48                 | verificato |
| profilato destro   | 169,49        | 285,48                 | verificato |

Il picco elevato di sollecitazione a taglio agente sul profilato sinistro, sebbene poco rappresentativo per quanto detto, risulta comunque verificato.

#### 8.2.2.2 Flessione semplice e flessione biassiale

Nelle tabelle 8.16 e 8.17 sono riportati rispettivamente i risultati delle verifiche eseguite nei confronti della flessione semplice e biassiale per i due approcci adottati.

**Tabella 8.16:** Risultati delle verifiche a flessione semplice.

| combinazioni<br>austriache | M <sub>Ed</sub> [kN m] | condizione $V_{Ed}$ <0,5 $V_{c,Rd}$ | M <sub>c,Rd</sub> [kN m] | verifica   |
|----------------------------|------------------------|-------------------------------------|--------------------------|------------|
| caso 1                     | 92,35                  | verificata                          | 96,01                    | verificato |
| caso 2                     | 62,59                  | verificata                          | 96,01                    | verificato |
| caso 3                     | 15,70                  | verificata                          | 96,01                    | verificato |
| caso 2 (con acqua)         | 69,77                  | verificata                          | 96,01                    | verificato |
| caso 3 (con acqua)         | 29,72                  | verificata                          | 96,01                    | verificato |

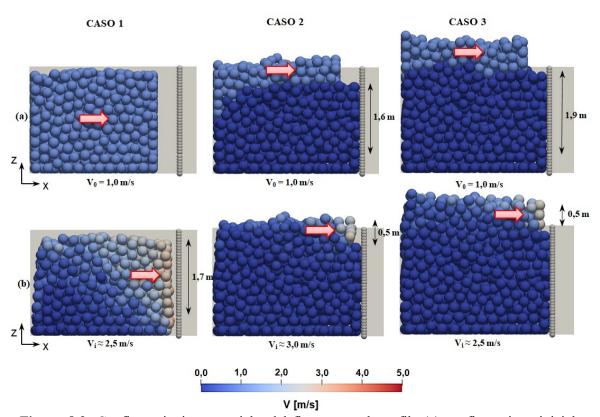
**Tabella 8.17:** Risultati delle verifiche a flessione biassiale.

| analisi<br>DEM-FEM | M <sub>y,Ed</sub><br>[kN m] | $\mathbf{M}_{\mathbf{z},\mathbf{Ed}}$ [kN m] | $\mathbf{M}_{	ext{N,y,Rd}}$ [kN m] | M <sub>N,z,Rd</sub><br>[kN m] | verifica          |
|--------------------|-----------------------------|--|------------------------------------|-------------------------------|-------------------|
| profilato sinistro | 154,19                      | 16,98  | 96,01                              | 21,71                         | non<br>verificato |
| profilato destro   | 101,14                      | 100,74                                       | 96,01                              | 21,71                         | non<br>verificato |

Si osserva come anche in questo caso le verifiche biassiali non risultino soddisfatte mentre tutte le restanti risultano verificate. In tale analisi tuttavia, i momenti massimi di sollecitazione ottenuti tramite analisi numerica sono troppo eccessivi in quanto rappresentano un comportamento poco probabile del flusso granulare; tuttavia rimangono valide le considerazioni sulla maggiore criticità della verifica a flessione biassiale e sul fatto che il momento agente secondo l'asse debole della sezione non è trascurabile, anzi può essere di intensità molto simile al momento secondo l'asse forte come risultato dall'analisi sul profilato destro (tabella 8.17).

#### 8.2.3 Analisi con i/D = 2

Infine si riportano i risultati ottenuti per quest'ultima analisi, caratterizzata da altezze di deposito ulteriormente maggiori rispetto ai casi precedenti. In figura 8.3 si riporta lo schema della configurazione iniziale e antecedente l'impatto.



**Figura 8.3:** Configurazioni geometriche del flusso granulare; fila (a) configurazione iniziale; fila (b) configurazione assunta immediatamente prima dell'impatto.

