



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

**Dipartimento di Ingegneria Industriale DII**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica

**SVILUPPO E MONITORAGGIO DI SMOULDERING COMBUSTION  
DI BIOMASSE**

Relatore: Prof. Paolo Canu

Correlatori: Ing. Alberto Biasin

Ing. Micol Della Zassa

Laureando: Gianfranco Gianfelice

Matricola: 1085880

Anno Accademico 2015/2016



# Abstract

The aim of this work is the understanding of the behaviour and development of smouldering combustion. It is defined as a slow form of combustion, occurring flameless and mainly, at low temperatures.

The Smouldering combustion is a phenomenon whose fundamentals remain mostly unknown and it can produce severe damages when it evolves not controlled. For instance, it justifies extensive fires in storages of organic material including coal. On the other hand it could be exploited as a technique of remediation of contaminated soil, as well as way to degrade sludge and waste produced by the treatment of waste water, because smouldering can start with very small heat sources and later evolve in a self-sustained way, reducing industrial cost for final treatment and disposal.

In this work the information extracted from the investigation of smouldering processes is discussed. Specifically, the behaviour of smouldering combustion occurring in a porous matrix of biomass (pine bark), as well as in biomass mixed with sand, are studied. These porous media were characterized in term of different porosity and permeability, mainly varying the grain size of the material particles. These properties were monitored during the front propagation and it has been analyzed how they affected pressure drops, gradients of temperature, burning speed and the smouldering ignition.



# Riassunto

L'obiettivo di questo lavoro è quello di comprendere ed approfondire il fenomeno dello smouldering, analizzarne il comportamento e monitorarne lo sviluppo, in funzione di alcuni parametri fisico-chimici. Lo smouldering, o smouldering combustion, è definito come una forma di combustione lenta, che si manifesta senza fiamma, principalmente a basse temperature, che è in grado di autosostenersi nel tempo, sfruttando la natura combustibile del materiale solido interessato dal fenomeno.

Lo Smouldering è un processo ancora poco conosciuto e poco investigato che però è ragionevolmente associato all'insorgere di seri danni qualora non sia controllato. Ad esempio, lo smouldering è associato al verificarsi di vasti incendi in stoccaggi di materiale organico, come nel caso di carbone. D'altra parte, esso costituisce una potenziale alternativa di processo da sfruttare in bonifiche di terreni contaminati, o nel degradamento di fanghi e di rifiuti provenienti dal trattamento di acque reflue. Questo per via della capacità di autosostenersi, dopo un minimo quantitativo di energia necessario per l'innescò del fenomeno.

Nel presente lavoro di tesi vengono discusse le informazioni estratte dallo studio dello smouldering. In particolare, è stato analizzato il comportamento della smouldering combustion in una matrice porosa costituita da biomassa (corteccia di pino), così come una miscela biomassa e sabbia. Questi mezzi porosi sono stati caratterizzati in termini di differenti porosità e permeabilità iniziale, principalmente variando la granulometria del materiale. Queste proprietà sono state monitorate durante la propagazione del fronte e è stato studiato come loro influenzano le perdite di carico, i gradienti di temperatura, la velocità di propagazione e l'innescò dello smouldering.



# Introduzione

## Motivazione

"A case can be made for fire being, next to the life processes, the most complex of phenomena to understand" (Hoyt C. Hottel, 1984).

Molti materiali solidi granulari, in forma di polvere, hanno una propensione a processi di autocombustione che si innescano molto lentamente e possono procedere senza manifestazione di fiamma (Smouldering Combustion), come le braci di un focolare o una sigaretta. Questa evenienza può determinare l'evoluzione verso grossi incendi incontrollabili in presenza di adeguato materiale.

Il fenomeno è molto diffuso e giustifica incendi in stoccaggi di materiale organico, come di carbone, nei sottoboschi e molti altri fenomeni.

Lo smouldering, o smouldering combustion, è definito come una forma di combustione lenta, che si manifesta a basse temperature, principalmente senza fiamma, che è in grado di autosostenersi nel tempo.

È evidentemente un fenomeno chimico ma che richiede proprietà di scambio termico e di trasferimento di ossidante adeguate, in un delicato bilancio, nel quale ha un ruolo determinante la porosità e la permeabilità del cumulo e la sua reattività chimica.

È un processo che, se controllato, costituisce una potenziale alternativa di processo da sfruttare in bonifiche di terreni contaminati, o nel degradamento di fanghi e di rifiuti provenienti dal trattamento di acque reflue. Infatti sono state sviluppate tecnologie che sfruttano uno dei vantaggi del fenomeno, ossia la capacità di autosostenersi, dopo un minimo quantitativo di energia necessario per l'innescò e sfruttando la natura combustibile del materiale solido interessato.

## Obiettivi

In questa tesi si è preso in considerazione lo sviluppo della Smouldering Combustion di biomasse, in particolare corteccia di pino (Pine Bark). Per condurre questo lavoro sono state monitorate le perdite di carico e l'andamento della temperatura

in un reattore riempito con materiale combustibile. Sono stati utilizzati modelli dalla teoria dei mezzi porosi (i.e. Darcy, Ergun) costituiti da materiali solidi in polvere. L'obiettivo principale è quello di indagare come lo Smouldering viene influenzato dalla permeabilità e porosità del letto poroso e come il processo evolve in diverse condizioni operative. Il software  $\text{\textcircled{R}}\text{COMSOL Multiphysics}$  è stato uno strumento di supporto per simulare e modellare le caratteristiche fluidodinamiche attraverso il mezzo poroso costituito dalla biomassa combustibile.

## **Struttura della tesi**

Il lavoro è articolato in più capitoli.

Il primo Capitolo riporta lo stato dell'arte, dalle applicazioni ai possibili pericoli che può costituire la Smouldering combustion. Vengono elencate le diverse proprietà fisiche che influenzano il fenomeno e viene descritta la cinetica che lo governa.

Nel secondo Capitolo vengono presentate le nozioni principali sulla teoria dei mezzi porosi, descrivendo alcuni dei modelli più conosciuti presenti in letteratura. Sono riportate informazioni e correlazioni per determinare le caratteristiche di un mezzo binario, composto cioè da due materiali con differente granulometria.

Nel Capitolo Tre si descrivono gli apparati sperimentali impiegati, i materiali, i metodi e lo studio preliminare. Viene introdotto in particolare un metodo alternativo per la determinazione della porosità iniziale di un mezzo poroso.

Il Capitolo Quattro riporta gli studi sperimentali condotti nel laboratorio di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova. Dopo una prima parte relativa alla caratterizzazione iniziale di ciascun test, vengono analizzati in maniera critica i risultati ottenuti, effettuando confronti tra test diversi.

