

Università degli studi Federico II di Napoli  
Dottorato di ricerca in Scienze della Terra  
XVIII Ciclo

**IL FENOMENO DELLA  
FLUIDIZZAZIONE NELLA  
DINAMICA DELLE CORRENTI  
PIROCLASTICHE DENSE**



Relatore

*Prof. Lucio Lirer*

Co-Relatore

*Prof. Piero Salatino*

Candidata

*Dott. Teresita Gravina*



*“Le cose che impariamo con passione,  
non le dimenticheremo mai.”*  
Alfred Mercier

**INTRODUZIONE** **7**

---

**CAPITOLO 1: FLUSSI PIROCLASTICI DENSI-  
GENERALITA' E FENOMENOLOGIA.** **12**

---

<b>1.1 GENERALITÀ SUI FLUSSI PIROCLASTICI DENSI.</b>	<b>12</b>
<b>1.2 GENESI E STRUTTURA DI CORRENTI PIROCLASTICHE DENSE</b>	<b>12</b>
<b>1.3 REGIMI DI FLUSSO NELLE CORRENTI PIROCLASTICHE</b>	<b>15</b>
<b>1.4 CARATTERISTICHE DEPOSIZIONALI DI CORRENTI PIROCLASTICHE DENSE.</b>	<b>16</b>
<b>1.5 IL RUOLO DELLA FLUIDIZZAZIONE NELLA DINAMICA DI CORRENTI PIROCLASTICHE DENSE.</b>	<b>19</b>
<b>1.6 MODELLISTICA FISICA DI CORRENTI PIROCLASTICHE DENSE</b>	<b>20</b>
<b>1.7 MODELLISTICA MATEMATICA DI CORRENTI PIROCLASTICHE DENSE.</b>	<b>22</b>

**CAPITOLO 2: INQUADRAMENTO DELLA DINAMICA DI  
CORRENTI PIROCLASTICHE DENSE NELLE  
CONOSCENZE TEORICHE SUL MOTO DI SISTEMI  
GRANULARI VELOCI.** **25**

---

<b>2.1 LE CORRENTI PIROCLASTICHE COME FLUSSI GRANULARI VELOCI.</b>	<b>25</b>
2.1.1 GENERALITÀ SUI FLUSSI GRANULARI.	25
2.1.2 CLASSIFICAZIONE DEI FLUSSI GRANULARI VELOCI.	27
2.1.3 SFORZI INTERNI AI FLUSSI GRANULARI	27
<b>2.2 LE CORRENTI PIROCLASTICHE COME CORRENTI GRAVITAZIONALI (GRAVITY CURRENTS).</b>	<b>29</b>
2.2.1 LA VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DI UNA CORRENTE GRAVITAZIONALE.	30
2.2.2 LO SCAMBIO DI MATERIA TRA GRAVITY CURRENTS NELLA TRATTAZIONE CLASSICA.	30
2.2.3 PECULIARITÀ ASSOCIATE AL MOTO FRONTALE DI CORRENTI GRAVITAZIONALI.	31
<b>2.3 LA FLUIDIZZAZIONE DI SOLIDI GRANULARI.</b>	<b>34</b>

2.3.1 GENERALITÀ SULLA FLUIDIZZAZIONE DI SOLIDI GRANULARI MONODISPERSI: CONDIZIONE DI INCIPIENTE FLUIDIZZAZIONE E REGIMI DI FLUIDIZZAZIONE.	35
2.3.2 CLASSIFICAZIONE DI SOLIDI GRANULARI IN RELAZIONE ALLA QUALITÀ DELLA FLUIDIZZAZIONE.	38
2.3.3 FLUIDIZZAZIONE DI SOLIDI POLIDISPERSI: CONDIZIONE DI INCIPIENTE FLUIDIZZAZIONE.	40
2.3.3 FLUIDIZZAZIONE TRANSIENTE E SEGREGAZIONE DI COMPONENTI IN MISCELE GRANULARI POLIDISPERSE.	41
2.3.4 FLUIDIZZAZIONE IN FLUSSO DI SCORRIMENTO.	44
2.3.5 FENOMENI DI ABRASIONE (ATTRITION) NEL CORSO DELLA FLUIDIZZAZIONE ED ASSOCIATA GENERAZIONE DI PARTICOLATO FINE.	45
<b>2.4 PRECEDENTI ESPERIENZE INERENTI LA FLUIDIZZAZIONE DI MATERIALI PIROCLASTICI</b>	<b>47</b>

**CAPITOLO 3: UN CRITERIO APPROSSIMATO PER L'INSTAURARSI DI CONDIZIONI DI AUTOFLUIDIZZAZIONE NELLA REGIONE FRONTALE DI CORRENTI PIROCLASTICHE DENSE.** **53**

<b>3.1 VALUTAZIONE PRELIMINARE DELL'ENTITÀ DEGLI SFORZI INTERNI ALLA FASE GRANULARE E DEFINIZIONE DEL REGIME DI FLUSSO.</b>	<b>53</b>
<b>3.2 DERIVAZIONE DI UNA EQUAZIONE SEMPLIFICATA PER LA VELOCITÀ DEL FLUSSO IN CONDIZIONI FLUIDIZZATE E NON.</b>	<b>55</b>
<b>3.3 ANALISI DELLA STRUTTURA DELLA REGIONE FRONTALE DI UNA CORRENTE PIROCLASTICA DENSE.</b>	<b>55</b>
<b>3.4 UN CRITERIO SEMPLIFICATO PER L'AUTOFLUIDIZZAZIONE DI UNA CORRENTE PIROCLASTICA DENSE.</b>	<b>58</b>
<b>3.5 MOLTEPLICITÀ DEGLI STATI STAZIONARI E SENSIBILITÀ DALLE CONDIZIONI INIZIALI DEL FLUSSO DI CORRENTI PIROCLASTICHE DENSE.</b>	<b>60</b>
<b>3.6 CONDIZIONI CHE PROMUOVONO L'INSORGENZA DELLA CONDIZIONE DI MOTO AUTO-FLUIDIZZATO DI UNA CORRENTE PIROCLASTICA DENSE.</b>	<b>61</b>

## **CAPITOLO 4: METODI, APPARECCHIATURE E TECNICHE SPERIMENTALI** **64**

<b>4.1. APPARATO SPERIMENTALE</b>	<b>64</b>
4.1.1 COLONNA DI FLUIDIZZAZIONE	65
4.1.2 DISPOSITIVO DI AGITAZIONE	67
<b>4.2. MATERIALI</b>	<b>68</b>
4.2.1 DEPOSITO DA FLUSSO PIROCLASTICO DELL'ERUZIONE DEL TUFO GIALLO NAPOLETANO	69
4.2.2 DEPOSITO DA FLUSSO PIROCLASTICO DELL'ERUZIONE DI AVELLINO.	71
4.2.3 DEPOSITO PIROCLASTICO DA CADUTA CONNESSO ALL'ERUZIONE DI AVELLINO.	73
4.2.4 PREPARAZIONE E DESCRIZIONE DEI MATERIALI	75
4.2.5 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI PIROCLASTICI IN ESAME	75
<b>4.3 CARATTERIZZAZIONE DELLA FLUIDIZZAZIONE DI SOLIDI GRANULARI DI INTERESSE VULCANOLOGICO.</b>	<b>80</b>
4.3.1 PROVE DI FLUIDIZZAZIONE IN REGIME QUASI-STAZIONARIO	80
4.3.2 PROVE DI COLLASSO	82
4.3.3 PROVE DI FLUIDIZZAZIONE IN PRESENZA DI FLUSSO DI SCORRIMENTO.	86
4.3.4 CARATTERIZZAZIONE DEI FENOMENI DI ABRASIONE IN CORSO DI FLUIDIZZAZIONE.	87
4.3.5 CARATTERIZZAZIONE DEI FENOMENI DI ELUTRIAZIONE IN CORSO DI FLUIDIZZAZIONE.	87

## **CAPITOLO 5: RISULTATI SPERIMENTALI** **89**

<b>5.1. CARATTERIZZAZIONE DELLA FLUIDIZZAZIONE DI PIROCLASTITI DI TUFO GIALLO NAPOLETANO</b>	<b>89</b>
5.1.1 CARATTERIZZAZIONE DELLA FLUIDIZZAZIONE DELLA MISCELA DI TUFO GIALLO NAPOLETANO	89
5.1.2 CARATTERIZZAZIONE DELLA FLUIDIZZAZIONE DI FRAZIONI GRANULOMETRICHE SELEZIONATE DELLA MISCELA DI TUFO GIALLO NAPOLETANO	95
5.1.3 CARATTERIZZAZIONE DELLA FLUIDIZZAZIONE DELLA MISCELA DI TUFO GIALLO NAPOLETANO NEL DISPOSITIVO A CILINDRI COASSIALI IN ASSENZA DI AGITAZIONE MECCANICA	97

5.1.4 CARATTERIZZAZIONE DELLA FLUIDIZZAZIONE DELLA MISCELA DI TUFO GIALLO NAPOLETANO IN PRESENZA DI AGITAZIONE MECCANICA	100
5.1.5 CONFRONTO TRA LE PROVE DI FLUIDIZZAZIONE ESEGUITE SULLA MISCELA DI TUFO GIALLO NAPOLETANO IN PRESENZA ED IN ASSENZA DI AGITAZIONE MECCANICA	102
5.1.6 PROVE DI COLLASSO ESEGUITE SULLA MISCELA DI TUFO GIALLO NAPOLETANO	102
5.1.7 PROVE DI COLLASSO SU FRAZIONI GRANULOMETRICHE SELEZIONATE DELLA MISCELA DI TUFO GIALLO NAPOLETANO	105
5.1.8 PROVE DI COLLASSO ESEGUITE SULLA MISCELA DI TUFO GIALLO NAPOLETANO CON E SENZA AGITAZIONE MECCANICA	106
5.1.9 COMPORTAMENTO FLUIDODINAMICO DELLA MISCELA DI TUFO GIALLO NAPOLETANO	108
<b>5.2 CARATTERIZZAZIONE DELLA FLUIDIZZAZIONE DI PIROCLASTITI DI AVELLINO FLOW</b>	<b>110</b>
5.2.1 CARATTERIZZAZIONE DELLA FLUIDIZZAZIONE DELLA MISCELA DI AVELLINO FLOW	110
5.2.2 CARATTERIZZAZIONE DELLA FLUIDIZZAZIONE DI FRAZIONI GRANULOMETRICHE SELEZIONATE DELLA MISCELA DI AVELLINO FLOW	114
5.2.3 CARATTERIZZAZIONE DELLA FLUIDIZZAZIONE DELLA MISCELA DI AVELLINO FLOW NEL DISPOSITIVO A CILINDRI COASSIALI IN ASSENZA DI AGITAZIONE MECCANICA	117
5.2.4 CARATTERIZZAZIONE DELLA FLUIDIZZAZIONE DELLA MISCELA DI AVELLINO FLOW IN PRESENZA DI AGITAZIONE MECCANICA	119
5.2.5 CONFRONTO TRA LE PROVE DI FLUIDODIZZAZIONE ESEGUITE SULLA MISCELA DI AVELLINO FLOW IN PRESENZA O ASSENZA DI AGITAZIONE MECCANICA	121
5.2.6 PROVE DI COLLASSO ESEGUITE SULLA MISCELA DI AVELLINO FLOW	121
PROVE DI COLLASSO SU FRAZIONI GRANULOMETRICHE SELEZIONATE DELLA MISCELA DI AVELLINO FLOW	122
5.2.8 PROVE DI COLLASSO ESEGUITE SULLA MISCELA DI AVELLINO FLOW CON E SENZA AGITAZIONE MECCANICA	124
5.2.9 COMPORTAMENTO FLUIDODINAMICO DELLA MISCELA DI AVELLINO FLOW	125
<b>5.3 CARATTERIZZAZIONE DELLA FLUIDIZZAZIONE DI PIROCLASTITI DI AVELLINO FALL</b>	<b>127</b>

5.3.1 CARATTERIZZAZIONE DELLA FLUIDIZZAZIONE DELLA MISCELA DIVELLINO FALL	127
5.3.2 CARATTERIZZAZIONE DELLA FLUIDIZZAZIONE DI FRAZIONI GRANULOMETRICHE SELEZIONATE DELLA MISCELA DI AVELLINO FALL	132
5.3.3 PROVE DI ELUTRIAZIONE	135
5.3.4 PROVE DI ABRASIONE	136
5.3.5 CARATTERIZZAZIONE DELLA FLUIDIZZAZIONE DELLA MISCELA DI AVELLINO FALL NEL DISPOSITIVO A CILINDRI COASSIALI IN ASSENZA DI AGITAZIONE MECCANICA	138
5.3.6 CARATTERIZZAZIONE DELLA FLUIDIZZAZIONE DELLA MISCELA DI AVELLINO FALL IN PRESENZA DI AGITAZIONE MECCANICA	141
5.3.7 CONFRONTO TRA LE PROVE DI FLUIDODIZZAZIONE ESEGUITE SULLA MISCELA DI AVELLINO FLOW IN PRESENZA O ASSENZA DI AGITAZIONE MECCANICA	144
5.3.7 PROVE DI COLLASSO ESEGUITE SULLA MISCELA DI AVELLINO FALL	145
5.3.8 PROVE DI COLLASSO ESEGUITE SULLA MISCELA DI AVELLINO FLOW CON E SENZA AGITAZIONE MECCANICA	146
5.3.9 COMPORTAMENTO FLUIDODINAMICO DELLA MISCELA DI AVELLINO FALL	147

**CAPITOLO 6: CONCLUSIONI** **150**

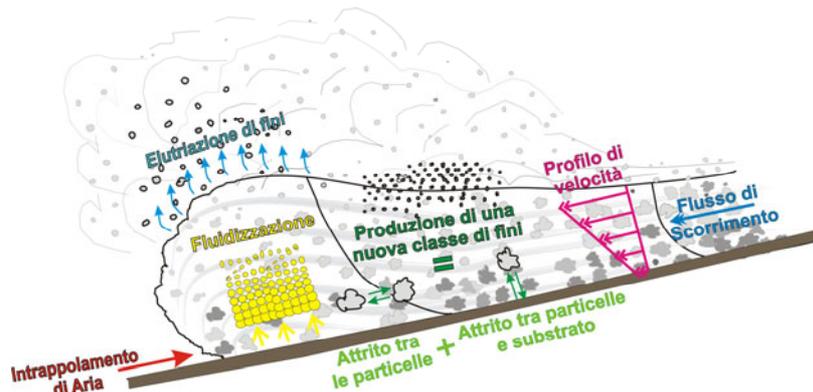
**BIBLIOGRAFIA** **161**

## INTRODUZIONE

Un flusso piroclastico può essere definito come una corrente bifasica, costituita da particelle solide disperse in una fase gassosa di origine vulcanica, cui si aggiunge gas atmosferico derivante dall'interazione del flusso piroclastico con l'ambiente esterno. Dopo la loro formazione, un flusso piroclastico si allontana dal *vent* a velocità elevate, ed al suo interno si sviluppano tipologie di trasporto di particelle dipendenti dalla loro densità e dimensioni. Questi processi interni alle correnti piroclastiche seguono in larga misura leggi comuni ad altri tipi di trasporto, erosione e sedimentazione, quali il fluviale ed il marino, con i quali sono stati spesso confrontati (Allen, 1982). Differenze significative risiedono nel mezzo disperdente, che per i flussi piroclastici è costituito dalla fase gassosa, nonché dalle peculiari condizioni che caratterizzano la loro genesi, delle quali il flusso conserva memoria nella sua propagazione. I gas che alimentano un flusso piroclastico provengono in gran parte da quelli presenti nella colonna eruttiva, ma rivestono un ruolo rilevante anche quelli essodati dalle particelle vetrose, i gas generati per passaggio del flusso al disopra di vegetazione o superfici di acqua (Cas e Wright, 1987), ed, in particolare, i gas ed i volatili che sono intrappolati durante il moto del flusso. L'entità della fase gassosa di un flusso piroclastico diminuisce costantemente dal momento della sua formazione, fino al momento della sedimentazione, sebbene in questo intervallo di tempo non si annulli mai del tutto.

Caratteristica peculiare dei flussi piroclastici è il moto ascensionale della fase gassosa al suo interno. La componente volatile può raggiungere velocità tali da riuscire a sostenere completamente la frazione solida presente nel flusso, fenomeno noto come fluidizzazione. Questo ultimo è stato indicato come uno dei fenomeni interni ai flussi piroclastici che ne esaltano la

mobilità anche su pendii di pendenza modesta. Il flusso del gas induce fenomeni di segregazione all'interno della fase solida, e contatti tra le particelle e tra particelle ed il substrato, che generano consistenti fenomeni d'attrito che portano alla formazione di una nuova frazione di materiali fini. Questa frazione solida di neo-formazione partecipa all'arricchimento della matrice, ma svolge un ruolo importante nei fenomeni di segregazione interni al flusso (Gravina et al., 2004) e nel favorire la condizione di fluidizzazione all'interno del flusso piroclastico (Roche et al., 2002).

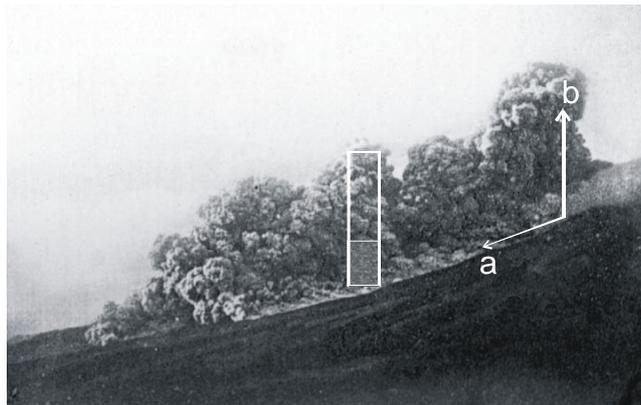


**Figura 1:** Schematizzazione dei fenomeni interni ad una corrente piroclastica

Lo studio del ruolo svolto dai fenomeni di fluidizzazione nel moto di correnti piroclastiche dense è stato affrontato da diversi autori (Sparks 1976; Wilson, 1980, 1984), che hanno evidenziato i differenti processi che si susseguono durante le diverse fasi della messa in posto di un flusso piroclastico. Dal punto di vista sperimentale sono state effettuate caratterizzazioni su materiali sintetici impiegando apparecchiature e le metodologie adottate per lo studio delle sospensioni bifasiche solido/fluido (Druitt et al., 2004; Gravina et al., 2004; Roche et al., 2002, 2004). Questi studi per lo più fanno uso di letti formati da particelle comprese in un intervallo granulometrico relativamente stretto, le cui dimensioni raggiungono al massimo

qualche millimetro, e delle quali sono note forma e densità. Un flusso piroclastico, invece, presenta una popolazione di particelle solide con spettri di dimensioni, densità e forme molto ampi. L'assortimento granulometrico può arrivare a coprire 10-14 unità della scala phi (da 1/16 di millimetro fino ad 1 metro); la densità può variare tra 2,5-3,0 g/cm<sup>3</sup> per litici e cristalli, fino a scendere a valori inferiori a 1 g/cm<sup>3</sup> per le pomici; la forma delle particelle è molto varia, con una distribuzione completa da forme sferiche a cilindriche, fino a planari (Cas e Wright, 1987). Inoltre bisogna tenere in conto che fenomeni di abrasione, dovuti ai moti relativi della fase solida di un flusso piroclastico, fanno sì che la sua distribuzione granulometrica si modifichi significativamente nel tempo.

Le osservazioni disponibili in letteratura suggeriscono che il moto di un flusso piroclastico, i fenomeni di miscelazione tra solidi e i processi di abrasione subita da clasti possano essere almeno in parte interpretati sulla base di informazioni desunte dalle teorie disponibili per l'analisi dei fenomeni di fluidizzazione e della dinamica dei sistemi granulari.



**Figura 2:** Cilindro di controllo immerso nel flusso piroclastico. Assumendo per i flussi piroclastici un meccanismo di movimento tipo *plug flow*, è possibile disaccoppiare il moto verticale delle particelle sostenute dai gas, da quello orizzontale della corrente piroclastica (foto del flusso piroclastico Lacroix, 1904).

Il presente lavoro di tesi di dottorato, che si è sviluppato nel quadro di una collaborazione tra il Dipartimento di Scienze della Terra ed il Dipartimento di Ingegneria Chimica dell'Università degli Studi di Napoli Federico II, ha affrontato sul piano teorico e sperimentale le seguenti problematiche:

- Si è analizzato il comportamento di correnti piroclastiche dense in relazione alla possibilità che si instaurino condizioni di auto-fluidizzazione, ovvero fluidizzazione promossa dall'incedere rapido della corrente. In particolare si è affrontata la problematica della struttura della regione frontale del flusso e della ingestione di aria nella regione frontale della corrente piroclastica, evidenziando i fattori che possono favorirla. Aspetto centrale nell'analisi condotta è rappresentato dal confronto tra una scala temporale del flusso opportunamente definita e la scala temporale sulla quale un letto granulare inizialmente fluidizzato collassa verso la condizione di letto fisso al venir meno della sorgente di gas di fluidizzazione (fenomeno della de-aerazione).
- Si è studiato in sede sperimentale il comportamento di miscele granulari di origine piroclastica rispetto ai fenomeni di fluidizzazione. Le miscele impiegate sono di origine e natura diversa e si ritengono rappresentative di sistemi granulari che costituiscono correnti piroclastiche reali. In particolare è stato evidenziato il ruolo che la polidispersità delle miscele e la presenza di una cospicua frazione di particelle fini svolge nello stabilire la qualità della fluidizzazione.
- Si è studiato in sede sperimentale l'effetto che la presenza di un flusso di scorrimento (*shear flow*) sortisce sulla qualità della fluidizzazione, con particolare riferimento alla soppressione del regime di fluidizzazione bollente ed alla stabilizzazione di una condizione di fluidizzazione omogenea del letto.

- Si sono determinati per via sperimentale i tempi caratteristici di de-aerazione di letti di solidi granulari, mediante l'impiego di tecniche di collasso. In particolare si è posto in relazione il tempo caratteristico di de-aerazione con la polidispersità della miscela granulare e con la concomitante presenza di un flusso di scorrimento.
- Si è operata una caratterizzazione preliminare dei processi di abrasione di solidi di natura piroclastica dei conseguenti fenomeni di elutriazione di particolato fine da letti granulari di piroclastiti.

# CAPITOLO 1: FLUSSI PIROCLASTICI DENSI - GENERALITA' E FENOMENOLOGIA.

## 1.1 GENERALITÀ SUI FLUSSI PIROCLASTICI DENSI.

Un flusso piroclastico può essere definito come una corrente bifasica, costituita da particelle solide (materiale juvenile, pomici, scorie e cristalli, e non juvenile, litici accessori ed accidentali), disperse in una fase gassosa (prevalentemente vapore d'acqua e subordinatamente biossido e monossido di carbonio). Alla fase gassosa di origine vulcanica, si aggiunge una quantità di gas atmosferico, derivante dall'interazione del flusso piroclastico con l'ambiente esterno (Cas e Wright, 1987). Questa corrente calda scorre lungo i fianchi del vulcano, sotto l'azione della forza di gravità, a temperatura compresa tra i 500 °C e quella ambiente (Cas e Wright, 1987).

Il termine "flusso piroclastico" s.l. comprende una vasta gamma di correnti bifasiche e di prodotti. Si passa dai *block and ash flow*, tipicizzati da piccoli volumi, alle ignimbriti, flussi a prevalente componente pomicea caratterizzati da grossi volumi (Cas e Wright, 1987). La densità, le dimensioni delle particelle, le temperature e l'influenza delle morfologie su cui queste correnti scorrono determinano dinamiche deposizionali estremamente differenti.

## 1.2 GENESI E STRUTTURA DI CORRENTI PIROCLASTICHE DENSE

La genesi di un flusso piroclastico s.l. è molteplice. In modo semplificato essi possono essere ricondotti sia a fenomeni di collasso gravitazionale di una colonna eruttiva pliniana o a fenomeni di *blast* direzionale. La classificazione genetica dei flussi piroclastici è riassunta in tabella 1.1

Clasti	Meccanism o eruttivo	Denominazione del flusso	Prodotti	Esempi storici	Depositi	
vescicolati	Collasso della colonna eruttiva	<b>FLUSSO DI POMICI</b>	Pomici e cenere; magmi acidi.	Valley of Ten Thousand Smokes  Katamai, Alaska 1912	Depositi voluminosi formati dal collasso continuo di una colonna pliniana	
			Pomici e cenere; magmi da acidi ad intermedi.	Komagatake, Giappone, 1929	Depositi poco voluminosi formati dal collasso interrotto della colonna, simile al caso dei flussi di scorie	
		<b>FLUSSO DI SCORIE</b>	Scorie e cenere; magmi da basaltici ad andesitica.	Soufrière, St. Vincent, 1902	Depositi di piccolo volume prodotti dal collasso della colonna interrotto da brevi esplosioni. Possono contenere grossi blocchi non vescicolati.	
Non vescicolati	Collasso di un duomo di lava	Esplosivo	<b>FLUSSI ANDESITICI</b>	Andesiti semivescicolate e ceneri.	Asama, 1783	Depositi di piccolo volume composti da clasti andesitica spigolosi e semivescicolati.
			Gravitazionale	<b>FLUSSO DI BLOCCHI E CENERE</b> ; nubi ardenti	Blocchi e cenere; magmi andesitica o dacitici.	Mt. Peleè, Martinica, 1902
		<b>FLUSSO DI BLOCCHI E CENERE</b> ; nubi ardenti		Blocchi e cenere; magmi andesitici o dacitici.	Merapi, Indonesia, 1930	Depositi di piccolo volume.

**Tabella 1.1:** Classificazione genetica dei flussi piroclastici (Scandone, 1998).

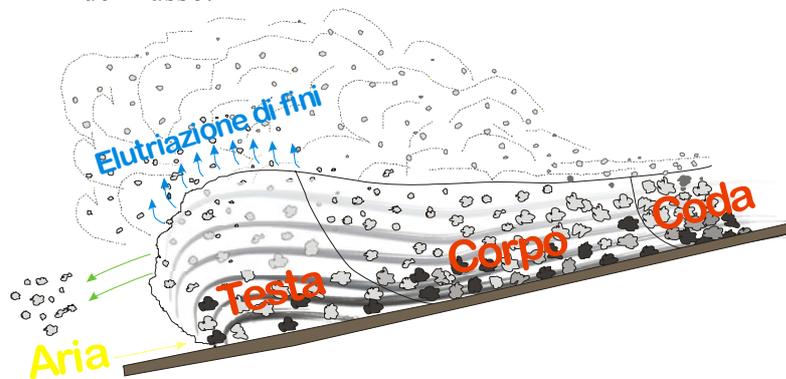
Secondo Wilson e Walker (1982) una corrente piroclastica si può dividere in tre parti (figura 1.1):

Testa: zona anteriore del flusso, nella quale si registrano i maggiori fenomeni d'interazione con l'ambiente esterno; il suo fronte è leggermente rialzato rispetto al substrato, a causa di fenomeni d'attrito. La parte frontale della testa ha una forma articolata, costituita da alternanze di lobi e di rientranze. Dalle rientranze vi è ingestione di aria a

temperatura ambiente, mentre dai lobi vengono emessi i gas e le particelle meno dense della frazione solida. L'aria ingerita, una volta all'interno del flusso piroclastico, si riscalda espandendosi rapidamente, innescando la fluidizzazione, e in alcuni casi, il passaggio da regime laminare a turbolento. Questo meccanismo fa sì che la testa sia la parte maggiormente espansa e fluidizzata del flusso. La intensa fluidizzazione è responsabile dell'elutriazione delle particelle più fini della frazione solida del flusso, che andranno a formare l'*ash cloud*, il cui movimento sovrasta la testa delle correnti piroclastiche. Talvolta nel suo avanzamento il flusso piroclastico può essere rallentato, o bloccato, da ostacoli morfologici, mentre l'*ash cloud* può anche staccarsi dal flusso e procedere indipendentemente da esso.

Corpo: è la parte volumetricamente più sviluppata del flusso, il movimento delle particelle è di tipo laminare o *plug flow*; in questa parte del flusso si ha la maggiore concentrazione di particelle e grande dissipazione di energia per attrito tra queste ultime e substrato;

Coda: è la zona in cui, a causa della vicinanza al suolo, aumenta l'attrito e diminuisce la fluidizzazione, la fase solida è trascinata passivamente; queste condizioni indicano che la coda è una zona a minore velocità rispetto alle altre parti del flusso.



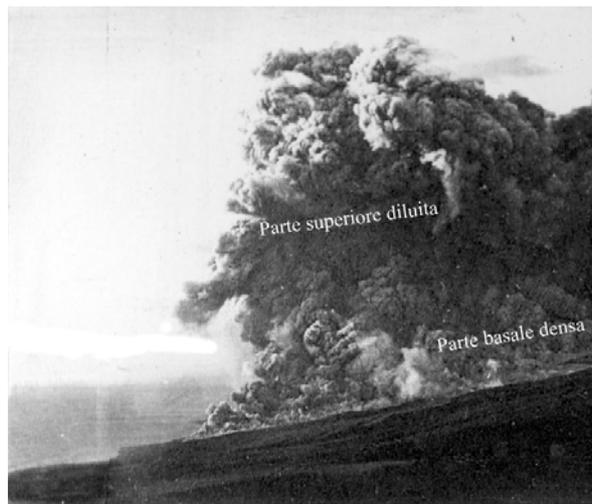
**Figura 1.1:** Schema di un flusso piroclastico.

### 1.3 REGIMI DI FLUSSO NELLE CORRENTI PIROCLASTICHE

Come descritto nel paragrafo precedente i flussi piroclastici sono suddivisi in tre regioni: testa, corpo e coda, che presentano diversi regimi di flusso e diverse modalità di trasporto della fase solida. Fisher (1966, 1983, 1995) e Branney e Kokelaar (1992) hanno affermato che una corrente piroclastica si può suddividere in:

- una parte basale densa, che si muove con moto laminare;
- una parte superiore diluita, con moto turbolento.

Dalla parte basale, arricchita in materiali densi e grossolani, si determina la deposizione della fase solida, mentre la parte diluita, arricchita in materiale fine, trasporta la fase solida in sospensione. Le due parti in cui viene suddivisa un flusso piroclastico presentano diverse velocità di propagazione, infatti, in alcuni casi si osservano fenomeni di disaccoppiamento. La parte diluita presenta una velocità maggiore rispetto alla parte basale densa, e la può sopravanzare continuando la sua propagazione in modo indipendente.



**Figura 1.2:** Divisione delle correnti piroclastiche in un parte inferiore densa, ed una superiore diluita.(foto del flusso piroclastico Lacroix, 1904).

Nel corso della propagazione dei flussi piroclastici avvengono variazioni nel tipo di trasporto della fase solida. In particolare, la variazione in concentrazione della fase solida, la variazione in altezza del flusso e della sua velocità di propagazione, fanno variare il regime di flusso. Fisher (1983, 1986) ha definito all'interno dei flussi piroclastici tre possibili trasformazioni di regime di flusso:

1. passaggio da regime laminare a turbolento per un aumento della velocità di scorrimento;
2. passaggio da regime laminare a turbolento per segregazione di un livello basale formato da materiali densi e grossolani;
3. passaggio da regime laminare a turbolento per ingestione di aria.

Attualmente tale schematizzazione può considerarsi superata, pur permanendo valida la considerazione che un aumento del grado di diluizione di un flusso piroclastico comporti l'instaurarsi di un regime turbolento.

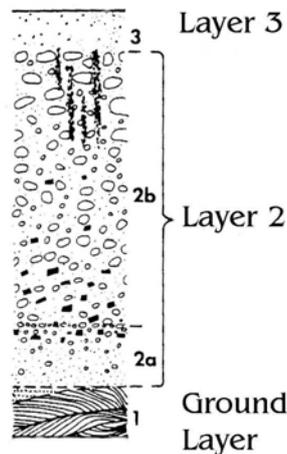
#### **1.4 CARATTERISTICHE DEPOSIZIONALI DI CORRENTI PIROCLASTICHE DENSE.**

Dallo schema di Wilson e Walker (1982) emerge che la fluidizzazione riveste un ruolo importante nella propagazione di un flusso piroclastico, soprattutto nelle regioni di testa e corpo. L'analisi di depositi dei flussi piroclastici conferma l'importanza del ruolo della fluidizzazione.

La descrizione della morfologia della testa del flusso piroclastico mostra che dalle rientranze della testa si determina una ingestione di aria a temperatura ambiente, mentre dai lobi vengono emessi getti di gas ad alta velocità. Queste emissioni di gas riescono ad espellere fuori dalla testa frammenti grossolani ed arrotondati di pomici, che vanno a formare uno strato alla base del deposito da flusso piroclastico, detto *jettted deposit* (*Fines depleted Ignimbrite*). Questo strato, impoverito in

materiali fini, si deposita mentre il flusso è ancora in movimento e viene scavalcato da questo. Wilson e Walker (1982) lo hanno interpretato come un *ground surge* che precede il flusso piroclastico, il quale non è capace di percorrere grandi distanze, a causa della mancanza di matrice, e dopo un breve tragitto decelera rapidamente e si deposita in massa. Il *jetted deposit* è limitato da un contatto erosivo con il livello sovrastante (Wilson e Walker, 1982) definito come *ground layer* (figura 1.3), il quale è arricchito nella frazione più densa (litici e cristalli) della frazione solida del flusso. Il *ground layer* quindi è interpretato come il risultato della sedimentazione di clasti densi per segregazione dalla testa del flusso.

Al disopra del *ground layer* si ha quella che è considerata la vera unità da flusso piroclastico, depositata dal corpo. Secondo Sparks (1973) esso si può dividere in tre strati.



**Figura 1.3:** Deposito da flusso piroclastico (modificato da Sheridan, 1979).

Lo strato 2a (figura 1.3), caratterizzato da pomice e litici con granulometria fine, a gradazione inversa. I materiali più sottili, ritrovati alla base dello strato, fanno ritenere che il questo strato si formi in seguito all'attrito tra il flusso piroclastico e substrato sul quale questo si muove (Sparks, 1976).

Lo strato 2b (figura 1.3) è la parte principale dell'unità da flusso, caratterizzata dalla gradazione inversa delle pomici e diretta dei litici (*corse tail gradation*). La gradazione di pomici e litici è detta di tipo gravitazionale o di galleggiamento, ed è dovuta al contrasto di densità tra matrice e clasti di dimensioni maggiori. Le pomici sono frammenti poco densi, resi leggeri dalla presenza al loro interno di numerosi vacuoli. All'aumentare delle dimensioni delle pomici, aumenta la frazione volumetrica dei loro vacuoli, e di conseguenza la densità delle pomici decresce all'aumentare delle loro dimensioni. In genere la densità della matrice di un deposito da flusso è maggiore rispetto a quella delle pomici, questo fa sì che le pomici con dimensioni maggiori "galleggino" rispetto alla matrice del deposito, presentando così gradazione inversa (Cas e Wright, 1987). Questo non accade per i frammenti litici, la cui densità risulta maggiore rispetto a quella della matrice. Ne risulta che all'interno dello strato 2b la matrice svolge un ruolo importante, per l'istaurarsi della *corse tail gradation*. Sparks (1976) studiando le variazioni granulometriche di depositi ignimbrici, concluse che i flussi piroclastici possono considerarsi grandi dispersioni di clasti in un mezzo di particelle fini fluidizzate, le quali agiscono da "lubrificante", in modo simile all'acqua nei *mud flow*.

Lo strato 3 (figura 1.3) è la parte più alta di un deposito da flusso; esso è formato in prevalenza da frammenti juvenili sottili elutriati dal flusso, che vanno a formare l'*ash cloud*. Il deposito mostra un piccolo spessore, è ben stratificato e mantella la topografia, pertanto è ascrivibile ad un meccanismo deposizionale da caduta. La natura stessa di deposito da caduta dell'*ash cloud* fa sì che esso possa essere reperito anche in siti in cui non è presente il deposito del flusso, a cui è geneticamente legato. Il deposito dello strato 3 non si ritrova facilmente, se la sua sedimentazione non avviene in un mezzo, come quello acqueo, che lo preserva.

## **1.5 IL RUOLO DELLA FLUIDIZZAZIONE NELLA DINAMICA DI CORRENTI PIROCLASTICHE DENSE.**

Lo stato di fluidizzazione di un letto di solidi granulari attraversato da un moto ascendente di fluido è stato oggetto di studio con riferimento sia a condizioni incontrate nelle applicazioni di processo che con riferimento a fenomeni naturali. Una sintetica rassegna dello stato delle conoscenze a questo riguardo verrà presentata nel capitolo successivo, con particolare riferimento agli aspetti rilevanti ai fini del presente studio. Si desidera qui unicamente richiamare la condizione fondamentale che presiede allo stato di fluidizzazione. Lo stato di fluidizzazione di un letto di solidi granulari si instaura allorché la velocità del fluido in moto ascendente attraverso un letto eccede il valore in corrispondenza del quale la perdita di carico nell'attraversamento del letto eccede il carico idrostatico (o litostatico) decurtato dalla spinta archimedeica. L'instaurarsi dello stato di fluidizzazione in un letto di solidi granulari ha implicazioni significative sulla mobilità e reologia del letto, come verrà più estesamente discusso nel seguito. In particolare, si evidenzia come la condizione di fluidizzazione determini il venir meno dello sforzo di taglio limite allo scorrimento, determinato dalla frizione tra particelle quando un letto di solidi granulari venga sottoposto a flusso di scorrimento.

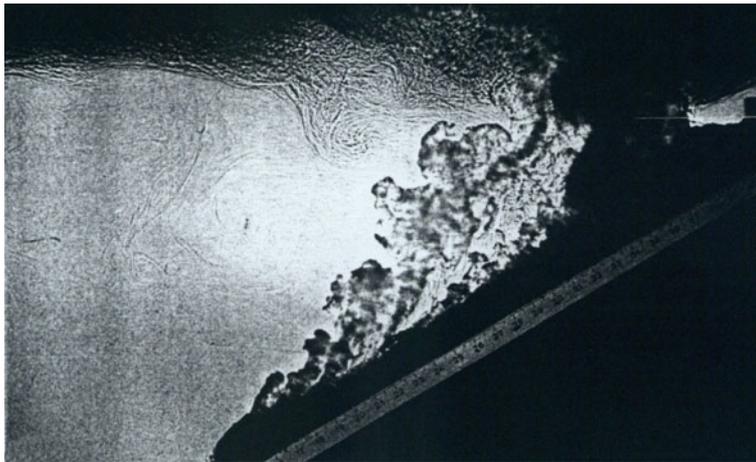
Gli studi di letteratura riferiti alla analisi della dinamica di flussi piroclastici hanno frequentemente invocato l'instaurarsi di condizioni di fluidizzazione come fattore determinante della mobilità del flusso. Riferimenti in tal senso possono trovarsi già nei lavori pionieristici di Kent (1965), Shreve (1966), Sparks (1976), e più recentemente di Wilson (1980,1984).

Il presente lavoro di tesi si riferisce direttamente a tale problematica. In esso sono presi in esame e studiati, in sede teorica e sperimentale, i fattori che possono promuovere e stabilizzare l'instaurarsi di condizioni di fluidizzazione nel moto di correnti piroclastiche dense.

## 1.6 MODELLISTICA FISICA DI CORRENTI PIROCLASTICHE DENSE

In letteratura sono documentati diversi tentativi di simulare il flusso di correnti piroclastiche mediante sperimentazioni di laboratorio in parziale similitudine. Il problema fondamentale di mettere a punto una adeguata modellistica fisica del moto di correnti piroclastiche dense risiede essenzialmente nella impossibilità di operare in similitudine completa, sia per la complessità intrinseca del fenomeno, derivante dalla interazione di processi concorrenti, sia per le scale dimensionali e temporali del processo reale.

Herbert et al. (1986) hanno eseguito simulazioni in laboratorio utilizzando una miscela di metanolo e glicole etilenico (MEG); questa viene fatta scorrere su di un piano ad inclinazione variabile, all'interno di un contenitore pieno di acqua. Questo sistema è stato utilizzato per simulare i fenomeni di diminuzione della densità, dovuti all'intrappolamento di aria nel flusso.



**Figura 1.4:** Simulazione di un flusso piroclastico con una miscela di metanolo e glicole etilenico (MEG) che viene fatto scorrere su di un piano inclinato all'interno di un contenitore pieno di acqua. La foto si riferisce a 40 secondi dal rilascio del MEG nel contenitore pieno di acqua (da Herbert et al., 1986)

Lo stesso apparato sperimentale è stato utilizzato da Woods e Bursik (1994) per studiare il rapporto tra il tasso di sedimentazione ed il tasso di intrappolamento di aria di un flusso piroclastico; quindi sulla capacità di un *ash cloud co-ignimbritica* di innalzarsi sopra un flusso piroclastico. A questo scopo sono stati eseguiti due tipi d'esperimenti: il primo è stato eseguito per studiare il galleggiamento della *cloud co-ignimbritica*, generato attraverso l'intrappolamento d'aria a condizioni ambiente nel flusso; il secondo tipo d'esperimento, eseguito per favorire condizioni di galleggiamento nel flusso attraverso la sedimentazione, è stato condotto utilizzando delle correnti d'acqua con solidi in sospensione, all'interno del contenitore pieno di soluzione salina. Da questa sperimentazione è risultato che il tasso di sedimentazione esercita un fondamentale controllo sopra la frazione di materiale solido che è trasportata nell'*ash cloud co-ignimbritica*. L'intrappolamento diventa più importante rispetto alla sedimentazione all'aumentare dell'inclinazione del piano, mentre la sedimentazione prende il sopravvento su pendii poco inclinati. Variazioni di inclinazione lungo il pendio possono causare regioni localizzate di mixing con l'aria, e quindi zone localizzate di galleggiamento, oppure uno sdoppiamento del flusso.

E' da sottolineare come l'intrappolamento d'aria alla base del fronte del flusso in lento movimento su un piano inclinato, simulato nelle condizioni sperimentali menzionate, non sia paragonabile a quello che si crea alla fronte di una corrente piroclastica in rapido movimento su un pendio. In particolare risulta non adeguatamente rappresentata l'interazione della regione frontale con il suolo e con il fluido ambiente a velocità elevate. Tale carenza pregiudica del tutto la possibilità di simulare adeguatamente che si instaurino condizioni di fluidizzazione nella regione frontale di correnti piroclastiche dense in moto rapido su pendio.

## 1.7 MODELLISTICA MATEMATICA DI CORRENTI PIROCLASTICHE DENSE.

Numerosi studi hanno fatto ricorso a simulazioni numeriche per rappresentare l'evoluzione di colonne eruttive pliniane e correnti piroclastiche (Valentine e Wohletz 1989; Valentine et al., 1991,1992; Dobran et al.,1993; Neri e Dobran,1994; Neri e Macedonio,1996).