Tabella 8.18: Valutazione delle azioni e delle sollecitazioni per i tre differenti casi.

|                        | 1 110 01111 01101 1 1111111111111 |  |  |  |
|------------------------|-----------------------------------|--|--|--|
| CASO 1                 |                                   |  |  |  |
| h <sub>d</sub> [m]     | 1,7                               |  |  |  |
| v [m/s]                | 2,5                               |  |  |  |
| $p_{Mu}[kN/m^2]$       | 98,32                             |  |  |  |
| $\gamma_{G1}(A1)$      | 1,30                              |  |  |  |
| V <sub>Ed</sub> [kN]   | 108,64                            |  |  |  |
| M <sub>Ed</sub> [kN m] | 92,35                             |  |  |  |

| CASO 2                           |       |  |  |
|----------------------------------|-------|--|--|
| h <sub>d</sub> [m]               | 0,4   |  |  |
| h <sub>dep</sub> [m]             | 1,6   |  |  |
| v [m/s]                          | 3     |  |  |
| $p_{Mu}[kN/m^2]$                 | 47,75 |  |  |
| $q_d [kN/m^2]$                   | 2,54  |  |  |
| $e_{ow}[kN/m^2]$                 | 2,54  |  |  |
| $\gamma_{G1}(A1)$                | 1,30  |  |  |
| V <sub>Ed</sub> [kN]             | 15,05 |  |  |
| M <sub>Ed</sub> [kN m]           | 24,46 |  |  |
| $p_{MuS}[kN/m^2]$                | 7,61  |  |  |
| $w_{\text{ow,b}} [kN/m^2]$       | 23,61 |  |  |
| $e_{\rm ow}[kN/m^2]$             | 4,82  |  |  |
| V <sub>Ed</sub> [kN] con acqua   | 31,16 |  |  |
| M <sub>Ed</sub> [kN m] con acqua | 34,45 |  |  |

| CASO 3                         |       |  |  |
|--------------------------------|-------|--|--|
| h <sub>d</sub> [m]             | 0,5   |  |  |
| h <sub>dep</sub> [m]           | 2     |  |  |
| v [m/s]                        | 2,5   |  |  |
| $\Phi_{ m e} [^{\circ}]$       | 20    |  |  |
| $\tau_{Mu} [kN/m^2]$           | 3,46  |  |  |
| L <sub>tr</sub> [m]            | 1,35  |  |  |
| $F_{tr}[kN/m]$                 | 4,68  |  |  |
| $q_d [kN/m^2]$                 | 3,17  |  |  |
| $e_{ow}[kN/m^2]$               | 15,86 |  |  |
| $\gamma_{G1}(A1)$              | 1,30  |  |  |
| V <sub>Ed</sub> [kN]           | 15,41 |  |  |
| M <sub>Ed</sub> [kN m]         | 15,70 |  |  |
| $p_{MuS}[kN/m^2]$              | 9,52  |  |  |
| $w_{\text{ow,b}} [kN/m^2]$     | 29,52 |  |  |
| $e_{ow}[kN/m^2]$               | 6,02  |  |  |
| V <sub>Ed</sub> [kN] con acqua | 32,32 |  |  |
| $M_{Ed}$ [kN m] con acqua      | 29,72 |  |  |

In tabella 8.18 sono riportate le sollecitazioni determinate secondo i due approcci seguiti, mentre in tabella 8.19 si riportano le sollecitazioni di progetto derivanti dall'analisi numerica DEM-FEM.

Tabella 8.19: Sollecitazioni di progetto dei profilati ricavate dall'analisi DEM-FEM.

|                          | profilato sinistro | profilato destro |
|--------------------------|--------------------|------------------|
| M <sub>y,Ed</sub> [kN m] | 60,62              | 56,47            |
| M <sub>z,Ed</sub> [kN m] | 18,94              | 14,87            |
| V <sub>y,Ed</sub> [kN]   | 53,35              | 76,34            |
| V <sub>z,Ed</sub> [kN]   | 0,05               | 0,09             |

## 8.2.2.1 Taglio

In tabella 8.20 sono riportati gli esiti delle verifiche a taglio della sezione di incastro dei profilati, con riferimento al sotto-paragrafo 8.1.3.

Tabella 8.20: Risultati delle verifiche a taglio.

| comb. austriache   | V <sub>Ed</sub> [kN] | V <sub>c,Rd</sub> [kN] | verifica   |
|--------------------|----------------------|------------------------|------------|
| caso 1             | 108,64               | 285,48                 | verificato |
| caso 2             | 15,05                | 285,48                 | verificato |
| caso 3             | 15,41                | 285,48                 | verificato |
| caso 2 (con acqua) | 31,16                | 285,48                 | verificato |
| caso 3 (con acqua) | 32,32                | 285,48                 | verificato |

| analisi DEM-FEM    | V <sub>Ed</sub> [kN] | V <sub>c,Rd</sub> [kN] | verifica   |
|--------------------|----------------------|------------------------|------------|
| profilato sinistro | 53,35                | 285,48                 | verificato |
| profilato destro   | 76,34                | 285,48                 | verificato |

#### 8.2.2.2 Flessione semplice e flessione biassiale

Nelle tabelle 8.21 e 8.22 sono riportati rispettivamente i risultati delle verifiche eseguite nei confronti della flessione semplice e biassiale per i due approcci adottati.