Nel quinto Capitolo viene introdotto il software utilizzato per implementare il modello e le fisiche impiegate. Viene in particolare riprodotto la geometria del mezzo poroso e verificata la caratterizzazione iniziale fatta per i test sperimentali, attraverso simulazioni fluidodinamiche.

Il Capitolo finale rappresenta le conclusioni di questa tesi.



# Indice

<b>1</b>	<b>Analisi Critica dello Stato dell'Arte</b>	<b>15</b>
1.1	Smouldering Combustion . . . . .	15
1.2	Applicazioni e controllo . . . . .	17
1.3	Influenza di diversi parametri . . . . .	20
1.4	Equazioni di governo del fenomeno . . . . .	22
1.4.1	Cinetica . . . . .	22
<b>2</b>	<b>Teoria sui mezzi porosi</b>	<b>25</b>
2.1	Introduzione ed esempi . . . . .	25
2.2	Proprietà dei mezzi porosi . . . . .	26
2.3	Leggi per mezzi porosi . . . . .	28
2.3.1	Modello di Darcy ed estensioni . . . . .	28
2.3.2	Modello di Ergun . . . . .	29
2.3.3	Equazioni per il campo di temperatura . . . . .	30
2.4	Letto granulare composto da particelle differenti . . . . .	31
2.4.1	Proprietà . . . . .	32
<b>3</b>	<b>Studio sperimentale</b>	<b>35</b>
3.1	Descrizione dell'apparecchiatura sperimentale . . . . .	35
3.2	Strumentazione di misura . . . . .	36
3.3	Materiali utilizzati . . . . .	39
3.4	Validazione sperimentale e analisi preliminare . . . . .	42
3.5	Geometria impianto sperimentale . . . . .	47
<b>4</b>	<b>Risultati sperimentali</b>	<b>51</b>
4.1	Esperimenti e caratterizzazione iniziale del mezzo poroso . . . . .	51
4.2	Temperatura e perdite di carico . . . . .	53
4.2.1	Aggiunta di inerte con granulometria e quantità differenti . . . . .	56
4.2.2	Stratificazione biomassa/sabbia . . . . .	61
4.2.3	Compattazione del letto poroso . . . . .	64
4.2.4	Ripetibilità e limiti dei test sperimentali . . . . .	67

4.3	Conclusioni . . . . .	70
<b>5</b>	<b>Simulazione della fluidodinamica nel letto poroso</b>	<b>71</b>
5.1	Geometria del modello . . . . .	72
5.2	Definizione del modello . . . . .	72
5.3	Studio e risultati . . . . .	73
<b>6</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>77</b>
<b>7</b>	<b>Lista dei Simboli</b>	<b>79</b>

# Elenco delle figure

1.1	I due regimi di combustione: con fiamma (flaming) e Smouldering, [1] . . . . .	16
1.2	Upward - Downward Smouldering, [2] . . . . .	17
1.3	Propagazione dello smouldering . . . . .	18
2.1	Dipendenza di $k_{bp}/k_d$ dal rapporto dei diametri $\delta$ . Nella figura vengono indicati 5 modelli differenti per descrivere la variazione, per approfondimenti si rimanda all'articolo di Dias et al.[44]. . . . .	33
2.2	Schematizzazione di un mezzo poroso a strati. . . . .	34
3.1	Reattore tubolare in acciaio: diametro interno 3.6cm; lunghezza 50cm. . . . .	37
3.2	Reattore tubolare in quarzo: diametro interno 1.05cm; lunghezza 43cm. . . . .	37
3.3	Reattore tubolare in acciaio: diametro interno 4cm; lunghezza 30cm. . . . .	38
3.4	Supporto interno al reattore. . . . .	38
3.5	Termocoppia (TC) Multipoint. . . . .	38
3.6	Sensori di pressione. . . . .	39
3.7	Materiale per la fase di validazione sperimentale. . . . .	40
3.8	Sfere di ferro: diametro 1cm. . . . .	41
3.9	Corteccia di pino (Pine Bark). . . . .	41
3.10	Materiale inerte. . . . .	43
3.11	Calibrazione del trasduttore di pressione differenziale, grafico Perdite di carico [mbar]-Tensione in uscita [V]. . . . .	43
3.12	Confronto delle perdite di carico sperimentali con il modello di Ergun. . . . .	45
3.13	TP-1: Verifica della capacità di autosostenersi dello Smouldering. . . . .	47
3.14	TP-2: Analisi termica (Temperatura nel punto centrale della zona reattiva) al variare della rampa di riscaldamento (HR). Aria insufflata a 1000ml/min e $T_{set} = 250^{\circ}\text{C}$ . . . . .	48

3.15	TP-3: Profili di temperatura con fasce riscaldanti attive nella parte superiore e inferiore del reattore, combustibile caricato misto a sabbia di tipo B, aria insufflata dall'alto a $1000\text{ml}/\text{min}$ , $T_{set} = 300$ °C. . . . .	48
3.16	TP-4: Comportamento termico del reattore con $T_{set} = 300$ °C. . . . .	49
3.17	Geometria del reattore con PB. . . . .	50
4.1	Permeabilità iniziale. . . . .	54
4.2	TS-base. . . . .	55
4.3	Confronto profili termici e perdite di carico: TS-A. . . . .	57
4.4	Velocità di propagazione dell'onda termica: TS-A. . . . .	58
4.5	Confronto profili termici e perdite di carico: TS-B. . . . .	58
4.6	Velocità di propagazione dell'onda termica: TS-B. . . . .	59
4.7	Confronto profili termici e perdite di carico: TS-C. . . . .	59
4.8	Confronto perdite di carico nel tempo: TS-base, TS-A, TS-B, TS-C. . . . .	60
4.9	Confronto della temperatura media nel tempo: TS-base, TS-A, TS-B, TS-C. . . . .	61
4.10	Confronto delle perdite di carico in funzione della temperatura media: TS-base, TS-A, TS-B, TS-C. La freccia verso destra indica riscaldamento, l'altra il raffreddamento del solido. . . . .	62
4.11	Permeabilità: TS-base, TS-A, TS-B, TS-C. . . . .	62
4.12	Confronto della temperatura media nel tempo: TS-base, TS-D, TS-B. . . . .	63
4.13	Velocità di propagazione dell'onda termica: TS-D. . . . .	63
4.14	Geometria del reattore: TS-E. . . . .	65
4.15	Temperatura e perdite di carico, TS-E. . . . .	66
4.16	Confronto delle perdite di carico nel tempo: TS-base, TS-B, TS-E. . . . .	66
4.17	Permeabilità nel tempo: TS-E. . . . .	67
4.18	Temperatura e perdite di carico, TS-F. . . . .	68
4.19	Confronto delle perdite di carico nel tempo: TS-base, TS-B, TS-F. . . . .	68
4.20	Permeabilità nel tempo: TS-B e TS-F. . . . .	69
4.21	Velocità di propagazione dell'onda termica: TS-F. . . . .	69
5.1	Geometria utilizzata in Comsol. Vista laterale. . . . .	72
5.2	Mesh Modello Comsol . . . . .	74
5.3	Confronto dati sperimentali con Modello Comsol: PB. . . . .	75
5.4	Confronto dati sperimentali con Modello Comsol: PB-sabbia A. . . . .	75
5.5	Confronto dati sperimentali con Modello Comsol: PB-sabbia B. . . . .	76
5.6	Confronto dati sperimentali con Modello Comsol: PB-sabbia C. . . . .	76