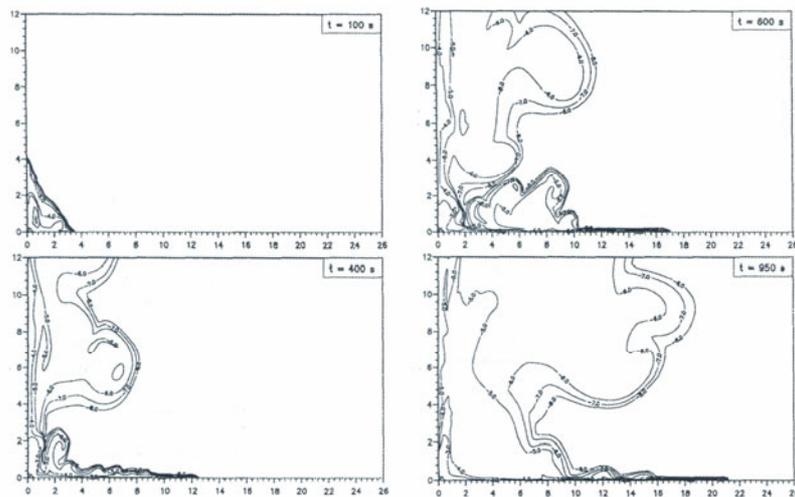
Valentine e Wohletz (1989) hanno simulato le dinamiche delle colonne eruttive utilizzando le equazioni di Navier e Stokes. Queste equazioni, associate alle equazioni di conservazione di massa ed energia, sono risolte in domini bidimensionali (simmetria cilindrica, paragonabile ad un'eruzione da un vent centrale), separatamente per la fase gas (vapore d'acqua) e la fase solida (particelle di uguale dimensione). Il modello di Valentine e Wohletz (1989) sviluppa un'analisi diretta di alcuni processi non lineari, alla base delle dinamiche eruttive. Si tratta della simulazione numerica di una colonna che collassa, nella quale si considera la variazione di concentrazione di particelle, pressione del gas, densità del gas, temperatura delle particelle, in tre tempi diversi dopo l'eruzione. I risultati della simulazione numerica mostrano che il *plume* eruttivo penetra nell'atmosfera, ed alla testa del *plume* si forma un vortice (*working surface*), che quando impatta al suolo probabilmente si trasforma nella *head* del flusso piroclastico. Valentine e Wohletz (1989), inoltre, dividono la fase solida di una colonna eruttiva in due parti; la prima si allontana dal vent formando il flusso piroclastico, mentre la restante parte del flusso ritorna nel vent e instaura un ricircolo del materiale eruttato.

I flussi piroclastici prodotti da modelli numerici mostrano una *head* relativamente spessa, un *body* più sottile ed una *tail* a minore concentrazione. Al variare dei parametri eruttivi gli autori riconoscono tre tipologie di flusso piroclastico: flussi piroclastici generati da instabilità della colonna sostenuta (brevi collassi), flussi prodotti da eruzioni con materiale di dimensioni

grossolane ed infine flussi prodotti da eruzioni con un meccanismo di tipo *boiling over*.

I modelli di Dobran et al. (1993) e di Neri e Dobran (1994) sono simili ai modelli di Valentine e Wohletz (1989) con alcuni perfezionamenti. La fase gassosa della colonna eruttiva è divisa in due componenti: vapore d'acqua juvenile e aria.

Neri e Macedonio (1996) aggiungono, rispetto al modello di Dobran et al. (1993) una ulteriore popolazione di particelle con dimensioni diverse. Questo modello prevede un sistema di equazioni di conservazione per la fase gassosa (vapore d'acqua juvenile e aria) e per le popolazioni di particelle a diverse dimensioni. Il modello di Neri e Macedonio (1996) considera il trascinalamento esercitato dalle particelle sulle altre fasi della colonna eruttiva con delle equazioni di conservazione lineare della quantità di moto.



**Figura 1.5:** Simulazione numerica di una eruzione vulcanica. Nel grafico è riportato il volume totale della frazione volumetrica, sono riportate le distribuzioni delle particelle a 100,400,600 e 800 secondi dall'eruzione. Le curve di livello sono esponenti in base 10 (da Neri et al, 2002).

Tutti gli studi menzionati, frequentemente per ammissione esplicita degli stessi autori, non descrivono adeguatamente la dinamica della regione basale densa (contenuta entro poche decine di metri di quota dal suolo) del flusso piroclastico, ma si concentrano principalmente sulla simulazione numerica della fase meno densa della corrente piroclastica. Essi risultano, pertanto, adeguati alla descrizione di fenomeni legati all'*ash cloud* ed alla formazione della *Phoenix*.

## **CAPITOLO 2: INQUADRAMENTO DELLA DINAMICA DI CORRENTI PIROCLASTICHE DENSE NELLE CONOSCENZE TEORICHE SUL MOTO DI SISTEMI GRANULARI VELOCI.**

### **2.1 LE CORRENTI PIROCLASTICHE COME FLUSSI GRANULARI VELOCI.**

Le correnti piroclastiche rappresentano miscele bifasiche composte da una fase discontinua di natura particellare dispersa in un continuo gassoso il cui dinamismo si sviluppa con velocità estremamente elevate (circa 100 Km/h). Quantunque la letteratura vulcanologica offra una ragguardevole mole di informazioni riguardo i meccanismi deposizionali dei flussi piroclastici, essa appare del tutto carente riguardo le loro dinamiche interne. Nel presente capitolo le caratteristiche di flusso di una corrente piroclastica densa sono esaminate alla luce delle conoscenze relative al moto di sistemi granulari veloci, conoscenze che si sono sviluppate frequentemente con riferimento a flussi granulari di interesse nelle applicazioni di processo (scarichi da tramogge, *chute flows* su pendio) in condizioni di flusso attentamente controllate, ancorché molto diverse dalle condizioni estreme proprie dei flussi granulari di interesse vulcanologico.

#### **2.1.1 GENERALITÀ SUI FLUSSI GRANULARI.**

Un flusso granulare, in maniera estremamente semplice, può essere definito come un particolare flusso bifasico costituito da un fase solida particellare ed un fluido interstiziale. Un letto granulare del quale sia indotto il moto, ad esempio per effetto di

forze gravitazionali, con componenti di flusso di scorrimento, presenta una reologia estremamente variabile in dipendenza delle caratteristiche del solido e del fluido interstiziale nonché delle condizioni di flusso.

La letteratura sui flussi granulari veloci è stata esaurientemente passata in rassegna da due articoli (Campbell, 1990; Goldhirsch, 2003). In particolare la rassegna di Campbell riprende e sintetizza efficacemente le conoscenze alla base della formulazione dei termini costitutivi del tensore degli sforzi proprio della fase particellare discreta, analizzata come mezzo pseudo-continuo.

Una prima fondamentale distinzione dei flussi granulari viene fatta in relazione al ruolo del fluido interstiziale: flussi granulari “secchi” dominati dalle interazioni tra particelle solide, mentre la fase interstiziale svolge un ruolo modesto. Viceversa, nelle condizioni di flusso aerato assume importanza significativa l’interazione fluido-particella.

Campbell (1990) introduce una distinzione tra due regimi principali di flusso:

- regimi “quasi statici” o flussi lenti: le particelle della fase granulare sono in contatto, ed interagiscono tra loro per un lungo periodo di tempo. Il regime quasi statico è stato studiato utilizzando modelli validi per deformazioni plastiche basati sul principio di dilatazione di Reynolds (Reynolds, 1885; Bagnold, 1966);
- regimi “collisionali” o flussi rapidi: le particelle che formano la fase granulare non sono permanentemente in contatto le une con le altre.

Più di recente lo stesso autore (Campbell, 2002; Campbell, 2004) ha evidenziato come, in condizioni di flusso comprese tra quelle dei regimi “quasi statico” e “collisionale”, ed in particolar modo per flussi confinati, possa instaurarsi un terzo regime, nel quale forze di inerzia del solido ed elasticità dello stesso controllano la reologia. Ciò si verifica attraverso il continuo rinnovarsi di “catene” di contatti contigui che si stabiliscono in

seno alla fase particellare e che sono in grado di resistere agli sforzi che si instaurano nel flusso. Lo stato tensionale del solido soggetto a flusso di scorrimento è pertanto legato, in maniera stocastica, allo stabilirsi ed al rinnovarsi di tali catene.

### 2.1.2 CLASSIFICAZIONE DEI FLUSSI GRANULARI VELOCI.

Sulla base della morfologia macroscopica di flusso, i flussi granulari rapidi possono essere classificati come confinati (assenza di pelo libero del flusso) o non confinati: ciascuna delle due tipologie può a sua volta essere ulteriormente suddivisa sulla base della stazionarietà o meno dello scorrimento.

Il moto delle correnti piroclastiche dense è evidentemente riconducibile alla tipologia di flussi non confinati e non stazionari. La non-stazionarietà si manifesta nella presenza di una regione frontale di separazione tra il flusso ed il mezzo in cui si determina la propagazione della corrente. Come verrà evidenziato più compiutamente nel seguito, la presenza di un fronte che avanza insieme al flusso modifica in maniera sostanziale le equazioni costitutive che relazionano sforzi e deformazioni all'interno dello stesso. Lo scambio di quantità di moto tra flusso granulare e mezzo circostante avviene con meccanismi che risultano largamente influenzati dalle condizioni di flusso nella regione frontale.

### 2.1.3 SFORZI INTERNI AI FLUSSI GRANULARI

Un problema di notevole complessità nella descrizione della dinamica dei flussi granulari è rappresentato dalla corretta definizione delle equazioni costitutive che legano il tensore degli sforzi  $T_{ij}$  ed il tensore delle deformazioni  $V_{ij}$ .

In prima approssimazione, i termini relativi al tensore degli sforzi che governa la reologia di un flusso granulare sono riconducibili ai seguenti meccanismi:

- Sforzi di tipo frizionale (statici, dinamici): sforzi legati all'instaurarsi di forze di attrito tra particelle contigue.

L'entità di tali sforzi è dipendente dallo sforzo normale in seno alla fase particellare secondo la legge di Mohr-Coulomb.

$$\tau_{xy,f} = \mu \sigma_y = \tan(\theta_0) \sigma_y$$

ove  $\theta_0$  è l'angolo di attrito interno e  $\mu = \tan(\theta_0)$  è un coefficiente di attrito;

- Sforzi di tipo collisionale: si tratta di sforzi legati al trasferimento di quantità di moto dovuto alla interazione di tipo collisionale tra coppie di particelle. Gli sforzi di natura collisionale sono espressi da equazioni costitutive di cui sono state nel tempo fornite formulazioni diverse. Tutte sono concettualmente riconducibili all'equazione proposta da Bagnold (1954):

$$\tau_{xy,c} = C_f \cdot \rho_p \cdot d^2 \left( \frac{dv_x}{dy} \right)^2 = \eta \cdot \frac{dv_x}{dy}$$

- Sforzi di tipo convettivo (*streaming*): sono sforzi dovuti al movimento stocastico di singole particelle, vettori di quantità di moto, in regimi di flusso diluiti allorché esse si spostano da regioni a velocità più elevata a regioni del flusso a velocità più bassa;
- Sforzi interni alla fase fluida interstiziale: sono sforzi di natura viscosa o inerziale propri della fase fluida interstiziale e da questa trasferiti al sistema granulare;
- Sforzi inerziali: si tratta di sforzi di natura turbolenta del tutto analoghi agli sforzi di Reynolds nel moto turbolento di fasi fluide e legati alle componenti fluttuanti della velocità della fase particellare su scale dimensionali di norma molto maggiori delle dimensioni delle singole particelle.

Nel complesso, la reologia di un sistema granulare soggetto a moto di scorrimento è riconducibile a quella di un fluido alla Bingham (comportamento viscoplastico) con comportamento

viscoso dilatante (*shear-thickening*). Velocità di flusso particolarmente elevate (quali quelle che possono determinarsi in flussi piroclastici) o l'instaurarsi di condizioni di fluidizzazione possono influire marcatamente sul comportamento reologico di correnti veloci discostandolo da quello osservato nelle condizioni di flusso quasi-statico, come verrà discusso nel seguito.

## **2.2 LE CORRENTI PIROCLASTICHE COME CORRENTI GRAVITAZIONALI (GRAVITY CURRENTS).**

Il moto delle correnti piroclastiche dense può essere analizzato nel quadro concettuale fornito dalle teorie sulle correnti gravitazionali. Per correnti gravitazionali (*gravity currents*) si intendono correnti fluide in moto stratificato e parzialmente confinato in un altro fluido a seguito della differenza di densità esistente tra i due. Una rassegna estesa delle problematiche connesse con l'analisi del moto di correnti gravitazionali è fornita nell'articolo di rassegna di Simpson (1982).

La differenza di peso specifico che fornisce la forza spingente può essere dovuta a diverse cause. La più ricorrente è la differente natura, e quindi densità, dei fluidi in moto relativo, ma altre cause possono essere ricercate nelle differenze di temperatura, ovvero dalla proprietà di uno dei due fluidi di contenere, disciolto o in sospensione, un altro componente. Nel caso in cui la corrente gravitazionale sia costituita da una sospensione di una fase solida dispersa si parlerà di *particle-driven gravity current*.

Le problematiche più ricorrenti associate al moto di correnti gravitazionali riguardano la determinazione della velocità di propagazione della corrente e la valutazione della entità dei fenomeni di trasporto (di materia, di quantità di moto) alla interfaccia tra la corrente gravitazionale ed il mezzo ambiente.

### 2.2.1 LA VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DI UNA CORRENTE GRAVITAZIONALE.

La trattazione classica della propagazione di correnti gravitazionali, dovuta a von Karman (1940), è basata su ipotesi di comportamento inviscido della corrente e che la velocità di propagazione della stessa sia costante. Con tali ipotesi, la velocità di propagazione di una *gravity current* è determinata dall'applicazione dell'equazione di Bernoulli lungo una traiettoria che si sviluppa all'interfaccia tra le fasi. Il risultato, espresso in forma dimensionale, fornisce:

$$U = 2^{1/2} (g'h)^{1/2}$$

Ove  $g'$  è l'accelerazione gravitazionale corretta per gli effetti di differenza di densità. In forma adimensionale la medesima condizione impone la costanza del numero adimensionale di Froude:

$$Fr = \frac{U^2}{g'L}$$

con  $L$  dimensione caratteristica del fenomeno in esame e dove  $U$  rappresenta la velocità di avanzamento del fronte. Il gruppo ha il significato fisico di rapporto tra l'entità delle forze di inerzia e quella delle forze gravitazionali agenti su un elemento fluido che, a regime, debbono bilanciarsi reciprocamente.

### 2.2.2 LO SCAMBIO DI MATERIA TRA GRAVITY CURRENTS NELLA TRATTAZIONE CLASSICA.

In una corrente gravitazionale è possibile individuare due strati limite in cui si determina flusso di scorrimento: uno strato libero (*free shear layer*) nella parte superiore del flusso, in corrispondenza del quale lo scambio di quantità di moto avviene prevalentemente per *entrainment* del mezzo circostante, ed uno strato limite confinato, in cui lo scambio di quantità di moto è legato in massima parte agli sforzi frizionali tra suolo e corrente.

In particolare in corrispondenza dello strato limite non confinato sussistono le condizioni perché si instauri un flusso di materia tra la corrente gravitazionale ed il mezzo circostante (*entrainment*). Tale flusso di materia è strettamente associato ad un flusso convettivo di quantità di moto che può, in taluni casi, costituire un termine non irrilevante nella formulazione delle equazioni del moto della corrente gravitazionale. Il flusso di materia che si instaura all'interfaccia è dipendente dal valore di un altro numero adimensionale, il numero di Richardson:

$$Ri = \frac{g\Delta\rho}{\rho_a} \cdot \frac{h \cos(\vartheta)}{U^2}$$

L'entità del flusso di *entrainment* è rilevante solo per valori bassi del numero di Richardson, molto minori di 1.

### 2.2.3 PECULIARITÀ ASSOCIATE AL MOTO FRONTALE DI CORRENTI GRAVITAZIONALI.

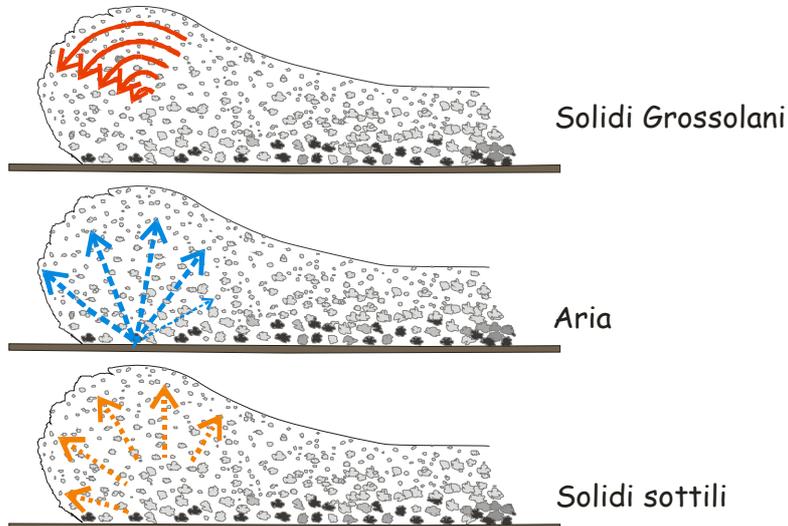
La rimozione dell'ipotesi di fluido inviscido e la considerazione della condizione di aderenza e dei gradienti di velocità nella regione basale di una corrente piroclastica densa possono alterare significativamente il quadro fenomenologico, in particolar modo per quel che riguarda il comportamento della regione frontale. In effetti l'esperienza suggerisce che correnti gravitazionali di origine naturale presentano di norma una struttura peculiare della regione frontale, con una *head* caratteristica, che presenta un'altezza maggiore rispetto al resto della corrente. La *head* è una zona di intensa miscelazione e gioca un ruolo importante nel comportamento della miscela, in questa regione si ha una zona di frontiera, dove si mantiene un elevato gradiente di pressione. In una *gravity current* in moto su di un piano lievemente inclinato, la *head* si mantiene quasi stazionaria, con un'altezza che è circa pari al doppio del resto della corrente, mentre per una corrente che scorre su di un piano inclinato le dimensioni della testa continuano ad incrementare. Mohrig et al. (1998) hanno discusso le caratteristiche

morfologiche della regione frontale in relazione al valore del numero di Froude della corrente, evidenziando come la *head* divenga sempre più pronunciata al crescere del numero di Froude.

Va inoltre rilevato come in correnti gravitazionali veloci la combinazione di forze di inerzia e gravitazionali, unitamente ai gradienti di velocità che si determinano nella regione basale della corrente, possono determinare significative alterazioni nella struttura del fronte. Nel 1968 Shreve fu tra i primi a sottolineare come l'espulsione di fluido presente nella regione basale di una corrente gravitazionale possa aver luogo su scale temporali comparabili con la durata del fenomeno. Il meccanismo di Shreve (1968) prevede che l'aria intrappolata in un debris flow possa agire da "lubrificante" se è in grado di permanere al suo interno per alcuni minuti. Questo fenomeno, inoltre, è influenzato dalla quantità di gas che percola attraverso la fase solida, che può istaurare uno stato di fluidizzazione.

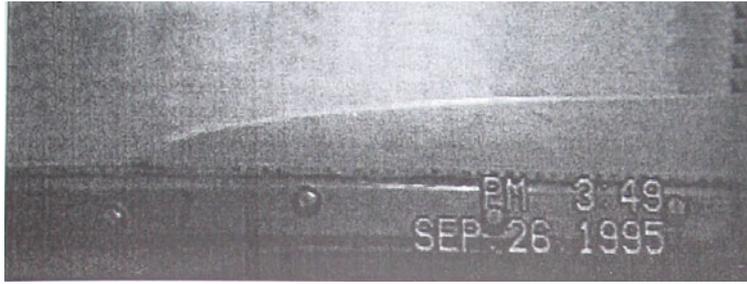
Wilson (1980) ha sottolineato il fenomeno del *overhang* del solido nella regione frontale. Elementi di flusso che si trovano a distanze maggiori dal suolo si muovono con velocità più elevate, il che porta ad una ricaduta al suolo delle particelle più grossolane. Questo fenomeno, a sua volta, causa la compressione della sottostante fase gassosa, che viene espulsa dalla regione basale del fronte del flusso o forzata a percolare attraverso questo. Le particelle fini, intimamente connesse con la fase gassosa, vengono, infatti, elutriate dal fronte della corrente piroclastica, contribuendo alla formazione dell'*ash cloud*. Le particelle fini, inoltre, possono contribuire allo scambio di quantità di moto con la fase gassosa e le particelle grossolane. Questa ultima caratteristica è importante se si tiene in conto la possibilità che il flusso di gas che si realizza attraverso una corrente piroclastica sia guidato dalle sovrappressioni che si generano alla base della corrente. Inoltre, l'entità di questo flusso di gas può essere tale da istaurare una condizione di fluidizzazione ed influire sulla reologia della corrente piroclastica. Il fenomeno dell'*overhang* trova conferma

in osservazioni fenomenologiche ed in simulazioni numeriche. In particolare esso è stato evidenziato anche da recenti simulazioni numeriche specificamente effettuate nel quadro del presente studio (Bareschino, 2005).



**Figura 2.1** Caratteristiche del moto della fase solida e gassosa nella testa di una corrente piroclastica (Da Salatino, 2003 modificata).

Mohrig et al (1998) hanno discusso in dettaglio il fenomeno dell'*overhang*. Essi ipotizzano che, per valori sufficientemente elevati del numero di Froude, l'*overhang* possa spingersi al punto di determinare il fenomeno del *hydroplaning*, ovvero la formazione permanente e continuamente rinnovata di un film di fluido alla base del flusso, responsabile della sostanziale alterazione dei meccanismi di scambio di quantità di moto nella regione basale. Quale che sia l'entità e la rilevanza dei fenomeni menzionati, è lecito attendersi che le perturbazioni delle strutture di flusso della regione frontale possano giocare un ruolo importante nell'influenzare la mobilità delle correnti piroclastiche dense.



**Figura 2.2:** Fronte di un *debris flow* sub-aereo (da Mohrig et al. 1998, modificato).

### 2.3 LA FLUIDIZZAZIONE DI SOLIDI GRANULARI.

Da quanto sopra esposto emerge con chiarezza come la fluidizzazione di solidi granulari possa giocare un ruolo significativo nel determinare la mobilità di correnti piroclastiche dense. Di seguito verranno fornite alcune nozioni fondamentali sulla fluidizzazione di solidi granulari, con particolare riferimento a quegli aspetti che assumono un particolare rilievo nel moto di correnti piroclastiche dense.

Si consideri un letto di particelle (di densità  $\rho_s$  e diametro  $d_p$ ) che riposano in un recipiente cilindrico, aperto superiormente all'atmosfera, la cui base sia permeabile ad un flusso gassoso. Sia  $U$  la velocità superficiale del flusso gassoso (definita come il rapporto tra la portata volumetrica del gas e l'area della sezione retta del condotto in cui è versato il solido). Per bassi valori di  $U$  le particelle sono ferme, ed il gas vi percola attraverso in maniera simile al flusso attraverso una struttura porosa. Questa condizione è definita di "letto fisso", le differenze di pressione lungo il letto sono dovute alle combinazioni di attrito viscoso e forze di inerzia, le prime dipendenti linearmente dalla velocità superficiale, le seconde dal quadrato di  $U$ .

Aumentando la velocità del gas si raggiunge il valore di  $U$  al quale la caduta di pressione (perdita di carico) attraverso il letto eguaglia il peso dello stesso per unità di area della sezione retta, al netto della forza Archimedeica: tale stato costituisce la

condizione di incipiente fluidizzazione. In tale condizione, per ulteriori incrementi di  $U$  la caduta di pressione lungo il letto si mantiene costante. Il sistema si comporta per molti versi come un liquido di densità pari a quella di *bulk* ( $\rho_{\text{bulk}}$ ) del letto espressa dalla:

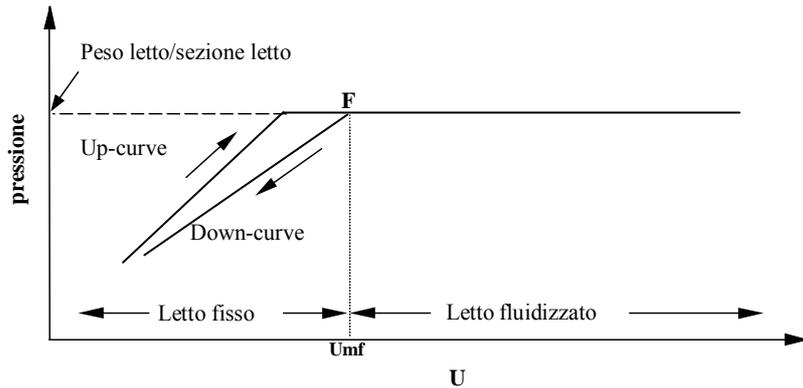
$$\rho_{\text{bulk}} = (\rho_s - \rho_g)(1 - \varepsilon) \quad (2.1)$$

con  $\rho_g$  densità del gas ed  $\varepsilon$  il grado di vuoto (definito come volume di vuoto per unità di volume del letto).

Il valore  $U$  in condizioni di incipiente fluidizzazione è caratteristico del sistema solido-gas ed è noto come velocità di incipiente fluidizzazione ( $U_{\text{mf}}$ ). In letteratura sono presenti diverse equazioni che permettono di stimare la velocità di incipiente fluidizzazione a partire dalle caratteristiche della frazione solida e gassosa.

### 2.3.1 GENERALITÀ SULLA FLUIDIZZAZIONE DI SOLIDI GRANULARI MONODISPERSI: CONDIZIONE DI INCIPIENTE FLUIDIZZAZIONE E REGIMI DI FLUIDIZZAZIONE.

In figura 2.3 si riporta un andamento esemplificativo delle curve di pressione, rilevata alla base di un letto di particelle monodisperse, nella fase di aumento e diminuzione della velocità superficiale del gas. La condizione di incipiente fluidizzazione viene raggiunta quando la pressione lungo il letto uguaglia il peso per unità di sezione trasversale, al netto della forza Archimedeica. Tale valore può essere definito come quello di intersezione tra le curve di pressione-velocità superficiale nella regione lineare e in quella di completa fluidizzazione



**Figura 2.3:** Curva di fluidizzazione: variazione della pressione al fondo del letto al variare della velocità del fluido.

L'anticipata transizione a letto fisso registrabile al diminuire di  $U$  (*down curve*), ovvero la presenza di isteresi della curva di fluidizzazione, è causata dal fatto che le particelle inizialmente versate nel condotto si impaccano con valori di  $\varepsilon$  inferiori a quelli registrabili in seguito ad impaccamento graduale.

A velocità superiori a  $U_{mf}$  si possono avere due diversi regimi fluidodinamici:

- fluidizzazione particellare o omogenea: si ha una espansione omogenea del letto con mobilità relativamente limitata delle particelle. Il letto presenta densità uniforme, la quale diminuisce progressivamente all'aumentare della velocità del gas;
- fluidizzazione aggregativa o bollente: una parte del fluido passa attraverso il letto sotto forma di "bolle" (cavità di forma simile alle bolle di gas in un liquido), le quali conferiscono alle particelle una più alta mobilità. A causa della presenza di queste ultime la densità del letto è disuniforme.

Il regime fluidodinamico che si stabilizza a  $U > U_{mf}$  dipende dalle caratteristiche del sistema solido-fluido. Nel caso in cui si

stabilizzi il regime di fluidizzazione omogenea è possibile osservare la transizione a regime di fluidizzazione bollente e la velocità al quale ciò avviene è nota come velocità di incipiente formazione delle bolle (minimo *bubbling*,  $U_{mb}$ ).

In particolari condizioni può verificarsi che il diametro delle bolle diventi comparabile con il diametro della colonna ed in tal caso il regime fluidodinamico del letto viene definito a *slug*. Questo ultimo regime non è in generale ottenibile in condotti a sezione molto grande, nei quali permangono di conseguenza condizioni di letto bollente.

Per velocità del gas più elevata si osserva la transizione al regime turbolento (Yerushalmi e Avidan, 1985). Tale regime, caratterizzato da un minor grado di eterogeneità della distribuzione del solido nella corrente gassosa, non presenta una netta distinzione tra fase bolle e fase emulsione né tanto meno un pelo libero ben definito. La transizione fra la fluidizzazione bollente e quella turbolenta è caratterizzata dall'attenuarsi delle fluttuazioni della densità media della sospensione. Il letto rimane in condizioni di regime turbolento finché non viene raggiunta la velocità di trasporto  $U_{tr}$ , definita come la velocità in corrispondenza della quale si registrerebbe in assenza di alimentazione di solido un rapido svuotamento del letto, oltre la quale iniziano i regimi di trasporto.

Le condizioni di transizione tra i regimi di fluidizzazione captivi e quelli di trasporto sono correlabili in termini di dipendenza tra il numero di Archimede:

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu_g^2}$$

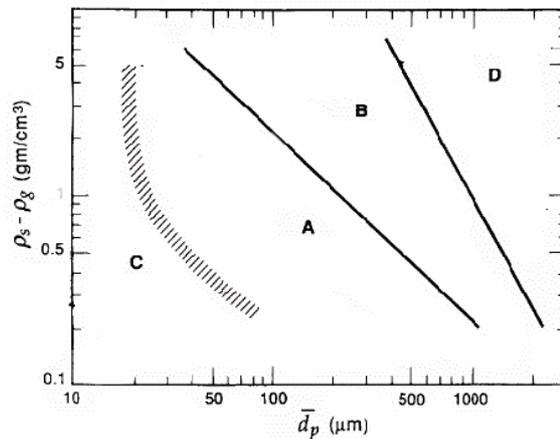
(dove  $d_p$  è il diametro delle particelle,  $\rho_s$  densità del solido,  $\rho_g$  densità del gas,  $\mu_g$  viscosità del gas e  $g$  l'accelerazione di gravità) ed il numero di Reynolds:

$$Re = \frac{vD}{\nu}$$

(in cui  $v$  è la velocità lineare di avanzamento del fronte del flusso granulare,  $\nu$  è la viscosità cinematica e  $D$  è la dimensione caratteristica).

### 2.3.2 CLASSIFICAZIONE DI SOLIDI GRANULARI IN RELAZIONE ALLA QUALITÀ DELLA FLUIDIZZAZIONE.

Al fine di individuare il comportamento dei sistemi solidi granulari rispetto alla fluidizzazione, è stata proposta da Geldart (1973) una classificazione delle polveri valida per definire la qualità della fluidizzazione attesa per un dato sistema solido-gas. Alla luce di tale classificazione, le polveri sono suddivise in quattro gruppi in funzione della dimensione media delle particelle e della differenza tra la densità del solido e quella del fluido



**Figura 2.4:** Classificazione dei solidi rispetto alla fluidizzazione Geldart (1973).

gruppo A presentano velocità di minima fluidizzazione minore rispetto alla velocità di minimo bubbling ( $U_{mb} > U_{mf}$ ). In tale intervallo di velocità il letto appare fluidizzato omogeneamente;

- gruppo B le velocità di minima fluidizzazione e di minimo *bubbling* coincidono ( $U_{mb} \cong U_{mf}$ ). Raggiunta la velocità di minima fluidizzazione si osserva l'istantanea formazione di bolle in seno al letto. I materiali del gruppo B sono caratterizzati da assenza di espansione omogenea del letto;
- gruppo C La fluidizzazione di queste polveri è estremamente difficile, se non tramite l'applicazione di tecniche *ad hoc*. La caratteristica principale delle polveri di tipo C è quella di essere soggette a fenomeni di aggregazione, rendendo praticamente impossibile al gas di fluidizzazione di permeare gli spazi interparticellari; il gas fluisce in maniera non uniforme attraverso il letto formando canali preferenziali. In questo modo diminuisce il contatto tra fase solida e fase gassosa. Le polveri appartenenti al gruppo C sono estremamente fini e leggere, con diametro medio tipicamente minore di 30  $\mu\text{m}$ , e presentano un comportamento coesivo;
- gruppo D sono particelle di dimensioni,  $d_p > 1 \text{ mm}$  caratterizzate da assenza di fluidizzazione omogenea e dalla comparsa di bolle fin dall'incipiente fluidizzazione ( $U_{mb} \cong U_{mf}$ ). Esse si distinguono dalle particelle del gruppo B per la velocità di ascesa delle bolle, che risulta inferiore della velocità interstiziale del gas di fluidizzazione.

Dal punto di vista microscopico, il diverso comportamento dei solidi granulari nei confronti della fluidizzazione può essere messo in relazione con la sussistenza di forze interparticellari solido-solido di varia natura. Tali forze giocano un ruolo diverso a seconda dei casi. Per particelle grossolane risultano trascurabili se paragonate alle forze di natura gravitazionale, ma assumono un'importanza sempre maggiore al diminuire delle dimensioni dei solidi granulari, fino a diventare con esse

confrontabili, per particelle con diametro medio minore di 100  $\mu\text{m}$ . Nel caso delle polveri appartenenti al gruppo C della classificazione di Geldart le forze interparticellari risultano maggiori delle forze gravitazionali, al punto da provocarne l'agglomerazione ed impedirne la normale fluidizzazione. Le forze interparticellari giocano un ruolo importante anche per il comportamento fluidodinamico di polveri di tipo A, ma non al punto di ostacolarne la fluidizzazione.

### 2.3.3 FLUIDIZZAZIONE DI SOLIDI POLIDISPERSI: CONDIZIONE DI INCIPIENTE FLUIDIZZAZIONE.

Nel caso di miscele di solidi aventi diverse caratteristiche fisiche (densità, dimensioni, morfologia) non si può definire una velocità di minima fluidizzazione, in quanto il comportamento del letto all'aumentare di  $U$  non presenta le variazioni marcate tipiche di letti di particelle monodisperse (figura 2.1). Inoltre le diverse tipologie di solidi presentano tendenza a miscelarsi o segregarsi, a seconda delle condizioni di fluidizzazione, per effetto della diversa mobilità delle particelle dovuta alle differenti dimensioni e densità. Ne consegue che all'interno del letto si possono instaurare disuniformità delle proprietà che lo caratterizzano, con la possibilità che si stabilizzino regimi di fluidizzazione diversi a diverse quote del letto.

La stima di  $U_{mf}$  per le miscele binarie risulta complicata dal punto di vista teorico in quanto l'utilizzo della relazione (2.1) prevede l'individuazione di valori unici di densità, grado di vuoto e diametro delle particelle e, l'utilizzazione di valori medi di diametro e densità non è sufficiente per avere valori attendibili di  $U_{mf}$ . In letteratura sono disponibili diverse correlazioni per il calcolo della velocità di minima fluidizzazione di una miscela di solidi, molte delle quali sono basate sull'estensione delle equazioni sviluppate per letti monodispersi, altre invece sono di carattere empirico.

In tutti i modelli teorici si verifica che la presenza di piccole percentuali di componenti fini (e/o leggeri) riesce a conferire alla miscela un valore di  $U_{mf}$  più basso rispetto a quello del suo componente più pesante (e/o grossolano). Ciò vuol dire che è possibile fluidizzare un materiale ad un valore della velocità superficiale del gas più bassa aggiungendo particelle più fini nel letto. Nella pratica però non si ottiene sempre un letto completamente fluidizzato per qualsiasi  $U > U_{mf}$ .

### 2.3.3 FLUIDIZZAZIONE TRANSIENTE E SEGREGAZIONE DI COMPONENTI IN MISCELE GRANULARI POLIDISPERSE.

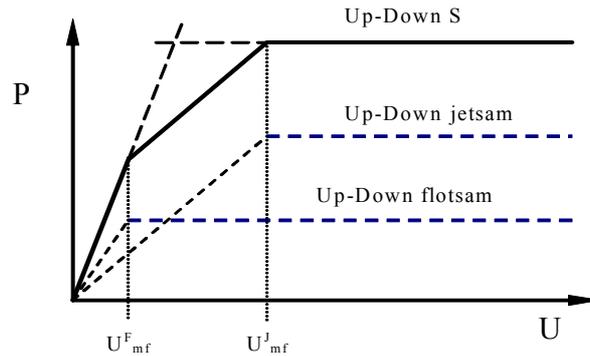
Il fenomeno di segregazione, riferito ad esempio ad una miscela binaria, consiste in una progressiva concentrazione al fondo del letto di un componente, denominato *jetsam*. Allo stesso tempo si determina la concentrazione in superficie di un altro componente, denominato *flotsam*. Il criterio di identificazione è suggerito dalle proprietà dei solidi: densità e diametro medio. In prima istanza si può affermare che a parità di densità si segrega al fondo il componente più grossolano mentre a parità di dimensioni si segrega al fondo il componente più denso. Nel caso in cui le due caratteristiche si “incrocino” (ovvero il componente più pesante è il più piccolo) è possibile il che *jetsam* sia anche il componente a  $U_{mf}$  minore.

Al fine di evidenziare nel letto la segregazione (o la miscelazione) dei componenti, è necessario che le particelle siano dotate di una buona mobilità, ovvero siano in condizioni di fluidizzazione aggregativa. Risulta necessario quindi individuare le condizioni operative in cui il letto è in condizioni di fluidizzazione ( $U_{mf}$ ) e quelle relative al regime di fluidizzazione bollente ( $U_{mb}$ ).

Dette  $U_{mf}^F$  e  $U_{mf}^J$  rispettivamente le velocità di minima fluidizzazione della componente *flotsam* e di quella *jetsam*, nel caso di miscela binaria si trova sovente che  $U_{mf}^F < U < U_{mf}^J$ , ovvero che la velocità di minima fluidizzazione della miscela

$U_{mf}^{mix}$  è intermedia tra quelle dei due componenti. È possibile quindi trovare miscele fluidizzate in condizioni per le quali il *flotsam* è in grado di fluidizzare in superficie, e il *jetsam* di segregarsi in regime di letto fisso al fondo.

Partendo da una situazione di completa segregazione, con *jetsam* al fondo del letto, l'andamento di una curva di fluidizzazione ottenuta aumentando gradualmente il valore di  $U$  è del tipo S riportato in figura 2.5.

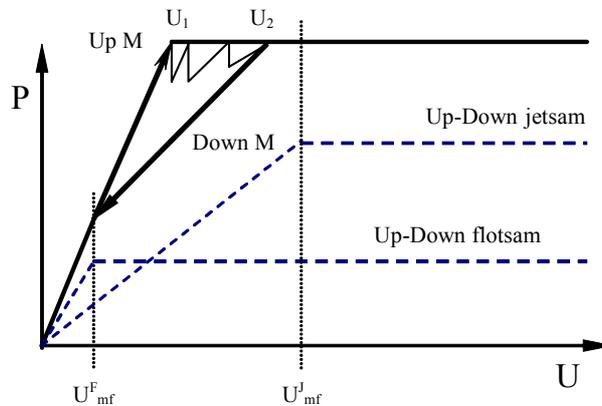


**Figura 2.5:** Curva di fluidizzazione di una miscela binaria in condizioni di completa segregazione.

Partendo da una situazione di completa miscelazione si otterrà una curva di tipo M, riportata in figura 2.6.

Il valore di velocità di minima fluidizzazione da assumere in queste situazioni non è univoco. Il criterio valido nel caso di letto monocomponente fornisce valori diversi al variare delle condizioni iniziali del letto. In alcuni di questi casi si parla di velocità di minima fluidizzazione apparente in quanto il valore assunto non ci indica con sicurezza una situazione di completa fluidizzazione in tutto il letto. Knowlton (1977) propose di definire la velocità di completa fluidizzazione come “il valore minimo in cui nella *down curve* si rileva la perdita di carico attraverso il letto uguale al peso per unità di sezione trasversale del letto”. Anche questo criterio può essere fuorviante in quanto

non è detto che a tale valore si registri una completa omogeneità delle concentrazioni di *flotsam* e *jetsam* nel letto.



**Figura 2.6:** Curva di fluidizzazione di una miscela in condizioni di partenza di completa omogeneità.

Nell'esaminare il ruolo che la polidispersità del solido fluidizzato gioca nel determinare condizioni di fluidizzazione, si possono svolgere le seguenti considerazioni. Per particelle di densità comparabile, la polidispersità di dimensioni è responsabile, di norma, di valori più bassi del grado di vuoto del letto alla incipiente fluidizzazione, il che si traduce in velocità di incipiente fluidizzazione minori dei corrispondenti valori per solidi monodispersi a parità di densità e di diametro medio. Ancor più interessante risulta l'analisi del ruolo della polidispersità nei casi in cui le velocità superficiali del gas di fluidizzazione siano superiori alla velocità di trasporto della frazione leggera della miscela. In tali condizioni, per effetto di meccanismi di scambio di quantità di moto di natura collisionale tra particelle fini e particelle grossolane (Win et al., 1995), queste ultime possono essere portate nello stato di fluidizzazione a velocità superficiali inferiori a quelle che sarebbero necessarie in assenza delle particelle fini. Tale condizione è plausibilmente

presente nella regione frontale di una corrente piroclastica densa.

#### 2.3.4 FLUIDIZZAZIONE IN FLUSSO DI SCORRIMENTO.

Molto esiguo il numero di studi che affrontano il tema dell'influenza che un flusso di scorrimento esercita sulla fluidizzazione di un solido granulare. Tale aspetto è destinato a giocare un ruolo significativo nella dinamica di correnti piroclastiche dense in relazione ai forti gradienti di velocità che si instaurano nella regione basale del flusso.

Apicella et al. (1997) sono stati tra i primi a condurre uno studio sperimentale sull'effetto stabilizzante del flusso di scorrimento sulla fluidizzazione omogenea. La sperimentazione è stata condotta fluidizzando letti di particelle, appartenenti ai gruppi A e B di Geldart, posti tra due cilindri coassiali, dei quali quello esterno è tenuto fermo mentre quello interno è posto in rotazione. Partendo dalla considerazione che la formazione di bolle all'interno di un letto fluido solido-gas è attribuibile all'intrinseca instabilità della sospensione bifasica in condizioni di espansione omogenea, gli autori hanno sostanzialmente dimostrato che lo scorrimento aumenta la diffusività delle particelle e quindi migliora la tendenza delle stesse a distribuirsi uniformemente nel letto, identificando nel contempo un valore critico di scorrimento (dipendente dall'altezza del letto e dalla velocità superficiale del gas) che bisogna applicare per ottenere l'omogeneizzazione.