| Tabella 8 | 8.21: | Risultati | delle | verifiche a | a fl | essione | semplice. |
|-----------|-------|-----------|-------|-------------|------|---------|-----------|
|-----------|-------|-----------|-------|-------------|------|---------|-----------|

| combinazioni<br>austriache | M <sub>Ed</sub> [kN m] | condizione $V_{Ed}$ <0,5 $V_{c,Rd}$ | M <sub>c,Rd</sub> [kN m] | verifica   |  |  |
|----------------------------|------------------------|-------------------------------------|--------------------------|------------|--|--|
| caso 1                     | 92,35                  | verificata                          | 96,01                    | verificato |  |  |
| caso 2                     | 24,46                  | verificata                          | 96,01                    | verificato |  |  |
| caso 3                     | 15,70                  | verificata                          | 96,01                    | verificato |  |  |
| caso 2 (con acqua)         | 34,45                  | verificata                          | 96,01                    | verificato |  |  |
| caso 3 (con acqua)         | 29,72                  | verificata                          | 96,01                    | verificato |  |  |

Tabella 8.22: Risultati delle verifiche a flessione biassiale.

| analisi<br>DEM-FEM | M <sub>y,Ed</sub><br>[kN m] | M <sub>z,Ed</sub> [kN m] | M <sub>N,y,Rd</sub><br>[kN m] | M <sub>N,z,Rd</sub><br>[kN m] | verifica          |
|--------------------|-----------------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------|
| profilato sinistro | 60,62                       | 18,94                    | 96,01                         | 21,71                         | non<br>verificato |
| profilato destro   | 56,47                       | 14,87                    | 96,01                         | 21,71                         | non<br>verificato |

Si osserva come in tutte le analisi, con riferimento alle combinazioni austriache, il primo caso e il terzo caso siano uguali a causa della stessa configurazione geometrica di partenza. Si ha quindi una variazione delle sollecitazioni solamente nel caso 2, in cui per differenti analisi si raggiungono altezze di deposito differenti. Si nota inoltre come il caso 1 sia il più critico, sia in termini di taglio che momento flettente, a fronte della maggiore altezza impattante del flusso dinamico rispetto alle altre configurazioni.

Tuttavia, tale assunzione è poco rappresentativa siccome la colata detritica tipica per l'asta torrentizia del Grand Valey è caratterizzata da spessori inferiori, che occludono progressivamente il filtro della barriera per ondate successive; la configurazione iniziale DEM con tale geometria è stata utilizzata principalmente per creare un deposito a monte della barriera che potesse simulare le configurazioni di carico austriache, limitando il numero di simulazioni altrimenti eccessive.

Tali analisi risultano comunque verificate mentre invece tutte le verifiche a flessione biassiale non risultano soddisfatte.

# Capitolo 9

# Conclusioni e possibili ulteriori sviluppi

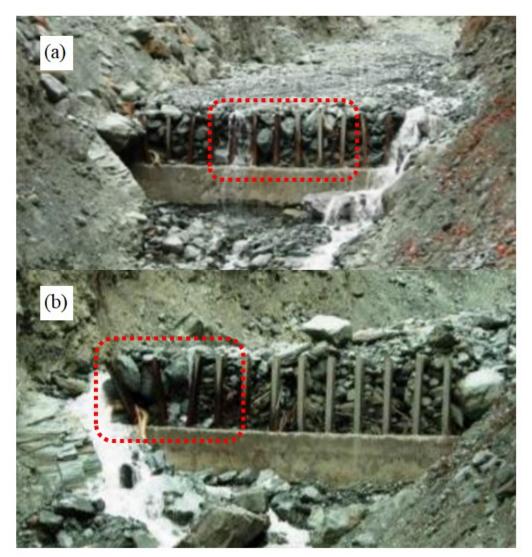
Lo studio di interazione proposto in questa tesi, ha permesso di spiegare, almeno in parte, i segnali sperimentali di deformazione registrati dalla strumentazione di monitoraggio posta sui profilati in acciaio della briglia in località Perrière. Infatti le deformazioni di trazione sono frutto di un comportamento biassiale con momenti sollecitanti agenti secondo le due direzioni principali del profilato. Tale comportamento è dovuto, oltre all'azione delle forze in direzione ortogonale alla barriera, alla nascita di forze, anche di intensità rilevante, in direzione parallela (asse y), come evidenziato nelle analisi DEM.

Le analisi FEM hanno poi confermato questo risultato, mostrando come durante la fase dinamica del fenomeno, ma anche soprattutto nella fase statica finale più significativa, alcune porzioni dei profilati fossero soggette a deformazioni di trazione. Inoltre il confronto, seppur qualitativo, dei risultati numerici e sperimentali ha evidenziato un'ottima corrispondenza in termini di modulo di tali grandezze.