# Elenco delle tabelle

3.1	Analisi granulometrica del PB. . . . .	42
4.1	Condizioni dei test sperimentali. . . . .	52
4.2	Caratterizzazione della porosità iniziale dei materiali (confronto con Modello di Ergun). *stime medie su un campione di più test .	52
4.3	Caratterizzazione test al tempo iniziale. . . . .	53



# Capitolo 1

## Analisi Critica dello Stato dell'Arte

### 1.1 Smouldering Combustion

Lo Smouldering è una forma di combustione lenta, a basse temperature, senza fiamma, che è in grado di autosostenersi. Tale processo è limitato dalla velocità con la quale l'ossigeno diffonde all'interno della superficie del combustibile solido. Un esempio familiare di Smouldering è il caso della sigaretta accesa, che ha caratteristiche comuni alla maggior parte dei materiali che bruciano senza fiamma. Le particelle di combustibile hanno una grande superficie per unità di massa e ciò facilita l'attacco superficiale da parte dell'ossigeno. Infatti la natura permeabile dell'aggregato di particelle di combustibile permette il trasporto di ossigeno al sito di reazione per diffusione e convezione. Allo stesso tempo, tali sistemi di particelle formano tipicamente isolanti termici abbastanza efficaci che limitano le dispersioni di calore, permettendo alla combustione di autosostenersi, nonostante la velocità di rilascio del calore sia piuttosto lenta [3].

La differenza fondamentale tra lo Smouldering e la combustione con fiamma è che, nel primo caso, la reazione di ossidazione e il rilascio di calore avviene sulla superficie del solido mentre, nel secondo caso, ciò si ha nella fase gassosa intorno al combustibile [1].

Nella Figura 1.1 si possono osservare e distinguere i due regimi su un combustibile di natura lignocellulosa. La temperatura caratteristica, la velocità di avanzamento e il calore rilasciato nel fenomeno di Smouldering sono inferiori rispetto ai valori propri della combustione con fiamma. Tipicamente si raggiungono temperature di picco intorno ai 500 – 700 °C e 6 – 12 kJ/g di entalpia di combustione media. Per queste caratteristiche lo Smouldering procede con velocità di propa-



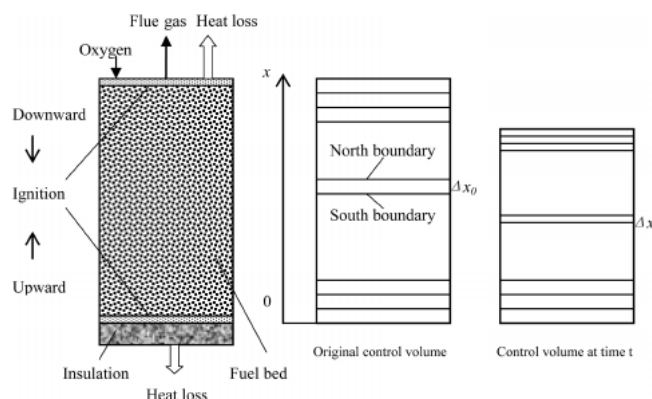
**Figura 1.1:** I due regimi di combustione: con fiamma (*flaming*) e *Smouldering*, [1]

gazione lente, intorno a 10 – 30 mm/h, contro velocità di fiamma di due ordini di grandezza maggiori.

La transizione, dallo *Smouldering* alla formazione della fiamma, avviene sostanzialmente in maniera spontanea e richiede che vi siano miscele di combustibile e comburente nei limiti di infiammabilità e una quantità di energia opportuna. Quindi, la transizione può essere causata da un'innesco nella fase gassosa del solido, favorita ad esempio dallo *smouldering* stesso. Infatti tale fenomeno produce combustibili gassosi e rilascia energia termica a sufficienza per innescare combustioni con fiamma. In particolare, nei materiali ricchi di cellulosa, la transizione è maggiormente correlata all'ossidazione secondaria del carbone, tipica reazione che segue il fronte dello *smouldering*, sviluppando temperature molto elevate, superiori ai 1000 °C. Tale ossidazione aumenta la porosità del solido e favorisce la possibilità che si formi una miscela in fase gas infiammabile [3, 4]. Normalmente la transizione è favorita quando si ha che il flusso d'ossidante procede nella stessa direzione del fronte, in questo modo i gas caldi generati permettono un preriscaldamento del combustibile a valle.

Nello studio delle modalità di propagazione dello *Smouldering* all'interno della superficie solida del combustibile, si è solito considerare il processo monodimensionale e distinguere due configurazioni: propagazione in avanti (*Forward Flow*) e opposta (*Opposed Flow*), riferendosi al flusso di ossidante in orizzontale. Nella configurazione in cui l'ossigeno e il fronte procedono nella stessa direzione i prodotti caldi investono il combustibile vergine, mentre nella configurazione contraria i prodotti viaggiano attraverso il carbone e le ceneri con ridotti fenome-





**Figura 1.2:** *Upward - Downward Smouldering*, [2]

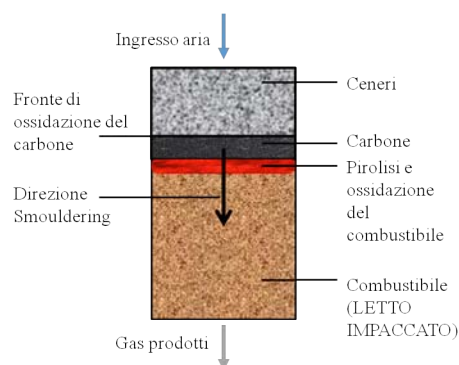
ni di preriscaldamento [1, 5]. Tali configurazioni possono essere riferite anche a flussi monodimensionali disposti in verticale (Upward-Downward Flow), Fig.1.2. In particolare nel caso in cui il fronte procede verso il basso (Downward), nella direzione del flusso d'aria, il processo è controllato principalmente dal trasporto di ossigeno per diffusione, mentre l'altro caso è influenzato maggiormente dalla cinetica della reazione [2].