Nezzal et al. (1998) hanno dimostrato che è possibile fluidizzare polveri coesive appartenenti al gruppo C di Geldart mediante l'impiego di agitazione meccanica, realizzata introducendo all'interno del letto un albero dotato di pale, limitandosi però ad una semplice analisi fenomenologica. Gli autori riportano che, in presenza di flusso di scorrimento, la transizione da letto fisso a letto fluidizzato è graduale e non netta come nella fluidizzazione spontanea ed inoltre che le perdite di carico in

condizioni di fluidizzazione risultano minori del peso del letto per unità di sezione.

Druitt et al. (2003) hanno studiato il comportamento fluidodinamico di un materiale naturale (classificato come C secondo Geldart) in presenza di agitazione meccanica ed alta temperatura. La conclusione a cui giungono, in accordo con i risultati sperimentali riportati da Nezzal et al (1998) è che l'introduzione di un flusso di scorrimento consente di fluidizzare polveri coesive: una lieve agitazione impedisce la formazione di aggregati di particelle e previene la formazione di canali preferenziali di flusso; l'interruzione improvvisa dell'agitazione meccanica, durante la fase di espansione omogenea, provoca la formazione spontanea di canali preferenziali all'interno del letto. In conclusione, i lavori citati consentono di affermare che l'introduzione di un flusso di scorrimento all'interno di un letto di particelle fluidizzate consente di: i) fluidizzare polveri coesive anche a velocità superficiali del gas non molto elevate; ii) indurre fluidizzazione omogenea per materiali appartenenti al gruppo C della classificazione di Geldart; iii) stabilizzare la regione di espansione omogenea ritardando l'inizio del regime di bubbling.

#### 2.3.5 FENOMENI DI ABRASIONE (ATTRITION) NEL CORSO DELLA FLUIDIZZAZIONE ED ASSOCIATA GENERAZIONE DI PARTICOLATO FINE.

Le particelle in un letto fluidizzato sono tipicamente soggette a fenomeni di abrasione. Tali fenomeni condizionano, spesso in misura rilevante, la distribuzione granulometrica che si stabilisce a partire da una determinata carica di solidi granulari, la generazione di particolato fine di dimensioni elutriabili, la morfologia delle particelle fluidizzate.

I fenomeni di abrasione che hanno luogo in un letto fluidizzato possono essere di diversa natura, tra queste categorie ricadono fenomeni di comminazione determinati da abrasione

superficiale o da sollecitazioni indotte da impatto subite dalle particelle in un letto fluidizzato. I primi sono determinati dallo sfregamento di particelle le une sulle altre per effetto di un flusso di scorrimento (*shear flow*) della fase emulsione del letto fluidizzato. Anche in assenza di un flusso di scorrimento, indotto a livello macroscopico (come in un flusso piroclastico), le condizioni di *shear flow* possono essere determinate quando solidi granulari relativamente grossolani sono posti in condizioni di fluidizzazione, e si ha la formazione di bolle gassose in moto ascensionale. In tali condizioni è stato dimostrato che la velocità di abrasione di particelle solide è proporzionale alla potenza meccanica dissipata in lavoro di frizione tra le particelle, e questa è a sua volta proporzionale all'eccesso della velocità superficiale  $U$  rispetto alla velocità di incipiente fluidizzazione  $U_{mf}$ . Una esauriente trattazione meccanicistica dei fenomeni di comminazione da abrasione superficiale è fornita da Ray et al. (1987).

Associato a talune modalità di fluidizzazione può essere l'insorgere di significative sollecitazioni ad impatto delle particelle fluidizzate. Tale è, ad esempio, il caso di particelle che siano trascinate in getti gassosi all'interno di letti fluidizzati presenti nella regione di alimentazione del gas (Ghadiri et al., 1995). Con riferimento ai flussi piroclastici, tali condizioni potrebbero manifestarsi nelle regioni a più elevato grado di turbolenza della fase solida, tipicamente associate alla sezione di testa del flusso. A seconda dell'intensità dell'impatto, con meccanismi propri del comportamento fragile o semifragile dei materiali in esame, possono determinarsi condizioni di distacco di frammenti superficiali (*chips*, da cui il termine *chipping*), o frammentazione in toto della particella. L'entità della comminazione può anche in tal caso essere ricondotta alla potenza dissipata in collisioni tra le particelle, sebbene questa ultima presenti dipendenze dai parametri operativi del letto, e segnatamente dalla velocità superficiale, diverse da quelle proprie delle condizioni di abrasione superficiale. In particolare la velocità di abrasione risulta dipendente da  $U^2$ .

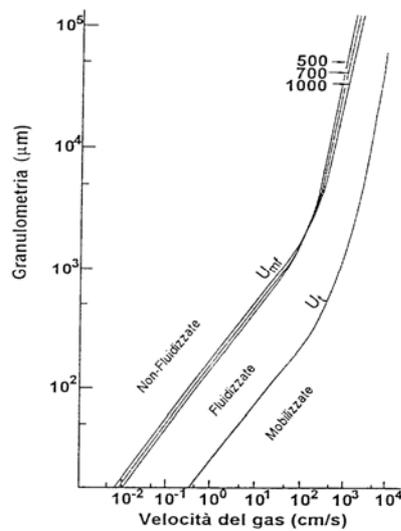
Con riferimento all'oggetto della presente tesi, i fenomeni di generazione di particolato fine nel seno di una corrente piroclastica densa assumono un particolare rilievo. Difatti la generazione di particolato fine ed il successivo trascinarsi del particolato ad opera della corrente gassosa interstiziale può esaltare, come è già stato discusso nella sezione riguardante la fluidizzazione di sistemi polidispersi, la fluidizzazione di particelle grossolane per effetto dello scambio di quantità di moto tra particelle in regime di trasporto e particelle in regime captivo.

#### **2.4 PRECEDENTI ESPERIENZE INERENTI LA FLUIDIZZAZIONE DI MATERIALI PIROCLASTICI**

La letteratura presenta un numero piuttosto limitato di studi rivolti alla caratterizzazione della fluidizzazione di solidi granulari di origine piroclastica. Sparks (1976) suggerì che i flussi piroclastici si possono considerare solo parzialmente fluidizzati, e composti da tre fasi:

1. Particelle la cui velocità terminale è minore della velocità del gas ( $U_t < U$ ), per questo saranno elutriate dal sistema;
2. Particelle con velocità di minima fluidizzazione minore della velocità del gas ( $U_t > U > U_{mf}$ ), e pertanto fluidizzabili;
3. Particelle con  $U_{mf} > U$ , ovvero troppo pesanti per essere fluidizzate.

Un flusso piroclastico è formato da una matrice costituita da una fase 1 e 2, nella quale è dispersa la fase 3, la quale a sua volta può presentare tendenza a galleggiare (pomici) o ad affondare (litici) in dipendenza della densità delle particelle rispetto alla densità della matrice. La fase 1 viene parzialmente elutriata dal flusso e va a formare l'*ash cloud*.

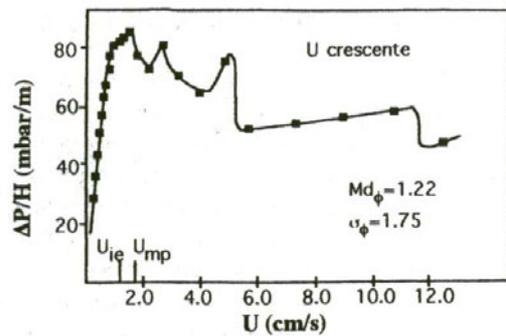


**Figura 2.7:** Relazione tra la velocità di minima fluidizzazione  $U_{mf}$ , la velocità terminale  $U_t$  e la granulometria della particella. Le curve sono calcolate per sfere di densità  $1 \text{ g/cm}^3$  in  $\text{CO}_2$  con  $\varepsilon = 0.45$  a temperatura di 500 700 1000 °C. In particolare la curva di  $U_t$  è calcolata a 770 °C per  $\text{CO}_2$  (Sparks, 1976).

Il modello di Sparks (1976) è stato modificato da Wilson (1980, 1984). L'autore, attraverso la caratterizzazione fluidodinamica di campioni di un deposito di flusso piroclastico, riconobbe tre differenti gradi di fluidizzazione, a cui corrispondono diverse caratteristiche nel deposito:

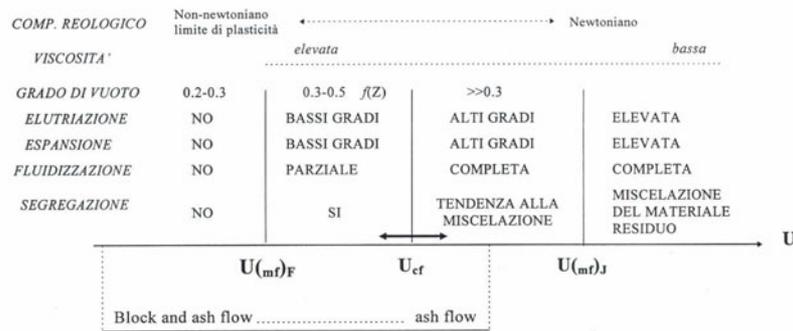
- $0 \leq U \leq U_{ie}$ , dove  $U_{ie}$  è la velocità del gas alla quale il letto inizia ad espandersi; nel deposito non si osserva una gradazione della frazione grossolana;
- $U_{ie} \leq U \leq U_{mp}$  dove  $U_{mp}$  è la velocità del gas alla quale si registra la massima caduta di pressione attraverso il letto; in questo caso il letto è parzialmente espanso e fluidizzato per l'azione del gas, ma non si osserva la formazione di bolle e non avviene alcuna elutriazione. Nel deposito osserviamo una gradazione della frazione grossolana controllata dalla viscosità della matrice;
- $U > U_{mp}$  nel letto si instaura una condizione d'instabilità, ed i gas danno luogo a *channeling*, con riduzione del gradiente di pressione. Si ha una rapida gradazione della

frazione grossolana, controllata dal *bubbling*, con deposizione delle particelle più grossolane, o più dense, al fondo del letto, e delle più fini, o meno dense al top. Nei casi estremi (*gas grading*) lo strato può essere completamente selezionato per dimensioni grazie all'effetto del gas. La gradazione è accompagnata da elutriazione delle particelle più sottili.



**Figura 2.8:** Curva di fluidizzazione ottenuta su un campione di materiale fine di ignimbrite con una dimensione media pari a  $Md = 1.22$  e sorting  $d = 1.75$  (Wilson, 1980).

Di Pastena (1997) concluse che all'interno di un flusso piroclastico le velocità più probabili di fluidizzazione sono comprese tra valori molto bassi (pochi cm al secondo), e valori intorno alla  $U_{cf}$  (velocità di completa fluidizzazione). Questa ultima è funzione della distribuzione granulometrica e dalle condizioni di temperatura e di umidità. La velocità di completa fluidizzazione assumerà valori diversi a seconda del tipo di flusso piroclastico; infatti una completa fluidizzazione (e miscelazione) si può osservare solo in flussi piroclastici con una frazione solida con un'alta percentuale di *fines*.



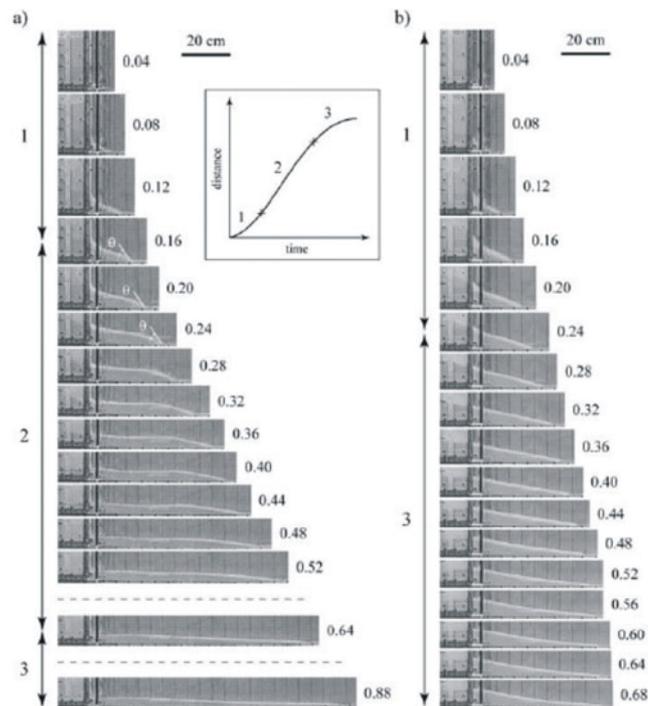
**Figura 2.9:** Schema dei risultati di Di Pastena (1997).

In più fasi della propria attività il gruppo di ricerca operante presso l'Università di Napoli Federico II ha evidenziato il ruolo della polidispersità dei solidi granulari, dimostrando come condizioni di fluidizzazione transiente possano instaurarsi anche a velocità superficiali relativamente basse. Ciò si verifica per effetto della capacità della matrice fluidizzata di mantenere in sospensione per tempi comparabili con le scale temporali di flussi piroclastici la frazione pesante (*jetsam*) della miscela granulare (Marzocchella et al, 1998, 2000; Gravina et al., 2004). In particolare l'ultimo di questi studi, che ha anche riguardato il ruolo dei fenomeni di *attrition*, si è sviluppato nel quadro del presente lavoro di tesi, e di esso verrà data una descrizione completa nel capitolo sui risultati sperimentali.

Roche et al. (2002) sulla base di analisi sperimentali sulla fluidizzazione di miscele granulari sintetiche, hanno dedotto che la grande mobilità nei flussi piroclastici è controllata da particelle di dimensioni comprese tra 20-30  $\mu m$  e 150-200  $\mu m$ , gruppo A secondo la classificazione di Geldart (1973) che costituiscono la matrice di una corrente piroclastica.

Roche et al. (2004) hanno svolto analisi sperimentali sulla propagazione di letti fluidi, usando come materiale Ballotini con densità 2500  $Kg/m^3$ , ricadenti in un ristretto taglio granulometrico. È stato osservato che le miscele granulari possono presentare due differenti comportamenti, a seconda dello stato iniziale del materiale che forma il letto. La

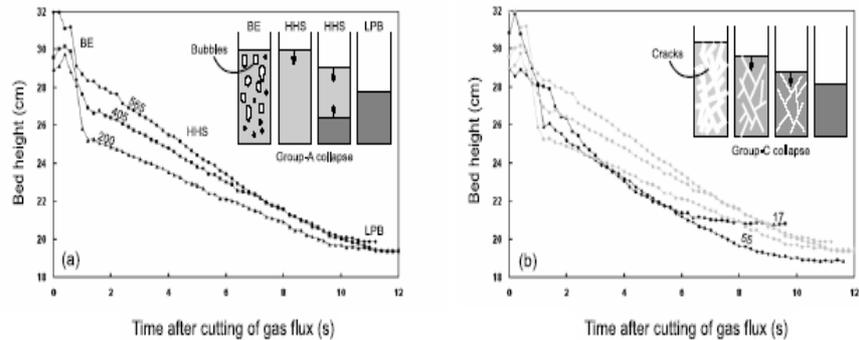
sperimentazione ha mostrato che materiali inizialmente fluidizzati si muovono per una distanza doppia rispetto a quella percorsa dalle miscele non fluidizzate. Le sperimentazioni condotte da Roche et al. (2004) evidenziano il ruolo della frazione fine e delle condizioni iniziali per la propagazione di miscele granulari.



**Figura 2.10:** Messa in posto di flussi di particelle del gruppo A (a) e B (b), della classificazione di Geldart, generati da letti di 20 cm di altezza, in condizione di incipiente fluidizzazione e non espansi. I numeri corrispondono al tempo in 1/100 s, mentre l'ultima figura rappresenta il deposito finale (Roche et al. (2004)).

Recentemente Druitt et al. (2004) hanno svolto esperimenti utilizzando particelle di diametro inferiore a 4 mm proveniente da un deposito ignimbrítico. La sperimentazione si è focalizzata sugli effetti di temperatura e di agitazione meccanica sul comportamento fluidodinamico di miscele granulari naturali. I

campioni di piroclastiti sono stati fluidizzati a temperatura ambiente e lasciati segregare; le componenti densi (litici e cristalli) si sono depositati alla base del letto mentre le pomici e componenti fini nella parte alta, e solo di queste ultime è stato studiato il comportamento fluidodinamico. La sperimentazione ha evidenziato che l'aumento della temperatura ha come effetto il passaggio da un comportamento di tipo A della classificazione di Geldart (1973) ad un comportamento di tipo C.



**Figura 2.11:** Curve di collasso di campioni di Ignimbriti: (a) prove di collasso eseguite a 200°C, 405°C e 565°C; (b) prove di collasso eseguite a 17°C e 55°C (da Druitt et al. 2004).

Gli esperimenti condotti da Druitt et al. (2004) forniscono suggerimenti riguardo il ruolo della fluidizzazione in flussi piroclastici di piccolo volume; gli autori ammettono di avere tralasciato lo studio dei fenomeni di segregazione interni alla fase solida, e che i loro risultati non danno indicazioni su flussi veloci con elevati numeri di Reynolds.

### **CAPITOLO 3: UN CRITERIO APPROSSIMATO PER L'INSTAURARSI DI CONDIZIONI DI AUTOFLUIDIZZAZIONE NELLA REGIONE FRONTALE DI CORRENTI PIROCLASTICHE DENSE.**

#### **3.1 VALUTAZIONE PRELIMINARE DELL'ENTITÀ DEGLI SFORZI INTERNI ALLA FASE GRANULARE E DEFINIZIONE DEL REGIME DI FLUSSO.**

Nel precedente capitolo si sono passati in rassegna i vari meccanismi di scambio di quantità di moto interni ad un flusso granulare, che ne condizionano la dinamica sotto l'effetto di forze motrici esterne, quali quella gravitazionale. In questa sezione verrà presentata una valutazione per ordine di grandezza dell'entità relativa dei vari termini che concorrono alla formulazione del tensore degli sforzi ed al regime di flusso che corrispondentemente si instaura.

Nell'ipotesi in cui la corrente piroclastica sia fluidizzata, il coefficiente di attrito interno  $\mu = \tan(\theta_0)$  si annulla, e quindi può essere considerato nullo anche l'angolo di attrito interno  $\theta_0$ .

Le valutazioni che seguono fanno riferimento alla seguente scelta di variabili selezionate in quanto ritenute rappresentative di quelle tipiche di un flusso piroclastico:

- Diametro medio delle particelle  $d_p \cong 500 \mu\text{m}$ ;
- Velocità media di avanzamento del fronte  $U \cong 30 \text{ m/sec}$ ;
- Densità media del solido  $\rho \cong 1500 \text{ Kg/m}^3$ ;
- Grado di pieno medio  $v \cong 0.1$ ;
- Altezza media del fronte  $H \cong 1 \div 10 \text{ m}$  (tenendo conto che l'*ash cloud* è irrilevante ai fini della meccanica della corrente piroclastica densa).

I risultati delle seguenti valutazioni sono chiaramente dipendenti dal valore assunto dalle variabili rappresentative del flusso. Cionondimeno la scelta fatta è tale da far ritenere che le valutazioni che verranno svolte possano applicarsi alla generalità delle correnti piroclastiche dense.

Sulla base dei valori sopra assunti, il numero di Richardson assume valori compresi tra 1 e 10. Tale risultato suggerisce che possa essere trascurata l'influenza dei fenomeni di *entrainment* sul pelo libero della corrente.

Per i flussi granulari non è disponibile un criterio rigoroso di transizione al regime turbolento. Un ordine di grandezza della viscosità  $\eta$  di un sistema granulare denso può essere stimato a partire dall'equazione di Bagnold (Bagnold, 1954; Savage, 1979).

$$\tau_{xy,c} = C_f \cdot \rho_p \cdot d^2 \left( \frac{dv_x}{dy} \right)^2 = \eta \cdot \frac{dv_x}{dy}$$

Assumendo per il numero di Reynolds l'espressione valida per fluidi dilatanti a legge di potenza (Levenspiel, 1998):

$$Re = \frac{3}{2} \frac{h^2 \rho_m}{K}$$

si ricavano valori del numero di Reynolds compresi tra  $10^7 \div 10^8$ , il che suggerisce che il moto della corrente piroclastica sia dominato dalle forze di inerzia ed abbia carattere turbolento. Ciò comporta che il dettaglio del comportamento reologico, ed in particolare il valore preciso assunto della viscosità dinamica del sistema granulare, diventi scarsamente rilevante ai fini del comportamento macroscopico del flusso, mentre conservi rilevanza ai fini della determinazione della scala minima della turbolenza e delle condizioni locali di scambio di quantità di moto e di dissipazione attraverso interazioni tra particelle e tra queste ed il fluido interstiziale.

### 3.2 DERIVAZIONE DI UNA EQUAZIONE SEMPLIFICATA PER LA VELOCITÀ DEL FLUSSO IN CONDIZIONI FLUIDIZZATE E NON.

Nelle condizioni di flusso turbolento pienamente sviluppato, il moto stazionario unidimensionale del fronte piroclastico è governato dalla condizione di bilancio della forza gravitazionale e della forza d'attrito alla base del flusso stesso:

$$\rho_m g \sin(\theta) h dz = f \frac{\rho_m U^2}{2} dz \quad (3.1)$$

che, una volta integrata, fornisce:

$$U = \sqrt{\frac{2}{f} g \sin(\theta) h} = \sqrt{\xi h \sin(\theta)} \quad (3.2)$$

L'analisi della letteratura relativa a flussi ad elevato numero di Reynolds suggerisce  $\xi \approx 1000 \text{m/s}^2$ . Per piccoli valori di  $\theta$  viene proposta dalla letteratura inerente il moto di valanghe dense una variante dell'equazione 3.2 che incorpora gli effetti dell'angolo di attrito interno del solido granulare (Hopfinger, 1983):

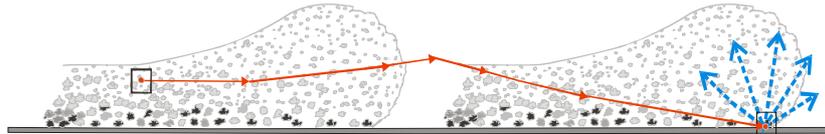
$$U = \sqrt{\xi h [\sin(\theta) - \mu \cos(\theta)]} \quad (3.3)$$

in cui  $\mu$  è il coefficiente di attrito dinamico, che in condizioni fluidizzate è uguale a zero.

### 3.3 ANALISI DELLA STRUTTURA DELLA REGIONE FRONTALE DI UNA CORRENTE PIROCLASTICA DENSA.

Le equazioni sopra riportate si riferiscono al moto supposto unidimensionale del flusso piroclastico. In realtà, come si è dettagliatamente discusso nella sezione 2.2.1, il moto frontale del flusso è intrinsecamente instabile, in quanto la condizione di aderenza in parete fa sì che filetti fluidi a distanze crescenti dalla parete sopravanzino il fronte dando vita a componenti bidimensionali di flusso che, in ultima analisi, si traducono in caduta al suolo del solido ed in intensa vorticità localizzata nella regione frontale. Si tratta del fenomeno dell' *overhang* dettagliatamente descritto e discusso nel capitolo precedente, associato alla formazione di un condotto basale nel quale si

determina l'espulsione violenta di fluido. E' plausibile che all'intensa vorticità della regione frontale, ed all'efficace trasferimento di quantità di moto al suolo legato a sforzi di Reynolds in tale regione, sia associata una minore velocità media del fronte rispetto al corpo del flusso, alla quale corrisponderebbe, per continuità, l'espansione della regione frontale. Tale effetto, già ipotizzato da Wilson (1980), si aggiungerebbe a quello associato alla ingestione (*entrainment*) di aria nella regione frontale.



**Figura 3.1:** Stima della pressione di stagnazione nello strato basale della testa di una corrente piroclastica. La linea rossa rappresenta la traiettoria di un elemento di flusso, le frecce rappresentano il flusso d'aria indotto dalla pressione di stagnazione (da Salatino, 2003, modificato).

La descrizione dei fenomeni che si determinano in prossimità della regione frontale della corrente piroclastica è fatta con riferimento alla figura 3.1. In particolare si può affermare che, nella parte basale della regione frontale del flusso, per effetto combinato del moto di traslazione del flusso e della ricaduta al suolo del solido, si potrebbe determinare, nell'ipotesi in cui siano trascurabili fenomeni dissipativi, una sovrappressione dinamica massima pari a:

$$p \approx \frac{\rho_m U^2}{2} \quad (3.4)$$

Tale valore è quello che si determina dalla applicazione dell'equazione di Bernoulli ad un generico elemento di flusso tra la condizione di moto e la condizione di stagnazione allorché nella regione basale del flusso l'elemento stesso annulla la propria velocità. E' da notare come il valore di pressione di stagnazione così valutato differisca dal valore:

$$p' \approx \frac{\rho_g U^2}{2} \quad (3.5)$$

calcolato, conformemente all'argomento di von Karman e nell'ipotesi di moto inviscido della corrente, assumendo come valore di densità quello del gas atmosferico in cui la corrente si muove. E' plausibile che la pressione di stagnazione  $p'$  espressa dalla equazione 3.5 si stabilisca ad una certa distanza dal fronte, laddove svaniscono gli effetti dinamici legati al moto di ricaduta del solido. La massima pressione dinamica  $p$  che si determina nella regione basale del fronte, definita dalla 3.4, può in linea di principio essere in parte sostenuta dalla fase particellare ed in parte dalla pressione nella fase gassosa interstiziale.

A questo riguardo si possono determinare due situazioni estreme:

- Se il sistema bifasico è espanso ed ha comportamento dinamico assimilabile a quello di un sistema pseudoomogeneo, la sovrappressione dinamica si manifesta integralmente come sovrappressione nella fase gassosa. In tal caso le sovrappressioni nella regione frontale del flusso favoriscono aerazione e fluidizzazione del flusso. Ciò si traduce in una diminuzione del coefficiente di attrito dinamico  $\mu$  ed in un incremento della velocità frontale;
- Se le condizioni di cui sopra non sussistono, una parte rilevante della sovrappressione dinamica associata alla ricaduta del flusso è sostenuta dal solido stesso. Tale circostanza si accompagna ad un incremento del coefficiente di attrito dinamico  $\mu$  in ultima analisi si traduce in un rallentamento del flusso.

E' plausibile che la differenza tra la componente  $\alpha p$  della pressione di stagnazione nella regione basale del flusso definita dalla 3.4 e la pressione di stagnazione  $p'$  definita dalla 3.5 e che si stabilisce in corrispondenza del "naso" del fronte rappresenti la forza spingente di un flusso convettivo forzato che concorre, insieme al flusso di natura percolativa attraverso il solido

sovastante, a determinare l'espulsione del gas dalla regione basale. La differenza  $\alpha p - p'$  è bilanciata dalle forze di inerzia associate all'accelerazione della massa gassosa e dalle perdite di carico per attrito associate alla violenta espulsione del gas attraverso il condotto di flusso basale. Questa considerazione va tenuta presente quando si valuti il ruolo svolto dalla rugosità del suolo nel promuovere lo stato di auto-fluidizzazione. Mohrig et al. (1998) suggeriscono che un suolo "liscio" potrebbe favorire l'insorgenza dei fenomeni di *hydroplaning*, dal momento che un suolo rugoso renderebbe più probabile la "rottura" del film di fluido basale che "lubrifica" il flusso. Viceversa nelle condizioni di propagazione sub-aerea di correnti piroclastiche e nel quadro fenomenologico qui proposto si potrebbe ipotizzare che un suolo rugoso contrasti più efficacemente l'espulsione del fluido basale dal fronte, favorendo l'instaurarsi della componente di flusso percolativo responsabile della fluidizzazione. Tale ipotesi, che potrebbe avere importanti implicazioni sul controllo e sulla prevenzione dei fenomeni piroclastici, è da verificare alla luce di evidenze sperimentali.

### 3.4 UN CRITERIO SEMPLIFICATO PER L'AUTOFLUIDIZZAZIONE DI UNA CORRENTE PIROCLASTICA DENSA.

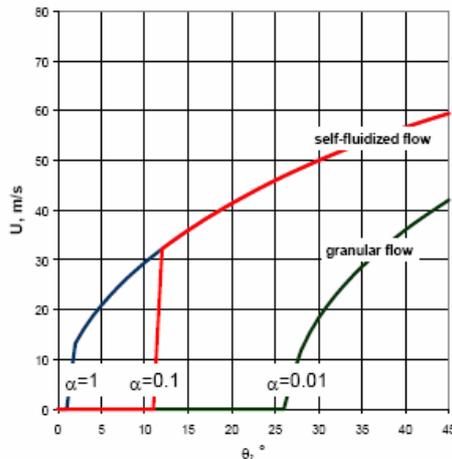
Nell'ipotesi in cui sussista la condizione di flusso pseudoomogeneo, ovvero di efficace scambio di quantità di moto tra fase particellare dispersa e fase fluida continua, si può enunciare un criterio semplificato perché nella regione frontale di una corrente piroclastica densa insorga lo stato di fluidizzazione. Il criterio può essere stabilito assumendo che lo stato di fluidizzazione si instauri allorché il massimo valore di sovrappressione dinamica che può instaurarsi nella regione basale del flusso sia uguale o maggiore del carico "litostatico" corrispondente al battente di sospensione piroclastica che insiste sulla regione basale. Ciò si traduce in:

$$\alpha \frac{\rho_m U^2}{2} = \alpha \frac{1}{2} \rho_m \xi h \sin(\theta) \geq \frac{\rho_m g h}{\cos(\theta)} \quad (3.6)$$

in cui il parametro  $\alpha (<1)$  viene introdotto per stabilire l'aliquota della pressione dinamica che si manifesta effettivamente come sovrappressione nella fase interstiziale gassosa. La condizione si traduce in:

$$\frac{\alpha \xi}{2g} \sin(\theta) \cos(\theta) \geq 1 \quad (3.7)$$

La Figura 3.2 riporta il risultato dell'implementazione dell'equazione 3.7. Le curve si riferiscono sia a condizioni di flusso fluidizzato che di flusso non fluidizzato. Queste ultime, ottenute dall'equazione 3.3, sono relative ad angoli di pendio superiori all'angolo di attrito interno  $\theta_0$ . Viceversa, le condizioni fluidizzate determinano velocità di propagazione finite anche per angoli di pendio inferiori a quello di attrito interno del solido granulare. La propagazione stabile del fronte in condizioni fluidizzate è possibile solo per valori dell'angolo di pendio in corrispondenza dei quali è soddisfatta la condizione di autofluidizzazione equazione 3.7. La condizione limite di soddisfacimento del criterio di auto-fluidizzazione identifica un valore critico dell'angolo di pendio, definito  $\theta_c$ , dipendente dal valore di  $\alpha$  e comunque non superiore a  $\theta_0$ , come evidenziato in Figura 3.2.



**Figura 3.2** Mappa delle condizioni di flusso stazionario del fronte in condizioni fluidizzate, e non fluidizzate, per valori fissati dello spessore del flusso.

E' importante sottolineare quali siano i presupposti perché si instaurino condizioni di flusso auto-fluidizzato:

- Il flusso stazionario auto-fluidizzato può instaurarsi solo per angoli di pendio  $\theta$  superiori a  $\theta_c$  ;
- Il flusso stazionario auto-fluidizzato può instaurarsi solo qualora le condizioni iniziali del flusso siano esse stesse fluidizzate. Il collasso gravitazionale di una colonna eruttiva può efficacemente corrispondere a questa condizione.

Il flusso stazionario auto-fluidizzato può instaurarsi solo se le sovrappressioni dinamiche indotte dal rapido arresto del solido nell'approssimarsi al suolo sono prevalentemente a carico della fase gassosa interstiziale, ovvero, come sopra richiamato, se il flusso è espanso e pseudoomogeneo. Questi requisiti sono ragionevolmente soddisfatti in presenza di solidi granulari di granulometria fine.

### **3.5 MOLTEPLICITÀ DEGLI STATI STAZIONARI E SENSIBILITÀ DALLE CONDIZIONI INIZIALI DEL FLUSSO DI CORRENTI PIROCLASTICHE DENSE.**

L'analisi dei risultati in Figura 3.2 evidenzia come il sistema possa esibire molteplicità di stati stazionari: per ogni valore della pendenza del suolo  $\theta$  si identificano una condizione di flusso di tipo auto-fluidizzato ed una riconducibile ad un flusso granulare "secco", le quali, per ogni fissato spessore dell'altezza  $h$  del flusso, si sviluppano con velocità differenti. E' plausibile che quale di queste condizioni di flusso si instauri nella realtà dipenda dalle condizioni iniziali del flusso in relazione alla velocità ed allo stato di fluidizzazione. A tale riguardo è importante sottolineare come sperimentazioni rivolte alla verifica dell'instaurarsi dello stato di auto-fluidizzazione debbano essere condotte con un accurato controllo delle condizioni iniziali del flusso. In particolare è importante verificare che le condizioni di partenza siano corrispondenti ad

uno stato di fluidizzazione, come ad esempio avviene nello studio di Roche et al. (2004). Non è invece questo il caso dello studio proposto da Takahashi e Tsujimoto (2000). I risultati di questo studio disprovverebbero, a parere degli autori, l'instaurarsi di condizioni di auto-fluidizzazione nella propagazione di correnti piroclastiche. Tale conclusione è opinabile alla luce del fatto che le condizioni iniziali del flusso non sono state tenute sotto controllo negli esperimenti condotti da questi autori, e plausibilmente non ricadono nel campo di condizioni fluidizzate.

### **3.6 CONDIZIONI CHE PROMUOVONO L'INSORGENZA DELLA CONDIZIONE DI MOTO AUTO-FLUIDIZZATO DI UNA CORRENTE PIROCLASTICA DENSA.**

Salatino (2003) ha sottolineato come l'instaurarsi di condizioni di moto auto-fluidizzato richieda che la sospensione bifasica presenti comportamento prossimo al pseudoomogeneo (cfr. sez. 3.3), ovvero efficace scambio di quantità di moto tra il solido granulare ed il fluido interstiziale. Tale condizione è favorita da tre fattori: 1) presenza di una consistente aliquota di fini nella miscela granulare; 2) polidispersità della sospensione granulare; 3) sussistenza di una condizione di flusso di scorrimento la quale, come discusso nella sezione 2.3.4, può favorire l'instaurarsi di condizioni di fluidizzazione particellare piuttosto che aggregativa. E' inoltre necessario che lo stato iniziale del solido granulare sia fluidizzato.

Roche et al. (2004) hanno di recente presentato un articolato studio teorico-sperimentale delle condizioni che promuovono l'instaurarsi dello stato di fluidizzazione nel moto di una corrente granulare. Le conclusioni alle quali essi pervengono sono in sostanziale accordo con quanto precedentemente riportato. In sintesi, vengono individuate due condizioni fondamentali perché la mobilità della corrente granulare sia esaltata dallo stato di fluidizzazione:

- il moto della corrente deve essere indotto a partire dallo stato di fluidizzazione, in analogia con le condizioni sperimentali che si determinano nelle prove di *lock exchange* o di *dam break*;
- Il solido granulare deve possedere caratteristiche tali che, una volta aerato, i tempi di de-aerazione  $t_d$  siano confrontabili con la scala temporale del flusso  $t_f$ .

In particolare la seconda condizione risulta dipendente dalle proprietà (granulometria, densità, polidispersità) del solido granulare. Roche et al. (2004) suggeriscono che le scale temporali della deaerazione del flusso possano essere determinate sulla base di esperienze di collasso, consistenti nella caratterizzazione della risposta dinamica di letti fluidizzati allorché viene istantaneamente interrotto lo stato di fluidizzazione.

La condizione di flusso pseudoomogeneo invocata da Salatino (2003) è sostanzialmente equivalente alla condizione  $t_d \gg t_f$  suggerita da Roche et al. (2004). La questione diviene più complessa quando si tratta di definire una plausibile scala temporale del flusso  $t_f$ . Nelle esperienze di Roche et al. (2004), condotte a valori modesti del numero di Froude, non si determinano le condizioni per il continuo rinnovamento dello stato di fluidizzazione. Non vi è alcuna evidenza di *overhang*, bensì la fenomenologia è quella classica di flussi granulari quasi-stazionari. In tali condizioni il valore di  $t_f$  coincide con la durata integrale del flusso prima che questo sia definitivamente messo in posto.

Nell'approccio proposto nel presente lavoro, viceversa, si ipotizza che la dinamica frontale, che nelle condizioni attuali si sviluppa a valori molto elevati del numero di Froude, favorisca il continuo rinnovarsi dello stato di fluidizzazione. Una valutazione per ordine di grandezza della scala temporale  $t_f$  potrebbe essere costituita in questo caso dal rapporto  $t_f \cong h/U$ , compresa tra alcuni centesimi ed alcuni decimi di secondo.

L'attività sperimentale condotta nel presente lavoro, e descritta nei capitoli successivi, è finalizzata alla verifica di alcune delle ipotesi presentate nella presente sezione. In particolare si è inteso verificare se ed in quale misura lo stato di fluidizzazione sia favorito dai seguenti parametri:

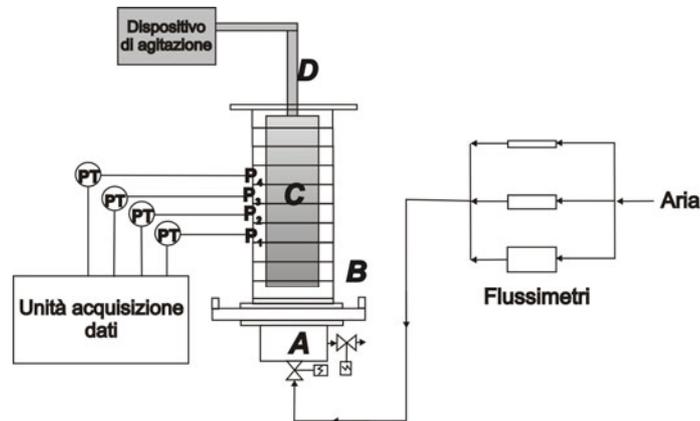
- granulometria caratteristica di solidi granulari di natura piroclastica rappresentativi di quelli che costituiscono correnti piroclastiche dense;
- polidispersità (per dimensioni e/o densità) dei solidi granulari di interesse;
- influenza sulla qualità della fluidizzazione di una condizione di flusso di scorrimento agente sul solido fluidizzato.

## CAPITOLO 4: METODI, APPARECCHIATURE E TECNICHE SPERIMENTALI

### 4.1. APPARATO SPERIMENTALE

L'apparecchiatura sperimentale utilizzata nel presente lavoro è costituita da:

- una colonna di fluidizzazione;
- un sistema di rilevamento della pressione lungo la colonna;
- un'unità di acquisizione dati;
- un sistema di alimentazione dell'aria di fluidizzazione.



**Figura 4.1:** Schema semplificato dell'impianto di fluidizzazione (non in scala). L'apparato sperimentale è composto da: *windbox* (A), una colonna di fluidizzazione da 120 mm di diametro interno (B) colonna con 10 cm di diametro esterno (C), albero (D). I dati sono acquisiti tramite un sistema di rilevamento della pressione lungo la colonna, collegato a dei trasduttori di pressione (tp). Il gas di fluidizzazione è aria in condizioni ambiente.

#### 4.1.1 COLONNA DI FLUIDIZZAZIONE

La colonna di fluidizzazione è stata realizzata in Plexiglas, per consentire l'osservazione diretta del moto della sospensione solido-gas e dei moti relativi tra i solidi all'interno del letto. L'impianto di fluidizzazione può essere equipaggiato con due diverse colonne di fluidizzazione:

colonna da 40 mm di diametro, fornita di un dispositivo per il recupero delle polveri. Il dispositivo è formato da una valvola deviatrice del flusso con due rami in uscita alle cui estremità sono posti filtri di carta per recuperare le polveri elutriate. La valvola permette di deviare la corrente gassosa effluente dalla colonna in modo tale da recuperare le polveri in uno dei due filtri, mentre l'altro può essere sostituito.

colonna da 120 mm di diametro, costituita da una serie di segmenti cilindrici in Plexiglas sovrapponibili del diametro di 12 cm e di altezza 2,5 cm. La tenuta fra i singoli segmenti è realizzata mediante guarnizioni in gomma, (*o-ring*); la tenuta con il distributore a piastra porosa, mediante una guarnizione in gomma siliconica opportunamente sagomata. La colonna utilizzata prevede la presenza di undici segmenti sistemati su un piatto del diametro di 40 cm, utilizzato per consentire la raccolta del materiale del letto. La colonna di fluidizzazione è dotata di una sezione di disimpegno (*freeboard*) collegato ad un filtro a manica, per consentire la captazione del particolato elutriato nella corrente gassosa effluente dalla apparecchiatura.

Nel corso della sperimentazione l'impianto è stato modificato per studiare il ruolo del flusso di scorrimento sulla fluidizzazione di miscele piroclastiche naturali. Nella colonna di fluidizzazione da 120 mm di diametro è stata inserita una seconda colonna, cosicché il sistema finale risulta costituito da

due cilindri coassiali, quello interno di 10 cm di diametro, ed quello esterno di diametro 12 cm. Il cilindro interno è a sua volta solidale ad un albero collegato, tramite un sistema di cinghia e puleggia, ad un motore elettrico (figura 4.1). Il fondo della colonna da 120 mm è stato riempito di cuscinetti di acciaio da 1 cm, non fluidizzabili alle velocità superficiali impiegate negli esperimenti, fino ad una quota corrispondente alla base del cilindro interno.

Il gas di fluidizzazione viene alimentato attraverso una zona “di calma” (*windbox*) costituita da un condotto di diametro 12 cm ed alto 30 cm, riempito di cilindri ceramici. Successivamente esso attraversa un distributore costituito da una piastra in acciaio sinterizzato ad elevata perdita di carico. Il *windbox* è stato equipaggiato con due elettrovalvole, delle quali una posta alla base ed una seconda ad una quota intermedia nel *windbox*. La funzione delle valvole è quella di intercettare istantaneamente il flusso gassoso alla base della colonna di fluidizzazione e contemporaneamente eliminare l’aria intrappolata nel *windbox*.

Il gas di fluidizzazione è proveniente dalla linea di aria tecnica compressa disponibile dalla rete di laboratorio. La portata d’aria viene regolata mediante valvole e misurata mediante rotametri a diverso fondo-scala.

Il sistema di misura di pressione è costituito da quattro trasduttori di pressione preamplificati ad elevata velocità di risposta. I trasduttori sono connessi alle prese di pressione disposte lungo il letto ed i segnali sono inviati all’unità di acquisizione per la successiva elaborazione. Le prese di pressione sono disposte in parete, in modo da non perturbare il moto della sospensione all’interno del letto. Esse hanno una diversa disposizione a seconda che la colonna sia dotata o meno del cilindro rotante coassiale interno. La tabella 4.1 riporta le quote alle quali sono collocate le prese di pressione nelle due configurazioni di impianto.