La modellazione DEM del flusso granulare, nonostante le numerose semplificazioni della realtà e assunzioni fatte, come ad esempio la sfericità delle particelle, l'omogeneità dimensionale dei grani e l'assenza di acqua nel flusso, ha permesso comunque di simulare il comportamento tridimensionale del fenomeno, evidenziando alcune peculiarità tra cui la nascita di catene di forze tra le particelle arrestate dal filtro che determinano delle spinte sui profilati non unicamente in direzione ortogonale alla barriera.

Un altro punto interessante è emerso nell'esecuzione delle verifiche, che hanno mostrato alcuni limiti delle configurazioni di carico proposte dalle linee guida austriache. Infatti le verifiche eseguite considerando tali configurazioni geometriche, ovvero trascurando l'evidenza numerica della nascita di momenti flettenti secondo le due direzioni principali, sono risultate soddisfatte, mentre le verifiche condotte considerando la flessione biassiale hanno riscontrato esiti negativi.

A sostegno di questi risultati, si propongono in figura 9.1 alcune fotografie di eventi passati in presenza di filtro completamente riempito, che mostrano delle divaricazioni e aperture dei profilati o in altri casi delle chiusure, come è emerso dalle simulazioni FEM, con riferimento alle deformazioni assunte dai profilati durante le analisi.



**Figura 9.1:** Evidenze fotografiche del comportamento deformativo dei profilati sotto l'azione della colata; (a) evento del 3 marzo 2008; (b) evento del 27 maggio 2008).

Sebbene queste fotografie siano antecedenti alla briglia strumentata crollata a seguito dell'evento del 2014 mettono in risalto il comportamento ottenuto numericamente a fronte proprio della creazione di archi stabili spingenti, o causati dall'incuneamento di massi di maggiore dimensione spinti dal materiale retrostante, come evidenziato in rosso. Tali evidenze, sono visibili seppur in minor misura anche in fotografie raffiguranti eventi più recenti riportate nel capitolo 6.

Si ritiene dunque inappropriato l'utilizzo di profilati aventi sezioni caratterizzate da un asse forte e uno debole, in virtù della sollecitazione biassiale che nasce dall'azione del flusso. Infatti le verifiche strutturali non sono state soddisfatte principalmente a causa della debolezza dei profilati ai momenti agenti secondo la direzione trasversale alla briglia. Si suggerisce quindi per un miglioramento del comportamento strutturale, l'utilizzo di forme a sezione chiusa o piena caratterizzate da un egual valore di resistenza in entrambe le direzioni principali.

La briglia a pettine che ha subito il collasso strutturale a seguito dell'evento di colata del 20 luglio 2014 ha tuttavia evidenziato un danno limitato dei profilati in acciaio, come è stato rappresentato in figura 6.22 (a) del capitolo 6. Questa mancanza di deformazioni plastiche nei profilati, può essere dovuta al debole grado di vincolo fornito dal basamento sui profilati stessi, dovuto alla mancanza di immorsamento diretto nel calcestruzzo, ma attraverso uno scatolare metallico riempito di sabbia; inoltre anche la presenza di armatura di collegamento insufficiente a garantire un comportamento monolitico dell'opera, può aver contribuito al collasso della struttura senza evidenti danni ai profilati.

A fronte di tali supposizioni, si ritiene che l'utilizzo delle forme sezionali con resistenza a flessione omogenea nelle due direzioni sia meno utile se non vi è un buon grado di incastro tra le parti strutturali dell'opera di difesa. Infatti il modello adottato per la valutazione delle azioni attraverso le configurazioni di progetto austriache, ma anche quelle numeriche, sono caratterizzate da un vincolo di incastro perfetto.

Siccome i risultati ottenuti possono essere rilevanti da un punto di vista progettuale, soprattutto se supportati da basi statistiche più ampie, possibili ulteriori sviluppi e approfondimenti possono essere realizzati considerando un maggior numero di analisi numeriche. Ad esempio può essere valutato l'effetto di differenti configurazioni iniziali in termini di posizione, dimensione dei grani, velocità di partenza e altre caratteristiche.

La valutazione della posizione ad esempio, conferendo valori iniziali casuali può evidenziare possibili dipendenze dei risultati ottenuti nella presenti tesi dalla configurazione iniziale adottata. Un altro aspetto interessante da valutare è l'influenza delle condizioni al contorno, ossia l'influenza delle pareti rigide laterali sul comportamento del flusso granulare, essendo le dimensioni utilizzate per la modellazione DEM molto prossime o superiori al limite per il quale non si risente dell'effetto dei bordi. Tale geometria può far riferimento a una parte della briglia filtrante prossimale alla sponda, per cui il bordo rigido può simulare l'effetto del contenimento spondale dell'alveo torrentizio.