Analizzando la struttura del fronte, in generale, è possibile distinguere quattro macro regioni:

- zona di preriscaldamento del combustibile vergine, nella quale il calore proveniente dalla reazione permette l'aumento della temperatura locale e l'iniziale evaporazione dell'acqua;
- zona di evaporazione, dove avviene una reazione endotermica tra gli 80 – 100 °C con conseguente perdita di massa funzione del grado di umidità;
- zona di combustione, regione nella quale avvengono le reazioni di pirolisi e ossidazione con rilascio di energia termica e hanno inizio dopo i 200 °C;
- carbone e ceneri, dove lo Smouldering cessa di esistere e si assiste a un progressivo raffreddamento della regione. La presenza di carbone si ha come prodotto di una combustione incompleta [1].

## 1.2 Applicazioni e controllo

Lo Smouldering è un processo ancora poco conosciuto che può condurre al manifestarsi di seri danni se la sua evoluzione procede in modo non controllato. Costituisce un forte rischio per due ragioni: si hanno emissioni di sostanze tossiche,



**Figura 1.3:** *Propagazione dello smouldering*

come monossido di carbonio, maggiori rispetto ad una combustione con fiamma e inoltre, nonostante il fenomeno venga innescato con una debole fonte di energia, garantisce una strada alternativa della propagazione di incendi [3].

È comune a diverse situazioni connesse ad attività lavorative: negli impianti di stoccaggio di carbone e di biomasse, nelle discariche di fanghi di depurazione e rifiuti solidi.

Le pile dei combustibili, come carbone fossile, sono soggette a ossidazioni a basse temperature a causa della presenza di comburenti negli interstizi della struttura porosa che caratterizza tutti i combustibili solidi. In più, tali pile sono spesso esposte all'aperto, dove il vento può giocare un ruolo importante per favorire lo sviluppo di combustioni spontanee, fenomeni che risultano dannosi sia da un punto di vista della sicurezza, sia per quello economico in quanto si hanno perdite di combustibile. Con il termine di combustioni spontanee o auto-combustione (Self-Heating) si intende l'aumento della temperatura in un solido combustibile determinato dal calore generato da processi chimici e fisici che si hanno all'interno del materiale stesso [6]. Tale aumento di temperatura è strettamente connesso con lo Smouldering, in quanto fornisce l'energia necessaria per l'innescamento.

Nel tempo sono stati studiati e sono stati messi in atto sistemi per predire e limitare il fenomeno, valutando il calore generato all'interno delle pile di carbone [7]. È stato dimostrato che una periodica compattazione del combustibile e un'opportuna pendenza della pila possono ridurre il processo. L'influenza del vento, invece, viene combattuta con barriere protettive e coprendo il cumulo con fanghi costituiti da cenere e acqua [8, 9, 10]. Lo stoccaggio del carbone può essere anche sotterraneo (silo), eliminando così il problema del vento, ma l'auto-combustione persiste. In questo caso l'accumulo di monossido di carbonio è maggiore e rappresenta un pericolo per il personale. Vengono quindi aggiunte delle sostanze ritardanti che servono a rallentare e a prevenire processi di combustione, dotando inoltre il silo di stoccaggio di opportuni sistemi di sicurezza ad acqua [11] e

rilevando continuamente l'eventuale presenza di monossido di carbonio.

I fenomeni di Smouldering sono anche all'origine di numerosi incendi domestici e boschivi, i quali risultano particolarmente difficili da spegnere. Infatti, in seguito a tentativi di spegnimento da parte del personale addetto, si potrebbe assistere ad un ritorno del fuoco a causa di zone incandescenti (es. braci), che possono persistere per lunghi periodi di tempo, come settimane e mesi, "covando" sottoterra tra radici e altre sostanze organiche. Spesso penetrano molti metri al di sotto della superficie bruciando torba e carbone ed emettendo grandi quantitativi di sostanze dannose in atmosfera [1].

Tuttavia, nel settore ambientale, lo Smouldering è particolarmente importante per il trattamento dei rifiuti e dei fanghi ottenuti dall'acque reflue, e per la produzione di biochar [12], ovvero carbone vegetale che si ottiene da diversi tipi di biomassa vegetale. In quest'ultimo campo comporta costi energetici minimali rispetto ad un processo come la pirolisi [1], poiché fornisce l'energia necessaria grazie alla lenta ossidazione di una frazione della biomassa stessa. Anche l'utilità dei fanghi come combustibile rappresenta un nuovo approccio per riciclare rifiuti producendo energia [13]. Lo Smouldering controllato costituisce una potenziale alternativa di processo da sfruttare, come ad esempio nelle bonifiche di terreni contaminati. Infatti sono state sviluppate tecnologie che sfruttano uno dei vantaggi del fenomeno, ossia la capacità di autosostenersi: dopo un minimo quantitativo di energia necessario per l'innesco e sfruttando la natura combustibile del materiale solido interessato, lo smouldering permette di consumare e degradare la contaminazione del terreno, rigenerandolo. Per la prima volta, infatti, è stata messa a punto una tecnologia che utilizza lo Smouldering come metodo per trattare terreni contaminati da catrame, greggio e miscele di idrocarburi, STAR (Self-sustaining Treatment for Active Remediation) [14, 15], raggiungendo riduzioni delle sostanze fossili presenti superiori al 99%. È possibile applicare lo Smouldering a combustibili di tipo liquido solo se è presente una matrice porosa solida nella quale diffonde il comburente e avviene l'ossidazione. Tali combustibili vengono denominati NAPLs (Non-Aqueous-Phase Liquids) che impregnano accidentalmente matrici porose costituite principalmente da sabbia e terriccio. Sono stati esplorati i limiti di applicabilità dello smouldering per bonificare terreni contaminati, variando l'energia da fornire per l'innesco, il flusso di aria e la tipologia di terreno [16].

Nel settore delle risorse fossili viene sfruttato per favorire la fuoriuscita dell'olio verso la superficie riducendo la viscosità del combustibile. Viene anche utilizzato nel processo di gassificazione del carbone sotterraneo [17]. Inoltre lo Smouldering di pneumatici permette il recupero di catrame e energia, riciclando così un rifiuto voluminoso e inquinante [18].