Presa di pressione	Configurazioni di impianto	
	<i>120 mm di diametro</i>	<i>Cilindri coassiali</i>
	m	
<b>P<sub>1</sub></b>	0.008	0.111
<b>P<sub>2</sub></b>	0.036	0.136
<b>P<sub>3</sub></b>	0.061	0.161
<b>P<sub>4</sub></b>	0.086	0.186

**Tabella 4.1:** Quote alle quali sono collocate le prese di pressione nelle due configurazioni di impianto

L'unità di acquisizione dati è costituita da un PC equipaggiato con schede della National Instruments per la conversione analogico/digitale dei segnali misurati. Un programma di acquisizione dati realizzato in ambiente LabView permette di acquisire i segnali di pressione alla frequenza desiderata e per un tempo prefissato. Il programma provvede alla stima di alcuni parametri statistici dei segnali acquisiti. Semplici elaborazioni basate su valori di pressione a velocità superficiali del gas differenti consentono, inoltre, di stimare agevolmente la velocità superficiale dell'aria alimentata alla colonna. I dati acquisiti vengono successivamente tabellati e diagrammati mediante opportuni programmi applicativi.

#### 4.1.2 DISPOSITIVO DI AGITAZIONE

Il cilindro pieno in Plexiglas inserito all'interno della colonna di fluidizzazione è stato reso solidale mediante accoppiamenti filettati ad una barra metallica. Sull'albero sono stati calettati due cuscinetti a sfera per consentirne la rotazione ed una puleggia per permettere la trasmissione del momento torcente. I cuscinetti sono alloggiati all'interno di due supporti collegati all'incastellatura di sostegno dell'impianto, allo scopo di consentire la sospensione del cilindro ad una distanza prefissata

dal fondo e contemporaneamente garantire la coassialità tra cilindro interno ed esterno.

La potenza necessaria alla rotazione a velocità costante del cilindro interno è fornita da un motore asincrono trifase antideflagrante, dotato di un regolatore di velocità che consente la variazione della stessa nell'intervallo  $180 \div 880$  rpm. La trasmissione del moto è realizzata mediante un sistema a cinghia e puleggia.



**Figura 4.2:** Foto dell'impianto formato dalle due colonne coassiali ed il dispositivo di agitazione.

#### 4.2. MATERIALI

Di seguito si riporta una breve descrizione degli affioramenti da cui sono state prelevate le miscele piroclastiche oggetto della sperimentazione. La scelta degli affioramenti da cui prelevare i materiali piroclastici è stata dettata dall'esigenza di studiare materiali naturali con diverse caratteristiche granulometriche e litologiche, in modo da investigare quali sono i fattori che fanno variare il comportamento fluidodinamico delle miscele granulari naturali.

#### 4.2.1 DEPOSITO DA FLUSSO PIROCLASTICO DELL'ERUZIONE DEL TUFO GIALLO NAPOLETANO

Le miscele di Tufo Giallo Napoletano utilizzate nel corso della sperimentazione sono state ottenute dai materiali prelevati dal deposito da un flusso piroclastico situato a Licola (Napoli) da una facies incoerente di Tufo Giallo Napoletano (12 ky B.P., Alessio et al., 1973; recentemente ritardato a 15.3 B.P. in Deino et al., 2005). In seguito si descrivono brevemente le caratteristiche dell'affioramento da cui è stato prelevato il deposito in esame.

L'affioramento studiato in località Licola comprende due livelli principali, definiti Unità Superiore e Inferiore, questa ultima a sua volta suddivisa in 5 subunità. I materiali utili alla sperimentazione sono stati prelevati nell'Unità Superiore, che è costituita da una bancata di ceneri, da fini a grossolane, in cui sono immerse pomice centimetriche e rari frammenti litici.

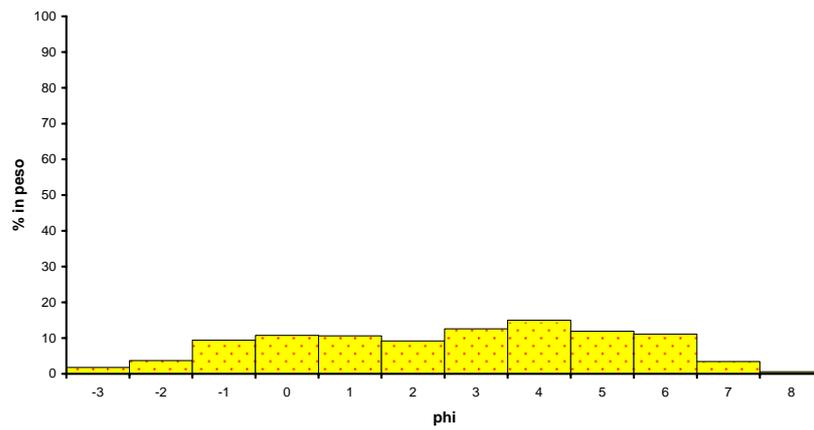
I materiali che formano il deposito di Tufo Giallo Napoletano presentano una distribuzione granulometrica di tipo polimodale (figura 4.4). La frammentazione è molto spinta, essendo rappresentati clasti fino alla classe 8 phi. Dall'analisi della curva granulometrica riportata in figura 4.4 si osserva che risultano principalmente rappresentate le particelle con dimensioni minori o uguali di 4 phi.

Le analisi litologiche eseguite sui prodotti dell'eruzione del Tufo Giallo Napoletano mostrano che questo deposito è costituito da clasti pomice sub arrotondati e rari frammenti di cristalli dispersi in una matrice cineritica costituita da *shard* vetrose.

Il materiale prelevato dal deposito di Tufo Giallo Napoletano è stato scelto, data l'omogeneità per densità delle particelle e l'arricchimento in materiali fini, come materiale di riferimento per studiare il ruolo delle particelle fini nel comportamento fluidodinamico delle miscele piroclastiche naturali.



**Figura 4.3:** Deposito da flusso piroclastico dell'eruzione del Tufo Giallo Napoletano (Licola).



**Figura 4.4:** Distribuzione granulometrica del deposito di Tufo Giallo Napoletano prelevato in località Licola.

#### 4.2.2 DEPOSITO DA FLUSSO PIROCLASTICO DELL'ERUZIONE DI AVELLINO.

Le miscele di Avellino Flow utilizzate nel corso della sperimentazione sono state ricavate dai materiali prelevati dal deposito da un flusso piroclastico situato a San Sebastiano al Vesuvio (NA). Si tratta di prodotti dell'eruzione di Avellino ( $3760 \pm 70$  anni dall'attuale, Alessio et al., 1973), eruzione che rappresenta uno dei maggiori eventi pliniani registrati nell'attività del Somma-Vesuvio (Rolandi et al., 1993). In seguito si descrivono brevemente le caratteristiche dell'affioramento da cui sono stati prelevati le miscele piroclastiche.

Il deposito in esame poggia in continuità stratigrafica sopra il deposito di pomici grigie da caduta sempre connesse all'eruzione di Avellino. Si tratta di un deposito massivo, costituito da pomici e litici centimetrici immersi in una matrice sottile.

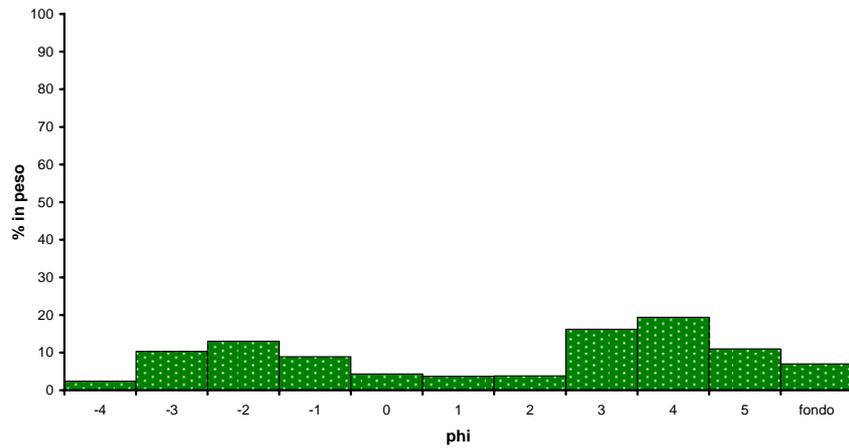
L'analisi granulometrica eseguita sui materiali prelevati dal deposito (Figura 4.6) mostra una distribuzione granulometrica di tipo polimodale, l'estrema prossimalità del deposito fa sì che esso non si presenti notevolmente arricchito in materiale sottile, risultano principalmente rappresentate le particelle con dimensioni minori o uguali di  $3 \phi$ .

Le analisi litologiche eseguite sui prodotti dell'eruzione di Avellino mostrano che questi sono costituiti principalmente da frammenti di pomici, cristalli e frammenti di litici lavici.

Il materiale prelevato dal deposito da flusso piroclastico dell'eruzione di Avellino, date le caratteristiche granulometriche e litologiche, è stato scelto come materiale di riferimento per studiare il comportamento fluidodinamico di materiali piroclastici che sono polidisersi per dimensioni, e in minor misura per densità.



**Figura 4.5** Deposito da flusso piroclastico Ddell'eruzione di Avellino (San Sebastiano al Vesuvio).



**Figura 4.6:** Distribuzione granulometrica del deposito di Avellino Flow prelevato in località San Sebastiano al Vesuvio.

#### 4.2.3 DEPOSITO PIROCLASTICO DA CADUTA CONNESSO ALL'ERUZIONE DI AVELLINO.

Le miscele di Avellino Fall utilizzate nel corso della sperimentazione sono state ottenute dai materiali prelevati dal deposito da caduta, affiorante in località San Sebastiano al Vesuvio (NA) e Marigliano (NA) dell'eruzione di Avellino ( $3760 \pm 70$  anni dall'attuale). Il materiale utilizzato per ottenere i campioni 1a, 1b, 2a, 2b (tabella 4.3 B) è stato prelevato dal deposito in località Marigliano (NA). Successivamente questo affioramento è risultato inaccessibile, ed il resto della sperimentazione è stato pertanto condotto impiegando materiali prelevati in località San Sebastiano al Vesuvio (NA), da un deposito sempre collegato alla fase da caduta dell'eruzione di Avellino. I due depositi si differenziano per la distribuzione litologica, infatti nel deposito da caduta presente in località Marigliano sono presenti frammenti di litici carbonatici, che invece sono assenti nel deposito presente in località San Sebastiano al Vesuvio.

Il materiale da utilizzare per la sperimentazione è stato prelevato dalla parte alta del deposito da caduta dell'eruzione di Avellino, caratterizzata dalla presenza delle pomici grigie.

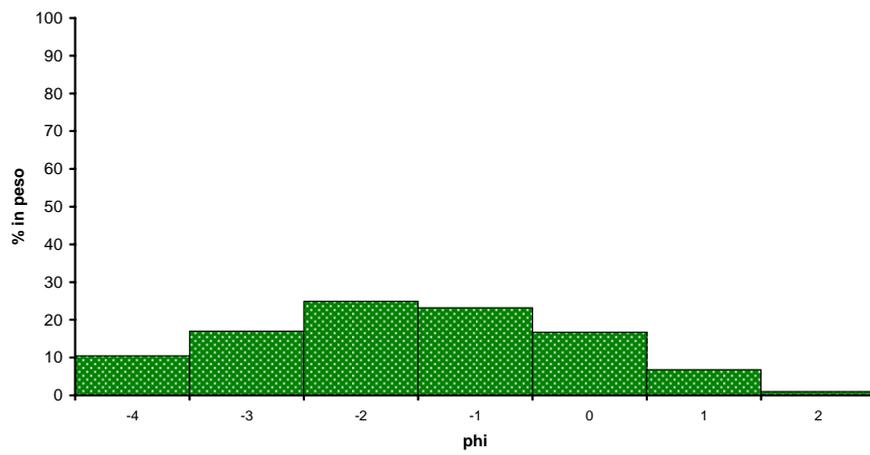
L'analisi granulometrica eseguita sui materiali prelevati dal deposito da caduta piroclastico (Figura 4.8) mostra una distribuzione granulometrica di tipo unimodale. La moda del campione è di -2 phi.

Le analisi litologiche, eseguite sui prodotti dell'eruzione di Avellino, mostrano che questi sono costituiti principalmente costituiti da frammenti di pomici, cristalli e frammenti di litici lavici e carbonatici.

Il materiale prelevato dal deposito da caduta dell'eruzione di Avellino è stato scelto, data la sua distribuzione granulometrica e litologica, come materiale di riferimento per studiare il comportamento fluidodinamico di materiali piroclastici che sono polidispersi per densità.



**Figura 4.7:** Deposito da caduta piroclastico connesso all'eruzione di Avellino (San Sebastiano al Vesuvio).



**Figura4.8:** Distribuzione granulometrica del deposito di Avellino Fall prelevato in località Marigliano

#### 4.2.4 PREPARAZIONE E DESCRIZIONE DEI MATERIALI

Dai materiali prelevati in campagna sono stati ricavati vari tagli selezionati mediante setacciatura. Per motivi sperimentali si è deciso di operare su particelle con dimensioni inferiori a 1 mm. Per questo motivo si sono selezionate tre tipi di miscele piroclastiche, le cui particelle hanno dimensioni comprese tra 0 e 1000 micron, ed inoltre si è deciso di selezionare anche tagli ristretti di piroclastiti. In tabella 4.2 sono riportati gli intervalli granulometrici dei campioni utilizzati nella presente sperimentazione.

Nome campione	Dimensioni, micron	Materiale
Miscela Tufo Giallo Napoletano	0- 1000	Tufo Giallo Napoletano
Miscela Avellino Flow	0- 1000	Avellino Flow
Miscela Avellino Fall	0- 1000	Avellino Fall
1a	800-1000	Avellino Fall
1b	680-800	Avellino Fall
2a	600-680	Avellino Fall
2b	500-600	Avellino Fall
3a	800-1000	Tufo Giallo Napoletano
3b	680-800	Tufo Giallo Napoletano
4a	600-680	Tufo Giallo Napoletano
4b	500-600	Tufo Giallo Napoletano

**Tabella 4.2:** Ampiezza granulometrica dei materiali piroclastici utilizzati nel corso della sperimentazione

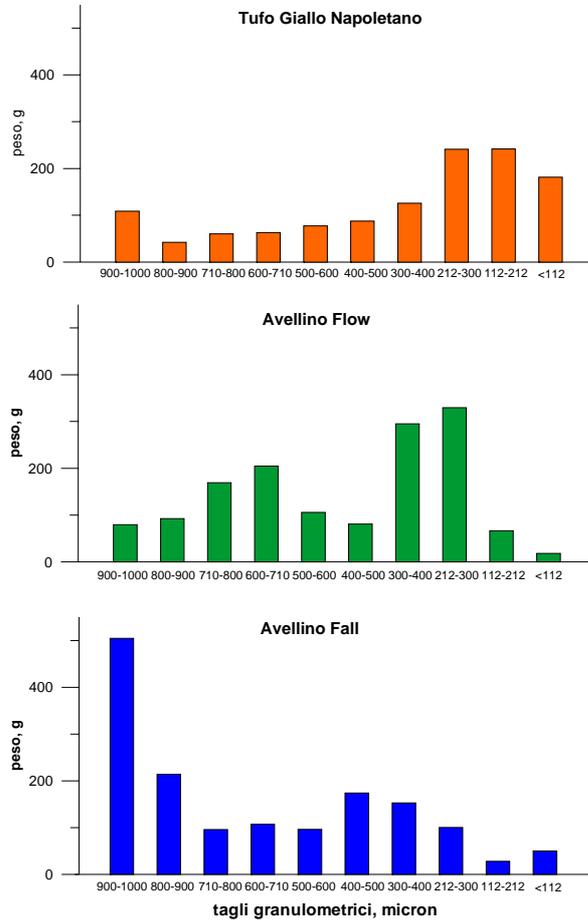
#### 4.2.5 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI PIROCLASTICI IN ESAME

Sulle tre miscele piroclastiche, e sui tagli ristretti di piroclastiti, sono state eseguite delle analisi granulometriche preliminari. Dall'analisi dei dati riportati in figura 4.9 appare che i tre tipi di miscele piroclastiche in esame hanno conservato la distribuzione granulometrica dei depositi da cui sono state prelevate:

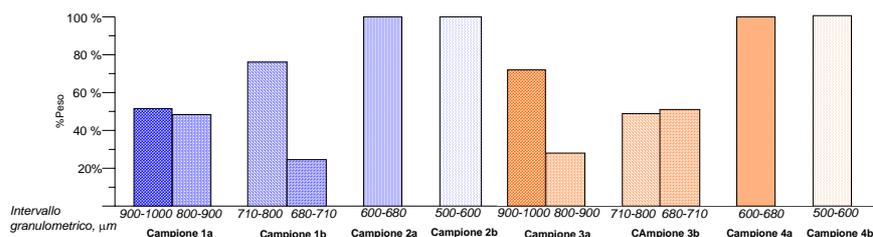
- La miscela di Tufo Giallo Napoletano risulta fortemente arricchita in materiali sottili;
- la miscela di Avellino Flow ha un andamento polimodale ed i materiali più rappresentati sono quelli con dimensioni comprese tra 200 e 400  $\mu\text{m}$ ;

- la miscela di Avellino Fall presenta la moda decisamente marcata sui materiali con dimensioni 900-1000  $\mu\text{m}$ .

In figura 4.10 inoltre, sono riportate le analisi granulometriche preliminari eseguite sui campioni di piroclasti.



**Figura 4.9:**  
Distribuzioni granulometriche delle miscele piroclastiche in esame.



**Figura4.10:** Distribuzioni granulometriche dei campioni di piroclastiti in esame.

Di seguito, inoltre, sono descritte le caratteristiche litologiche e granulometriche delle miscele piroclastiche oggetto della sperimentazione. In tabella 4.3 sono riportate le valutazioni semiquantitative delle componenti litologiche, nelle tre miscele piroclastiche e su tagli ristretti di piroclastiti.

Le miscele di Tufo Giallo Napoletano si presentano pressoché omogenee per densità, perchè clasti vetrosi (*shard*) e cristalli presentano densità confrontabili. In natura tale deposito può essere considerato una corrente piroclastica diluita, per cui le miscele da esso estratte sono comparabili con la fase solida di un flusso piroclastico che ha già depositato gran parte del carico solido è stata già depositata.

Le miscele estratte dal deposito da flusso piroclastico dell'eruzione di Avellino contengono una frazione ridotta (circa il 30%) di cristalli e frammenti litici, per cui predomina la frazione pomicea a bassa densità. Queste miscele rappresentano un flusso piroclastico che scorre in prossimità del vent.

Le miscele estratte dal deposito da caduta dell'eruzione di Avellino sono miscele polidisperse per densità; esse contengono, infatti, una percentuale confrontabile di cristalli e frammenti litici e di frammenti pomicea e carbonatici. Tenuto conto che la maggior parte dei depositi piroclastici da flusso si originano per il collasso della stessa colonna pliniana che mette in posto i depositi da caduta, si può ritenere, con buona approssimazione, che nel momento in cui il flusso piroclastico si

origina i clasti che lo costituiscono abbiano le stesse caratteristiche di quelli della miscela Avellino Fall.

A)

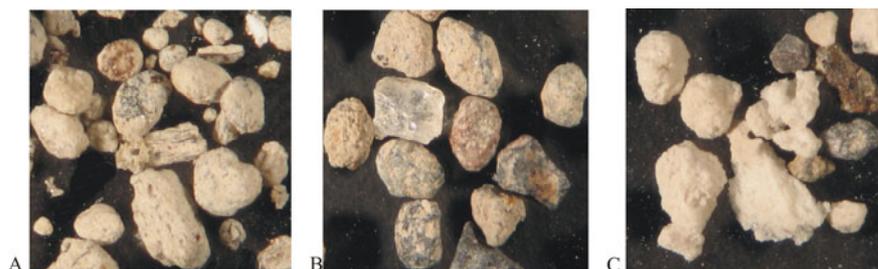
	DEPOSITO AVELLINO (San Sebastiano al Vesuvio)			DEPOSITO TUFO GIALLO NAPOLETANO	
		FALL	FLOW		
Intervallo granulometrico particelle: 0-1000 $\mu\text{m}$	Densità ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	% volumetrica	% volumetrica	Densità ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	% volumetrica
Frammenti pomici	1	50%	78%	2,5	96%
Frammenti litici	2,5	30%	16%		
Frammenti cristalli	3	20%	7%	2,5	4%

B)

Campioni	Dimensioni		Litici Carbonatici $\rho=1 \text{ g}/\text{cm}^3$	Litici Lavici $\rho=2.5 \text{ g}/\text{cm}^3$	Cristalli $\rho=3 \text{ g}/\text{cm}^3$	Frammenti di pomici $\rho=1 \text{ g}/\text{cm}^3$
	$\phi$	$\mu\text{m}$	Avellino Fall (Marigliano)			
1a	0.5	800-1000	8%	15%	25%	52%
1b		680-800	12%	6%	18%	64%
2a	1	600-680	12%	12%	17%	59%
2b		500-600	6%	9%	32%	53%
Tufo Giallo Napoletano						
3a	0.5	800-1000	-	-	4%	96%
3b		680-800	-	-	6%	94%
4a	1	600-680	-	-	4%	96%
4b		500-600	-	-	6%	94%

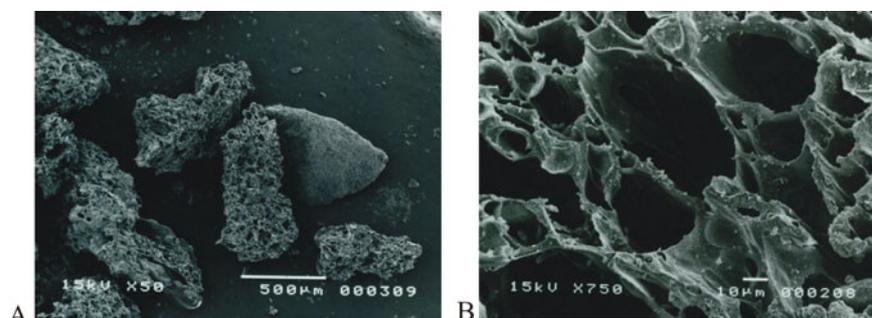
**Tabella 4.3:** Componenti delle miscele di Avellino e Tufo Giallo Napoletano: A) proprietà dei campioni ad ampia distribuzione granulometrica B) proprietà delle frazioni granulometriche selezionate a partire dalle miscele naturali

Di seguito si descrivono le caratteristiche morfoscopiche della frazione juvenile delle tre miscele in esame.



**Figura 4.11 :** Foto al microscopio binoculare (3X) delle particelle che formano le tre miscele: **A)** Miscela di Tufo Giallo Napoletano; **B)** Miscela di Avellino Flow; **C)** Miscela di Avellino Fall.

La frazione juvenile della miscela di Tufo Giallo Napoletano (figura 4.11 A) si presenta in forme di pomice arrotondate ed allungate, che rappresentano frammenti di clasti i cui vacuoli evidenziano strutture a canne d'organo. In figura 4.11 B sono raffigurate le particelle che formano la miscela di Avellino Flow, i frammenti pomiceo presentano un buon grado di arrotondamento, connesso al trasporto in massa, subito dalle particelle prima della messa in posto. La frazione juvenile della miscela di Avellino Fall presenta clasti a spigoli vivi (figura 4.11 C), su questa frazione è stata eseguita un'ulteriore analisi al microscopio elettronico a scansione (S.E.M.). In figura 4.12 sono riportate le foto al S.E.M. eseguite sulla frazione juvenile della miscela di Avellino Fall.



**Figura 4.12: A)** foto al S.E.M. del campione 2b (ingrandimento 50 X). **B)** foto al S.E.M. del campione 1a (ingrandimento 100 X).

Dall'analisi delle foto si osserva la morfologia a spigoli vivi presentata dalle particelle della frazione pomicea, nonché la struttura dei vacuoli allungati tipo canne d'organo (figura 4.12 B). Si nota, inoltre, l'assenza di materiale fine che tappezza le pareti dei vacuoli.

#### **4.3 CARATTERIZZAZIONE DELLA FLUIDIZZAZIONE DI SOLIDI GRANULARI DI INTERESSE VULCANOLOGICO.**

Le miscele prelevate dal deposito da caduta, e dal deposito da flusso piroclastico sono state caratterizzate dal punto di vista del comportamento a fluidizzazione. La sperimentazione è stata condotta con l'impianto di fluidizzazione in diverse condizioni operative:

- Colonna di fluidizzazione con diametro di 120 mm;
- Colonna di fluidizzazione con diametro di 40 mm equipaggiata con il dispositivo per il recupero delle polveri;
- Colonna di fluidizzazione da 120 mm dotata di cilindro interno coassiale, in condizioni rotanti e non.

Le prove svolte con la colonna di fluidizzazione di 120 mm di diametro sono servite per la caratterizzazione del comportamento alla fluidizzazione dei materiali naturali in esame ed, in particolare, per studiare il ruolo della frazione sottile. Inoltre, in questa configurazione di impianto sono state eseguite prove finalizzate alla caratterizzazione del comportamento all'abrasione. Le prove eseguite con le colonne coassiali sono state svolte comparando i risultati ottenuti con agitazione meccanica, ovvero con il cilindro interno posto in rotazione, con quelle condotte nelle medesime condizioni ma mantenendo fermo il cilindro interno.

##### **4.3.1 PROVE DI FLUIDIZZAZIONE IN REGIME QUASI-STAZIONARIO**

Durante le prove di fluidizzazione la velocità superficiale del gas  $U$  è progressivamente aumentata dalla condizione di letto

fisso fino a quella di letto vigorosamente bollente, passando per la condizione di incipiente fluidizzazione, per poi nuovamente diminuire fino alla condizione di letto fisso. Al variare della velocità superficiale del gas  $U$  si è proceduto alla misura dell'altezza del letto e delle pressioni  $P$ , registrate lungo la colonna di fluidizzazione. Da queste ultime si è ricavato il valore dei gradienti assiali di pressione  $\Delta P/\Delta Z$ .

L'analisi delle pressioni registrate lungo la colonna di fluidizzazione è servita per definire il raggiungimento dello stato di fluidizzazione. L'analisi dei gradienti di pressione, corrispondenti ad una misura della densità media della sospensione, ha fornito, invece, indicazioni sui fenomeni di segregazione assiale che si determinano nelle condizioni fluidizzate seguendo le procedure indicate da Olivieri et al., (2004).

Per ogni prova di fluidizzazione sono state registrate le seguenti variabili:

- $U_1$  velocità superficiale del gas alla quale si determina la transizione dalla condizione di letto fisso alla condizione di letto fluidizzato;
- $U_1'$  velocità superficiale del gas alla quale avviene il passaggio al regime di letto bollente;
- $U_1''$  velocità superficiale del gas di fluidizzazione alla quale è massima l'entità delle segregazioni assiali lungo il letto;
- $U_2$  velocità superficiale del gas di fluidizzazione alla quale il letto risulta completamente miscelato.

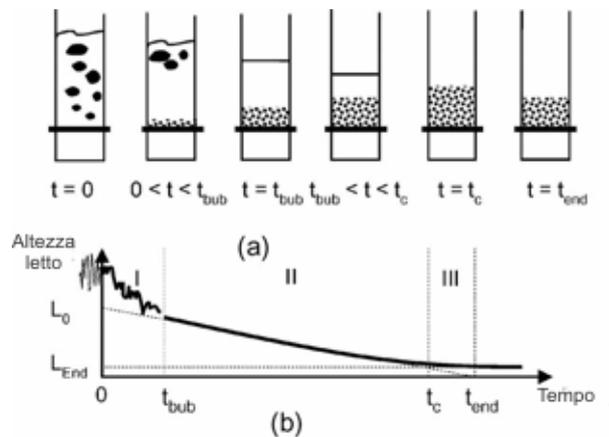
Al termine delle prove di fluidizzazione il materiale costituente il letto è stato sottoposto ad analisi granulometrica, sia sul *toto*, che sul materiale raccolto nei cinque segmenti cilindrici che formano la colonna di fluidizzazione. Inoltre, il materiale che forma il letto è stato successivamente sottoposto ad un'analisi litologica.

#### 4.3 2 PROVE DI COLLASSO

Le prove di collasso sono state introdotte per caratterizzare la qualità della fluidizzazione di solidi granulari, con particolare riferimento a quelli appartenenti alla tipologia A della classificazione di Geldart (1973).

Il comportamento del letto di particelle viene caratterizzato analizzando la dinamica del letto allorché, partendo dalla condizione fluidizzata, il valore della velocità superficiale del gas di fluidizzazione viene istantaneamente azzerato. L'analisi dell'altezza del letto nonché della pressione alla base della colonna nelle fasi successive all'arresto della fluidizzazione evidenzia tipicamente la successione di tre fasi (Figura 4.13):

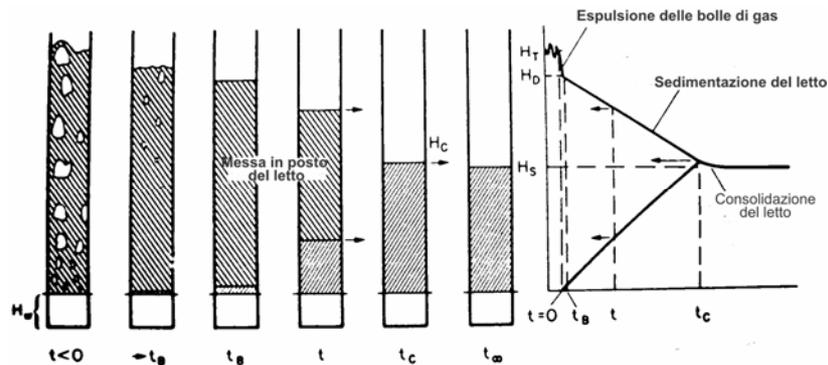
- I. inizialmente si registra una rapida diminuzione dell'altezza del letto dovuta all'espulsione dell'aliquota del gas di fluidizzazione che fluisce sotto forma di bolle;
- II. nel corso della seconda fase ha luogo l'allontanamento del gas interstiziale che fluisce nella fase emulsione del letto;
- III. ha infine luogo una fase di consolidamento durante la quale si ha la compattazione del letto (Cherntongchai e Brandani, 2005).



**Figura 4.13:** Illustrazione del collasso di un letto fluidizzato e la curva di collasso corrispondente (da Cherntongchai e Brandani, 2005).

Nel corso delle prove di collasso si misura il tempo necessario per la de-aerazione della fase solida del letto. Questo intervallo di tempo, che prende il nome di tempo di collasso ( $T_c$ ), assume un significato particolare nel definire il comportamento alla fluidizzazione di un solido granulare interessato da un flusso gassoso.

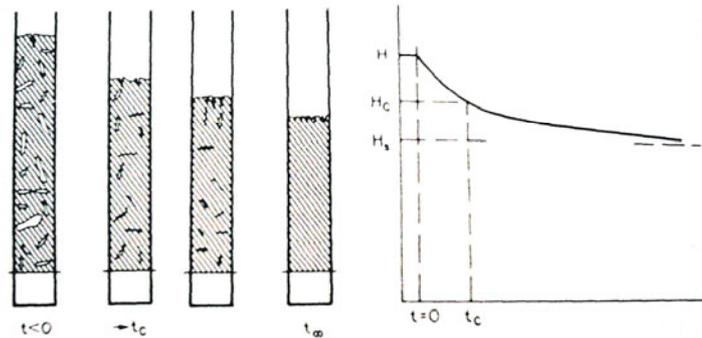
Geldart e Wong (1985) hanno evidenziato i comportamenti a collasso tipici di letti di particelle appartenenti alle classi A e C della classificazione di Geldart (1973). In figura 4.14 è riportato il comportamento a collasso delle particelle della gruppo A. La prima fase del collasso è caratterizzata dalla fuoriuscita del gas sotto forma di bolle. Per  $t=t_b$  inizia, dal fondo della colonna verso l'alto, la messa in posto del letto. Durante la quale la quota superiore del letto inizia a scendere a velocità costante, ed è possibile osservare il limite tra particelle messe in posto e particelle fluidizzate.



**Figura 4.14:** Collasso di un letto di particelle appartenenti alla classe A della classificazione di Geldart, (1973) (da Geldart e Wong, 1985).

Letti di particelle appartenenti alla classe C (Figura 4.15) presentano una fenomenologia diversa. Essi, infatti, non presentano la fase iniziale di allontanamento del gas sotto forma di bolle. A velocità della  $U > U_{mf}$  il letto si presenta espanso per la presenza al suo interno di cavità. Il collasso si manifesta con

la apertura delle cavità e procede con la sedimentazione del letto.

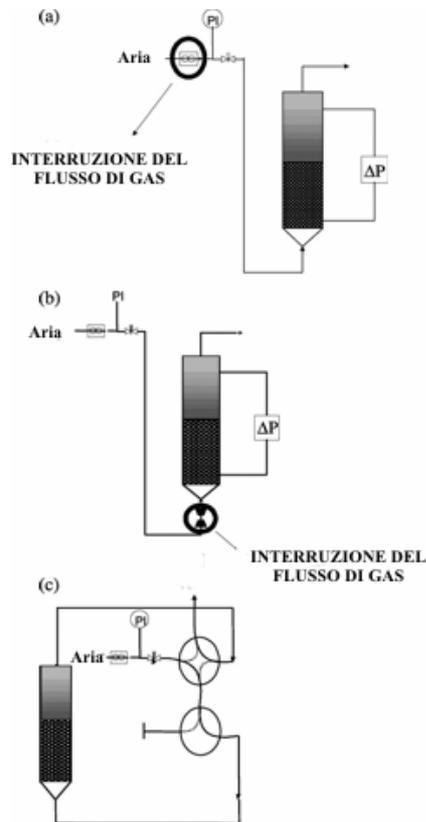


**Figura 4.15:** Collasso di un letto di particelle appartenenti alla classe C della classificazione di Geldart, (1973) (da Geldart e Wong ,1985).

Il collasso di un letto di particelle può essere influenzato dalla configurazione del sistema nel quale si effettua lo studio. Lorences et al. (2003) hanno confrontato prove di collasso eseguite su diverse configurazioni d'impianto (Figura 4.16). In figura 4.16 (a) è riportata il sistema a drenaggio singolo, nel quale il gas di fluidizzazione viene arrestato a monte dell'impianto. Nella tecnica del doppio drenaggio (Figura 4.16 b) il gas di fluidizzazione viene arrestato contemporaneamente alla base della colonna di fluidizzazione ed a monte dell'impianto. Infine la Figura 4.16 (c) riporta la configurazione adottata nella cosiddetta tecnica del drenaggio zero, la quale prevede la rotazione contemporanea di multivalvole che bloccano il flusso di gas, senza che nessuna valvola venga posta all'atmosfera.

Nella presente campagna sperimentale si è adottata la tecnica del doppio drenaggio (Lorences et al., 2003). Il flusso di gas viene intercettato alla base della colonna di fluidizzazione mediante un'elettrovalvola, mentre viene aperta all'atmosfera la seconda elettrovalvola che permette il deflusso del gas di fluidizzazione rimasto all'interno dell'impianto.

Durante le prove di collasso il letto viene portato nello stato di fluidizzazione ad una velocità superficiale corrispondente ad  $U_1'$ . Dopo un breve intervallo di tempo, necessario per misurare l'altezza iniziale del letto, l'alimentazione del gas di fluidizzazione viene istantaneamente arrestata, mediante l'utilizzo delle elettrovalvole alla base del *windbox*. Vengono contemporaneamente registrate le pressioni lungo la colonna e la quota della superficie del tetto del letto, quest'ultima grazie a videoriprese ad elevata risoluzione temporale e spaziale. Nelle prove eseguite con l'agitazione meccanica, il cilindro interno viene lasciato in moto per tutta la durata della prova.



**Figura 4.16:** Configurazioni alternative per le prove di collasso: (a) drenaggio singolo; (b) doppio drenaggio; (c) drenaggio zero (da Lorences et al., 2003).

Le dinamiche delle prove di collasso sono estremamente rapide, per questo motivo il letto è stato osservato con un sistema di videoripresa digitale che permette di riprendere le variazioni della quota del letto durante le prove di collasso e successivamente analizzare il fenomeno a minore velocità. Il sistema di videoripresa digitale è costituito da una videocamera Photron Ultima APX, dotata di un sensore CMOS con risoluzione spaziale di  $1024 \times 1024$  pixel, profondità di 10 bit e frequenza di campionamento fino a 2000 fps .

#### 4.3.3 PROVE DI FLUIDIZZAZIONE IN PRESENZA DI FLUSSO DI SCORRIMENTO.

Durante le prove di fluidizzazione eseguite in presenza di flusso di scorrimento la velocità superficiale del gas  $U$  è progressivamente aumentata, dalla condizione di letto fisso, fino a quella di letto vigorosamente bollente, per poi nuovamente diminuire fino alla condizione di letto fisso. Al variare della velocità superficiale del gas  $U$  si è proceduto alla misura dell'altezza del letto e delle pressioni  $P$ , registrate lungo la colonna di fluidizzazione per definire il profilo assiale dei gradienti di pressione  $\Delta P/\Delta Z$ . Questo tipo di prove è stato eseguito unicamente sulle miscele di piroclastiti ad ampia distribuzione granulometrica.

Durante questa fase della sperimentazione il flusso di scorrimento viene riprodotto mediante l'utilizzo del dispositivo per la produzione di agitazione meccanica. Questo dispositivo viene posto in azione quando il letto è in condizioni di minima fluidizzazione. L'agitazione meccanica viene attivata durante la fase di UP, poco prima del raggiungimento della  $U_1$ , e viene arrestata nella fase di DOWN, subito dopo aver raggiunto la velocità del gas di fluidizzazione a cui corrisponde la  $U_1$ .

Al termine della caratterizzazione fluidodinamica della miscela piroclastiche, il materiale costituente il letto è stato sottoposto ad un'analisi granulometrica sul toto del materiale versato nella colonna di fluidizzazione.

#### 4.3.4 CARATTERIZZAZIONE DEI FENOMENI DI ABRASIONE IN CORSO DI FLUIDIZZAZIONE.

Le prove di abrasione sono state indirizzate alla caratterizzazione preliminare dei fenomeni di attrito tra le particelle poste in condizione di fluidizzazione verificandone l'influenza sulla distribuzione granulometrica.

Questo tipo di prove è stato eseguito sull'impianto equipaggiato con la colonna di fluidizzazione con 120 mm di diametro e sui campioni di piroclastiti selezionate. Durante le prove il letto è tenuto ad una velocità superficiale pari ad  $U_1$  per intervalli di tempo prestabiliti, al termine dei quali l'alimentazione del gas di fluidizzazione viene istantaneamente arrestata ed il materiale del letto sottoposto ad analisi granulometrica. Successivamente il materiale piroclastico viene re-immesso nell'impianto e posto in condizioni di fluidizzazione per un ulteriore intervallo temporale prestabilito. La procedura è iterata più volte fino a quando i pesi dei materiali contenuti nei vari tagli granulometrici non tendono a valori costanti.

#### 4.3.5 CARATTERIZZAZIONE DEI FENOMENI DI ELUTRIAZIONE IN CORSO DI FLUIDIZZAZIONE.

Alcune prove di fluidizzazione sono state eseguite per caratterizzare l'entità della generazione di particolato fine e la successiva elutriazione dal letto quando questo sia fluidizzato alla velocità superficiale corrispondente ad  $U_2$ . Questo tipo di prove è stato eseguito unicamente sui campioni selezionati dalla miscela di Avellino fall, e sull'impianto di fluidizzazione equipaggiato con la colonna da 40 mm di diametro. Quest'ultima, infatti, è provvista di un dispositivo che permette la captazione delle polveri elutriate.

Nel corso delle prove il letto è tenuto ad una velocità di  $U_2$  per 45 minuti. Nel medesimo intervallo di tempo le particelle elutriate vengono raccolte mediante l'utilizzo di 15 filtri di carta.

Questi ultimi sono stati sostituiti ad intervalli di tempo prestabiliti, in modo da poter studiare l'evoluzione temporale del fenomeno di abrasione ed elutriazione. La sequenza tipica prevede l'impiego per un minuto dei primi cinque filtri, per tre minuti dei successivi cinque, e di cinque minuti degli ultimi cinque filtri.

## **CAPITOLO 5: RISULTATI SPERIMENTALI**

La tabella 5.1 riporta, per ciascuno dei materiali granulari indagati, un quadro sinottico delle prove sperimentali effettuate. In particolare le sperimentazioni condotte con miscele di Tufo Giallo Napoletano e Avellino Flow, più ricche in fini, risultano ideali per comprendere come la frazione sottile influenzi il comportamento alla fluidizzazione.

Sulle miscele “tal quali” sono state eseguite tre prove in ogni diversa condizione operativa. Non è stato possibile eseguire più di una prova su frazioni granulometriche selezionate delle miscele di Tufo Giallo Napoletano e Avellino Flow, a causa della notevole quantità di materiale necessaria per ottenere campioni selezionati a partire dalla miscela originaria.

### **5.1. CARATTERIZZAZIONE DELLA FLUIDIZZAZIONE DI PIROCLASTITI DI TUFO GIALLO NAPOLETANO**

#### **5.1.1 CARATTERIZZAZIONE DELLA FLUIDIZZAZIONE DELLA MISCELA DI TUFO GIALLO NAPOLETANO**

I risultati ottenuti nel corso di una prova di fluidizzazione eseguita sulla miscela di Tufo Giallo Napoletano sono riportati in figura 5.1. La figura 5.1 A riporta i dati di pressione registrati in corrispondenza delle prese poste lungo il letto durante le fasi di aumento (UP) e diminuzione della velocità superficiale del gas (DOWN) di fluidizzazione.