Un altro fattore importante, non considerato nella tesi, è l'influenza della velocità sull'intensità della forza di primo impatto contro la barriera; effettuando un'analisi parametrica variando oltre alla dimensione del diametro anche la velocità iniziale può permettere di valutare l'effetto di tale parametro sui pettini della barriera.

# Appendice A

## File per le applicazioni DEM

In quest'ultima parte si riporta un esempio dei file di testo utilizzati per l'inserimento della configurazione iniziale delle particelle all'interno del codice DEM, e un esempio di file di configurazione per l'inserimento dei parametri necessari all'esecuzione dell'analisi.

## A.1 Configurazione iniziale delle particelle

Si riporta in figura A.1 un file tipo contenente i dati necessari per l'introduzione nel codice della disposizione spaziale e delle caratteristiche principali delle particelle; esistono due tipi di file denominati particleFile e objectFile relativi alle particelle in movimento che rappresentano il flusso granulare e le particelle fisse che formano gli oggetti fissi, come la briglia filtrante. Da un punto di vista strutturale sono perfettamente analoghi, per cui di seguito si riporta un estratto del particleFile relativo all'analisi con  $D=0,2\,m$ , con riferimento alla prima ondata della colata.

| 144 | 10 |          |          |          |          |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|-----|----|----------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0   | 1  | 0.104134 | 0.245137 | 0.105047 | 0.104499 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1   | 1  | 0.100469 | 0.180063 | 0.101241 | 0.297616 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2   | 1  | 0.104706 | 0.373190 | 0.105182 | 0.365400 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3   | 1  | 0.096419 | 0.098678 | 0.097364 | 0.668088 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4   | 1  | 0.104595 | 0.105384 | 0.105425 | 0.868438 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5   | 1  | 0.104340 | 0.105331 | 0.291974 | 0.962101 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6   | 1  | 0.098922 | 0.099431 | 0.130735 | 1.128390 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7   | 1  | 0.095318 | 0.108162 | 0.096137 | 1.318970 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8   | 1  | 0.103235 | 0.104012 | 0.104032 | 1.517010 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9   | 1  | 0.095344 | 0.107960 | 0.118165 | 1.714890 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10  | 1  | 0.102952 | 0.103853 | 0.103915 | 1.912510 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11  | 1  | 0.101463 | 0.102442 | 0.102460 | 2.287590 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12  | 1  | 0.101797 | 0.102660 | 0.253399 | 0.102705 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13  | 1  | 0.099984 | 0.100910 | 0.282829 | 0.327482 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 14  | 1  | 0.097238 | 0.097693 | 0.116918 | 0.475839 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15  | 1  | 0.101991 | 0.102929 | 0.288828 | 0.733258 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Figura A.1: Estratto di particleFile utilizzato nelle simulazioni DEM.

Si tratta di una serie di numeri in colonna in cui il primo valore nella prima riga indica il numero totale di particelle; nella prima colonna è inserito un indice progressivo di identificazione della particella, nel caso specifico sono riportate le prime 15 a cui segue una

colonna di valori unitari siccome non sono presenti cluster. Nella terza colonna è riportato il valore del raggio in metri, dotato di una certa dispersione minima, seguono le posizioni x, y e z del centro della sfera, le componenti di velocità iniziale in direzione x, y e z di cui solo la prima componente è diversa da zero e pari a 1 m/s, le tre componenti di velocità angolare nulle e infine delle colonne con parametri che definiscono l'orientamento delle particelle; essendo sferiche tali parametri sono tutti nulli, tranne il primo valore pari a 1.

## A.2 File di configurazione

Il file di configurazione permette di introdurre nel codice DEM tutti i parametri definiti nel capitolo 4, necessari all'esecuzione dell'analisi. In figura A.2 si riporta il file di configurazione utilizzato nell'analisi con  $D=0.2\,\mathrm{m}$ .

```
# CONFIGURATION FILE FOR HYBIRD
# SOLVER SWITCHERS
lbSolve
freeSurfaceSolve
forceFieldSolve
coriolisSolve
centrifugalSolve
staticFrictionSolve
# PROBLEM NAME
                                                 = HONGKONG #
# TIME INTEGRATION
demInitialRepeat
lbmInitialRepeat
                                                = 0
                                                                          # run until this number of timesteps is reached (0 for infinite)
maximumTimeSteps
maxTime
                                                 = 30.0
                                                                          # run until the time variable has reached this value (0 for infinite) 50
# OUTPUT
screenExpTime
                                                 = 0.02
                                                                          # print data after x simulation time units (0 for deactivated)
                                                = 0.02  # print data after x simulation time units (0 for deactivated)
= 0  # write vtk file after x simulation time units (0 for deactivated)
= 0  # write Lagrangian vtk file after x simulation time units (0 for deactivated)
= 0.1  # write vtk file after x simulation time units (0 for deactivated)
= 0.1  # write particle recycle file after x simulation time units (0 for deactivated)
= 0  # write particle recycle file after x simulation time units (0 for deactivated)
= 0  # write a 2D topographycal file every x simulation time units (0 for deactivated)
= 1.16  162  163  164  165  166  167  168  169  170  171  172  173  174  175  176  177  178  179  180  181  182  183  184  185  186  187  188
fluidExpTime
fluidLagrangianExpTime
partExpTime
partRecycleExpTime
fluidRecycleExpTime
fluid2DExpTime
objectExpTime
singleObjects
```