Un'ulteriore applicazione è relativa al trattamento delle feci, le quali vengono incenerite dopo energivore e costose operazioni di essiccamento e di innesco, per

la necessità di una rapida distruzione e sterilizzazione del rifiuto. L'incenerimento è associato a elevate dissipazioni termiche e ad aggiunte continue di combustibili fossili per favorirlo. Con lo Smouldering è possibile ridurre i costi e l'energia per queste operazioni. In particolare, in [19], è stato impiegato un reattore in grado di trattare feci prodotte da 10 – 20 persone al giorno. Alle feci è stata aggiunta sabbia, per garantire la matrice porosa, e si è monitorato l'auto-sostentamento del fenomeno variando la quantità di sabbia aggiunta, il flusso di ossigeno e l'umidità iniziale del materiale, in modo tale da mappare le condizioni operative ottimali per questo trattamento.

### **1.3 Influenza di diversi parametri**

La caratterizzazione dello Smouldering è piuttosto complessa poiché influenzata da diversi parametri. Come si è letto nei precedenti paragrafi, perché si abbia l'insorgenza del fenomeno dello Smouldering deve essere presente comburente e combustibile, e quest'ultimo deve essere costituito da un aggregato di particelle porose che fornisce una grande area superficiale per unità di volume favorendo le reazioni superficiali, isolamento termico, e la permeabilità al trasporto di ossigeno ai siti di reazione per convezione e diffusione.

Secondo Moghtaderi [20], il processo di ossidazione in un cumulo di combustibile, come carbone, genera un flusso convettivo naturale all'interno della pila stessa. Questo, per la porosità del materiale, è influenzato a sua volta dall'aria circostante e dal vento. L'effetto combinato della convezione naturale e forzata va a favorire la formazione di fenomeni di Smouldering, soprattutto nel lato della pila posizionato sottovento [21]. La pila risulta essere in sicurezza in due casi estremi di ventilazione: assenza o abbondanza di circolazione dell'aria. In uno studio sullo Smouldering di torba viene mostrato come, con presenza di vento, le temperature massime raggiunte sono superiori di 50 °C rispetto al caso senza vento e, nel momento in cui la velocità del vento aumenta ulteriormente, il fenomeno si attenua poiché incrementano le dissipazioni di calore [22]. La velocità di propagazione del fronte incrementa in maniera lineare con l'aumentare del flusso d'aria; tuttavia, ad elevate portate di ossidante, si manifestano maggiori effetti di raffreddamento del sistema e le temperature calano [16].

È stato investigato come la compattazione del cumulo di combustibile riduce la presenza interstiziale di ossigeno e venga ridotta la comparsa di reazioni endotermiche [8, 9]. Laddove le destinazioni prevalenti dei fanghi di depurazione sono lo smaltimento in discarica, è importante stabilizzare termicamente il rifiuto attraverso la pellettizzazione del materiale che permette un elevato grado di compattazione e riduzione di porosità [23]. Infatti la ventilazione e il flusso di ossigeno presente all'interno della matrice porosa di combustibile sono strettamente

legati alla porosità del materiale e alla dimensione delle particelle, andando ad incidere in particolare sulla permeabilità del mezzo. Dimezzando il diametro delle particelle, si riduce di un fattore 4 la permeabilità e quindi il flusso di ossigeno all'interno del combustibile [21].

In numerosi studi è stata esplorata la capacità di autosostenersi da parte del processo di Smouldering, in particolare per quei materiali, come la torba in ambito di incendi boschivi, caratterizzati da elevati contenuti di umidità e di sostanze inorganiche. È stato trovato che in generale le reazioni sono in grado di svilupparsi nonostante l'umidità relativa superi valori del 60% [14, 22]. Infatti, in determinate configurazioni, il calore netto in eccesso permette di preriscaldare il combustibile vergine ed evaporare parte dell'umidità [19, 14]. Questo è sicuramente un fattore utile alle nuove applicazioni di Smouldering per incenerire fanghi provenienti da acque reflue, dove si registrano elevati contenuti di umidità (60 – 80% ) e potere calorifico inferiore basso (0.8 – 3.5kJ/g) [14]. Quindi, il ruolo del contenuto di acqua iniziale incide in particolare su due punti: velocità di reazione e bilancio di energia [21].

Un altro fattore che influenza lo sviluppo dello Smouldering è la presenza di inerti e di sostanze inorganiche all'interno delle biomasse (sodio, ferro, potassio) [24]. Infatti i minerali presenti nella matrice porosa sono in grado di assorbire l'energia prodotta dallo Smouldering e agire come uno scambiatore restituendo il calore durante la combustione. Se si ha un elevato contenuto di ceneri, aumenta il fabbisogno di calore e quindi si riduce la quota di calore di combustione utile all'evaporazione dell'acqua. Da qui la necessità di valutare il contenuto critico di umidità in funzione della quantità di inerti presenti [25]. Spesso, laddove il processo vuole essere favorito, viene aggiunta sabbia per favorire la permeabilità dell'ossidante e per ridurre le dissipazioni di calore [19, 14].

Nel caso di bonifiche di terreni contaminati, le dimensioni dei granuli di terriccio e sabbia modificano le caratteristiche del mezzo poroso. Pironi et al. [16] indicano che all'aumentare del diametro del granello di sabbia si ha un calo della superficie di reazione per unità di volume (i.e. diminuisce la superficie del combustibile per unità di volume) e un aumento dell'energia sensibile richiesta per unità di volume, cosicché il mezzo poroso non ha tempo sufficiente per portarsi alla temperatura in equilibrio con i gas circostanti. Quindi, la zona a monte del fronte dello Smouldering viene preriscaldata ad una temperatura minore con conseguente riduzione della velocità di reazione e di capacità di auto-sostenersi da parte del processo.

Infine è fondamentale il ruolo della geometria e della dimensione del reattore. Nello studio di Sujanti et al. [24] è stata osservata l'importanza del ruolo che la quantità di massa e l'inerzia termica del combustibile giocano nel bilancio termico, senza dimenticare di considerare le dissipazioni termiche e la generazione spontanea di calore durante il processo di Smouldering. In particolare un aumento

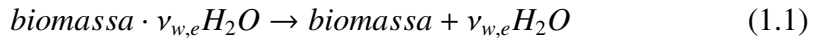
della quantità di massa del combustibile permette di originare un innesco a temperature inferiori, mentre queste ultime incrementano linearmente con la superficie esterna del reattore per unità di massa.