	800- 1000 µm	800-680 µm	600-680 µm	600-500 µm	0-1000µm	100-1000 µm	300-1000 µm	500-1000 µm	710-1000 µm
<b>Tufo Giallo Napoletano</b>									
prove di fluidizzazione (120 mm)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
prove di fluidizzazione (cilindri coassiali)					x				
curve di fluidizzazione con agitazione					x				
prove di collasso (120 mm)					x	x	x	x	x
prove di collasso (cilindri coassiali)					x				
prove di collasso con agitazione					x				
Prove di abrasione									
Prove di elutriazione (40 mm)									

	800- 1000 µm	800-680 µm	600-680 µm	600-500 µm	0-1000 µm	100-1000 µm	300-1000 µm	500-1000 µm	710-1000 µm
<b>Avellino Flow</b>									
prove di fluidizzazione (120 mm)					x	x	x	x	x
prove di fluidizzazione (cilindri coassiali)					x				
curve di fluidizzazione con agitazione					x				
prove di collasso (120 mm)					x	x	x	x	x
prove di collasso (cilindri coassiali)					x				
prove di collasso con agitazione					x				
Prove di abrasione									
Prove di elutriazione (40 mm)									

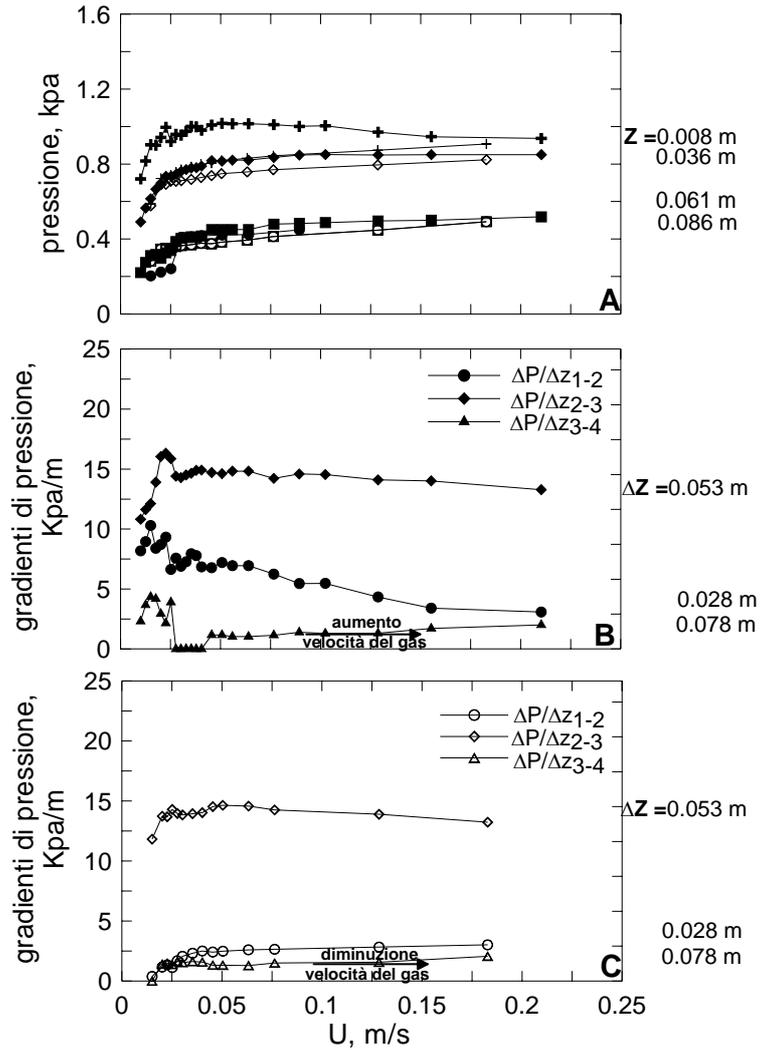
	800- 1000 µm	800-680 µm	600-680 µm	600-500 µm	0-1000 µm	100-1000 µm	300-1000 µm	500-1000 µm	710-1000 µm
<b>Avellino Fall</b>									
prove di fluidizzazione (120 mm)	x	x	x	x	x	x	x	x	x
prove di fluidizzazione (cilindri coassiali)					x				
curve di fluidizzazione con agitazione					x				
prove di collasso (120 mm)					x	x	x	x	x
prove di collasso (cilindri coassiali)					x				
prove di collasso con agitazione					x				
Prove di abrasione	x	x							
Prove di elutriazione (40 mm)	x	x	x	x					

**Tabella 5.1:** Riassunto delle prove sperimentali eseguite sui materiali di Tufo Giallo Napoletano, Avellino Flow ed Avellino Fall.

Nelle figure 5.1 B e 5.1 C sono riportati i gradienti di pressione, relativi a prese di pressione successive, rispettivamente nella fase di aumento e nella fase di diminuzione della velocità superficiale del gas di fluidizzazione. Dall'analisi dei valori del grafico pressione-velocità del gas si osserva che la velocità del gas  $U_1$  è di circa 0.03 m/s e la velocità del gas  $U_1'$  di circa 0.08 m/s. Dall'osservazione della curva di fluidizzazione (Figura 5.1 A) si osserva che la prima presa di pressione ( $P_1$ ) registra una leggera diminuzione di valore di pressione durante la fase di aumento della velocità dei gas, mentre la curva, registrata durante la fase di diminuzione della  $U$ , presenta dei valori più bassi. Questa diminuzione della pressione registrata alla  $P_1$  è stata imputata alla perdita di materiale del letto per elutriazione di fini. L'analisi della curva dei gradienti di pressione corrispondente ad una misura della densità media della sospensione è riportata in Figura 5.1 B. I gradienti di pressione registrati nella fase di aumento della velocità dei gas evidenziano valori costanti lungo il letto dei gradienti  $\Delta P/\Delta Z_{2-3}$  e  $\Delta P/\Delta Z_{3-4}$ . Il valore più elevato tra i gradienti di pressione si registra nella parte centrale del letto, dove si rinvencono i materiali con maggiore densità. Al contrario si registra una diminuzione del gradiente  $\Delta P/\Delta Z_{1-2}$ , giustificata dall'elutriazione di fini.

I gradienti di pressione, registrati durante la fase di diminuzione della velocità dei gas (Figura 5.1 C) evidenziano come lo stato di segregazione che si è instaurato durante la fase di aumento della velocità del gas risulti stabilizzato nella fase di velocità decrescente.

La miscela "tal quale" di Tufo Giallo Napoletano è formata da componenti litologici la cui densità è molto simile. Pertanto la loro segregazione all'interno del letto è da imputarsi unicamente alle diverse dimensioni delle particelle. Probabilmente nella parte superiore della colonna di fluidizzazione si concentrano le *shard* vetrose molto leggere, alla base del letto le pomice grossolane ed infine nella parte



**Figura 5.1:** Curva di fluidizzazione (A) e gradienti di pressione (B e C) ottenuti nel corso di una prova di fluidizzazione condotta sulla miscela di Tufo Giallo Napoletano. Sull'asse delle x è rappresentata la velocità dei gas  $U$ , mentre sull'asse delle y i valori della pressione  $P$  registrati alle 4 prese. Con i simboli pieni sono indicate le curve ottenute della fase di UP, mentre con i simboli vuoti chiaro le curve ottenute nella fase di DOWN.

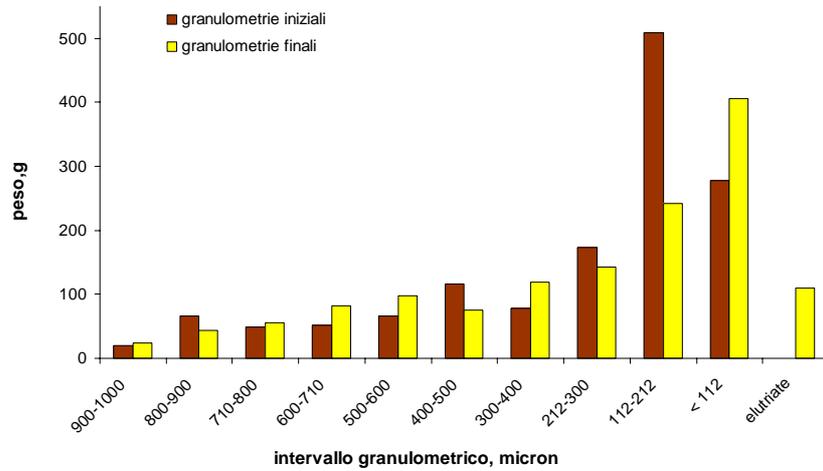
centrale del letto si concentrano particelle pomicee di dimensioni intermedie. Queste ultime mostrano una densità maggiore rispetto alle particelle pomicee più grossolane, che, a causa delle loro maggiori dimensioni e, quindi, della loro maggiore vacuolarità, si rinvengono alla base del letto, con la conseguenza che in quella sezione si registra un gradiente di pressione minore di quello registrato nella parte centrale del letto.

Al termine delle prove di fluidizzazione il materiale del letto è stato sottoposto ad analisi granulometrica, sia riferita al materiale totale che riferita alle frazioni raccolte in ciascuno dei cinque segmenti cilindrici. L'analisi granulometrica eseguita sul totale conserva lo stesso andamento mostrato prima della prova. Escludendo le particelle più fini, la distribuzione granulometrica del campione non varia significativamente. Inoltre, si riscontra una cospicua quantità di materiale elutriato, dato che conferma l'andamento della pressione registrata alla presa  $P_1$ . L'analisi granulometrica compiuta sui segmenti cilindrici è riportata in figura 5.2 B. Osservando singolarmente le curve granulometriche corrispondenti ad ogni segmento cilindrico, si può rilevare come, dal basso verso l'alto della colonna, la moda del campione si sposti da materiali più grossolani a materiali più sottili.

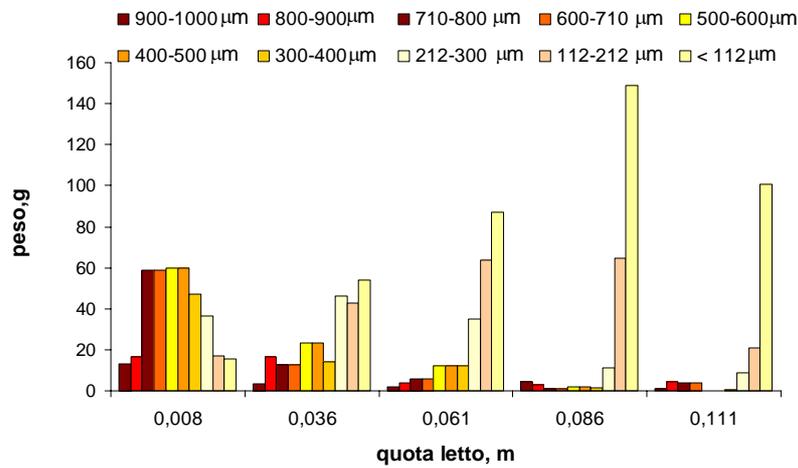
Al termine della prova di fluidizzazione è stato eseguito una valutazione semiquantitativa sulle frazioni granulometriche 900-1000  $\mu\text{m}$  e 500-600  $\mu\text{m}$ . È risultato che lungo la colonna di fluidizzazione non si determinano variazioni significative nella distribuzione dei componenti litologici.

La densità apparente delle pomice appartenenti agli intervalli granulometrici 500-600  $\mu\text{m}$  e 900-1000  $\mu\text{m}$  è stata determinata mediante porosimetria a mercurio. I risultati sono riportati in figura 5.3. Dall'analisi del grafico si osserva che i campioni di pomice con dimensioni 500-600  $\mu\text{m}$  presentano densità maggiori rispetto alle pomice di dimensioni 900-1000  $\mu\text{m}$ . Inoltre, i frammenti di pomice prelevati nella parte centrale del letto presentano la maggiore variabilità della densità.

A)



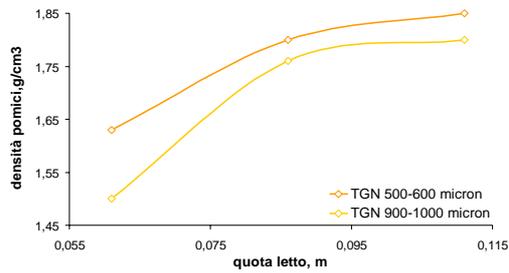
B)



**Figura 5.2:** (A) Confronto tra le analisi granulometriche eseguite sulla miscela di Tufo Giallo Napoletano prima e dopo la prova di fluidizzazione. (B) Analisi granulometriche eseguite sul materiale raccolto, al termine della prova di fluidizzazione, nelle cinque fette cilindriche che formano la colonna di fluidizzazione.

Questi dati confermano che la segregazione per dimensioni che si rileva all'interno del letto di Tufo Giallo Napoletano è legata alle differenti dimensioni delle pomici e dei loro vacuoli, ed alla

conseguente variazione di densità, all'interno della frazione pomicea.



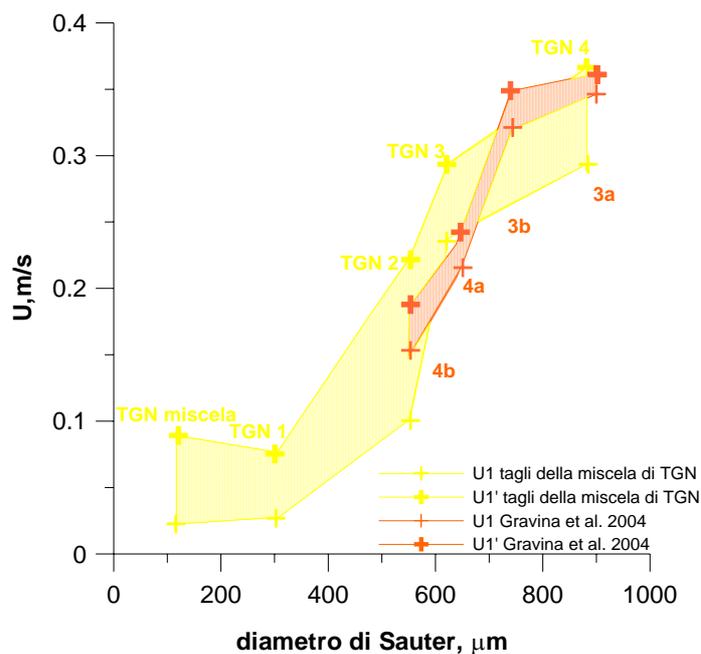
**Figura 5.3:** Variazione delle densità dei campioni di pomici di dimensioni 500-600  $\mu\text{m}$  e 900-1000  $\mu\text{m}$  prelevate a diverse quote lungo la colonna di fluidizzazione.

### 5.1.2 CARATTERIZZAZIONE DELLA FLUIDIZZAZIONE DI FRAZIONI GRANULOMETRICHE SELEZIONATE DELLA MISCELA DI TUFO GIALLO NAPOLETANO

Al fine di verificare il ruolo svolto dalla frazione fine nelle miscele piroclastiche nel determinare il comportamento alla fluidizzazione, si è operata la caratterizzazione di frazioni granulometriche selezionate a partire dalla miscela di Tufo Giallo Napoletano. Le granulometrie delle frazioni impiegate sono riportate in tabella 5.2.

	TGN 1	TGN 2	TGN 3	TGN 4
intervalli granulometrici	100-1000 $\mu\text{m}$	300-1000 $\mu\text{m}$	500-1000 $\mu\text{m}$	710-1000 $\mu\text{m}$
$\mu\text{m}$	g			
900-1000	18,21	120,85	66,93	477,54
800-900	41,17	108,29	74,92	326,36
710-800	96,10	133,07	63,78	132,9
600-710	75,94	119,72	153,56	
500-600	111,82	196,51	462,59	
400-500	115,12	196,79		
300-400	190,89	167,60		
212-300	345,84			
212-100	188,83			

**Tabella 5.2:** Distribuzione granulometrica delle frazioni granulometriche selezionate di Tufo Giallo Napoletano.



**Figura 5.4:** Confronto tra le velocità di  $U_1$  ed  $U_1'$  registrate dalla caratterizzazione fluidodinamica delle miscele di Tufo Giallo Napoletano e le  $U_1$  ed  $U_1'$  registrate da Gravina et al. (2004).

In figura 5.4 sono riportate le velocità  $U_1$  e della  $U_1'$  di campioni di Tufo Giallo Napoletano in funzione del rispettivo diametro di Sauter (1). Dall'osservazione del grafico si evince che alla diminuzione della frazione di particelle sottili nei campioni si registra un aumento di entrambe le velocità di transizione.

- (1) Il diametro di Sauter rappresenta il diametro di una sfera che ha lo stesso rapporto area superficie esterna/volume della particella irregolare

$$d = \frac{1}{\sum \left( \frac{x_i}{d_i} \right)}$$

$X_i$  = frazione ponderale di particelle di diametro  $d_i$

$d_i$  = diametro particelle (Kunii e Levenspiel, 1991)

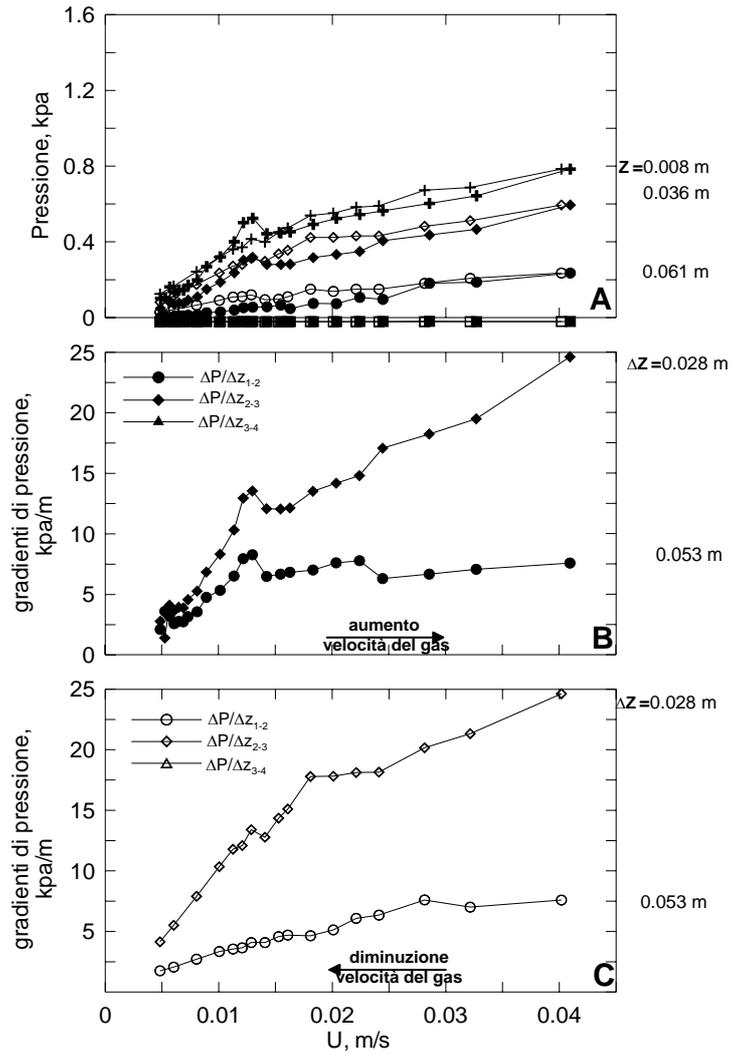
I campioni caratterizzati da un più ristretto intervallo granulometrico (TGN 4), presentano valori di  $U_1'$  ed  $U_1$  simili a quelli già documentati da Gravina et al. (2004). Invece i campioni che presentano un intervallo granulometrico più ampio, e quindi con maggiore frazione di particelle fini (TGN 1, TGN 2, TGN 3), mostrano valori di  $U_1$  ed  $U_1'$  minori rispetto a quelli osservati sui campioni di piroclastiti 3a, 3b, 4a e 4b (tabella 5.1).

Confrontando i grafici dei gradienti di pressione dei campioni (TGN 1, TGN 2, TGN 3, TGN 4) con quelli registrati impiegando la miscela 0-1000  $\mu\text{m}$  di Tufo Giallo Napoletano non frazionata, si osserva che questa ultima evidenzia una segregazione più spiccata. L'analisi dei gradienti di pressione su intervalli granulometrici diversi di Tufo Giallo Napoletano mostra inoltre che:

- I campioni con ampia distribuzione granulometrica (TGN 1, TGN 2) presentano segregazione marcata durante tutta la prova;
- I campioni con distribuzione granulometrica ristretta (TGN 3, TGN 4) sono segregati solo nella fase iniziale delle prove di fluidizzazione. Il comportamento di questi ultimi due campioni potrebbe essere dovuto alla tendenza dei clasti costituenti la miscela di Tufo Giallo Napoletano a gradarsi per dimensioni (e quindi per densità); all'aumentare della  $U$ , intervengono fenomeni di miscelazione che annullano la segregazione. I gradienti di pressione registrati durante la fase di diminuzione della velocità dei gas mostrano lo stesso fenomeno.

### 5.1.3 CARATTERIZZAZIONE DELLA FLUIDIZZAZIONE DELLA MISCELA DI TUFO GIALLO NAPOLETANO NEL DISPOSITIVO A CILINDRI COASSIALI IN ASSENZA DI AGITAZIONE MECCANICA

Si sono eseguite delle prove di fluidizzazione sulla miscela di Tufo Giallo Napoletano dopo aver equipaggiato l'impianto da 120 mm di diametro interno con il cilindro coassiale, mantenuto



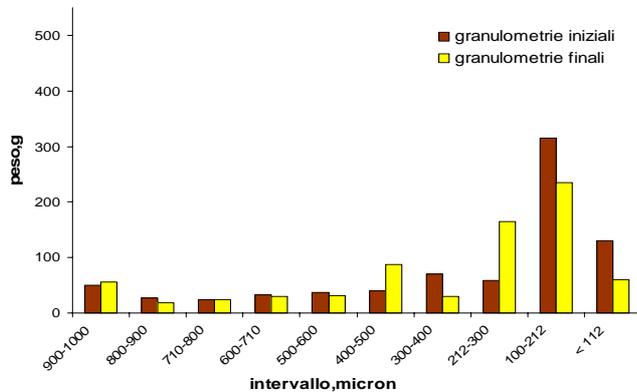
**Figura 5.5:** Curva di fluidizzazione (A) e gradienti di pressione (B e C) ottenuti nel corso di una prova di fluidizzazione condotta sulla miscela di Tufo Giallo Napoletano con l'impianto equipaggiato con il cilindro interno. Sull'asse delle x è rappresentata la velocità dei gas U, mentre sull'asse delle y i valori della pressione P registrati alle 4 prese. Con i simboli pieni sono indicate le curve ottenute della fase di UP, mentre con i simboli vuoti chiaro le curve ottenute nella fase di DOWN.

per il momento immobile. I dati relativi sono riportati in Figura 5.5.

Dall'analisi del grafico pressione-velocità del gas di fluidizzazione (Figura 5.5 A) appare che la  $U_1$  è pari a 0.013 m/s e la a  $U_1'$  0.016 m/s. In corrispondenza della  $U_1$  la curva presenta un moderato *overshoot*, presumibilmente da imputare ad un comportamento di tipo coesivo delle particelle della miscela di Tufo Giallo Napoletano. Sfortunatamente nel corso della prova si sono verificati alcuni problemi con la presa di pressione  $P_3$  che hanno pregiudicato la registrazione dei valori di pressione e dei corrispondenti gradienti a questa quota del letto.

Dall'osservazione dei gradienti di pressione, relativi alla fase di aumento della velocità del gas (Figura 5.5 B), si osserva che sono presenti fenomeni di segregazione. Inoltre, si registra l'inversione dei gradienti  $\Delta P/\Delta Z_{1-2}$  e  $\Delta P/\Delta Z_{2-3}$ , probabilmente dovuta alla gradazione per dimensioni delle pomici.

Il confronto tra i dati ottenuti nel corso della prova di fluidizzazione eseguita sull'impianto equipaggiato con il cilindro interno e la curva di fluidizzazione ottenuta sull'impianto con la colonna di fluidizzazione da 120 mm di diametro (figura 5.1) induce a ritenere che gli effetti di parete associati alla presenza del cilindro interno siano contenuti.



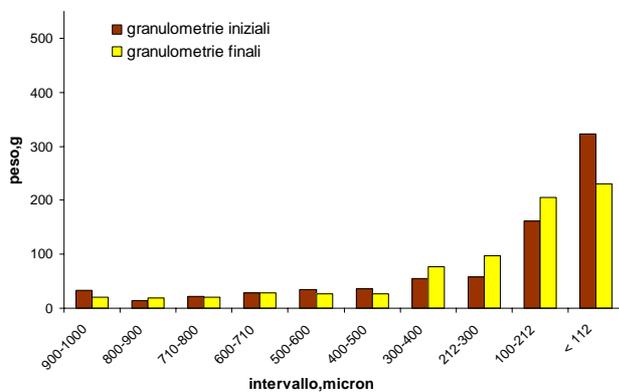
**Figura 5.6:**  
Confronto tra le analisi granulometriche eseguite sulla miscela di Tufo Giallo Napoletano prima e dopo la prova di fluidizzazione eseguita sull'impianto equipaggiato con il cilindro interno.

Al termine della prova di fluidizzazione si è eseguita un'analisi granulometrica sul *toto* del materiale del letto. I risultati sono riportati in figura 5.6, confrontati con i dati relativi all'analisi granulometrica iniziale

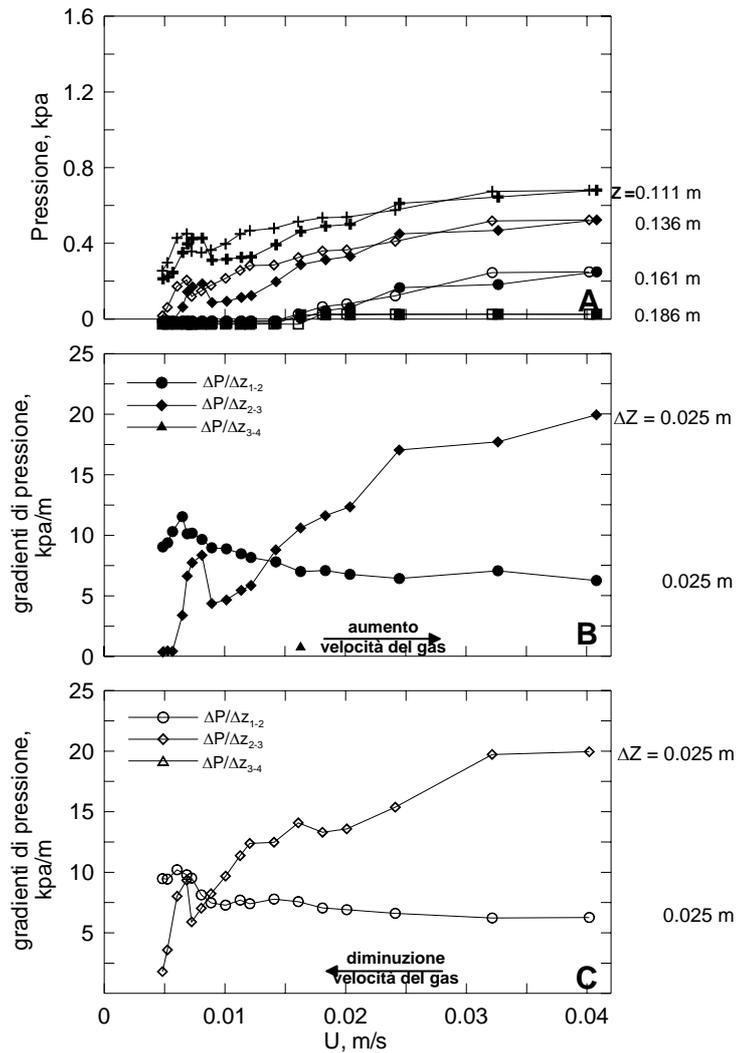
#### 5.1.4 CARATTERIZZAZIONE DELLA FLUIDIZZAZIONE DELLA MISCELA DI TUFO GIALLO NAPOLETANO IN PRESENZA DI AGITAZIONE MECCANICA

In figura 5.8 sono riportati i dati ottenuti nel corso di una prova di fluidizzazione eseguita sulla miscela di Tufo Giallo Napoletano in presenza di agitazione meccanica. Dall'analisi del grafico pressione-velocità del gas di fluidizzazione (figura 5.8 A) la  $U_1$  è pari a circa 0.010 m/s, mentre la  $U_1'$  è pari a 0.025 m/s.

L'analisi dei gradienti di pressione evidenzia l'insorgenza di fenomeni segregativi all'interno del letto. Inoltre, si registra l'inversione dei gradienti  $\Delta P/\Delta Z_{1-2}$  e  $\Delta P/\Delta Z_{2-3}$ , probabilmente a causa della gradazione per dimensioni delle pomici. Al termine della prova di fluidizzazione si è eseguita un'analisi granulometrica sul *toto* del materiale che forma il letto. I risultati sono riportati in figura 5.7, confrontati con i dati ottenuti dall'analisi granulometrica iniziale.



**Figura 5.7:** Confronto tra le analisi granulometriche eseguite sulla miscela di Tufo Giallo Napoletano prima e dopo la prova di fluidizzazione eseguita con agitazione meccanica.



**Figura 5.8:** Curva di fluidizzazione (A) e gradienti di pressione (B e C) ottenuti nel corso di una prova di fluidizzazione condotta sulla miscela di Tufo Giallo Napoletano prova di fluidizzazione eseguita con agitazione meccanica. Sull'asse delle x è rappresentata la velocità dei gas U, mentre sull'asse delle y i valori della pressione P registrati alle 4 prese. Con i simboli pieni sono indicate le curve ottenute della fase di UP, mentre con i simboli vuoti chiaro le curve ottenute nella fase di DOWN.

#### 5.1.5 CONFRONTO TRA LE PROVE DI FLUIDIZZAZIONE ESEGUITE SULLA MISCELA DI TUFO GIALLO NAPOLETANO IN PRESENZA ED IN ASSENZA DI AGITAZIONE MECCANICA

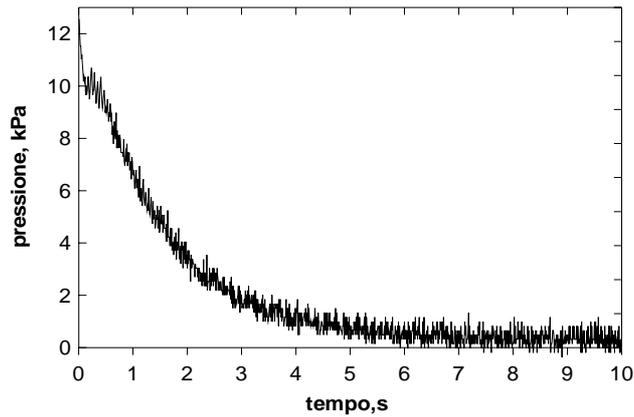
Dal confronto tra i grafici pressione-velocità del gas di fluidizzazione, registrati in presenza ed in assenza di agitazione meccanica (figura 5.5 A e 5.8 A), si osserva che in presenza di agitazione meccanica i valori di pressione registrati nella fase di diminuzione della velocità del gas sono maggiori rispetto ai valori registrati nella fase di aumento di velocità del gas.

Il confronto tra i gradienti di pressione registrati in presenza ed in assenza di agitazione meccanica (figura 5.5 B-C e 5.8 B-C) mostra che l'agitazione meccanica favorisce la segregazione per densità delle particelle.

Il confronto tra le analisi granulometriche eseguite al termine delle prove di fluidizzazione in presenza ed assenza di agitazione meccanica, mostra che la presenza dell'agitazione meccanica non amplifica l'abrasione della particelle. Questo probabilmente è dovuto alla grande percentuale di materiale fine all'interno della miscela in esame, ed all'abrasione subita dalle particelle di Tufo Giallo Napoletano prima della loro messa in posto.

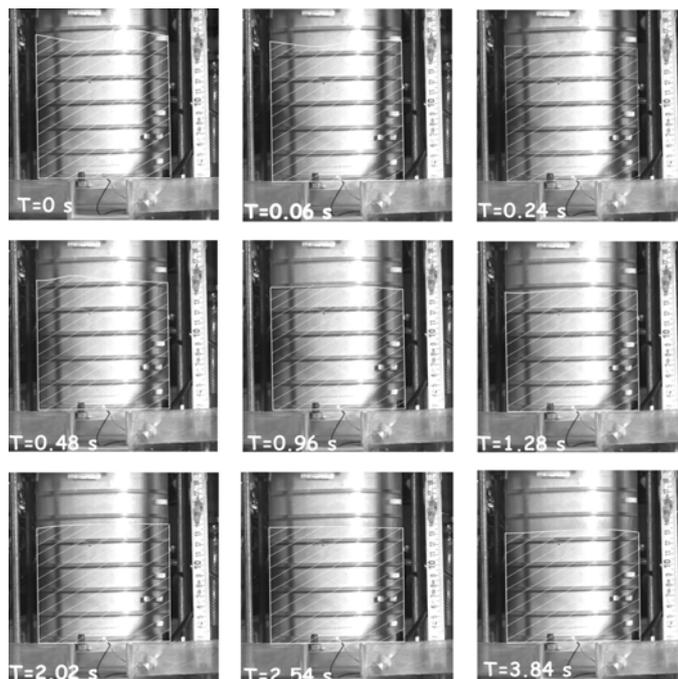
#### 5.1.6 PROVE DI COLLASSO ESEGUITE SULLA MISCELA DI TUFO GIALLO NAPOLETANO

In figura 5.9 si riportano i dati di pressione registrati alla presa  $P_1$  nel corso di una prova di collasso eseguita sulla miscela di Tufo Giallo Napoletano. Dall'analisi dei dati di pressione si osserva che il collasso del letto si sviluppa su di un intervallo temporale di circa 4 secondi.

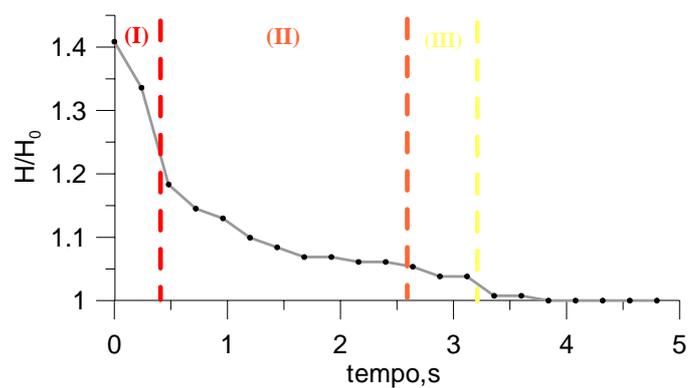


**Figura 5.9:** Pressioni registrate alla presa  $P_1$  nel corso di una prova di collasso, eseguita sulla miscela di Tufo Giallo Napoletano

La videoriprese ad alta risoluzione temporale del letto nel corso delle prove di collasso hanno fornito un modo indipendente per analizzare la fenomenologia, attraverso l'osservazione delle variazioni della quota del letto in funzione del tempo. La figura 5.10 riporta, a titolo esemplificativo, una delle sequenze filmate. In figura 5.11 è riportata la variazione di quota del letto, qui espressa in forma normalizzata come rapporto tra l'altezza misurata al generico istante di tempo e l'altezza statica del letto, in funzione del tempo, registrata durante una prova di collasso sulla miscela di Tufo Giallo Napoletano. In accordo con Cherntongchai e Brandani (2005), la curva si può dividere in tre tratti: il primo cui corrisponde una rapida diminuzione dell'altezza del letto dovuta all'espulsione delle bolle (I); il secondo tratto rappresenta la fase di sedimentazione del letto per rilascio del gas interstiziale (II); infine il terzo tratto rappresenta la fase di consolidamento (III) durante la quale si ha la compattazione del letto. Nel complesso si può indicare in circa 3.9 secondi il tempo di collasso complessivo, in buon accordo con il dato desunto dalla misurazione delle pressioni.



**Figura 5.10:** Immagini selezionate dalla videoripresa effettuata durante la prova di collasso eseguita sulla miscela di Tufo Giallo Napoletano

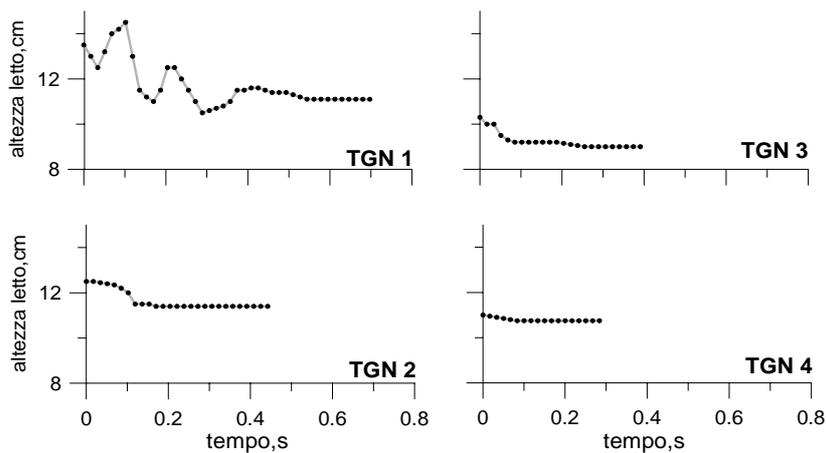


**Figura 5.11:** Variazione dell'altezza del letto normalizzata durante la prova di collasso eseguita sul campione di Tufo Giallo Napoletano di dimensioni 0-1000  $\mu\text{m}$ : (I): espulsione delle bolle di gas; (II): sedimentazione del letto; (III) consolidamento del letto.

### 5.1.7 PROVE DI COLLASSO SU FRAZIONI GRANULOMETRICHE SELEZIONATE DELLA MISCELA DI TUFO GIALLO NAPOLETANO

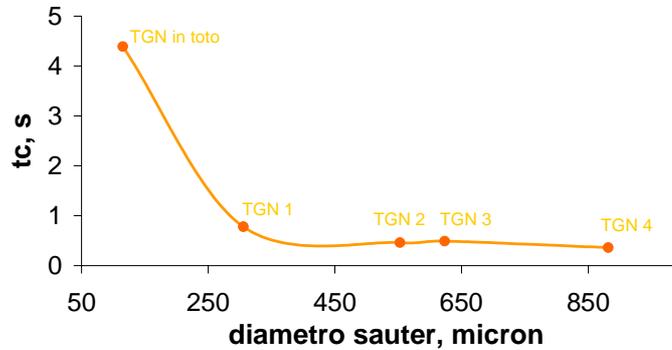
Al fine di evidenziare il ruolo dei fini nel comportamento alla fluidizzazione di una miscela piroclastica, si sono eseguite prove di collasso su frazioni granulometriche selezionate della miscela di Tufo Giallo Napoletano (Tabella 5.2). Dalla osservazione dei dati di pressione si osserva che al diminuire della presenza di fini nella miscela si accompagna la diminuzione dei tempi di collasso.

In figura 5.12 sono riportate le variazioni della quota del letto registrate nel corso di prove di collasso eseguite su frazioni selezionate di Tufo Giallo Napoletano. Dall'osservazione dei grafici si possono rilevare le differenze marcate tra le curve di collasso al diminuire dell'ampiezza dell'intervallo granulometrico del campione di riferimento. In pratica, per tutti i campioni esenti da fini risulta prevalente la fase iniziale di allontanamento del gas di fluidizzazione associato al moto delle bolle, mentre meno pronunciata è la fase del collasso associata al flusso interstiziale di gas nella fase emulsione del letto.



**Figura 5.12:** Variazione dell'altezza del letto durante le prove di collasso eseguite su tagli della miscela di Tufo Giallo Napoletano.

La figura 5.13 riassume i valori osservati del tempo di collasso  $T_c$  al variare delle dimensioni medie dei campioni in esame. Come atteso, al diminuire della frazione di fini si osserva una diminuzione del tempo di collasso del letto, in accordo con precedenti evidenze sperimentali (Lorences et al., 2003).

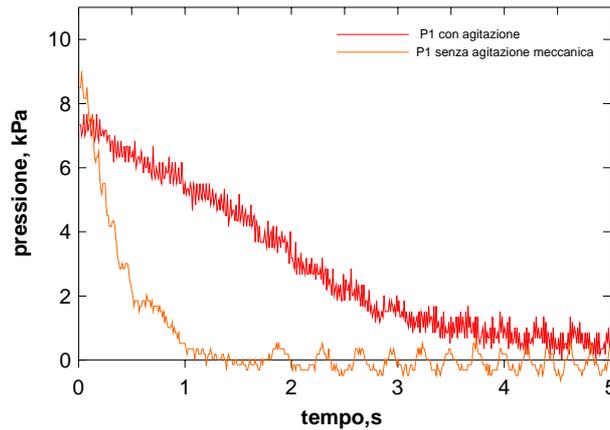


**Figura 5.13:** Tempi di collasso dei tagli prelevati dalla miscela di Tufo Giallo Napoletano in funzione del corrispondente diametro di Sauter.

#### 5.1.8 PROVE DI COLLASSO ESEGUITE SULLA MISCELA DI TUFO GIALLO NAPOLETANO CON E SENZA AGITAZIONE MECCANICA

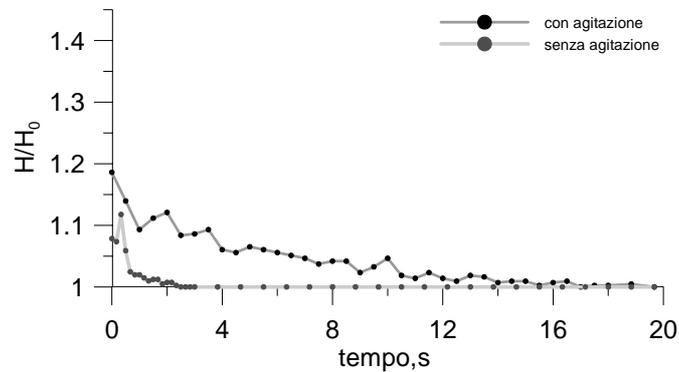
Sono state condotte prove di collasso nel dispositivo a cilindri coassiali, confrontando i risultati ottenuti mantenendo fermo il cilindro interno con quelli ottenuti imponendo ad esso un moto rotatorio.

Dall'analisi dei dati di pressione (figura 5.14) si osserva che il collasso del letto in assenza di agitazione meccanica ha luogo, nel dispositivo a cilindri coassiali, in circa 1 secondo. Il tempo di collasso  $T_c$  si porta a circa 4 secondi in presenza di agitazione meccanica.



**Figura 5.14:** Pressioni registrate, alla presa P1 nel corso delle prove di collasso eseguite sulla miscela di Tufo Giallo Napoletano in presenza ed in assenza di agitazione meccanica.

La figura 5.15 riporta i risultati dell'analisi delle videoriprese che forniscono, in funzione del tempo, la variazione dell'altezza del letto. Le curve corrispondenti alla presenza ed all'assenza di flusso di scorrimento presentano un diverso andamento. In particolare si evidenzia una notevole differenza nei tempi di collasso che, da 1-2 s in assenza di agitazione, arriva ad oltre 10 s in presenza di flusso di scorrimento.



**Figura 5.15:** Variazione dell'altezza normalizzata durante le prove di collasso eseguite sulla miscela di Tufo Giallo Napoletano in presenza ed in assenza di agitazione meccanica.

### 5.1.9 COMPORTAMENTO FLUIDODINAMICO DELLA MISCELA DI TUFO GIALLO NAPOLETANO

Le prove eseguite sulla miscela di Tufo Giallo Napoletano sono servite per studiare il ruolo della frazione fine nel comportamento fluidodinamico delle miscele piroclastiche.