Figura A.2: Estratto della prima parte del file di configurazione.

In questa prima parte del file di configurazione sono disponibili alcune caratteristiche generali di funzionamento del codice; in particolare è possibile selezionare quali solutori utilizzare, in questo caso il solutore DEM, del campo delle forze e dell'attrito statico che permette di risolvere l'analisi senza tener conto dell'accoppiamento con la fase fluida (LBM Lattice Boltzmann Method) in presenza di attrito e con la valutazione del campo di forze. Il tempo massimo di durata dell'analisi impostato pari a 30 s (maxTime), il tempo di risoluzione dell'output  $\Delta t_{out}$  pari a 0,02 s (screenExpTime) e l'indice delle particelle di cui si vuole ricavare le forze, in particolare sono riportati alcuni valori riguardanti le aste centrali della barriera. In figura A.3 si riporta la seconda parte relativa ai parametri specifici per la caratterizzazione del modello DEM.

```
# DEM PARAMETERS
density
contactModel
                                                    # mass/length^3
# LINEAR OR HERTZIAN
                            = 2630 0
                            = HERTZIAN
voungMod
                            = 1.2e9
                                                    # mass/length^2/time
                                                      / a viscosity coefficient is calculated so that the restitution keeps this value 0.2
linearStiff
                            = 5.0e5
                                                    # LINEAR 5.3e4
restitution
viscTang
                            = 0.8
= 0.5
frictionCoefPart
frictionCoefWall
                            = 0.577
                                                      0.3
                            = 0.577
= 0.577
frictionCoefObj
                                                    # 0.3
rollingCoefPart
particleFile
                              0.0678  # 0.3
./particle_flusso_sedimentato_D0.2_E1.2e9.dat #
                            = 0.0678
                                                    # length 42
# length
translateX
translateY
                            = 0.0
translateZ
                            = 0.0
                                                    # length
scale
                            = 1.0
objectFile
                               ./particle_briglia_4_aste_H0.5.dat
                                              # mass/length/time -> like dynamic viscosity
                            = 0.000001
numVisc
                                                    # ratio between time step and estimated duration of contacts (only if multistep=0)
multiSter
criticalRatio
```

Figura A.3: Seconda parte del file di configurazione del DEM.

Nella seconda parte sono riportati parametri che definiscono il modello e il suo comportamento. La densità delle particelle, la tipologia del modello di contatto tra le particelle selezionabile tra lineare o hertziano: la scelta del secondo implica che il codice trascuri il parametro di rigidezza lineare definito in seguito, siccome tale modello è caratterizzato dai parametri di modulo elastico e il coefficiente di Poisson. Il coefficiente di restituzione, la viscosità tangenziale, il coefficiente di attrito statico tra particelle e tra muro e particelle, il nominativo del particelFile e dell'objectFile da cui leggere le configurazioni di particelle e infine il rapporto critico. Per la definizione di tali parametri si rimanda al capitolo 4.

# **Bibliografia**

- Ancey C. "Debris flows and related phenomena". *Geomorphological Fluid Mechanics*. *Lecture Notes in Physics (LNP)*, (2001).
- Arattano M., Franzi L. "On the evalutation of debris flows dynamics by means of mathematical models". *Nat Hazards Earth Syst Sci* 3, pp. 539-544, (2003).
- Armanini A. "On the dynamic impact of a debris flow on structures. Recent developments on debris flows". *Lecture notes in Earth Sciences 64 (Springer Verlag)*, (1997).
- Armanini A., Larcher M., Odorizzi M. "Impatto dinamico di una colata di detriti contro una parete verticale". *XXXII Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*. Palermo, 14-17 settembre (2010).
- Armanini A., Scotton P. "On the dynamic impact of a debris flow on structures". *In Proceedings of XXV IAHR Congress*, Tokyo (Tech. Sess. B, III), pp. 203-210, (1993).
- Bardou E., Ancey C., Bonnard C., Vulliet L. "Classification of debris-flow deposits for hazard assessment in apline areas". *Proceedings of the 3rd International Conference on debris flow hazards mitigation*, pp. 799-808, (2003).
- Borri M., Barbero M., Barpi F., Pallara O. "Sistema di monitoraggio presso le briglie situate in località Pèrriere-Bois de Sapè, lungo il torrente Grand Valey, nel Comune di SaintVincent". Relazione finale, Politecnico di Torino, (2012).
- Calvetti F., di Prisco C., Vairaktaris E. "Dry granular flows impacts on rigid obstacles: DEM evaluation of a design formula for the impact force". *VI Italian conference of researchers in geotechnical engineering. Procedia Engineering 158*, pp. 290-295, (2016).