## 1.4 Equazioni di governo del fenomeno

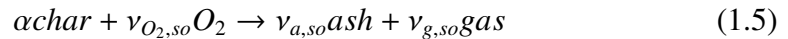
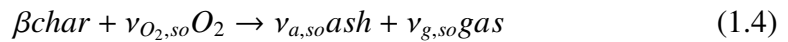
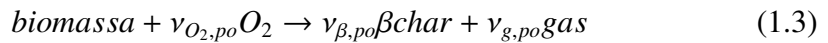
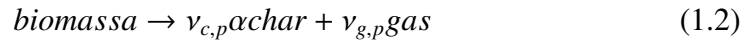
La complessità del processo di Smouldering richiede l'uso di approssimazioni nei modelli teorici e semplificazioni negli esperimenti per poterne studiare le caratteristiche. La velocità di propagazione di questa particolare forma di combustione è tipicamente controllata da due meccanismi principali: il trasporto dell'ossigeno nella matrice porosa e le dispersioni di calore del sistema [3]. Vengono qui raccolte le principali informazioni dalla letteratura inerenti i meccanismi che governano la cinetica delle reazioni, in particolare per le biomasse.

### 1.4.1 Cinetica

Da un punto di vista chimico, la biomassa è un materiale organico naturale, costituito da una miscela di tre componenti principali: emicellulosa, cellulosa e lignina. La reazione globale di decomposizione viene suddivisa in più sotto-reazioni costituite da 3- o 5-step [26, 27], o modelli ancora più complessi. In questo contesto viene esposta una cinetica caratterizzata da uno schema a 5-step:

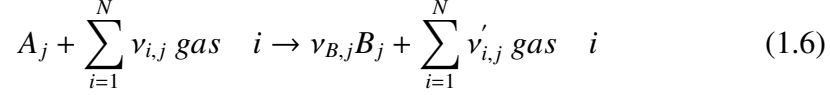


dove  $\nu$  è il coefficiente stechiometrico massivo della specie (w, acqua);



L'evaporazione (1.1) descrive come l'acqua, in fase di preriscaldamento, vaporizza con un unico passaggio (si assume al di sotto dei 120°C). La pirolisi (1.2) è una degradazione termochimica del solido in assenza di ossigeno, che produce gas, liquidi e  $\alpha char$  (materiale ricco di carbonio), subito dopo la fase di evaporazione. Nella reazione (1.3) si ha, invece, una prima ossidazione, in parallelo alla pirolisi, della biomassa ad alte temperature con produzione di carbone di tipo differente ( $\beta char$ ) ossia con struttura, composizione e reattività diversa. Le reazioni (1.4) e (1.5) costituiscono una seconda ossidazione del carbone e solido prodotto in precedenza, restituendo cenere (ash) e gas.

Considerando una reazione eterogenea globale  $j$  su base massiva, è possibile scrivere:



Per un campione di biomassa di massa iniziale  $m_0$  e temperatura  $T$ , la velocità di decomposizione adimensionale di  $A$  ( $r^*_{d,A_j} > 0$ ) può essere espressa secondo una legge di Arrhenius come:

$$\dot{r}^*_{d,A_j} = Z_j \exp\left(-\frac{E_j}{RT}\right) f(m_A^*) g(Y_{O_2}) \quad (1.7)$$

dove  $Z_j$  rappresenta il fattore pre-esponenziale e  $E_j$  l'energia di attivazione, mentre  $f(m_A^*)$  e  $g(Y_{O_2})$  sono funzioni di massa relative al reagente  $A$  e all'ossigeno. In particolare si ha che  $m_A^* = m_A/m_{A0}$  con  $m_{A0}$  massa iniziale del reagente.

Quindi le espressioni dimensionali per la velocità di consumo di  $A$  e di formazione di  $B$ , e il calore rilasciato dalla reazione  $j$ -esima si possono scrivere nel seguente modo:

$$\dot{r}_{d,A_j} = \dot{r}^*_{d,A_j} m_{A0} \quad (1.8)$$

$$\dot{r}_{f,B_j} = \dot{r}^*_{d,A_j} \nu_{B,j} m_{A0} \quad (1.9)$$

$$\dot{Q}_j = \dot{r}^*_{d,A_j} \Delta H_j \quad (1.10)$$

indicando con "d" distruzione o consumo e "f" formazione o produzione, mentre  $\Delta H_j$  è il calore di reazione.

In un volume di controllo che contiene la propagazione dello Smouldering, la velocità del fronte di avanzamento è determinata dal bilancio tra il calore generato per unità di massa dell'ossidante reagito ( $Q_{sml}$ ), l'energia richiesta per riscaldare il solido e il calore dissipato dall'involucro ( $\dot{q}_{loss} \frac{A_L}{A_C}$ ). Ipotizzando che tutto l'ossigeno venga consumato e che l'ignizione sia sufficientemente distante dal fronte, è possibile definire:

$$u_{sml} = \frac{\dot{m}_{O_2} Q_{sml} - \dot{q}_{loss} \frac{A_L}{A_C}}{\rho_s c_{ps} (1 - \epsilon) (T_{sml} - T_0)} \quad (1.11)$$

Dall'equazione 1.11 è possibile notare come la velocità di propagazione è direttamente proporzionale al flusso di massa dell'ossidante ( $\dot{m}_{O_2}$ ), mentre il suo modulo viene scalato in base alle proprietà della matrice solida porosa ( $\rho_s c_{ps} (1 - \epsilon)$ ), [1], di cui si discute nel Capitolo 2.





## Capitolo 2

# Teoria sui mezzi porosi

Nel seguente capitolo si descrivono le leggi sul moto dei fluidi in mezzi porosi utilizzate in questo studio. Dopo brevi cenni sulle proprietà dei mezzi porosi, vengono considerati i regimi di flusso a cui è sottoposto il fluido. Infine vengono descritte le caratteristiche dei letti granulari (impaccati) con particelle di differenti dimensioni e materiale.

Va subito fatta una distinzione tra i termini impaccamento e compattazione. Nel primo caso si indica la capacità di sistemazione delle particelle verso una riduzione dello spazio di vuoto interparticellare senza andare a modificare le caratteristiche di forma e dimensione del granulo, il secondo implica, invece, una modifica morfologica dei granuli.