In tabella 5.3 sono riportati i valori di  $U_1$  ed  $U_1'$  ottenuti nel corso della caratterizzazione fluidodinamica delle miscele di Tufo Giallo Napoletano. Dall'analisi dei dati si osserva che le miscele ad ampia distribuzione granulometrica mostrano valori di  $U_1$  ed  $U_1'$  più bassi rispetto ai campioni compresi in uno stretto intervallo granulometrico (3a, 3b, 4a, 4b), quindi si può affermare che la polidispersità per dimensioni delle miscele favorisce il raggiungimento della condizione di fluidizzazione. Il confronto tra i valori di  $U_1$  ed  $U_1'$  mostrati dalle miscele ad ampia distribuzione granulometrica, ed le  $U_1$  ed  $U_1'$  caratteristiche dei campioni TGN 1 TGN 2 TGN 3 TGN 4 permette di affermare che la presenza della frazione fine porta ad un abbassamento dei valori di  $U_1$  ed  $U_1'$ .

In tabella 5.4 sono riassunti i valori dei tempi di collasso ottenuti nel corso delle prove di collasso eseguite in presenza ed assenza di agitazione meccanica. L'analisi dei dati conferma il ruolo svolto dalla frazione fine, in particolare si osserva che le particelle con dimensioni minori di 100  $\mu\text{m}$  portano ad un notevole aumento dei tempi di collasso. Le prove eseguite in presenza di flusso di scorrimento mostrano che questa ultima porta a un notevole aumento dei tempi di collasso.

Campione	dimensioni	U <sub>1</sub>			U <sub>1</sub> '			U <sub>1</sub> ''			U <sub>2</sub>		
		120 mm	Cilindri coassiali	Agitazione	120 mm	Cilindri coassiali	Agitazione	120 mm	Cilindri coassiali	Agitazione	120 mm	Cilindri coassiali	Agitazione
	μm	m/s											
3a	800-1000	0.35			0.36			0.48			0.75		
3b	680-800	0.32			0.35			0.40			0.63		
4a	600-680	0.21			0.23			0.29			0.54		
4b	500-600	0.15			0.18			0.23			0.46		
Miscela TGN	0-1000	0.02	0.01	0.01	0.09	0.02	0.02						
TGN 1	100-1000	0.03			0.08								
TGN 2	300-1000	0.10			0.22								
TGN 3	500-1000	0.24			0.29								
TGN 4	710-1000	0.29			0.37								

**Tabella 5.3:** Riassunto dei dati relativi alla caratterizzazione fluidodinamica della miscela di Tufo Giallo Napoletano.

Campione	dimensioni	T <sub>c</sub> (da segnale pressione)			T <sub>c</sub> (da quota superficie del letto)		
		120 mm	Cilindri coassiali	Agitazione	120 mm	Cilindri coassiali	Agitazione
	μm	m/s					
Miscela TGN	0-1000	4.39	1	4.14	3.84	2.50	18
TGN 1	100-1000	0.78			0.54		
TGN 2	300-1000	0.49			0.17		
TGN 3	500-1000	0.46			0.26		
TGN 4	710-1000	0.36			0.12		

**Tabella 5.4:** Riassunto dei dati relativi alle prove di collasso eseguite sulla miscela di Tufo Giallo Napoletano. Si riporta la durata del collasso registrata dalle variazioni di pressione (T<sub>c</sub> (pressione)) e dalla variazione di quota del letto (T<sub>c</sub> (quota letto))

## 5.2 CARATTERIZZAZIONE DELLA FLUIDIZZAZIONE DI PIROCLASTITI DI AVELLINO FLOW

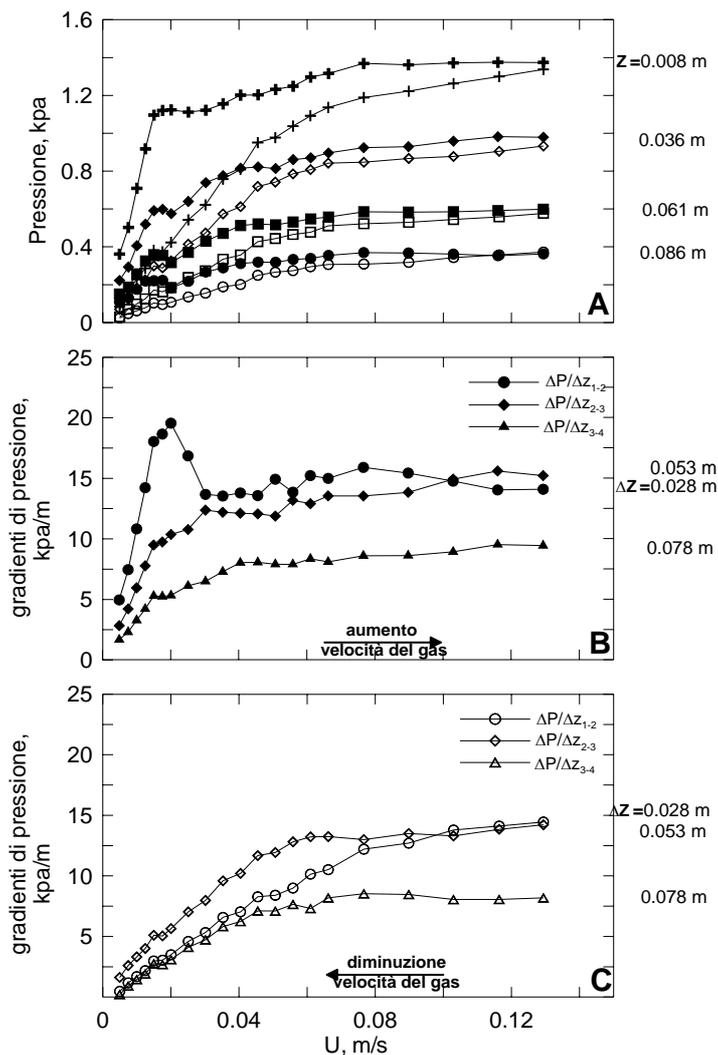
### 5.2.1 CARATTERIZZAZIONE DELLA FLUIDIZZAZIONE DELLA MISCELA DI AVELLINO FLOW

Lo stesso protocollo sperimentale di caratterizzazione del Tufo Giallo Napoletano è stato applicato alla caratterizzazione delle miscele di Avellino Flow.

La figura 5.16 mostra i risultati della caratterizzazione del comportamento alla fluidizzazione della miscela di Avellino Flow. Dall'analisi dei valori del grafico pressione-velocità del gas si osserva che la velocità del gas  $U_1$  è di circa 0.02 m/s e la  $U_1'$  di circa 0.05 m/s. Dall'osservazione della figura 5.16 A si osserva che la curva registrata alla prima presa di pressione ( $P_1$ ) durante la fase di diminuzione della  $U$ , presenta valori più bassi. Questa diminuzione della pressione è stata imputata alla perdita di materiale per elutriazione di fini.

L'analisi della curva dei gradienti di pressione (Figura 5.16 B), registrati nella fase di aumento della velocità dei gas, evidenzia fenomeni di segregazione nel letto. Per  $U=U_1'$  i gradienti di pressione si assestano su valori costanti, mentre per  $U>0.35$  m/s si osserva l'inversione tra i gradienti di pressione  $\Delta P/\Delta Z_{1-2}$  e  $\Delta P/\Delta Z_{2-3}$ . I gradienti di pressione, registrati durante la fase di diminuzione della velocità dei gas (fig 5.16 C), evidenziano come in queste fasi i fenomeni segregativi insorti durante la fase di incremento della velocità superficiale, siano sostanzialmente congelati nelle fasi di riduzione della velocità superficiale del gas di fluidizzazione.

La miscela di Avellino Flow è formata principalmente da frammenti pomicei e da una minore percentuale di litici e cristalli. In base alla sua distribuzione litologica, la segregazione all'interno del letto è dettata principalmente dalla differenza di dimensioni tra le particelle.

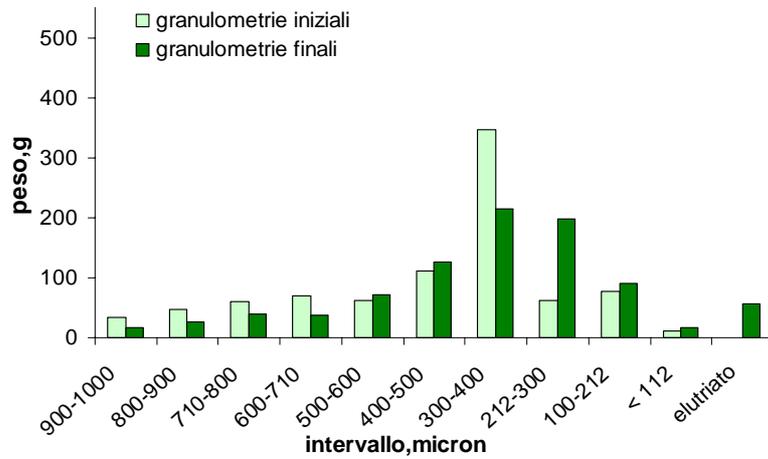


**Figura 5.16:** Curva di fluidizzazione (A) e gradienti di pressione (B e C) ottenuti nel corso di una prova di fluidizzazione condotta sulla miscela di Avellino Flow. Sull'asse delle x è rappresentata la velocità dei gas  $U$ , mentre sull'asse delle y i valori della pressione  $P$  registrati alle 4 prese. Con i simboli pieni sono indicate le curve ottenute della fase di UP, mentre con i simboli vuoti chiaro le curve ottenute nella fase di DOWN.

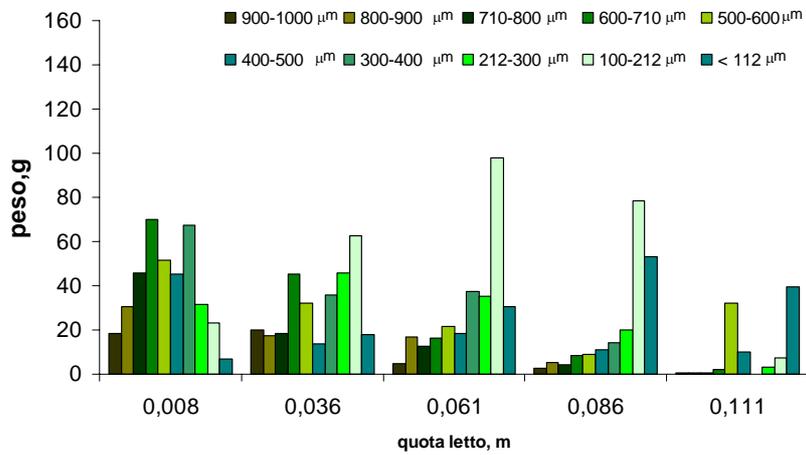
Per questo motivo nella parte superiore del letto abbiano un arricchimento in particelle pomicee di piccole dimensioni, mentre nella parte inferiore si rinvengono pomici grossolani, e particelle delle frazioni di litici e cristalli. Al termine della caratterizzazione fluidodinamica, il materiale costituente il letto è stato sottoposto ad analisi granulometrica, sia sul toto, sia sul materiale raccolto nei cinque segmenti cilindrici che costituiscono la colonna di fluidizzazione. L'analisi granulometrica, eseguita sul toto della miscela di Avellino Flow, conserva l'andamento polimodale mostrato dall'analisi granulometrica iniziale. L'analisi granulometrica compiuta sui segmenti cilindrici, mostra segregazione per dimensioni (figura 5.17 B). Il materiale grossolano, maggiormente rappresentato nella parte basale del letto, diminuisce nella sezione centrale e scompare quasi del tutto nella parte superiore. Osservando le curve granulometriche ottenute in ogni segmento, si nota come, dal basso verso l'alto della colonna, la moda del campione si sposti dal materiale più grossolano al materiale più sottile. Dall'alto verso il basso della colonna, a parità di volume, diminuiscono i pesi misurati, indicando una diminuzione di densità del materiale lungo il letto.

Al termine della prova di fluidizzazione è stato eseguito una valutazione semiquantitativa di costituenti sui campioni appartenenti ai tagli granulometrici 900-1000  $\mu\text{m}$  e 500-600  $\mu\text{m}$ . Il conteggio eseguito sulla frazione 900-1000  $\mu\text{m}$  mostra che il campione, nei primi tre segmenti cilindrici che formano la colonna di fluidizzazione, è formato nella maggior parte da frammenti pomicei, mentre le percentuali di frammenti litici e cristalli non presentano notevoli variazioni. Nel campione prelevato alla base del letto si osserva una diminuzione della percentuale di frammenti pomicei, ed un aumento della presenza di litici. L'andamento del conteggio, eseguito sul campione di dimensioni 500-600  $\mu\text{m}$ , è simile a quello ottenuto dall'analisi dei campioni di dimensioni 900-1000  $\mu\text{m}$ , ma il primo presenta maggiore variazione della percentuale dei frammenti pomicei lungo il letto.

A)

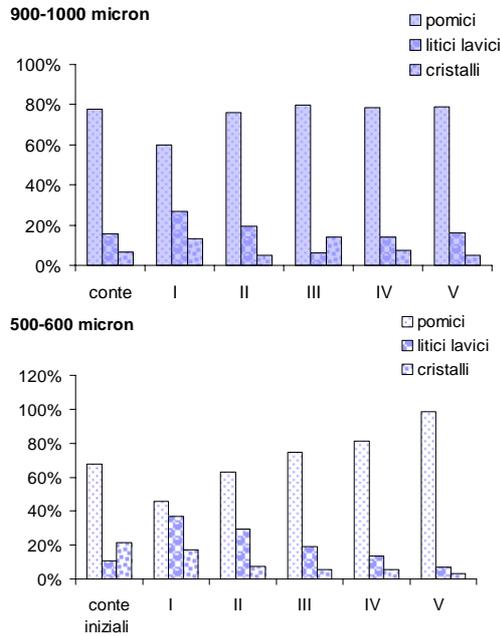


B)



**Figura 5.17:** (A) Confronto tra le analisi granulometriche eseguite sulla miscela di Avellino Flow prima e dopo la prova di fluidizzazione. (B) Analisi granulometriche eseguite sul materiale raccolto, al termine della prova di fluidizzazione, nelle cinque fette cilindriche che formano la colonna di fluidizzazione.

I risultati del conteggio semiquantitativo confermano l'andamento dei gradienti di pressione registrati nel corso della prova di fluidizzazione.



**Figura 5.18:** Conte semiquantitative eseguite, al termine della prova di fluidizzazione, sui tagli di dimensioni 900-1000  $\mu\text{m}$  e 500-600  $\mu\text{m}$  della miscela di Avellino Flow.

## 5.2.2 CARATTERIZZAZIONE DELLA FLUIDIZZAZIONE DI FRAZIONI GRANULOMETRICHE SELEZIONATE DELLA MISCELA DI AVELLINO FLOW

Al fine di investigare il ruolo della frazione fine nel comportamento alla fluidizzazione delle miscele di Avellino Flow, si sono effettuate caratterizzazioni separate di frazioni granulometriche selezionate a partire dalla miscela assortita. Le distribuzioni granulometriche delle frazioni selezionate sono riportate in tabella 5.5.

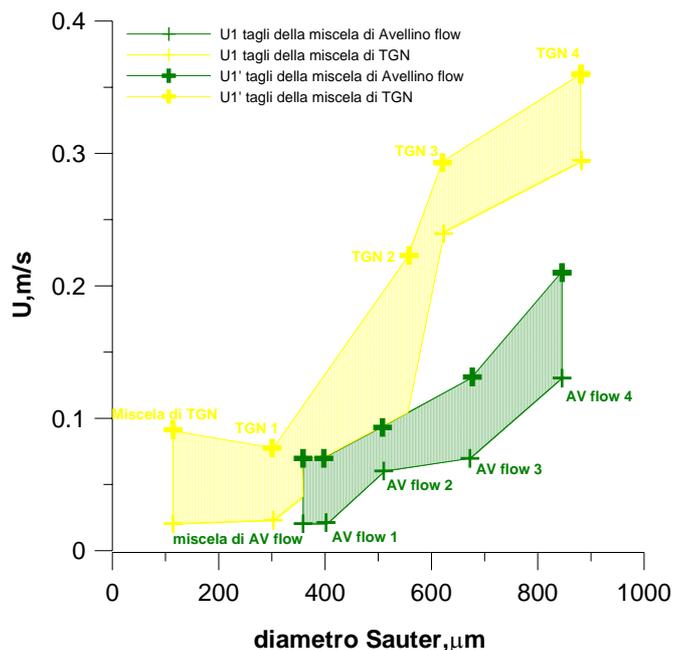
	AV Flow 1	AV Flow 2	AV Flow 3	AV Flow 4
<b>intervalli granulometrici</b>	100 – 1000 $\mu\text{m}$	300 – 1000 $\mu\text{m}$	500 – 1000 $\mu\text{m}$	710 – 1000 $\mu\text{m}$
$\mu\text{m}$	g			
<b>900-1000</b>	96.49	136.40	144.75	487.77
<b>800-900</b>	77.43	132.75	197.6	489.84
<b>710-800</b>	181.76	134.72	294.64	472.65
<b>600-710</b>	265.57	265.75	378.26	
<b>500-600</b>	214.72	259.23	452.88	
<b>400-500</b>	235.85	161.53		
<b>300-400</b>	110.66	455.79		
<b>212-300</b>	83.42			
<b>100-212</b>	187.84			

**Tabella 5.5:** Distribuzione granulometrica dei tagli prelevati dalla miscela di Avellino Flow.

In figura 5.19 sono riportati i valori delle velocità  $U_1$  e  $U_1'$  rilevati nel corso delle prove di fluidizzazione delle frazioni selezionate. Dall'osservazione del grafico si evince come alla diminuzione della frazione fine nei campioni corrisponda un aumento dei valori di  $U_1$  ed  $U_1'$ .

I dati relativi alle miscele di Avellino Flow sono stati confrontati con i corrispondenti valori relativi alle miscele di Tufo Giallo Napoletano in figura 5.19. Le differenze riscontrate nei valori di  $U_1$  ed  $U_1'$  mostrati dalle due miscele in esame sono presumibilmente da imputarsi alla diversa densità delle frazioni pomicee.

Dal confronto tra i gradienti di pressione misurati nel corso delle prove di fluidizzazione eseguite su i campioni AV Flow 1, AV Flow 2, AV Flow 3, AV Flow 4, con i gradienti di pressione relativi alla caratterizzazione fluidodinamica della miscela 0-



**Figura 5.19:** Confronto tra le velocità di  $U_1$  ed  $U_1'$  registrate dalla caratterizzazione del comportamento alla fluidizzazione delle miscele di Tufo Giallo Napoletano ed i valori corrispondenti registrati per miscele di Avellino Flow.

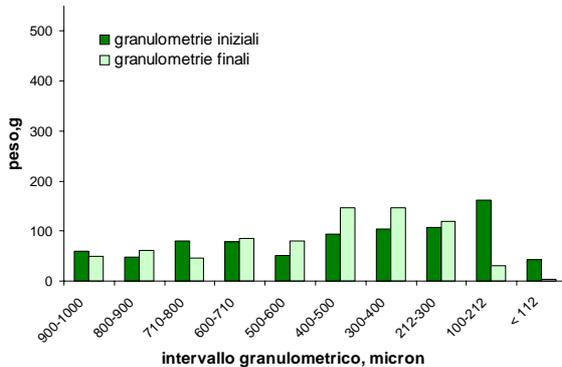
1000 μm di Avellino Flow, si osserva che la miscela assortita ed i campioni a maggiore ampiezza granulometrica (AV Flow 1, AV Flow 2, AV Flow 3) sono più marcatamente soggetti a fenomeni di segregazione nel corso delle prove di fluidizzazione. I fenomeni segregativi sono governati dalla differenza di densità delle particelle che formano la miscela di Avellino flow, e favoriti dalla polidispersità della miscela. L'unico campione che non presenta segregazione è l'AV Flow 4 costituito dalla frazione più grossolana.

### 5.2.3 CARATTERIZZAZIONE DELLA FLUIDIZZAZIONE DELLA MISCELA DI AVELLINO FLOW NEL DISPOSITIVO A CILINDRI COASSIALI IN ASSENZA DI AGITAZIONE MECCANICA

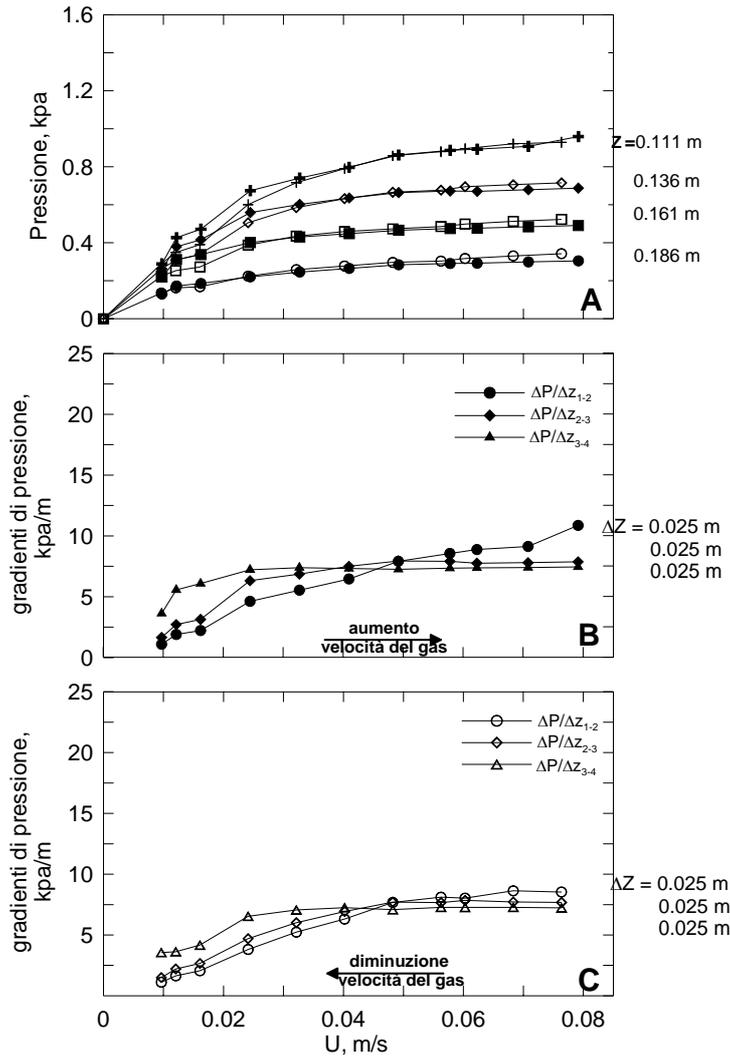
In figura 5.21 sono riportati i dati ottenuti nel corso di una prova di fluidizzazione eseguita sulla miscela di Avellino Flow, utilizzando l'impianto equipaggiato con il cilindro interno mantenuto inizialmente immobile. Dall'analisi del grafico pressione-velocità del gas (figura 5.21 A) si può ricavare, in corrispondenza dell'intersezione delle due rette a diversa pendenza che approssimano l'andamento della curva, il valore di  $U_1$ , pari a 0.016 m/s. Dall'osservazione del letto si ricava una  $U_1'$  pari a 0.020 m/s. I valori di pressione riportati in figura 5.21 A presentano un andamento diverso rispetto ai valori registrati nel corso delle prove di fluidizzazione eseguite sulla colonna con 120 mm di diametro (figura 5.16 A). Nelle prove eseguite con i due cilindri coassiali statici, dopo il raggiungimento della  $U_1$ , le pressioni continuano ad aumentare in modo graduale.

I gradienti di pressione registrati nella fase di aumento della velocità del gas (figura 5.21 B) e nella fase di diminuzione della velocità del gas (figura 5.21 C) presentano lo stesso andamento dei valori, con un graduale aumento anche dopo il raggiungimento della  $U_1$ .

Al termine della prova di fluidizzazione si è eseguita un'analisi granulometrica sul toto del materiale che forma il letto. I risultati sono riportati in figura 5.20, confrontati con i dati ottenuti dall'analisi granulometrica iniziale.



**Figura 5.20:** Confronto tra le analisi granulometriche eseguite sulla miscela di Avellino flow prima e dopo la prova di fluidizzazione eseguita con l'impianto equipaggiato con il cilindro interno.



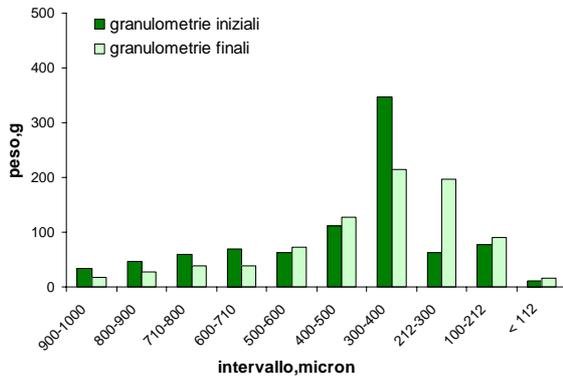
**Figura 5.21:** Curva di fluidizzazione (A) e gradienti di pressione (B e C) ottenuti nel corso di una prova di fluidizzazione condotta sulla miscela di Avellino flow con l'impianto equipaggiato con il cilindro interno. Sull'asse delle x è rappresentata la velocità dei gas U, mentre sull'asse delle y i valori della pressione P registrati alle 4 prese. Con i simboli pieni sono indicate le curve ottenute nella fase di UP, mentre con i simboli vuoti chiaro le curve ottenute nella fase di DOWN.

#### 5.2.4 CARATTERIZZAZIONE DELLA FLUIDIZZAZIONE DELLA MISCELA DI AVELLINO FLOW IN PRESENZA DI AGITAZIONE MECCANICA

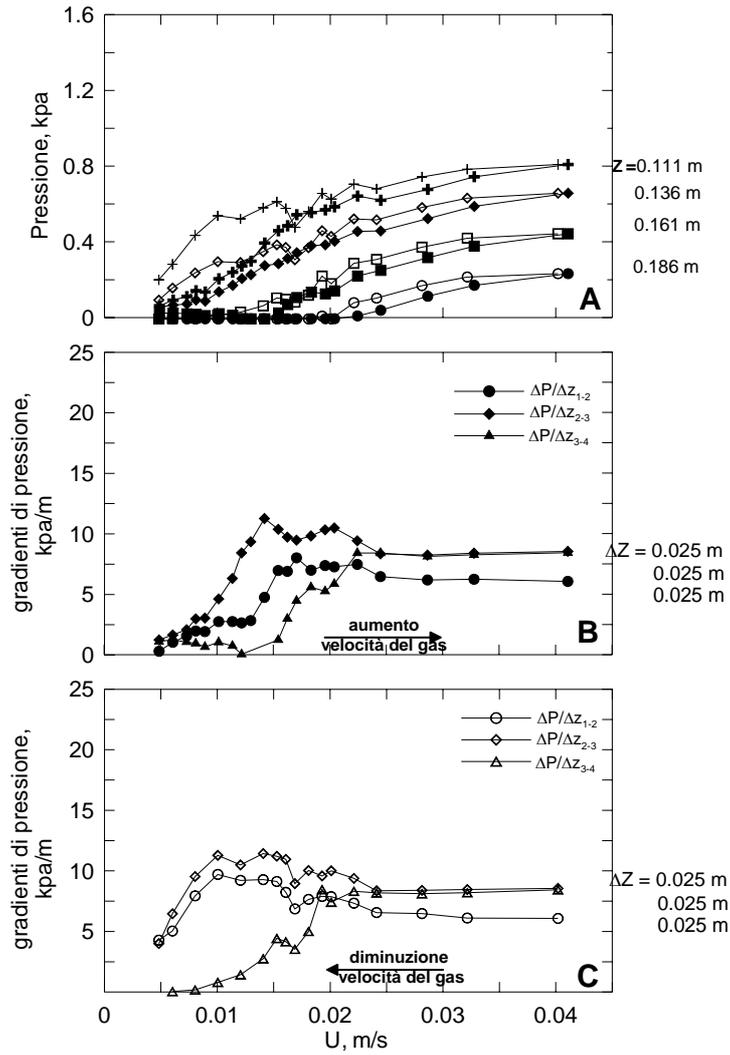
In figura 5.23 sono riportati i dati ottenuti nel corso di una prova di fluidizzazione eseguita sulla miscela di Avellino Flow, in presenza di agitazione meccanica. Dall'osservazione del grafico pressione-velocità superficiale del gas (figura 5.23 A), si può ricavare il valore di  $U_1$ , pari a 0.017 m/s. Nel corso della prova di fluidizzazione, dall'osservazione del letto si è registrata la velocità del gas corrispondente alla incipiente formazione di bolle ( $U_1'$ ) pari a 0.033 m/s.

L'analisi dei gradienti di pressione misurati nella fase di aumento della velocità del gas (figura 5.23 B) mostra che il valore più elevato è quello del gradiente  $\Delta P/\Delta Z_{2-3}$  che corrisponde ad un arricchimento di materiale denso nella parte centrale del letto. Per  $U > 0.005$  m/s i gradienti  $\Delta P/\Delta Z_{2-3}$  e  $\Delta P/\Delta Z_{3-4}$  presentano lo stesso valore, mentre si osserva una diminuzione del gradiente  $\Delta P/\Delta Z_{1-2}$ . Lo stato di segregazione determinatosi a valle della fase di aumento della velocità del gas rimane sostanzialmente immutato nella fase di diminuzione della velocità superficiale (Figura 5.23 C).

Al termine della prova di fluidizzazione si è eseguita un'analisi granulometrica sul materiale che forma il letto in toto. I risultati sono riportati in figura 5.22, confrontati ai dati ottenuti dall'analisi granulometrica iniziale.



**Figura 5.22:** Confronto tra le analisi granulometriche eseguite sulla miscela di Avellino Flow prima e dopo la prova di fluidizzazione eseguita sull'impianto equipaggiato con il cilindro interno.



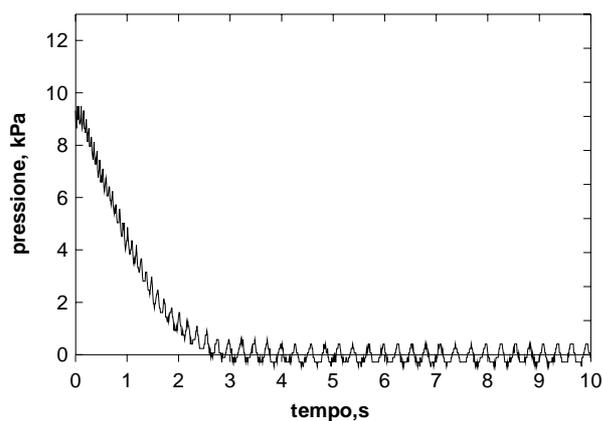
**Figura 5.23:** Curva di fluidizzazione (A) e gradienti di pressione (B e C) ottenuti nel corso di una prova di fluidizzazione condotta sulla miscela di Avellino Flow prova di fluidizzazione eseguita con agitazione meccanica. Sull'asse delle x è rappresentata la velocità dei gas U, mentre sull'asse delle y i valori della pressione P registrati alle 4 prese. Con i simboli pieni sono indicate le curve ottenute della fase di UP, mentre con i simboli vuoti chiaro le curve ottenute nella fase di DOWN.

### 5.2.5 CONFRONTO TRA LE PROVE DI FLUIDODIZZAZIONE ESEGUITE SULLA MISCELA DI AVELLINO FLOW IN PRESENZA O ASSENZA DI AGITAZIONE MECCANICA

Dal confronto tra i grafici pressione - velocità del gas di fluidizzazione, registrati in presenza ed in assenza di agitazione meccanica (figura 5.21 A e 5.23 A), si osserva come in presenza di agitazione meccanica i valori di pressione registrati nella fase di diminuzione della velocità del gas siano maggiori rispetto ai valori registrati nella fase di aumento di velocità del gas.

### 5.2.6 PROVE DI COLLASSO ESEGUITE SULLA MISCELA DI AVELLINO FLOW

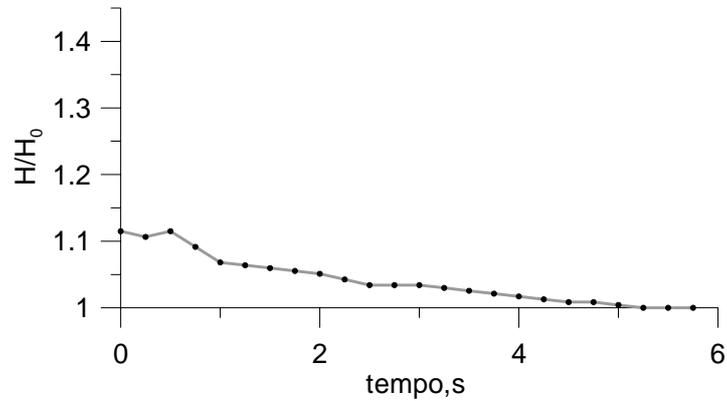
Dall'analisi dei dati di pressione (figura 5.24) si osserva che il collasso del letto formato da miscela assortita di Avellino Flow, ha una durata di circa 3 secondi .



**Figura 5.24:** Pressioni registrate alla presa  $P_1$  nel corso di una prova di collasso eseguita sulla miscela di Avellino Flow.

L'analisi delle videoriprese realizzate con la videocamera *low-motion* evidenzia un tempo di collasso  $T_c$  pari a circa 5 secondi. Inoltre, la videocamera *low-motion*, ha permesso di osservare le

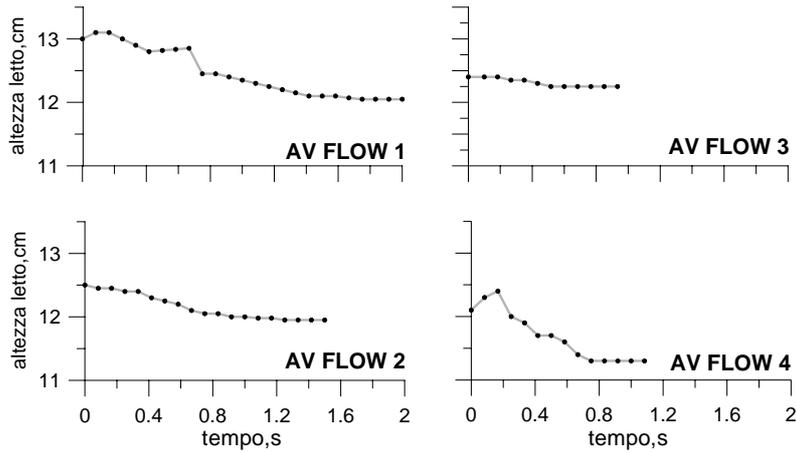
variazioni della quota del letto in funzione del tempo. In figura 5.25 è riportata la variazione di quota del letto in funzione del tempo.



**Figura 5.25:** Variazione dell'altezza normalizzata del letto durante la prova di collasso eseguita sul campione di Avellino Flow di dimensioni 0-1000  $\mu\text{m}$ :

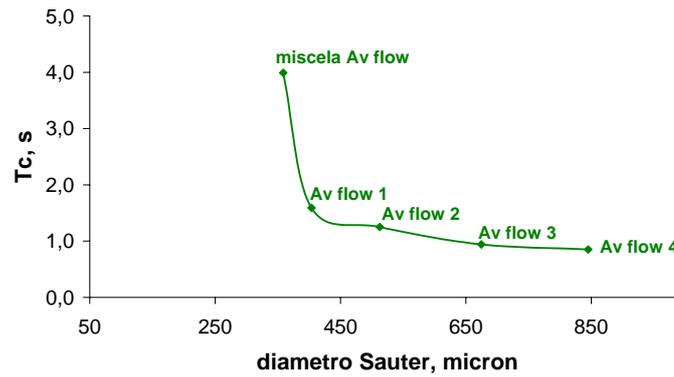
#### PROVE DI COLLASSO SU FRAZIONI GRANULOMETRICHE SELEZIONATE DELLA MISCELA DI AVELLINO FLOW

Al fine di individuare il ruolo dei fini sulla dinamica al collasso di una miscela piroclastica si sono eseguite prove di collasso su frazioni granulometriche selezionate della miscela di Avellino Flow (Tabella 5.5). Dall'osservazione dei dati di pressione si osserva come al diminuire della presenza di fini nella miscela si riduca consistentemente il tempo di collasso. I campioni AV Flow 1, AV Flow 2, e AV Flow 3 presentano sia la fase di espulsione delle bolle che la fase di sedimentazione, mentre il campione AV Flow 4 presenta solo la fase di espulsione delle bolle.



**Figura 5.28:** Variazione dell'altezza del letto durante le prove di collasso eseguite su tagli della miscela di Avellino Flow.

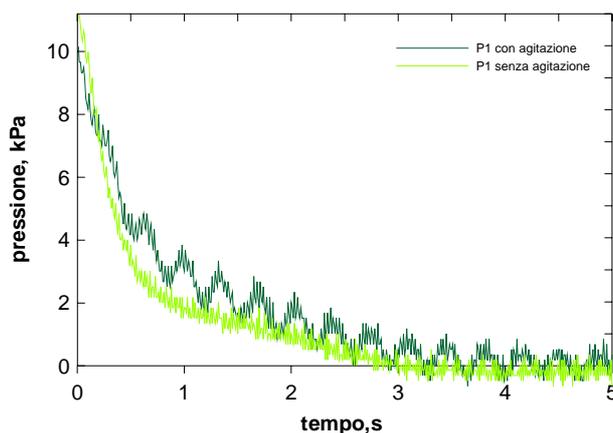
In figura 5.29 è riportato il tempo di collasso  $T_c$  in funzione delle dimensioni medie dei campioni in esame. Al diminuire della presenza di fini si ha una diminuzione del tempo di collasso del letto.



**Figura 5.29:** Tempi di collasso dei tagli prelevati dalla miscela di Avellino Flow in funzione delle dimensioni medie della miscela.

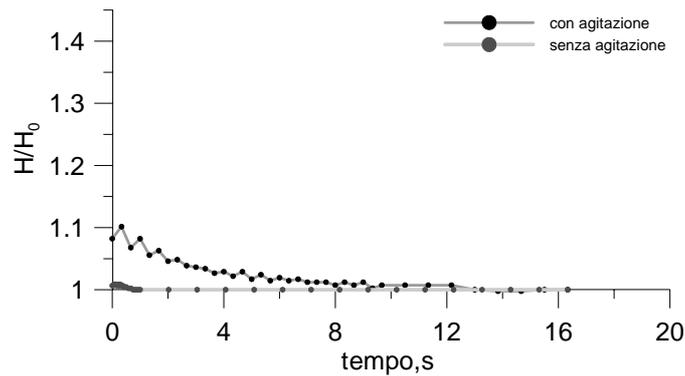
## 5.2.8 PROVE DI COLLASSO ESEGUITE SULLA MISCELA DI AVELLINO FLOW CON E SENZA AGITAZIONE MECCANICA

Dall'analisi dei dati di pressione (figura 5.30) si osserva che il collasso del letto formato da particelle della miscela di Avellino Flow ha durate comparabili con e senza agitazione meccanica, e dell'ordine di 3-4 s.



**Figura 5.30:** Pressioni registrate, alla presa P1, nel corso delle prove di collasso, eseguite sulla miscela di Avellino Flow in presenza ed in assenza di agitazione meccanica.

La figura 5.31 riporta la variazione, in funzione del tempo, dell'altezza del letto normalizzata, ovvero il rapporto tra l'altezza misurata e l'altezza statica. Le curve relative alle due condizioni indagate—con e senza agitazione - pur presentano lo stesso andamento, presentano una considerevole differenza nei tempi caratteristici del collasso. In presenza di agitazione meccanica risulta un tempo di collasso dell'ordine di 8-10 s a fronte di circa 1 s come valore di  $T_c$  registrato in assenza di flusso di scorrimento.



**Figura 5.31:** Variazione dell'altezza normalizzata durante le prove di collasso eseguite sulla miscela di Avellino Flow in presenza ed in assenza di agitazione meccanica.

### 5.2.9 COMPORTAMENTO FLUIDODINAMICO DELLA MISCELA DI AVELLINO FLOW

In tabella 5.6 sono riportati i valori di  $U_1$  ed  $U_1'$  ottenuti nel corso della caratterizzazione fluidodinamica delle miscele di Avellino Flow. Il confronto tra i valori di  $U_1$  ed  $U_1'$  mostrati dalla miscela ad ampia distribuzione granulometrica ed le  $U_1$  ed  $U_1'$  tipiche dei tagli AV Flow 1, AV Flow 2, AV Flow 3, AV Flow 4, permette di affermare che la presenza della frazione fine porta ad un abbassamento dei valori di  $U_1$  ed  $U_1'$ .

I valori di  $U_1$  ed  $U_1'$  ottenuti dalla caratterizzazione fluidodinamica delle miscele di Avellino Flow, più bassi rispetto alle altre miscele piroclastiche in esame. Questa evidenza sperimentale, dovuta alla densità della frazione pomicea, permette di affermare che i valori di  $U_1$  ed  $U_1'$  sono abbassati dalla presenza di materiale a minore densità.

Campioni	Dimensioni	U <sub>1</sub>			U <sub>1</sub> '		
		120 mm	Cilindri coassiali	Agitazione	120 mm	Cilindri coassiali	Agitazione
	µm	m/s					
Miscela Avellino Flow	0-1000	0.02	0.02	0.02	0.04	0.02	0.03
AV Flow 1	100-1000	0,02			0.06		
AV Flow 2	300-1000	0,06			0.09		
AV Flow 3	500-1000	0,07			0.12		
AV Flow 4	710-1000	0,13			0.18		

**Tabella 5.6:** Riassunto dei dati relativi alla caratterizzazione fluidodinamica della miscela di Avellino Flow.

In tabella 5.7 sono riassunti i valori dei tempi di collasso ottenuti nel corso delle prove di collasso eseguite in presenza ed assenza di agitazione meccanica. L'analisi dei dati conferma il ruolo svolto dalla frazione fine, in particolare si osserva che le particelle con dimensioni minori di 100 µm portano ad un notevole aumento dei tempi di collasso. Le prove eseguite in presenza di flusso di scorrimento mostrano che l'aggiunta del flusso di scorrimento porta a un notevole aumento dei tempi di collasso. La minore densità della frazione pomicea della miscela di Avellino Flow è la causa dell'aumento dei tempi di collasso in assenza di flusso di scorrimento.