- Ceccato F., Simonini P., "Granular Flow Impact Forces on Protection Structures: MPM Numerical Simulations with Different Constitutive Models". *Procedia Engineering*, 158, pp. 164-169, (2016).
- Ceccato F., Simonini P., di Prisco C., Redaelli, I. "The effect of the front inclination on the impact forces transmitted by granular flows to rigid structures". *In World Landslides Forum: Advancing Culture of Living with Landslides*, pp. 593-599, (2017)
- Ceravolo R., "Dispense di ingegneria sismica". Politecnico di Torino, corso di ingegneria sismica, (2018).
- Costa, J. E. *Physical geomorphology of debris flow*. In Costa JE, F. P., editor, Developments and Applications in Geomorphology, pp. 268-317. Springer, Berlin, Heidelberg, (1984).
- Coussot P., Meunier M. "Recognition, classification and mechanical description of debris flows". *Earth-Science Reviews*, 40: pp. 209–227, (1996).
- Cruden D.M. "A simple definition of a landslide". *IAEG Bull.*, 43, pp. 27-29, (1991).
- Cruden, D.M., Varnes, D.J. "Landslide Types and Processes". *Special Report, Transportation Research Board, National Academy of Sciences*, 247: pp. 36-75, 1996.
- Cundall P., Strack O. "A discrete numerical model for granular assemblies". *Géotechnique*, 29(1): pp. 47-65, (1979).
- D'Agostino V. "Principi di dimensionamento delle opere di protezione dai debris flow". Università degli studi di Padova, Legnaro (PD), pp. 1-20, (2005).
- Dassault Systèmes, SIMULIA. "Abagus/CAE User's Guide", v6.14, (2014).
- Dassault Systèmes, SIMULIA. "Abaqus Analysis User's Guide", v6.14, volume II: Analysis, (2014).
- Dassault Systèmes, SIMULIA. "Abaqus Analysis User's Guide", v6.14, volume IV: Elements, (2014).
- Dassault Systèmes, SIMULIA. "Abaqus Analysis User's Guide", v6.14, volume V: Prescribed conditions, constraints & interactions, (2014).
- Du R., Kang Z., Chen X., Zhu P. "A Comprehensive Investigation and Control Planning for Debris Flow in the Xiajiang River Basin of Yunnan Province". Science Press, (1987).

- Egli T. "Objektschutz: Angepasste bauweise reuziert das personen und sachrisiko bei gabauden". Technical report, Interpravent 2000, (2000).
- Fell R. "Landslide risk assessment and acceptable risk". *Canadian Geotechnical Journal*. 32, 2, pp. 261-272, (1994).
- Girolami L., Hergault V., Vinay G., Wachs A. "A three-dimensional discrete-grain model for the simulation of dam-break rectangular collapses: Comparison between numerical results and experiments". *Granular Matter*, 14(3), pp. 381-392. (2012).
- Gugliotta A. *Elementi finiti, Parte IV.* Torino, otto editore, (2002).
- Haff P. K., Werner B. T. (1986). "Computer Simulation of the Sorting of Grains". *Poweder Techn.*, 48(3) pp. 239-245, (1986).
- Huang H-P., Yang K-C., Lai S-W. "Impact force of debris flow on filter dam". European Geosciences Union General Assembly, 9, p. 32, (2007).
- Hubl J., Holzinger G. "Entwicklung von Grundlagen zur Dimensionierung kronenoffener Bauwerke für die Geschibebewirtschaftung in Wildbachen: Kleinmabstabliche Modellversuche zur Wirkung von Murbrechen". WLS Report 50 (Im Auftrag des BMLFUW), (2003).
- Hubl J., Suda J., Proske D., Kaitna R., Scheidl C. "Debris flow impact estimation". *Proceedings of the 11th International Symposium on Water Management and Hydraulic Engineering*, pp. 137-148, Settembre (2009).
- Hubl J., Nagl G., Suda J., Rudolf-Miklau F. "Standardized Stress Model for Design of Torrential Barriers under Impact by Debris Flow (According to Austrian Standard Regulation 24801)". *International Journal of Erosion Control Engineering 10*, n. 1, pp. 47-55, (2017).
- Hungr O., Morgan G.C. & Kellerhals. "Quantitative analysis of debris flow torrent hazards for design of remedial measures". Can. Geotechnical Journal, pp. 663-677, (1984).
- Hungr O., Evans S.G., Bovis M.J., Hutchinson J.N. "A review of the classification of landslides of the flow type". *Environmental & Engineering Geoscience*, pp. 221\_238, (2001).
- Iverson R. M. "Debris flows: behaviour and hazard assessment". *Geology Today*, 30(1) pp. 15-20, (2014).
- Jòhannesson T., Gauer P., Issler P., Lied K. "The design of avalanche protection dams. Recent practical and theoretical developments". European Communities, pp. 109-111, (2009).