### 2.1 Introduzione ed esempi

Il panorama dei mezzi porosi è molto ampio e vario, abbraccia infatti materiali molto comuni come la sabbia, il legno, le ceramiche, i tessuti biologici, le schiume metalliche, i fanghi, le fibre. Una macroscopica distinzione va fatta tra materiali coerenti (rocce) e incoerenti o granulari (sabbia). I mezzi porosi sono materiali che hanno una struttura fisica molto complicata e di difficile rappresentazione. Ciò che caratterizza un mezzo poroso è la capacità di essere "attraversato" da un fluido [28]. Tuttavia a causa della loro struttura risulta notevolmente complicato descrivere il flusso del fluido all'interno di letti porosi. Negli ultimi anni sono state condotte numerose ricerche per le applicazioni dei mezzi porosi nel campo dell'edilizia, in geofisica, nell'ingegneria petrolifera, in acustica. Accanto a studi di tipo applicativo vi è un apparato teorico che indaga matematicamente le proprietà e il comportamento di questi modelli.

## 2.2 Proprietà dei mezzi porosi

L'unica proprietà dei mezzi porosi che li distingue dagli altri corpi solidi è la complicata struttura porosa, la quale ha riflessi su altre caratteristiche chimico-fisiche e su fenomeni di trasporto. Infatti tutti i parametri che verranno descritti di seguito sono dipendenti dalla struttura e interconnessione dei pori. I più importanti sono porosità, permeabilità, superficie specifica e tortuosità.

La porosità (o grado di vuoto) è definita come il rapporto della frazione vuota nel materiale poroso rispetto al volume totale occupato dal mezzo, ovvero:

$$\epsilon = \frac{V_p}{V_t} \quad (2.1)$$

dove  $V_p$  è il volume dei pori, dello spazio vuoto, mentre  $V_t$  è il volume totale del mezzo poroso. Varia tra lo zero e l'unità e dipende dal tipo di mezzo poroso. In questo lavoro di tesi viene intesa come porosità totale, ovvero somma del grado di vuoto del sistema macroscopico e di quello intrinseco delle particelle. I metodi di misura descritti in letteratura per valutare tale proprietà sono [29]:

- misura del volume di acqua contenuto nei pori saturati, attraverso la misura della variazione di volume in un recipiente nel quale è immerso il campione, oppure attraverso la pesatura di un campione asciutto e saturo di acqua, estratto dal recipiente;
- misura del peso di un campione in aria e calcolo del peso della sua struttura a partire dalla densità del materiale che costituisce la struttura stessa;
- misura del peso di un campione in aria e sottoposto a vuoto, che consente la determinazione del volume d'aria presente nei pori attraverso la differenza di peso rilevata [30];
- misura del volume della struttura del campione attraverso una compressione o espansione a volume noto ed in condizioni isoterme di un volume d'aria isolato nel quale è immerso il campione, metodo che funziona bene per elevate porosità ( $\epsilon > 90\%$ ) [31].

La permeabilità ( $k$ ) è la capacità dei mezzi porosi di essere attraversati dai fluidi. In questo contesto si fa riferimento alla proprietà univocamente determinata dalla struttura dei pori ed espressa in "darcy" ( $0.987 \mu\text{m}^2$ ). È definita dalla legge di Darcy, con un flusso lento, stazionario e monodimensionale:

$$k = \frac{Q\mu L}{A\Delta P} \quad (2.2)$$

con  $Q$  portata volumetrica,  $\mu$  viscosità del fluido,  $L$  lunghezza del letto poroso,  $\Delta P$  perdite di carico,  $A$  sezione normale al flusso.

La superficie specifica,  $S_v$ , è definita come l'area interstiziale dei pori per unità di volume del solido o di bulk ( $V(1 - \epsilon)$ ):

$$S_v = \frac{A\epsilon}{V(1 - \epsilon)}. \quad (2.3)$$

Viene valutata soprattutto nelle misure di porosità e permeabilità di un campione, in particolare quando si tratta di un letto impaccato granulare costituito da particelle sferiche regolari [32].

La presenza di particelle all'interno del letto poroso riduce la sezione disponibile per il flusso del fluido e, preservando la continuità, la velocità all'interno del letto sarà maggiore di quella superficiale. È possibile relazionare quindi la velocità interstiziale  $U$  a quella superficiale  $U_0$  nel modo seguente:

$$U = \frac{U_0}{\epsilon}. \quad (2.4)$$

Chiaramente, la resistenza opposta al flusso del fluido attraverso il mezzo poroso, è relazionata al numero di particelle o alla concentrazione volumetrica. Se da un lato, quando il mezzo è pieno di solido ( $\epsilon = 0$ ) la resistenza tende ad infinito, dal lato opposto, in assenza di solido ( $\epsilon = 1$ ), la velocità interstiziale eguaglia quella superficiale [33].

Un'altra caratteristica di un mezzo poroso è la tortuosità, la quale permette di rappresentare la complessità del flusso all'interno del materiale. Può essere definita come il rapporto di una lunghezza media del percorso microscopico del flusso e dello spessore del letto. Ci sono molti studi che hanno cercato la relazione che si ha tra questa proprietà e la porosità. In particolare si ha che per letti impaccati, la legge più comune è:

$$\tau = \frac{1}{\epsilon^n} \quad (2.5)$$

dove  $n$  è un valore numerico che dipende dalle caratteristiche dell'impaccamento [34].

Da semplici analisi dimensionali è possibile mettere in relazione queste proprietà:

$$k = \frac{f(\epsilon, \tau)}{S_v^2} \quad (2.6)$$

dove  $f(\epsilon, \tau)$  è una funzione adimensionale della porosità e della tortuosità [35].

## 2.3 Leggi per mezzi porosi

Si espongono le leggi che descrivono i fenomeni di trasporto di materia, utilizzate in questo studio perchè interessa i fenomeni che regolano in particolare l'apporto di ossigeno/aria (comburente/reagente B) alle particelle di solido (combustibile/-reagente A) determinando la reazione di decomposizione e lo spostamento del fronte.

### 2.3.1 Modello di Darcy ed estensioni

L'equazione, nota come legge di Darcy (in onore dell'ingegnere francese che la formulò nel 1856), afferma che il gradiente di pressione nella direzione del flusso è proporzionale alla velocità del fluido attraverso il mezzo poroso. Spesso viene relazionata alla distanza o lunghezza del letto  $L$ :

$$-\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu Q}{k A} = \frac{\mu}{k} U_0 \quad (2.7)$$

con

$$U_0 = \frac{Q}{A} \quad (2.8)$$

Tale equazione descrive bene il flusso in un mezzo poroso, purchè la velocità sia sufficientemente bassa e siano importanti gli effetti viscosi.

Se la velocità del flusso invece è elevata, il legame lineare di Darcy (2.7) risulta inadeguato a descrivere accuratamente le  $\Delta P$ . Forchheimer propose (1901) di sostituire tale equazione con una di tipo non lineare, nello specifico di aggiungere una dipendenza quadratica con la velocità.

$$-\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k} U_0 + \rho \beta U_0^2 \quad (2.9)$$

con  $\rho$  densità del fluido e  $\beta$  fattore d'inerzia. Il distacco dal comportamento lineare è causato principalmente dal flusso turbolento.