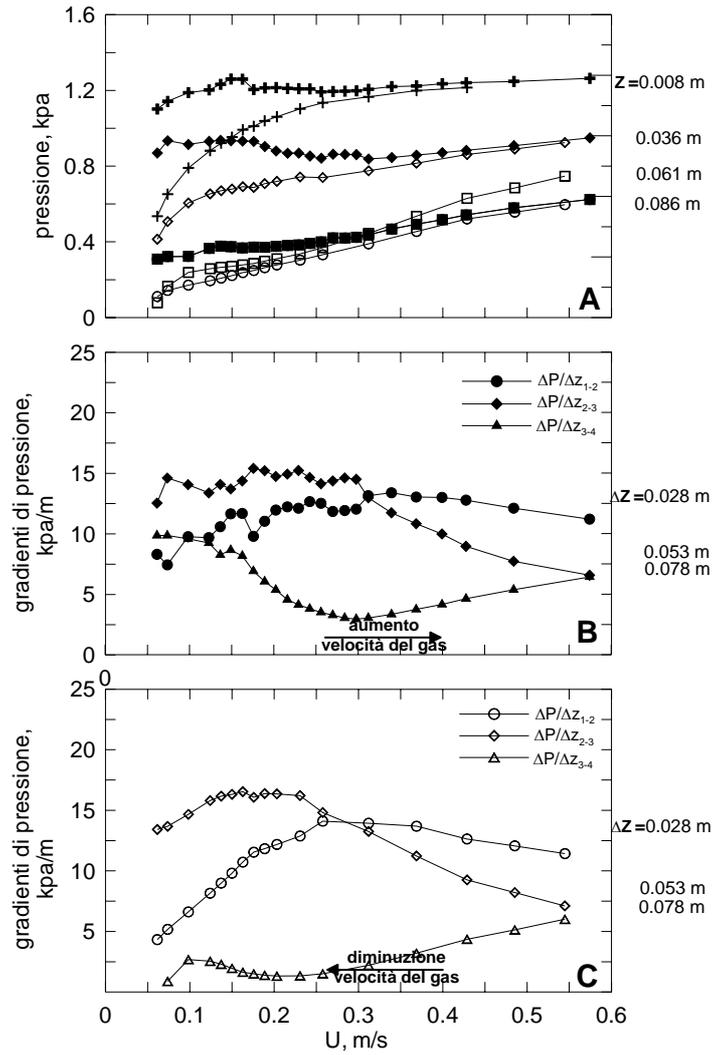
Campione	dimensioni	Tc (da segnale di pressione)			Tc (da quota superficie letto)		
		120 mm	Cilindri coassiali	Agitazione	120 mm	Cilindri coassiali	Agitazione
	µm	m/s					
Miscela Avellino Flow	0-1000	3.94	3.20	4.02	5,25	0.75	15
AV Flow 1	100-1000	1.59			1.42		
AV Flow 2	300-1000	1.25			1.25		
AV Flow 3	500-1000	0.94			0.77		
AV Flow 4	710-1000	0.85			0.75		

**Tabella 5.7:** Riassunto dei dati relativi alle prove di collasso eseguite sulla miscela di Avellino Flow. Si riporta la durata del collasso registrata dalle variazioni di pressione (Tc (pressione)) e dalla variazione di quota del letto (Tc (quota letto)).

### 5.3 CARATTERIZZAZIONE DELLA FLUIDIZZAZIONE DI PIROCLASTITI DI AVELLINO FALL

#### 5.3.1 CARATTERIZZAZIONE DELLA FLUIDIZZAZIONE DELLA MISCELA DI AVELLINO FALL

In figura 5.32 sono riportati i risultati ottenuti nel corso di una prova di fluidizzazione sulla miscela di Avellino Fall. Dall'analisi dei valori di pressione riportati nel grafico pressione-velocità del gas (figura 5.32 A), si osservano valori di  $U_1$  di circa 0.07 m/s, e di  $U_1'$  di circa 0.28 m/s. Durante la fase di diminuzione della velocità dei gas, alla presa di pressione  $P_1$ , si registrano dei valori di pressione leggermente inferiori a quelli osservati durante la fase di aumento della velocità dei gas. Questa differenza è dovuta all'elutriazione della frazione fine. L'analisi della curva dei gradienti di pressione, registrati nella fase di aumento della velocità dei gas, evidenzia una diminuzione di tale parametro che corrisponde alla terza e quarta presa di pressione ( $\Delta P/\Delta Z_{3-4}$ ); l'andamento del gradiente  $\Delta P/\Delta Z_{3-4}$  è dovuto alla segregazione di materiali sottili nella parte superiore del letto. Per bassi valori di  $U$ , il gradiente di pressione corrispondente alla seconda e terza presa di pressione ( $\Delta P/\Delta Z_{2-3}$ ) assume un valore superiore a quello registrato alla prima e seconda presa di pressione ( $\Delta P/\Delta Z_{1-2}$ ), indicando una segregazione di materiali più densi nella regione intermedia del letto. Per  $U \cong 0.35$  m/s si ha la diminuzione del gradiente di pressione  $\Delta P/\Delta Z_{2-3}$ , mentre aumenta il  $\Delta P/\Delta Z_{1-2}$ . Per  $U > 0.35$  m/s si osserva che il gradiente  $\Delta P/\Delta Z_{1-2}$ , conserva un valore costante, quindi si determina la concentrazione di particelle dense alla base del letto. Contemporaneamente a ciò si registra sia una diminuzione del gradiente di pressione  $\Delta P/\Delta Z_{2-3}$ , sia un aumento del gradiente di pressione  $\Delta P/\Delta Z_{3-4}$ ; Queste variazioni determinano la migrazione di particelle dalla regione intermedia del letto verso la parte superiore.



**Figura 5.32:** Curva di fluidizzazione (A) e gradienti di pressione (B e C) ottenuti nel corso di una prova di fluidizzazione condotta sulla miscela di Avellino Fall. Sull'asse delle x è rappresentata la velocità dei gas  $U$ , mentre sull'asse delle y i valori della pressione  $P$  registrati alle 4 prese. Con i simboli pieni sono indicate le curve ottenute della fase di UP, mentre con i simboli vuoti chiaro le curve ottenute nella fase di DOWN.

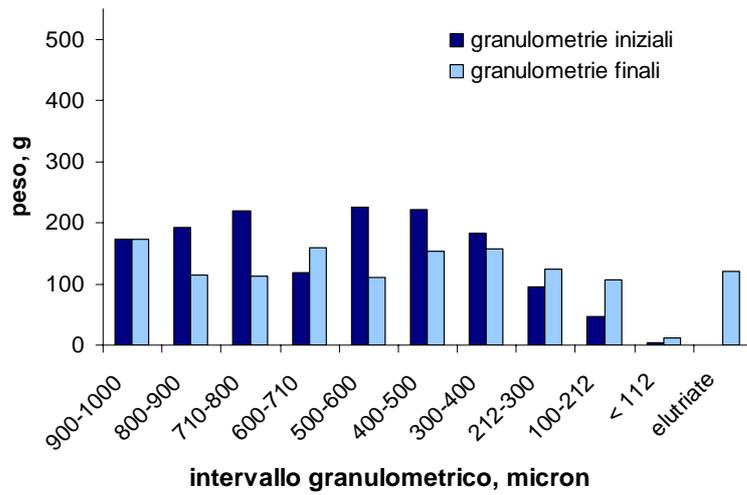
Dall'analisi dei gradienti di pressione, registrati nella fase di diminuzione della velocità dei gas, si osserva un aumento del gradiente  $\Delta P/\Delta Z_{2-3}$ , ed una diminuzione dei gradienti  $\Delta P/\Delta Z_{1-2}$  e  $\Delta P/\Delta Z_{3-4}$ .

La segregazione osservata all'interno del letto è da imputarsi alle diverse densità dei componenti che formano la miscela di Avellino Fall. La parte superiore del letto si arricchisce dei materiali più densi formando una "fascia" a maggiore densità (figura 5.33), che all'aumentare della velocità dei gas scende verso il fondo del letto. Nella prima parte e nella parte finale della prova di fluidizzazione, la densità alla base del letto probabilmente è abbassata dalla presenza di pomice grossolane, che, a causa dei loro vucoli di maggiori dimensioni, presentano densità minore rispetto al pomice meno grossolano, che si rinvengono preferibilmente nella parte superiore della colonna di fluidizzazione, aumentano, quindi, la densità della miscela in questa regione del letto. La gradazione diretta delle pomice determina l'inversione dei gradienti di pressione  $\Delta P/\Delta Z_{1-2}$  e  $\Delta P/\Delta Z_{23}$ . Al termine della caratterizzazione fluidodinamica, il materiale costituente il letto è stato sottoposto ad un'analisi granulometrica: sia sul toto, sia sul materiale raccolto nei cinque segmenti cilindrici che formano la colonna di fluidizzazione.

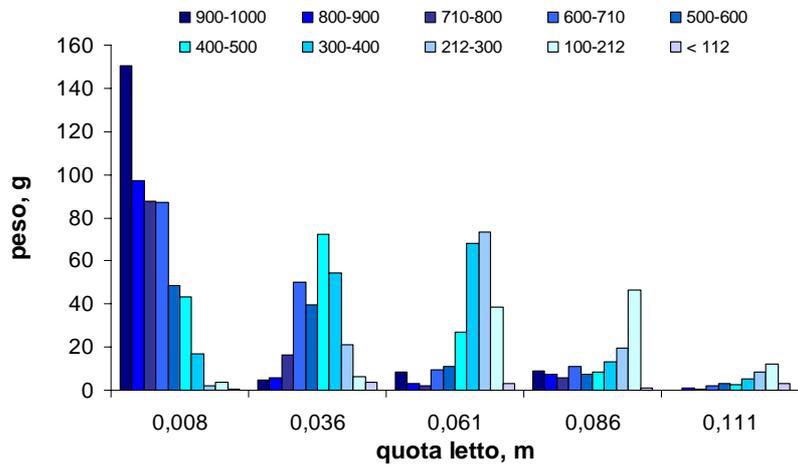


**Figura 5.33:** Foto scattata durante la prova di fluidizzazione eseguita sulla miscela di Avellino Fall. Al fondo del letto si vede una fascia di materiale chiaro (frammenti pomice) ed al centro del letto una fascia di materiali scuri (frammenti di litici e cristalli).

A)



B)



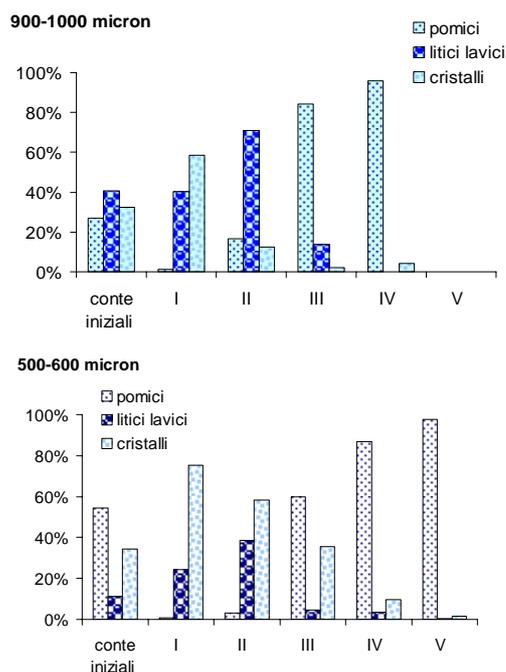
**Figura 5.34:** (A) Confronto tra le analisi granulometriche eseguite sulla miscela di Avellino Fall prima e dopo la prova di fluidizzazione. (B) Analisi granulometriche eseguite sul materiale raccolto, al termine della prova di fluidizzazione, nelle cinque fette cilindriche che formano la colonna di fluidizzazione.

L'analisi granulometrica, eseguita sul toto, presenta un andamento di tipo polimodale, mentre prima della fluidizzazione la miscela di Avellino Fall presentava una distribuzione granulometrica di tipo unimodale. L'analisi granulometrica compiuta sui segmenti cilindrici, è riportata in figura 5.34 B. Il materiale grossolano, maggiormente rappresentato nella parte basale del letto, diminuisce rapidamente nella parte centrale e scompare quasi del tutto nella parte superiore. Osservando le curve granulometriche ottenute su ogni segmento, si nota come, dal basso verso l'alto della colonna la moda del campione si sposta dal materiale più grossolano al materiale più sottile. Dall'alto verso il basso della colonna, a parità di volume, diminuiscono i pesi misurati, indicando una diminuzione di densità del materiale lungo il letto.

Al termine della prova di fluidizzazione è stata eseguita una valutazione semiquantitativa dei costituenti litologici sui campioni appartenenti ai tagli granulometrici 900-1000  $\mu\text{m}$  e 500-600  $\mu\text{m}$ . Il conteggio eseguito sulla frazione 900-1000  $\mu\text{m}$  mostra che il campione, nella parte superiore del letto, è formato essenzialmente da pomici. I litici iniziano a comparire nel terzo segmento della colonna di fluidizzazione, mentre nel secondo segmento, questi ultimi si presentano in percentuali maggiori rispetto alle pomici ed ai cristalli.

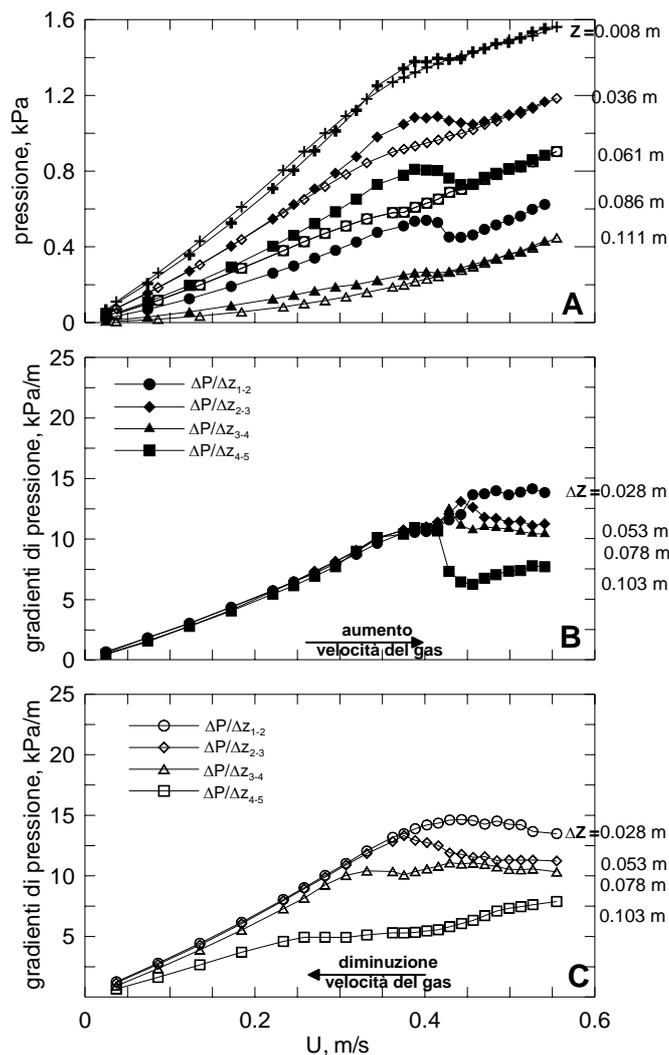
Nel campione prelevato alla base del letto si osserva una percentuale maggiore di cristalli rispetto ai litici, mentre le pomici sono quasi assenti. L'andamento del conteggio eseguito sul campione di dimensioni 500-600  $\mu\text{m}$  è simile a quello ottenuto dall'analisi dei campioni di dimensioni 900-1000  $\mu\text{m}$ , ma con un notevole aumento della percentuali dei cristalli.

**Figura 5.35:** Conte semiquantitative eseguite, al termine della prova di fluidizzazione, sui tagli di dimensioni 900-1000  $\mu\text{m}$  e 500-600  $\mu\text{m}$  della miscela di Avelino Fall.



### 5.3.2 CARATTERIZZAZIONE DELLA FLUIDIZZAZIONE DI FRAZIONI GRANULOMETRICHE SELEZIONATE DELLA MISCELA DI AVELLINO FALL

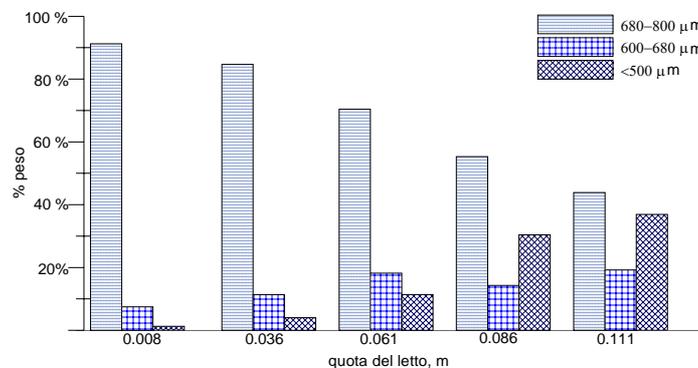
In figura 5.36 sono riportati i risultati della prova di fluidizzazione, eseguita sul campione 1b delle piroclastiti di Avellino Fall. Dall'analisi del grafico 5.36 A si osserva che il valore di  $U_1$  è pari a 0.37 m/s, mentre  $U_1'$  è pari a 0.42 m/s. L'analisi dei gradienti di pressione, misurati lungo il letto in funzione della  $U$ , evidenzia gli effetti della segregazione. Infatti, all'aumentare della velocità del gas fino ad  $U_1$  il gradiente aumenta gradualmente; per valori di  $U > U_1$  il gradiente di pressione  $\Delta P / \Delta Z_{4-3}$  diminuisce e, considerando che questo valore corrisponde ad una misura della densità media della sospensione, ne consegue che in questa parte si determinano condizioni per la segregazione di materiali leggeri in superficie.



**Figura 5.36:** Curva di fluidizzazione (A) e gradienti di pressione (B e C) ottenuti nel corso di una prova di fluidizzazione condotta sulla campione 1b. Sull'asse delle x è rappresentata la velocità dei gas  $U$ , mentre sull'asse delle y i valori della pressione  $P$  registrati alle 4 prese. Con i simboli pieni sono indicate le curve ottenute della fase di UP, mentre con i simboli vuoti chiaro le curve ottenute nella fase di DOWN

Per valori di velocità  $U > U_1'$  si registra anche la diminuzione del gradiente di pressione  $\Delta P / \Delta Z_{3-2}$  e parallelamente l'aumento invece del valore  $\Delta P / \Delta Z_{2-1}$  dove avviene la segregazione di materiali densi ed ulteriore migrazione di leggeri in superficie. Per  $U > 0.65$  m/s i tre gradienti tendono ad un valore comune indicando con ciò che i fenomeni di miscelazione del letto, ormai mobilizzati in tutta la sua estensione, sono attivi e diventano progressivamente più significativi.

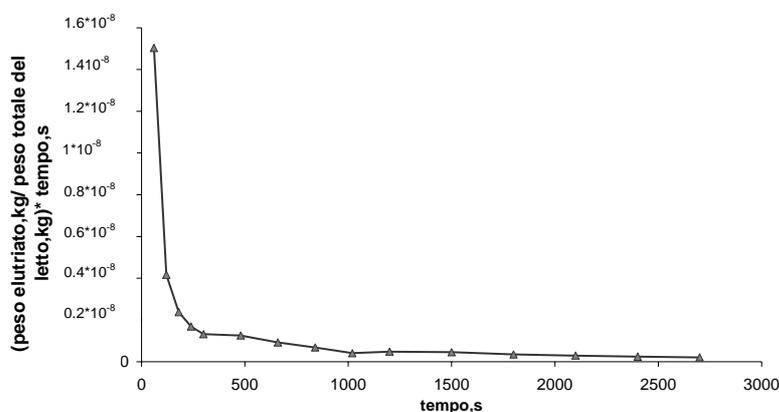
L'analisi granulometrica eseguita al termine della prova di fluidizzazione sul campione 1b di piroclastiti di Avellino Fall, mostra un assortimento diverso da quello iniziale per la presenza di una nuova classe di particelle di piccole dimensioni generate dagli urti che occorrono tra i clasti all'interno del letto. La distribuzione verticale delle particelle ed i risultati dell'analisi litologica finale, mostrano che le particelle di dimensioni minori si ritrovano preferenzialmente alla sommità del letto mentre al fondo si concentra la frazione più densa e grossolana formata da cristalli e litici lavici; questa distribuzione litologica è in accordo con i dati ottenuti dall'analisi dei gradienti di pressione misurati durante la prova di fluidizzazione. Appare chiaro che la segregazione all'interno del letto è governata essenzialmente dalle differenze di densità dei materiali più che dalle differenze di dimensioni.



**Figura 5.37:** Analisi granulometriche eseguite al termine della prova di fluidizzazione del campione 1b.

### 5.3.3 PROVE DI ELUTRIAZIONE

In figura 5.38 sono riportati i risultati di una prova di elutriazione, eseguita sul campione 1a delle piroclastiti di Avellino Fall. Dall'analisi del grafico si osserva che la velocità di elutriazione è massima all'inizio della prova e poi diminuisce rapidamente. Bisogna osservare che il campione su cui è stata eseguita la prova è formato da particelle comprese in uno stretto intervallo dimensionale, per questo motivo le particelle fini elutriate si sono formate nel corso della fluidizzazione per fenomeni di abrasione tra le particelle. Il picco di velocità di elutriazione, raggiunto all'inizio della prova, è correlato a fenomeni di *rounding off* delle particelle. La velocità di elutriazione, in media durante tutta la prova è pari a  $1 \cdot 10^{-5}$ - $1 \cdot 10^{-7}$  (kg di materiale elutriato/kg di materiale nel letto) per secondo.



**Figura 5.38:** Flusso di polveri elutriate in funzione del tempo.

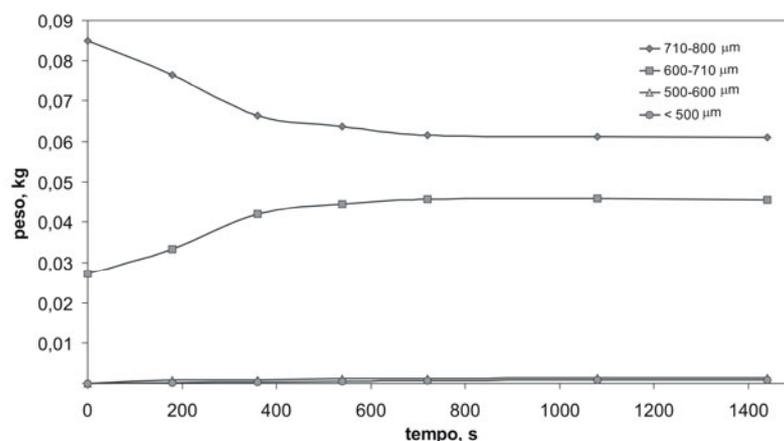
In accordo con Ray et al. (1987), la velocità di elutriazione risulta dipendente dalla potenza dissipata all'interno del letto fluido. La potenza per unità di massa del materiale granulare dissipata durante le prove di elutriazione è stata calcolata come il prodotto di  $(U \times g)$ , è nell'ordine di 10 W/kg. In un flusso piroclastico la velocità di dissipazione di energia meccanica,

associato con le forze di frizione granulari, eguaglia la velocità di variazione di energia potenziale lungo il piano inclinato su cui si muove il flusso, ovvero  $U_s \times g \times \sin(\theta)$ , dove  $U_s$  è la velocità del flusso piroclastico,  $\theta$  è l'inclinazione del piano. Assumendo  $U_s \cong 30$  m/s e  $\theta \cong 45^\circ$  il tasso di energia meccanica dissipata è superiore a 200 W/kg, più di un ordine di grandezza rispetto ai valori ottenuti nel presente esperimento. Se il tasso di attrito varia come l'energia meccanica dissipata per unità di massa, si possono aspettare tassi di attrito in un flusso piroclastico in ordine di  $2 \cdot 10^{-4}$ - $2 \cdot 10^{-6}$  (kg di materiale elutriato/kg di materiale nel letto) per secondo.

Sulla base di questo valore si potrebbe attendere che il 15% del materiale sia elutriato in un intervallo di tempo di 15 minuti. Sebbene questo valore sia basato su una valutazione largamente approssimata, esso può contribuire a sottolineare come la formazione di materiale fine può risultare rilevante nelle reali condizioni di un flusso piroclastico.

#### 5.3.4 PROVE DI ABRASIONE

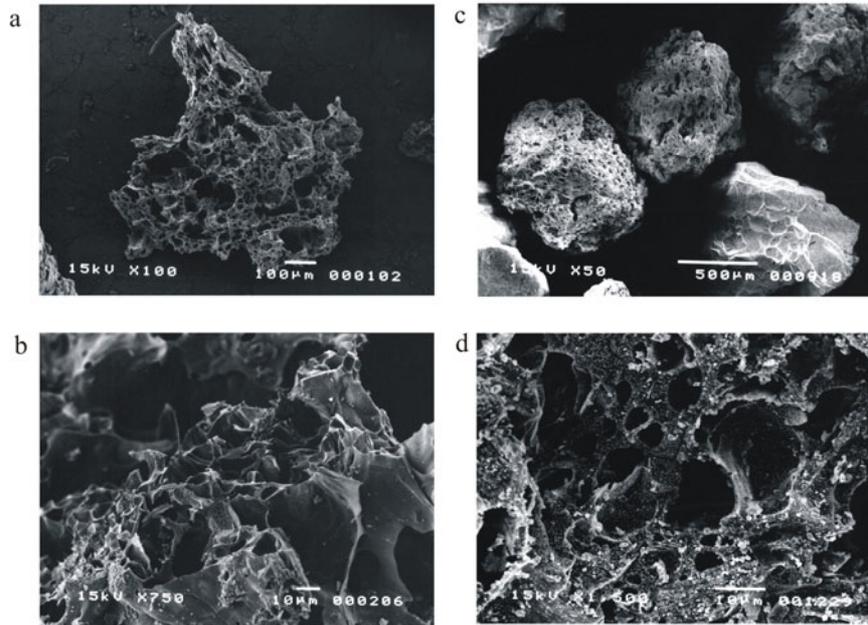
In figura 5.39 sono riportati i risultati di una prova di abrasione eseguita sul campione 1a delle piroclastiti di Avellino Fall. Il materiale piroclastico è stato posto ad una velocità del gas di fluidizzazione pari ad un valore di  $U_1''$ . A questa velocità del gas il letto si trova in una condizione bollente-segregativa, caratterizzata da uno stato di incipiente *bubbling* nella regione superiore del letto, segregazione di particelle dense nella parte basale del letto. In accordo con Sparks et al. (1976), questo stato potrebbe rappresentare la condizione di fluidizzazione interna ai flussi piroclastici.



**Figura 5.39:** Risultati della prova di abrasione eseguita sul campione 1a delle piroclastiti di Avellino Fall.

I dati riportati in figura 5.39 mostrano cambi significativi nella distribuzione granulometrica del campione: a causa degli attriti tra le particelle durante la fluidizzazione, diminuisce la popolazione di particelle grossolane ed aumenta quella delle particelle sottili. I pesi dei diversi tagli granulometrici raggiungono valori costanti dopo un certo intervallo di tempo.

Al termine delle prove di abrasione si è eseguita un'analisi al S.E.M. sulla frazione pomicea della miscela di Avellino Fall, questa è stata confrontata con l'analisi preliminare al S.E.M. Le foto riportate in figura 5.40 A e C mostrano che dopo le prove di abrasione le particelle pomicee hanno perso la morfologia a spigoli vivi e presentano delle forme arrotondate. L'analisi delle figure 5.40 B e D mostrano il particolare della superficie dei frammenti pomicei. Si nota che dopo la prova di abrasione le particelle presentano una superficie priva di asperità.



**Figura 5.40:** Foto al S.E.M. dei campioni di Avellino Fall prima e dopo le prove di abrasione e fluidizzazione:

**a** frammento di pomice di dimensioni 680-1000 $\mu\text{m}$ , prima della prova di fluidizzazione (ingrandimento 100x);

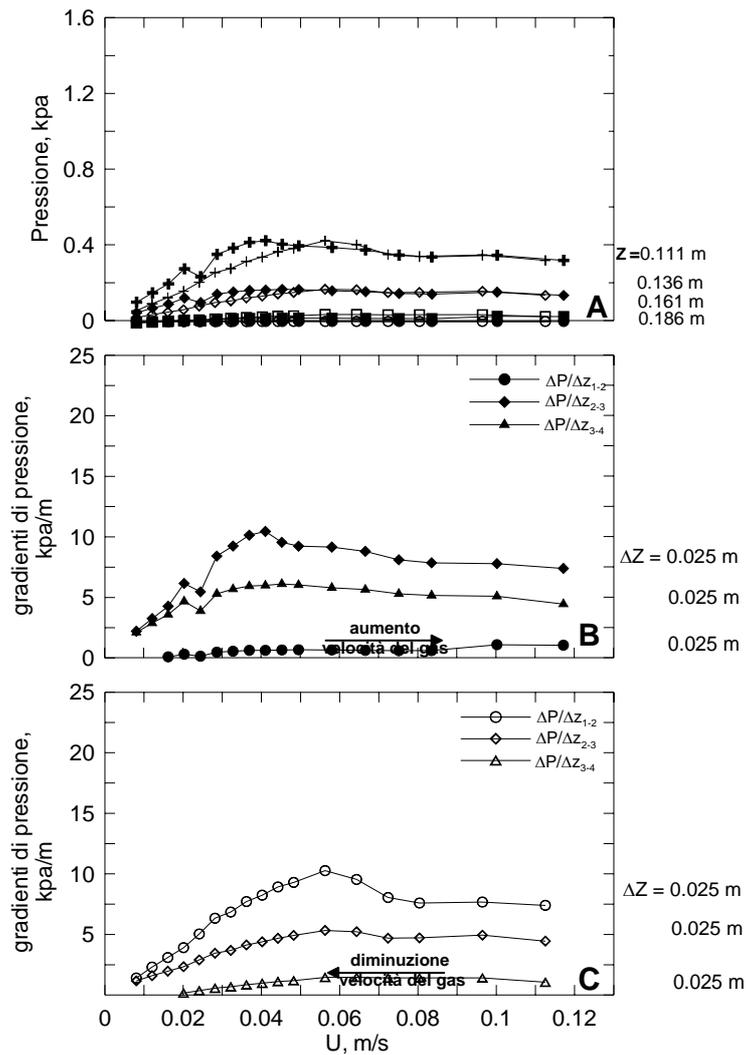
**b** particolare di un frammento di pomice di dimensioni 500-680 $\mu\text{m}$  prima della prova di fluidizzazione (ingrandimento 750x);

**c** frammento di pomice di dimensioni 900-1000  $\mu\text{m}$ , alla fine della prova di fluidizzazione (ingrandimento 50x);

**d** particolare di un frammento di pomice di dimensioni 680-710  $\mu\text{m}$  dopo la prova di fluidizzazione (ingrandimento 1500x).

### 5.3.5 CARATTERIZZAZIONE DELLA FLUIDIZZAZIONE DELLA MISCELA DI AVELLINO FALL NEL DISPOSITIVO A CILINDRI COASSIALI IN ASSENZA DI AGITAZIONE MECCANICA

Si sono eseguite delle prove di fluidizzazione sulla miscela di Avellino Fall dopo aver equipaggiato l'impianto con il cilindro interno, i dati relativi sono riportati in figura 5.41.

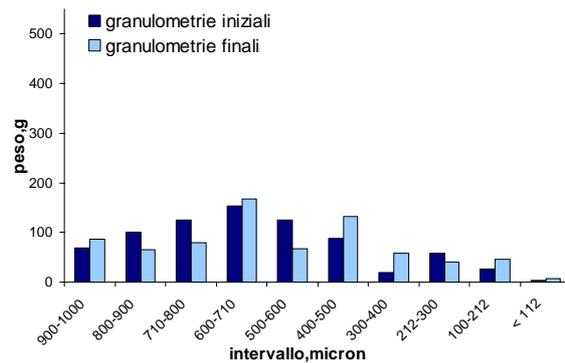


**Figura 5.41:** Curva di fluidizzazione (A) e gradienti di pressione (B e C) ottenuti nel corso di una prova di fluidizzazione condotta sulla miscela di Avellino Fall con l'impianto equipaggiato con il cilindro interno. Sull'asse delle x è rappresentata la velocità dei gas  $U$ , mentre sull'asse delle y i valori della pressione  $P$  registrati alle 4 prese. Con i simboli pieni sono indicate le curve ottenute della fase di UP, mentre con i simboli vuoti chiaro le curve ottenute nella fase di DOWN.

Dall'analisi del grafico pressione-velocità del gas di fluidizzazione (Figura 5.41 A) appare che la  $U_1$  è pari ad un valore di 0.02 m/s ed la  $U_1'$ , pari ad 0.04 m/s. Nel corso della prova non è stato possibile registrare valori alla quarta presa di pressione, in quanto l'altezza del letto non ha raggiunto la quota corrispondente. L'analisi dei gradienti di pressione calcolati nella fase di aumento della velocità dei gas (figura 5.41 B) mostra che all'aumentare della velocità dei gas il letto si segrega. Il gradiente  $\Delta P/\Delta Z_{1-2}$  presenta il valore più elevato, ad indicare che i materiali più densi si accumulano preferenzialmente alla base della colonna di fluidizzazione. I gradienti  $\Delta P/\Delta Z_{2-3}$  e  $\Delta P/\Delta Z_{3-4}$  presentano valori inferiori, indicando un letto gradato in modo diretto. In particolare il gradiente  $\Delta P/\Delta Z_{3-4}$  presenta un valore molto basso, dovuto all'arricchimento della parte superiore del letto in particelle poco dense. Ad una  $U$  pari a circa 0.04 m/sec si registra la massima differenza tra i valori dei gradienti di pressione, a questa velocità del gas si registra la massima segregazione lungo il letto.

I gradienti di pressione, registrati durante la fase di diminuzione della velocità dei gas (figura 5.41 C) presentano lo stesso andamento dei gradienti registrati durante la fase di aumento della velocità del gas. Il confronto tra i dati ottenuti nel corso della prova di fluidizzazione eseguita sull'impianto equipaggiato con il cilindro interno e la curva di fluidizzazione ottenuta sull'impianto con la colonna di fluidizzazione da 120 mm di diametro (figura 5.32) induce a ritenere che gli effetti di parete associati alla presenza del cilindro interno siano contenuti.

Al termine della prova di fluidizzazione si è eseguita un'analisi granulometrica sul toto del materiale che forma il letto, i risultati sono riportati in figura 5.42 confrontati con i dati ottenuti dall'analisi granulometrica iniziale.



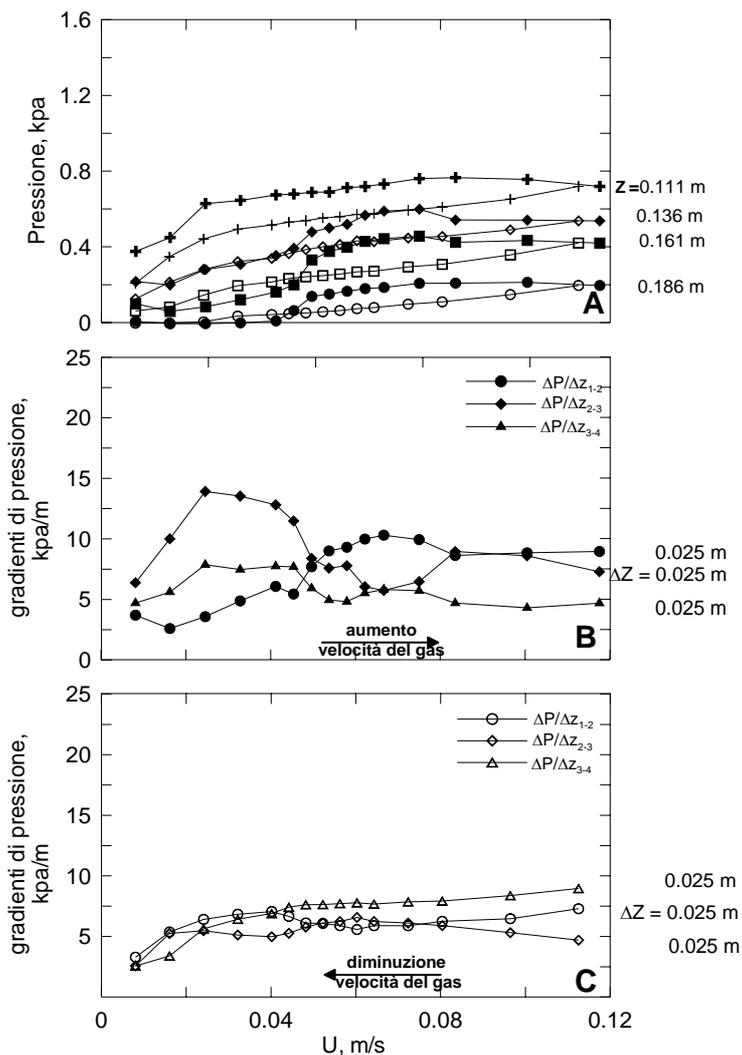
**Figura 5.42:** Confronto tra le analisi granulometriche eseguite sulla miscela di Avellino Fall prima e dopo la prova di fluidizzazione eseguita con l'impianto equipaggiato con il cilindro interno.

### 5.3.6 CARATTERIZZAZIONE DELLA FLUIDIZZAZIONE DELLA MISCELA DI AVELLINO FALL IN PRESENZA DI AGITAZIONE MECCANICA

In figura 5.43 sono riportati i dati ottenuti nel corso di una prova di fluidizzazione eseguita sulla miscela di Avellino Fall, in presenza di agitazione meccanica.

Dall'analisi del grafico pressione-velocità del gas (Figura 5.43 A) appare che la  $U_1$  è pari ad un valore di 0.02 m/s ed la  $U_1'$ , pari ad 0.05 m/s. Focalizzando l'attenzione ai valori di pressione registrati alle prese  $P_2$   $P_3$   $P_4$  si osserva che, al raggiungimento della  $U_1$ , si registra un rapido aumento dei valori di pressione, mentre questo fenomeno non si osserva alla  $P_1$ . L'aumento dei valori di pressione corrisponde alla formazione delle bolle. Dall'osservazione del letto si vede che solo la parte superiore del letto è interessata dalle bolle, per questo motivo l'aumento dei valori di pressione non si registra alla prima presa di pressione.

L'analisi dei gradienti di pressione misurati nella fase di aumento della velocità del gas (figura 5.43 B) mostra un letto segregato.



**Figura 5.43:** Curva di fluidizzazione (A) e gradienti di pressione (B e C) ottenuti nel corso di una prova di fluidizzazione condotta sulla miscela di Avellino fall in presenza di agitazione meccanica. Sull'asse delle  $x$  è rappresentata la velocità dei gas  $U$ , mentre sull'asse delle  $y$  i valori della pressione  $P$  registrati alle 4 prese. Con i simboli pieni sono indicate le curve ottenute della fase di UP, mentre con i simboli vuoti chiaro le curve ottenute nella fase di DOWN.

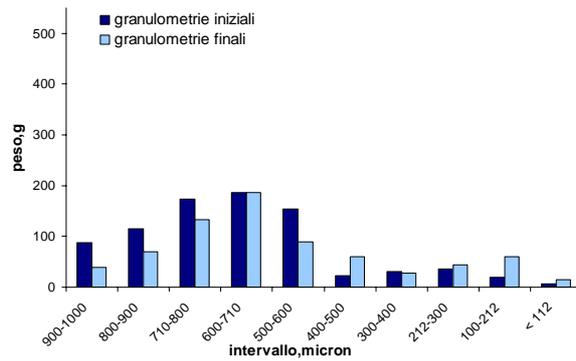
Ad un valore della  $U$  pari a circa  $0.05 \text{ m/s}$  si registra un'inversione tra i gradienti di pressione, con il gradiente  $\Delta P/\Delta Z_{3-4}$  che presenta valori maggiori rispetto ai gradienti  $\Delta P/\Delta Z_{1-2}$  e  $\Delta P/\Delta Z_{2-3}$ . I fenomeni segregativi osservati nella fase di aumento della velocità del gas si congelano nella fase di diminuzione (figura 5.43 C).

In figura 5.44 si riporta una foto eseguita nel corso della prova di fluidizzazione eseguita sulla miscela di Avellino Fall in presenza di agitazione meccanica. Dall'osservazione della foto si vede che il letto si presenta completamente diviso in due parti: la parte basale, di colore scuro arricchita in frammenti litici e cristalli, e la parte superiore in frammenti pomicei. Purtroppo questa forte segregazione all'interno del letto non è registrata dai gradienti di pressione, in quanto i valori di pressione sono stati registrati solo nella regione del letto occupata dalle particelle più dense.



**Figura 5.44:** Foto scattata durante la prova di fluidizzazione eseguita sulla miscela di Avellino fall. Al fondo del letto si vede una fascia di materiale chiaro (pomici) ed al centro del letto una fascia di materiali scuri (frammenti di litici e cristalli).

Al termine della prova di fluidizzazione si è eseguita un'analisi granulometrica sul toto del materiale che forma il letto, i risultati sono riportati in figura 5.45 confrontati ai dati ottenuti dall'analisi granulometrica iniziale.

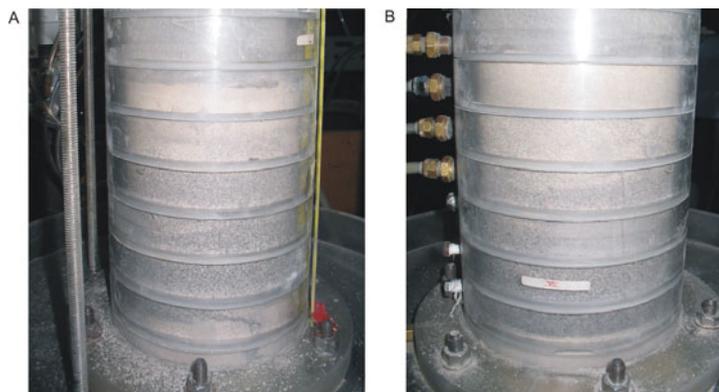


**Figura 5.45:** Confronto tra le analisi granulometriche eseguite sulla miscela di Avellino Fall prima e dopo la prova di fluidizzazione eseguita in presenza di agitazione meccanica.

### 5.3.7 CONFRONTO TRA LE PROVE DI FLUIDODIZZAZIONE ESEGUITE SULLA MISCELA DI AVELLINO FLOW IN PRESENZA O ASSENZA DI AGITAZIONE MECCANICA

Dal confronto tra i grafici pressione-velocità del gas di fluidizzazione, registrati in presenza ed in assenza di agitazione meccanica (figura 5.41 A e 5.43 A), si osserva che in presenza di agitazione meccanica i valori di pressione registrati nella fase di diminuzione della velocità del gas sono minori rispetto ai valori registrati nella fase di aumento di velocità del gas.