- Johnson C. G., Kokelaar B. P., Iverson R. M., Logan M., LaHusen R. G., Gray J. M. N. T. "Grain-size segregation and levee formation in geophysical mass flows". *J. Geophys. Res.*, 117, F01032, (2012).
- Kwan J.S.H. "Supplementary technical guidance on design of rigid debris-resisting barriers (GEO Report No.270)". *Geotechnical Engineering Office, Hong Kong*, p. 88, (2012).
- Lancellotta R. Geotecnica, 4 ed. Bologna, Zanichelli, (2014).
- Leonardi A. "Numerical simulation of debris flow and interaction between flow and obstacole via DEM". Tesi di dottorato. ETH Zurich, (2015).
- Lichtenhahn C. "Die berechnung von sperren in beton und eisenbeton, Kolloquium uber Wildbachsperren". (1973).
- Lo D.O.K. "Review of Natural Terrain Landslide Debris-resisting Barrier Design (GEO Report No.104)". *Geotechnical Engineering Office*, Hong Kong, (2000).
- Marchelli M. "Debris flow interaction with open rigid barriers". Tesi di dottorato. Politecnico di Torino, (2018).
- Melfi M. L. "Analisi di interazione tra colata detritica e opera di difesa a fini progettuali". Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Torino, (n.d.).
- MLR. "Specification of Geological Investigation for Debris Flow Stabilization". *National Land Resources Department*, China, p. 32, (2006).
- NILIM. "Manual of Technical Standard for Designing Sabo Facilities against Debris Flow and Driftwood". *Technical Note of NILIM No.365, Natural Institute for Land and Infrastructure Management*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Japan, p.73, (2007).
- NTC. "Aggiornamento delle «Norme Tecniche per le Costruzioni». D.M. 17/1/2018". (2018).
- Pierson T. C. and Costa J. E. "A rheological classification of subaerial sediment-water flows". *Geological Society of America: Reviews in Engineering Geology*, VII pp. 1-12, (1987).
- Pirulli M. "Il fenomeno del Debris flow e metodologie di calcolo dei percorsi di colata". Politecnico di Torino, (2014).

- Proske D., Suda J., Hubl J. "Debris flow impact estimation for breakers". Georisk Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, (2011).
- Rickenmann D. "Empirical relationships for debris flows". *Natural Hazards*, pp. 47-77, (1999).
- Suda J., Hubl J., Bergmeister K. "Design and Construction of high stressed concrete structures as protection works for torrent control in the Austrian Alps". 3rd fib international Congress, (2010).
- SWCB. "Manual of Soil and Water Conservation". Soil and Water Conservation Bureau, Taiwan, p. 692, (2005).
- Takahashi T. Debris flow. Mechanics, prediction and countermeasures. Taylor & Francis/Balkema, Londra, (2007).
- VanDine D. F. "Debris flow control structures for forest engineering". Res. Br., B.C. Min. For., Victoria, B.C., Work. Pap. 08, (1996).
- Varnes, D. "Slope movement types and processes". Schuster RL, Krizek RJ (eds) Landslides, analysis and control, special report 176, Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C., pp. 11-33, (1978).
- Watanabe M., Ikeya H. "Investigation and analysis of volcanic mud flows on Mount Sakurajima. Japan. Erosion sediment transport measurement.". *International Association on Hydrology*. Pp. 245-256, Florence, (1981).
- Watanabe M., Mizuyama T., Uehara, S. "Review of debris flow countermeasure facilities". *Journal of Japanese Erosion Control Engineering Society*, 115 pp.40-45, (1980).
- Zhang. "A comprehensive approach to the observation and prevention of debris flow in China". *Natural Hazards*, pp. 1-23, (1993).