In figura 5.46 si riportano due foto effettuate al termine delle prove di fluidizzazione eseguite sulle miscele di Avellino Fall in presenza ed in assenza di agitazione meccanica. Il confronto tra le due foto mostra che nelle prove con agitazione meccanica si amplifica la segregazione lungo il letto.

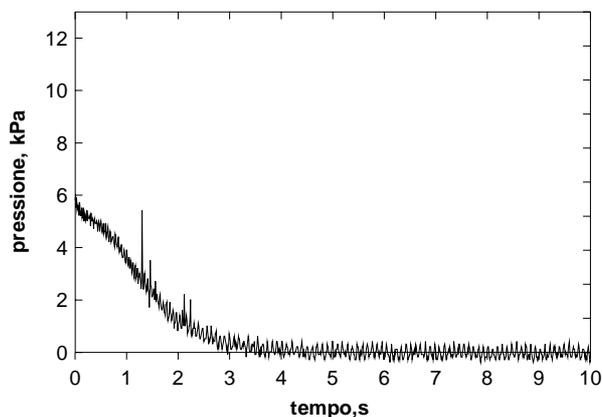


**Figura 5.46:** confronto tra le foto scattate al termine delle prove di fluidizzazione eseguite sulla miscela di Avellino Fall: (A) in assenza di agitazione meccanica; (B) in presenza di agitazione meccanica.

Il confronto tra le analisi granulometriche eseguite al termine delle prove di fluidizzazione con e senza agitazione meccanica mostra un leggero aumento dell'abrasione nella prova con agitazione meccanica

### 5.3.7 PROVE DI COLLASSO ESEGUITE SULLA MISCELA DI AVELLINO FALL

Dall'analisi dei dati di pressione (figura 5.46) si osserva che il collasso del letto formato da particelle della miscela di Avellino Fall ha una durata di circa 2 secondi

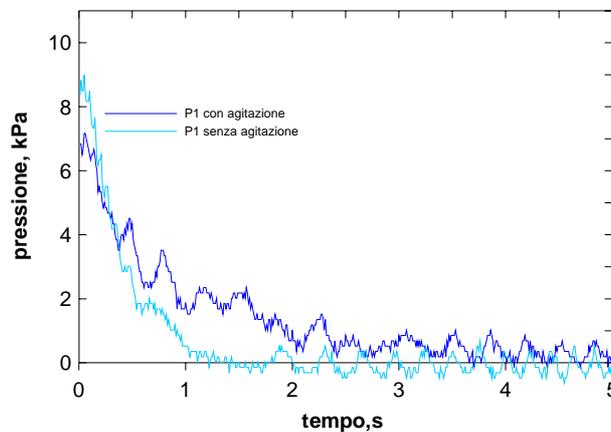


**Figura 5.46:** Pressioni registrate alla presa  $P_1$  nel corso di una prova di collasso, eseguita sulla miscela di Avellino Fall.

L'analisi dei filmati realizzati con la videocamera *low-motion*, da cui appare un  $T_c$  pari a circa 0.3 s. La videocamera *low-motion*, inoltre, ha permesso di osservare le variazioni della quota del letto in funzione del tempo. Dall'osservazione della ripresa si vede che la fase di collasso consiste essenzialmente nel rilascio del gas della fase bolle.

### 5.3.8 PROVE DI COLLASSO ESEGUITE SULLA MISCELA DI AVELLINO FLOW CON E SENZA AGITAZIONE MECCANICA

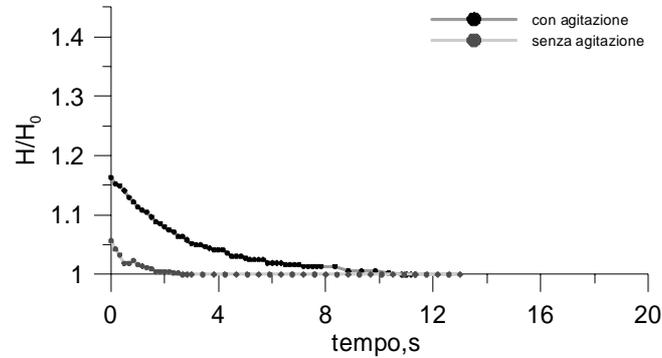
Dall'analisi dei dati di pressione (figura 5.47) si osserva che il collasso del letto formato da particelle della miscela di Avellino Fall ha una durata di circa 1 s, in assenza di agitazione meccanica, e di circa 2 s in presenza di agitazione meccanica.



**Figura 5.47:** Pressioni registrate, alla presa  $P_1$ , nel corso delle prove di collasso, eseguite sulla miscela di Avellino Fall

La figura 5.48 riporta la variazione, in funzione del tempo, dell'altezza del letto normalizzata, ovvero il rapporto tra l'altezza misurata e l'altezza statica. Le curve relative alle due condizioni indagate—con e senza agitazione - pur presentano lo stesso andamento, presentano una considerevole differenza nei

tempi caratteristici del collasso. In presenza di agitazione meccanica risulta un tempo di collasso dell'ordine di 10 s a fronte di circa 3 s come valore di  $T_c$  registrato in assenza di flusso di scorrimento.



**Figura 5.48:** Variazione dell'altezza normalizzata durante le prove di collasso eseguite sulla miscela di Avellino Fall in presenza ed in assenza di agitazione meccanica.

### 5.3.9 COMPORTAMENTO FLUIDODINAMICO DELLA MISCELA DI AVELLINO FALL

La caratterizzazione fluidodinamica della miscela di Avellino Fall ha permesso di investigare sui fenomeni segregativi che si verificano nei letti formati da miscele piroclastiche.

Campione	dimensioni	$T_c$ (da segnale pressione)			$T_c$ (da quota superficie del letto)		
		120 mm	Cilindri coassiali	Agitazione	120 mm	Cilindri coassiali	Agitazione
	$\mu\text{m}$	m/s					
Miscela Avellino Fall	0-1000	1.77	0.90	2	0.27	2.7	11
-	100-1000						
-	300-1000						
-	500-1000						
-	710-1000						

**Tabella 5.8:** Riassunto dei dati relativi alle prove di collasso eseguite sulla miscela di Avellino Fall.

Campione	Dimensioni	U <sub>1</sub>			U <sub>1</sub> '			U <sub>1</sub> ''			U <sub>2</sub>		
		120 mm	Cilindri coassiali	Agitazione	120 mm	Cilindri coassiali	Agitazione	120 mm	Cilindri coassiali	Agitazione	120 mm	Cilindri coassiali	Agitazione
	μm	m/sec											
<b>1a</b>	800-1000	0.47			0.51			0.65			0.75		
<b>1b</b>	680-800	0.37			0.42			0.53			0.65		
<b>2a</b>	600-680	0.24			0.32			0.38			0.70		
<b>2b</b>	500-600	0.10			0.16			0.26			0.52		
<b>Miscela Av Fall</b>	0 -1000	0.07	0.02	0.02	0.28	0.04	0.05						
<b>Av Fall 1</b>	100 -1000												
<b>Av Fall 2</b>	300 - 1000												
<b>Av Fall 3</b>	500 – 1000												
<b>Av Fall 4</b>	710 – 1000												

**Tabella 5.9:** Riassunto dei dati relativi alla caratterizzazione fluidodinamica della miscela di Avellino Fall

In tabella 5.9 sono riportati i valori di  $U_1$  ed  $U_1'$  ottenuti nel corso della caratterizzazione fluidodinamica delle miscele di Avellino Fall. Dall'analisi dei dati si osserva che le miscele ad ampia distribuzione granulometrica mostrano valori di  $U_1$  ed  $U_1'$  più bassi rispetto ai campioni compresi in uno stretto intervallo granulometrico (3a, 3b, 4a, 4b), quindi si può affermare che la polidispersità per dimensioni delle miscele favorisce il raggiungimento della condizione di fluidizzazione.

In tabella 5.8 sono riassunti i valori dei tempi di collasso ottenuti nel corso delle prove di collasso eseguite in presenza ed assenza di agitazione meccanica. Dall'analisi dei dati si osserva che la presenza di un flusso di scorrimento favorisce l'allungamento dei tempi di collasso.

## CAPITOLO 6: CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi si è sviluppato nel quadro di una collaborazione tra il Dipartimento di Scienze della Terra ed il Dipartimento di Ingegneria Chimica dell'Università degli Studi di Napoli Federico II. Esso ha riguardato l'analisi dei fattori che possono promuovere l'insorgere dello stato di fluidizzazione nel moto di correnti piroclastiche dense, esaminati sia in sede teorica che sperimentale. La esaltazione dei fenomeni di mobilitazione di correnti piroclastiche dense ha rilevanti implicazioni in ordine all'impatto delle stesse sulle strutture ed all'estensione delle aree a rischio potenziale. Scopo del lavoro è stato quello di contribuire alla formazione di un patrimonio di conoscenze che possano essere di ausilio nella comprensione della dinamica dei fenomeni piroclastici ed, in prospettiva, alla adozione di opportune misure di prevenzione e controllo. I principali risultati conseguiti sono di seguito presentati in forma sintetica.

### **INQUADRAMENTO CONCETTUALE DEL MOTO DI CORRENTI PIROCLASTICHE DENSE.**

Il moto rapido di correnti piroclastiche dense è stato inquadrato concettualmente alla luce delle teorie disponibili per l'analisi di flussi granulari veloci e di quelle che si riferiscono al moto di correnti gravitazionali. In particolare si sono passati in rassegna, anche alla luce di una attenta disamina della letteratura, aspetti diversi che si riferiscono alla struttura della regione frontale di una corrente piroclastica densa ed a i fenomeni di ingestione (*entrainment*) di aria dall'ambiente circostante nella regione frontale del flusso. Il quadro delle conoscenze sperimentali che emerge dalla letteratura risulta carente, soprattutto per quel che riguarda l'analisi di moti rapidi, caratterizzati da elevati valori del numero di Froude. Sulla base delle limitate conoscenze disponibili si è sviluppato un criterio approssimato per l'instaurarsi di una condizione di auto-fluidizzazione del flusso

piroclastico, intesa come condizione in cui lo stesso rapido incedere della corrente piroclastica induce lo stato di fluidizzazione del sistema granulare. D'altra parte lo stato di fluidizzazione, modificando in misura rilevante la reologia del sistema granulare, accentua considerevolmente la mobilità della corrente piroclastica influenzando la velocità di propagazione e le sovrappressioni dinamiche associate alla interazione della corrente con le strutture. In pieno accordo con i risultati di altri studiosi, si è riconosciuta l'importanza, ai fini dell'instaurarsi di condizioni di auto-fluidizzazione, del confronto tra una scala temporale del flusso e la scala temporale sulla quale un letto granulare inizialmente fluidizzato rilassa verso la condizione di letto fisso al venir meno della sorgente di gas di fluidizzazione (fenomeno della de-aerazione). Quest'ultima scala temporale risulta crucialmente dipendente da proprietà della miscela granulare quali la distribuzione granulometrica, la polidispersità per dimensioni e per densità, la parallela sussistenza di condizioni di flusso di scorrimento (*shear flow*). Le valutazioni proposte, a prevalente carattere descrittivo, rappresentano lo spunto per ulteriori e più approfonditi sviluppi in sede teorica e sperimentale.

#### **COMPORAMENTO ALLA FLUIDIZZAZIONE DI MISCELE PIROCLASTICHE.**

Si è studiato in sede sperimentale il comportamento di miscele granulari di origine piroclastica rispetto ai fenomeni di fluidizzazione. A tale scopo si sono effettuate prove di fluidizzazione in una colonna otticamente accessibile in scala di laboratorio opportunamente equipaggiata al variare della velocità superficiale del gas di fluidizzazione. Si sono impiegate miscele di origine e natura diversa, accomunate dalla proprietà di essere rappresentative del materiale costituente correnti piroclastiche reali. I risultati sperimentali hanno fornito alcune semplici ma significative evidenze relative al comportamento alla fluidizzazione delle piroclastiti investigate:

- le miscele piroclastiche di origine naturale sono fluidizzate da correnti gassose già a valori estremamente modesti ( $\cong 1\text{cm/s}$ ) della velocità superficiale del gas. Particolarmente rilevante a tale riguardo risulta la presenza di una frazione significativa di particolato fine ( $d_p < 100\mu\text{m}$ ) nella miscela granulare;
- Il comportamento delle miscele piroclastiche tal quali è assimilabile a quello di materiali appartenenti al gruppo A della classificazione di Geldart, ovvero caratterizzati da un campo di velocità superficiali del gas di fluidizzazione in cui l'espansione del letto avviene senza formazione di bolle. Risultano non trascurabili forze di natura interparticellare, sebbene non al punto da far classificare i materiali in esame nella tipologia C (polveri coesive). Le frazioni granulometriche esenti da fini presentano invece comportamenti assimilabili a quelli della categoria B della classificazione di Geldart, per i quali l'incipiente fluidizzazione e l'incipiente formazione di bolle coincidono;
- La presenza di una matrice fine, agevolmente fluidizzabile, nelle miscele piroclastiche naturali fa sì che possano essere mantenute in uno stato di fluidizzazione anche frazioni granulari relativamente grossolane ( $d_p \geq 1\text{mm}$ ). Difatti i fenomeni segregativi che pur si manifestano in seno alle miscele granulari investigate si sviluppano su scale temporali ben più lunghe di quelle del flusso;
- A valori relativamente modesti della velocità superficiale del gas di fluidizzazione i fenomeni di segregazione di frazioni granulari eterogenee in una miscela polidispersa sono efficacemente contrastati dai fenomeni di miscelazione indotti dal flusso. Questo aspetto contribuisce alla stabilizzazione dello stato di fluidizzazione della frazione più pesante e grossolana del flusso;
- I risultati delle prove di collasso confermano sostanzialmente i risultati ottenuti nelle prove di fluidizzazione in condizioni quasistazionarie. In particolare si evidenzia il ruolo rilevante della frazione fine delle

miscele piroclastiche nello stabilizzare condizioni di fluidizzazione omogenea e nel ritardare il collasso della sospensione fluidizzata. Il confronto dei risultati ottenuti nelle prove di collasso con le due tecniche di rilevazione della dinamica del letto, quella basata sulle misure di pressione e quella basata sull'analisi mediante videoripresa veloce delle variazioni di altezza del letto, mostrano risultati differenti. In particolare la tecnica basata sulla misura di pressione suggerisce tempi di rilassamento del segnale sistematicamente inferiori rispetto ai tempi caratteristici individuati con la tecnica di videoripresa. E' plausibile che il ruolo delle interazioni particella-particella intervenga nel determinare le differenze osservate. In ogni caso i tempi di collasso di miscele tal quali risultano variabili da alcuni secondi ad alcune decine di secondi in dipendenza delle condizioni sperimentali.

**ENTITÀ ED INFLUENZA DEI FENOMENI DI GENERAZIONE DI PARTICOLATO FINE PER ABRASIONE MECCANICA NEL CORSO DELLA FLUIDIZZAZIONE.**

Una campagna sperimentale è stata specificamente diretta ad una valutazione preliminare dell'entità dei fenomeni di abrasione subiti da materiale piroclastico nel corso della fluidizzazione. L'entità dei fenomeni di abrasione meccanica risulta significativa, soprattutto quando i risultati ottenuti nell'apparecchiatura di laboratorio siano riesaminati alla luce delle effettive e molto maggiori potenze meccaniche per unità di massa del sistema granulare che sono dissipate nel moto rapido della corrente piroclastica in condizioni realistiche. Anche alla luce di quanto osservato circa il ruolo della frazione fine nel determinare la qualità della fluidizzazione, è plausibile che la generazione di particolato fine per abrasione meccanica durante la propagazione di correnti piroclastiche dense giochi un ruolo rilevante nel determinare le condizioni di fluidizzazione e la mobilità della corrente stessa.

### **INFLUENZA DEL FLUSSO DI SCORRIMENTO SULLA QUALITÀ DELLA FLUIDIZZAZIONE.**

Esperimenti di fluidizzazione di miscele piroclastiche sono stati condotti in un'apparecchiatura a cilindri verticali coassiali in condizioni nelle quali il cilindro interno è posto in rotazione a velocità angolari prestabilite. Tali esperimenti sono stati espressamente progettati per porre in evidenza il possibile ruolo che una componente di flusso di scorrimento svolge nel determinare la qualità della fluidizzazione. Una prima campagna sperimentale è stata svolta mantenendo il cilindro interno immobile, al fine di verificare gli effetti sui parametri della fluidizzazione del confinamento del letto. E' apparso che gli effetti del confinamento, pur rilevabili, sono modesti. Le prove condotte con il cilindro interno in moto rotatorio, ovvero in condizioni di flusso di scorrimento, hanno evidenziato come quest'ultimo contribuisca alla soppressione del regime di fluidizzazione bollente ed alla stabilizzazione di una condizione di fluidizzazione omogenea del letto. Tale effetto risulta marcato sia per miscele tal quali, contribuendo ad espandere l'intervallo di velocità superficiali in cui la fluidizzazione si manifesta omogenea senza formazione di bolle, sia per frazioni granulometriche esenti da fini ottenute dalle miscele originarie.

L'insieme dei risultati sperimentali presentati nel lavoro di tesi ha suggerito che l'instaurarsi dello stato di fluidizzazione nei granulati estratti da piroclastiti naturali è controllato da:

- Polidispersità per dimensioni delle particelle che costituiscono la miscela;
- presenza all'interno della miscela di materiale di dimensioni inferiori a 100  $\mu\text{m}$ ;
- presenza all'interno della miscela di particelle di densità inferiore o uguale a 1  $\text{g/cm}^3$ ;
- instaurarsi di un flusso di scorrimento.

Il permanere dello stato di fluidizzazione si è rivelato, invece, funzione della:

- percentuale, tra i componenti la fase solida, di materiale di dimensioni inferiori a 100  $\mu\text{m}$  presenti all'inizio della sperimentazione;
- percentuale, tra i componenti la fase solida, di materiali di dimensioni inferiori a 100  $\mu\text{m}$  prodotti durante la sperimentazione;
- percentuale, tra i componenti la fase solida, di particelle di densità inferiore o uguale a 1  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;
- persistenza della condizione di flusso di scorrimento.

Al fine di ipotizzare un parallelo tra il comportamento alla fluidizzazione delle miscele di granulati naturali di origine piroclastica e quello che accade in condizioni naturali quando una corrente di densità piroclastica ha origine da un vulcano, appare opportuno richiamare i caratteri delle miscele selezionate per la sperimentazione. Sembra, altresì, necessario sottolineare i limiti imposti dall'apparato sperimentale, che non ha consentito di analizzare il comportamento fluidodinamico dei depositi tal quale. È quindi necessario tenere conto della grossa approssimazione che sottende al considerare le miscele fluidizzate come rappresentative di una corrente piroclastica.

Le miscele estratte dal deposito da caduta dell'eruzione di Avellino sono miscele polidisperse per densità; esse contengono, infatti, una percentuale confrontabile di frammenti a densità 2.5  $\text{g}/\text{cm}^3$  e di frammenti a densità minore di 1  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Per quanto riguarda le dimensioni, esse presentano una moda prevalente sulle classi più grossolane. I clasti che costituiscono tali miscele, avendo subito una deposizione per *rain-off* e, di conseguenza, nessun tipo di trasporto relativo, presentano spigoli vivi sia nella frazione juvenile che in quella litica. Tenuto conto che la maggior parte dei depositi piroclastici da flusso si originano per il collasso della stessa colonna pliniana che mette in posto i depositi da caduta, si può ritenere, con buona approssimazione, che nel momento in cui il flusso piroclastico si origina i clasti che lo costituiscono abbiano le stesse caratteristiche morfologiche di quelli della miscela Avellino Fall.

Le miscele estratte dal deposito da flusso piroclastico dell'eruzione di Avellino sono miscele polidisperse primariamente per dimensioni e, in minor misura, per densità. Il deposito, infatti, è decisamente polimodale anche se, grazie alla sua origine puramente magmatica, non è notevolmente arricchito in materiale sottile. Le miscele estratte da questo deposito, di contro, contengono una frazione ridotta (circa il 30%) di frammenti a densità  $2.5 \text{ g/cm}^3$ , per cui predomina in esse la frazione a bassa densità. I clasti che costituiscono tali miscele presentano un buon grado di arrotondamento, connesso al trasporto in massa, e alle conseguenti abrasioni relative tra granuli, subite dagli elementi prima e durante della messa in posto. I materiali prelevati in località S. Sebastiano al Vesuvio dal deposito da flusso piroclastico collegato all'eruzione di Avellino rappresentano un flusso piroclastico che scorre in prossimità del vent.

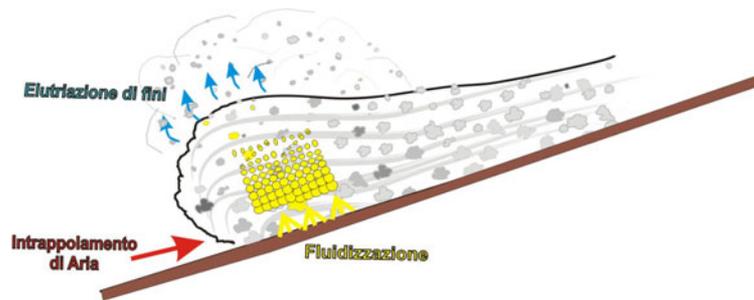
Le miscele estratte dal deposito della facies incoerente del Tufo Giallo Napoletano si presentano pressoché omogenee per densità. La frammentazione è molto spinta per cui le mode delle miscele sono spostate sulle classi granulometriche più fini. La densità dei clasti vetrosi (*shard*) e dei rari frammenti di litici e cristalli sono tra loro confrontabili. In natura tale deposito può essere considerato una corrente piroclastica diluita, per cui le miscele da esso estratte sono comparabili con la fase granulare di un flusso che ha già depositato gran parte del carico solido.

Dopo la fase sperimentale, si può tentare di leggere i risultati del comportamento fluidodinamico delle varie miscele in parallelo con le dinamiche che si registrano durante la propagazione di una corrente piroclastica, alla luce del modello qui proposto per l'instaurarsi della condizione di autofluidizzazione.

In questa chiave si può affermare che, partendo dallo schema generale di origine di una corrente piroclastica per collasso di una colonna sostenuta, è possibile riconoscere tre stadi:

1. il materiale originario è costituito da una notevole quantità di clasti grossolani e contiene componenti

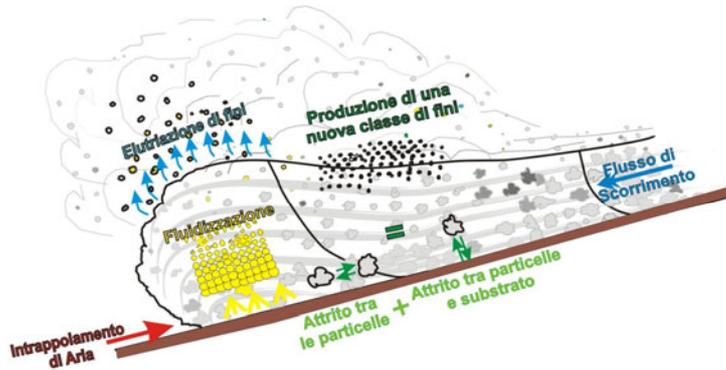
volatili che rappresentano la fase gassosa della colonna collassante (gas primari). La fase solida della corrente in questo stadio si presenta polidispersa per densità e con mode sulle classi granulometriche grossolane. Tenendo conto dei già citati fattori di scala introdotti dalla sperimentazione, il comportamento della miscela può, in buona approssimazione, essere paragonato a quello della miscela Avellino Fall utilizzata nella fase sperimentale. La relativamente bassa percentuale di materiale fine non permette l'instaurarsi di scambi di quantità di moto tra fase solida e gassosa, che vanno a favorire l'autofluidizzazione, vive, in questa fase, quindi, sarebbe controllata dall'elevato contenuto in gas primari (figura 6.1).



**Figura 6.1:** Schema di una corrente piroclastica – stadio 1.

2. Durante la propagazione della corrente piroclastica, si produce, per abrasione dei clasti iuvenili, una nuova frazione di particelle sottili e contemporaneamente, una buona percentuale del materiale grossolano e denso tende a sedimentare. Queste due concause comportano un arricchimento di fini del flusso piroclastico. La fase solida della corrente in questo stadio si presenta polidispersa primariamente per dimensioni e, in minor misura, per densità. Il suo comportamento può, in buona approssimazione, essere paragonato a quello della miscela Avellino Flow utilizzata nella fase sperimentale.

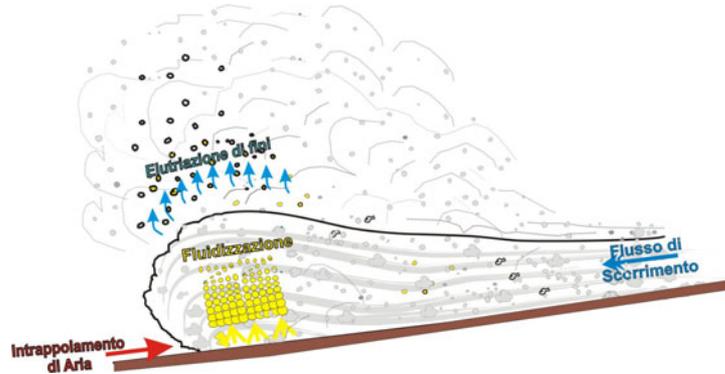
La notevole percentuale di fini fa sì che la miscela richiede minori velocità del gas per raggiungere lo stato di fluidizzazione e, favorendo gli scambi di quantità di moto tra la frazione solida e quella gassosa, permette l'instaurarsi dell'autofluidizzazione (figura 6.2).



**Figura 6.2:** Schema di una corrente piroclastica – stadio 2.

3. Nelle correnti piroclastiche in cui la percentuale di particelle fini è notevolmente elevata, la fase solida si comporta come una miscela pressoché omogenea per densità, e con mode spostate sulle frazioni sottili. Il suo comportamento può, in buona approssimazione, essere paragonato a quello della miscela Tufo Giallo Napoletano. In questo caso la velocità dei gas necessaria per raggiungere lo stato di fluidizzazione diminuisce ulteriormente. Gli scambi di quantità di moto tra la fase solida e quella gassosa divengono prevalenti e il fenomeno dell'autofluidizzazione consente alla corrente di rimanere fluidizzata anche se la percentuale di gas primari è estremamente ridotta questa evidenza sperimentale, che in condizioni naturali si traduce in una maggiore mobilità per le correnti piroclastiche ricche in fini potrebbe concorrere a spiegare perché, in

corrispondenza di fenomeni disaccoppiamento, le correnti piroclastiche più diluite associate a flussi densi, raggiungono distanze maggiori e acquisiscono capacità di scavalcare piccoli alti topografici (figura 6.3).



**Figura 6.3:** Schema di una corrente piroclastica – stadio 3.

Dall'analisi dei risultati della sperimentazione sulle miscele si può, in sintesi, dedurre che la mobilità di una corrente piroclastica dipende dalla concomitanza di due fattori che entrambi concorrono a favorire gli scambi di quantità di moto tra la fase solida e quella gassosa: la polidispersità per dimensioni e l'abbondanza di particelle fini.

Dalle evidenze sperimentali emerse durante le prove è risultato che la produzione di materiale sottile (abbondanza di fini), e la conseguente variazione della distribuzione granulometrica dei costituenti i materiali di partenza (polidispersità), si arrestano dopo un certo intervallo di tempo dall'inizio della prova, quando la miscela segrega al fondo la frazione più grossolana e/o più densa. Il riflesso in condizioni naturali di questa fenomenologia, si traduce nel fatto che nel momento in cui una corrente durante il proprio percorso diventi omogenea per dimensioni, a causa della sedimentazione dei clasti relativamente più grossolani, il flusso si arresta in quanto viene a mancare la polidispersità, e con essa uno dei fattori che favorivano l'autofluidizzazione.

Il ruolo della frazione fine quale fattore che aumenta la capacità di propagazione di una corrente piroclastica, emerso dalla

presente ricerca, rappresenta uno spunto per interpretare sotto una nuova luce le dinamiche deposizionali di molti tipi di depositi da corrente piroclastica arricchiti in frazione sottile (*base surge, ash cloud surge*).

## BIBLIOGRAFIA

Alessio M., Bella F., Improta S. Belluomini, G. Cortesi, C. Turi B. (1973) UNIVERSITY OF ROME CARBON-14 DATES X. Radiocarbon 15(1):165-178.

Allen J.R.L. (1982) DEVELOPMENTS IN SEDIMENTOLOGY. Volume 30 A & B: "Sedimentary structures. Their character and physical basis" Amsterdam Elsevier press.

Apicella E., D'Amore M., Tardos G., Mauri R. (1997) ONSET OF INSTABILITY IN SHEARED GAS FLUIDIZED BEDS. AIChE Journal 43:78-82.

Bagnold R.A. (1954) EXPERIMENTS ON A GRAVITY-FREE DISPERSION OF LARGE SOLID SPHERES IN A NEWTONIAN FLUID UNDER SHEAR. Proceedings of the Royal Society, 225:49-63.

Bagnold R.A. (1966) THE SHEARING AND DILATATION OF DRY SAND AND THE "SINGING" MECHANISM. Proceedings of the Royal Society 295:219-232.

Bareschino P. (2005) comunicazione personale.

Branney M.J., Kokelaar P. (1992) A REAPPRAISAL OF IGNIMBRITE EMPLACEMENT PROGRESSIVE AGGRADATION AND PARTICULATE TO NON-PARTICULATE FLOW TRANSITION DURING EMPLACEMENT OF HIGH GRADE IGNIMBRITE. Bulletin of Volcanology 54:504-520.

Cas R.A.F., Wright J.V. (1987) VOLCANIC SUCCESSION. Chapman & Hall, London p.651.

Campbell C.S. (1990) RAPID GRANULAR FLOWS. Annual Review of Fluid Mechanics 22:57-92.

Campbell C.S. (2002) GRANULAR SHEAR FLOWS AT THE ELASTIC LIMIT. Journal of Fluid Mechanics 465:261-291.

Campbell C.S. (2004) GRANULAR FLOWS AND GAS-FLUIDIZATION. Fluidization XI p. 21-35.

Cherntongchai P., Brandani S. (2005) A MODEL FOR THE INTERPRETATION OF THE BED COLLAPSE EXPERIMENT. *Powder Technology* 151:37– 43.

Deino A. L., Orsi G., de Vita S., Piochi M. (2004) THE AGE OF THE NEAPOLITAN YELLOW TUFF CALDERA-FORMING ERUPTION (CAMPI FLEGREI CALDERA - ITALY) ASSESSED BY <sup>40</sup>AR/<sup>39</sup>AR DATING METHOD. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 133:157-170.

Dobran F., Neri A., Macedonio G. (1993) NUMERICAL SIMULATION OF COLLAPSING VOLCANIC COLUMNS. *Journal of Geophysical Research* 98:285-311.

Di Pastena V. (1997) ASPETTI FLUIDODINAMICI DEI PYROCLASTIC FLOW. Università degli studi “Federico II” di Napoli, Dottorato di ricerca in geofisica a vulcanologia p. 92.

Druitt T.H., Bruni G., Lettieri P., Yates J.G. (2004) THE FLUIDIZATION BEHAVIOUR OF IGNIMBRITE AT HIGH TEMPERATURE AND WITH MECHANICAL AGITATION. *Geophysical Research Letter* No. 2, L02604 10.1029/2003GL018593.

Fisher R.V. (1966) MECHANISM OF DEPOSITION FROM PYROCLASTIC FLOW. *American Journal Society* 264:350-363.

Fisher R.V. (1983) FLOW TRANSFORMATIONS IN SEDIMENT GRAVITY FLOWS. *Geology* 11:273-274

Fisher R.V. (1986) SYSTEM OF TRANSPORT AND DEPOSITION WITHIN PYROCLASTIC SURGES: EVIDENCES FROM MT. ST. HELENS, WASHINGTON. *EOS* 67:1246-1259

Fisher R.V. (1995) DECOUPLING OF PYROCLASTIC CURRENTS: HAZARD ASSESSMENT. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 66:257-263 .

Geldart D. (1973) TYPES OF GAS FLUIDIZATION. *Powder Technology* 7: 285.

Geldart D., Wong A.C. Y. (1985) FLUIDIZATION OF POWDERS SHOWING DEGREES OF COHESIVENESS-II EXPERIMENTS ON RATES OF DEAREATION. *Chemical Engineering Science* 40:663-661.

- Ghadiri M., Cleavert A.S., Tuponogov V.G. (1995) INFLUENCE OF DISTRIBUTOR ORFICE SIZE ON ATTRITION IN THE JETTING REGION OF FLUIDISED BEDS. Proc. Fluidization VIII C. Laguerie and JK.F. Large ed.,Tours, France 799-804.
- Gravina T., Lirer L., Marzocchella A., Petrosino P., Salatino P. (2004) FLUIDIZATION AND ATTRITION OF PYROCLASTIC GRANULAR SOLIDS. Journal of Volcanology and Geothermal Research 138:27-42.
- Goldhirsch I. (2003) RAPID GRANULAR FLOW. Annual Review of Fluid Mecchanics 35:267-293.
- Herbert E., Huppert J., Turner J. S., Carey S. N., Sparks R. S. J., Hallowort M. A. (1986) A LABORATORY SIMULATION OF PYROCLASTIC FLOWS DOWN SLOPES. Journal of Volcanology and Geothermal Research 30:179-199.
- Hopfinger E.J. (1983) SNOW AVALANCHE MOTION AND RELATED PHENOMENA. Annual Review of Fluid Mechanics 15:47-76
- Kent P. E. (1966) THE TRANSPORT MECHANISM IN CATASTROPHIC ROCK FALLS. Journal of Geology 74:79-83.
- Knowlton T. (1977) HIGH-PRESSURE FLUIDIZATION CHARACTERISTICS OF SEVERAL PARTICULATE SOLIDS, PRIMARILY COAL AND COAL-DERIVED MATERIALS. AIChE Symp. Series 73: 22-34.
- Kunii D., Levenspiel O. (1991) FLUIDIZATION ENGINEERING, second edition, Butterworth-Heinemann p. 234.
- Levenspiel O. (1998) ENGINEERING FLOW AND HEAT EXCHANGE. Plenum Press New York and London p.378
- Lorences M. J., Patience G. S., Diez F. V., Coca J. (2003) FINES EFFECTS ON COLLAPSING FLUIDIZED BEDS. Powder Technology 131:234–240.
- Mohrig D., Whipple K.X., Hondzo M., Ellis C., Parker G. (1998).HYDROPLANING OF SUBAQUEOUS DEBRIS FLOWS. Geological Society American Bulletin 110:387– 394.
- Neri A., Dobran F. (1994) INFLUENCE OF ERUPTION PARAMETERS ON THERMOFLUID DYNAMICS OF COLLAPSING VOLCANIC COLUMNS. Journal of Geophysical Research 99:11833-11857.

- Neri A., Macedonio G. (1996) NUMERICAL SIMULATION OF COLLAPSING VOLCANIC COLUMNS WITH PARTICLES OF TWO SIZES. *Journal of Geophysical Research* 101:8153-8174.
- Nezzal A., Large J. F., Guigon P. (1998) FLUIDIZATION BEHAVIOUR OF VERY COHESIVE POWDERS UNDER MECHANICAL AGITATION. *Fluidization VIII* 77-81.
- Olivieri G., Marzocchella A., Salatino P. (2004) SEGREGATION OF FLUIDIZED BINARY MIXTURES OF GRANULAR SOLIDS. *AIChE Journal* 50(12): 3095-3106.
- Ray Y.-C., Jiang T.-S., and Wen C.Y. (1987) PARTICLE POPULATION MODEL FOR A FLUIDIZED BED WITH ATTRITION. *Powder Technology* 52(1): 35-48.
- Roche O., Gilbertson M., Phillips J.C., Sparks R.S.J. (2002) EXPERIMENTS ON DEERATING GRANULAR FLOW AND IMPLICATIONS FOR PYROCLASTIC FLOW MOBILITY. *Geophysical Research Letters* 29 (16) 1792, doi:10.1029/2002GL014819.
- Roche O., Gilbertson M. A., Phillips J. C., Sparks R. S. J. (2004), EXPERIMENTAL STUDY OF GAS-FLUIDIZED GRANULAR FLOWS WITH IMPLICATIONS FOR PYROCLASTIC FLOW EMPLACEMENT. *Journal of Geophysical Research* 109, B10201, doi:10.1029/2003JB002916.
- Rolandi G., Mastrolorenzo G., Barrella A.M., Borrelli A. (1993) THE AVELLINO PLINIAN ERUPTION OF SOMMA VESUVIO (3760 ± 70 Y B. P.): THE PROGRESSIVE EVOLUTION FROM MAGMATIC TO HYDROMAGMATIC STYLE. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 62: 67-88.
- Salatino P. (2003) ASSESSMENT OF MOTION-INDUCED FLUIDIZATION OF DENSE PYROCLASTIC GRAVITY CURRENTS. *Esf Lesc Exploratory Workshop Gases In Magmatic Evolution: From Depth To Atmosphere, From Micro To Macro-Scale, From Calculation To Observation, Rome, Italia 11-13 May 2003.*
- Savage S.B. (1979) GRAVITY FLOW OF COHESIONLESS GRANULAR MATERIALS IN CHUTES AND CHANNELS. *Journal of Fluid Mechanics* 92:53-96.
- Scandone R., Giacomelli L. (1998) *VULCANOLOGIA*. Liguori Editore. p. 635.
- Sheridan M.F. (1979) EMPLACEMENT OF PYROCLASTIC FLOW. *In* Chapin, C.E. and Elston W.E., eds., *Ash-flow tuffs: Geological Society of America Special paper* (180).

Shreve J. (1968) LEAKAGE AND FLUIDIZATION IN AIR-LAYER LUBRICATED AVALANCHES. *Geological society of American Bulletin* 79:653-658.

Simpson J. E. (1982) GRAVITY CURRENTS IN THE LABORATORY, ATMOSPHERE, AND OCEAN. *Annual review of fluid mechanics* 14:213-234.

Sparks R.S.J, Self S, Walker, G.P.L. (1973) PRODUCTS OF IGNIMBRITE ERUPTIONS. *Geology* v1:115-118.

Sparks R.S.J. (1976) GRAIN SIZE VARIATIONS IN IGNIMBRITE AND IMPLICATION FOR THE TRANSPORT OF PYROCLASTIC FLOWS. *Sedimentology* 23:147-188.

Takahashi T., Tsujimoto H. (2000) A MECHANICAL MODEL FOR MERAPI-TYPE PYROCLASTIC FLOW. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 98: 91-115.

Todesco M., Neri A., Esposti Ongaro T., Papale P., Macedonio G., Longo A. (2002) PYROCLASTIC FLOW HAZARD ASSESSMENT AT VESUVIUS (ITALY) BY USING NUMERICAL MODELING. I LARGE SCALE DYNAMICS. *Bulletin Volcanology* 64:155-177.

Valentine G., Wohletz K. (1989) ENVIRONMENTAL HAZARD OF PYROCLASTIC FLOWS DETERMINED BY NUMERICAL MODELS. *Geology* 17:641-644.

Valentine G., Wohletz K. (1989) NUMERICAL MODELS OF PLINIAN ERUPTION COLUMNS AND PYROCLASTIC FLOW. *Journal of geophysical Research* 94:1867-1887

Valentine G., Wohletz K., Kieffer S. (1991) SOURCES OF UNSTEADY COLUMN DYNAMICS IN PYROCLASTIC FLOW ERUPTIONS. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 96:887-892

Valentine G.A., Wohletz K.H, Kieffer S.W. (1992) EFFECTS ON TOPOGRAPHY ON FACIES AND COMPOSITIONAL ZONATION IN CALDERA-RELATED IGNIMBRITES. *Geological Society American Bulletin* 104:154-165.

Von Karman F. (1940) THE ENGINEER GRAPPLES WITH NON LINEAR PROBLEMS. *Bulletin of American Mathematics society* 46:615-683.

Yerushalmi J. e Avidan A. (1985) HIGH-VELOCITY FLUIDIZATION. in *Fluidization, 2<sup>nd</sup> Ed.* 225-291.

Wilson C.J.N., Walker G.P.L. (1982) IGNIMBRITE DEPOSITIONAL FACIES: THE ANATOMY OF A PYROCLASTIC FLOW. *Journal of Geological Society London* 139:581-592.

Wilson C.J.N. (1980) THE ROLE OF FLUIDIZATION IN THE EMPLACEMENT OF PYROCLASTIC FLOW: AN EXPERIMENTAL APPROACH. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 8:231-249.

Wilson C.J.N. (1984) THE ROLE OF FLUIDIZATION IN THE EMPLACEMENT OF PYROCLASTIC FLOW.2. EXPERIMENTAL RESULTS AND THEIR INTERPRETATION. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 20:55-84.

Win K.K., W. Nowak H., Matsuda M., Hasatani Z., Bis J., Krzywanski M., Gajewski W. (1995) TRANSPORT VELOCITY OF COARSE PARTICLES IN MULTI-SOLID FLUIDIZED BED. *Journal of Chemical Engineering of Japan* 28:535-541.

Woods A., Bursik I.B. (1994) A LABORATORY STUDY OF ASH FLOWS. *Journal of geophysical Research* b3:4375-4394.

## GRAZIE...

*Al prof. Lucio Lirer senza il cui fondamentale aiuto questo lavoro non sarebbe esistito.*

*Al prof. Piero Salatino, per la sua grande disponibilità e per avere creduto in questa ricerca.*

*Alla Dott. Paola Petrosino, che mi ha aiutato con i più disparati problemi, e per una lunga serie di utili consigli.*

*Al prof. Antonio Marzocchella, per avermi aiutato a risolvere dubbi e problemi di carattere tecnico.*

*A Sabato Masi per avere effettuato le prove di porosimetria a mercurio.*

*A mio padre, Michele ed Enzo (mio cuGGino) che mi hanno aiutato nella parte più dura e scoccante del lavoro, prelevare (sgraffignare) i campioni.*

*All'ing. Piero Breschino, (mio compagno di sventure piroclastiche) che è stato di fondamentale aiuto, nel corso della messa a posto dell'impianto, e per le discussioni sulle metodologie sperimentali.*

*Alla Dott. Patrizia Daniele, per avermi fornito le foto e le analisi granulometriche dei depositi piroclastici, e per la compagnia nel box.*

*All'ing. Antonella Di Iorio, che tante volte mi ha ascoltato e tirato su di morale quando ero immersa nella polvere delle mie pomici.*

*A tutti i compagni di laboratorio (e di merende), Peppe, Mariaelena, Fabiana, Roberto, Gianfranco, Nando, Dario, Antonello, Nicola, Fabio sempre pronti a dare una mano, e a farmi sorridere.*

*Alla mia amica Dott. Annarita Saccone per la rilegatura della tesi.*