Un'altra equazione (Kozeny-Carman) valida per flussi laminari (velocità sufficientemente basse) è derivata dall'equazione di Poiseuille in condotti circolari:

$$-\frac{\Delta P}{L} = \frac{32\mu}{d^2} U_0 \quad (2.10)$$

dove  $d$  è il diametro del canale, definito come il rapporto tra volume aperto e superficie sulla quale il fluido passa

$$d = \frac{AL\epsilon}{AL(1 - \epsilon)S_v} \quad (2.11)$$

Sostituendo questa relazione (2.11) nella (2.10) si ha:

$$\frac{\Delta P}{L} = \mu \frac{[K(1 - \epsilon)^2 S_v^2]}{\epsilon^3} U_0 \quad (2.12)$$

con  $K$  costante di Kozeny, funzione della tortuosità. Comparando tale relazione con la legge di Darcy si ricava:

$$k = \frac{\epsilon^3}{K(1 - \epsilon)^2 S_v^2} \quad (2.13)$$

dove viene esplicitata la funzione adimensionale citata nell'equazione precedente 2.6, [33].

### 2.3.2 Modello di Ergun

Tra i modelli più noti nel campo dei mezzi porosi, legati a descrivere i fenomeni di trasporto, vi è quello di Ergun, il quale rappresenta l'andamento delle perdite di carico che si hanno attraverso un letto impaccato costituito da particelle sferiche. La relazione proposta tiene in considerazione anche un coefficiente di sfericità  $\Phi$  [36]:

$$-\frac{\Delta P}{L} = \frac{150(1 - \epsilon)^2 \mu U_0}{\Phi^2 \epsilon^3 D_p^2} + \frac{1.75(1 - \epsilon) \rho U_0^2}{\epsilon^3 \Phi D_p} \quad (2.14)$$

con  $D_p$  diametro medio delle particelle. Ergun combinò le equazioni per flusso laminare e turbolento addizionando i contributi. Il primo termine a secondo membro è dominante per basse velocità, mentre l'altro diventa importante per elevati flussi. I coefficienti dell'equazione variano per differenti materiali [37].

Esistono diversi criteri in letteratura per stabilire il regime del flusso all'interno di un mezzo poroso. Seguendo quello proposto da Ergun, viene definito il Numero di Reynolds modificato:

$$Re_p = \frac{\rho D_p U}{\mu(1 - \epsilon)}. \quad (2.15)$$

Ergun osservò che il valore critico, oltre il quale il flusso non può considerarsi completamente laminare, è  $Re_{p,critico} = 3 - 10$  [38].

Spesso l'equazione di Ergun viene riscritta in termini di  $f_{Er}$ , fattore di attrito [36]:

$$f_{Er} = \frac{\Delta P}{L} \frac{D_p \epsilon^3}{U_0^2 \rho (1 - \epsilon)} \quad (2.16)$$

proponendo

$$f_{Er} = 1.75 + \frac{150}{Re_p}. \quad (2.17)$$

De Souza-Santos [39] afferma che, nel caso si abbiano particelle non uniformi, la determinazione del valore del diametro medio ( $D_p$ ) è dipendente dall'uso che se ne vuole fare. In particolare una semplice media aritmetica o pesata non tiene in conto degli effetti delle differenti particelle sul volume e sulla superficie. Il trasferimento di calore è funzione della superficie disponibile tra le particelle per unità di volume del letto poroso, mentre le perdite di carico sono sensibili alle dimensioni delle particelle e al volume. Quindi una stima che fa riferimento a questi effetti può essere data da:

$$D_p = \frac{1}{\sum_i \frac{w_i}{d_i}} \quad (2.18)$$

dove  $w_i$  è la frazione di massa della particella  $i$  e  $d_i$  il diametro.

### 2.3.3 Equazioni per il campo di temperatura

Le equazioni dei precedenti modelli non considerano gli effetti legati ad accelerazioni o decelerazioni del fluido attraverso il letto impaccato causate da variazioni di densità al variare della temperatura del sistema. Infatti se ad esempio si ha aria che attraversa il letto, quando il fluido viene riscaldato, si ha una diminuzione della densità con conseguente accelerazione attraverso il letto, registrando maggiori perdite di carico. L'importanza di tale dipendenza è significativa per elevate variazioni di temperatura del fluido che attraversa il mezzo poroso.

La variazione di temperatura, e gli effetti sulle proprietà del fluido, possono essere tenuti in conto esprimendo la densità del fluido e la viscosità in funzione della temperatura e della pressione. Se gas ideali, la densità può essere espressa come

$$\rho = \frac{p_a}{RT} \quad (2.19)$$

con  $p_a$  pressione ambiente,  $R$  costante del gas,  $T$  temperatura. La viscosità è possibile approssimarla ad una funzione della sola temperatura elevata a  $b$  e costante  $g$ :

$$\mu = gT^b \quad (2.20)$$

La velocità interstiziale (2.4) sarà posta in funzione della densità, e quindi della temperatura:

$$U(T) = \frac{U_0 \rho_0}{\rho} \quad (2.21)$$

definendo  $\rho_0$  densità del fluido alla temperatura di riferimento  $T_0$  (ambiente). Se si considera un flusso laminare in condizioni non-isoterme attraverso un letto

impaccato, è possibile riscrivere l'equazione di Ergun nel modo seguente:

$$-\frac{\Delta P}{L} = \frac{c(1-\epsilon)^2}{\Phi^2 \epsilon^3 D_p^2} \frac{g T^b U_0 T}{T^0} \quad (2.22)$$

o, raccogliendo i vari termini costanti in  $c_2$ :

$$-\frac{\Delta P}{L} = c_2 \frac{T^{(1+b)}}{T_0} \quad (2.23)$$

È possibile assumere tale parametro costante se si hanno perdite di carico attraverso il letto trascurabili rispetto alla pressione ambiente  $p_a$ . In generale, quindi, le perdite di carico aumentano al crescere della temperatura del fluido.

In letteratura sono disponibili numerosi studi sulla capacità di riscaldamento e raffreddamento di un letto impaccato. Il primo studio analitico fu proposto da Schumann (1929), e le successive equazioni sull'argomento fanno tutte riferimento a tale modello. Le ipotesi principali di tale studio riguardano un flusso monodimensionale, assenza di dispersione e conduzione assiale, proprietà costanti, sistema adiabatico e assenza di gradienti di temperatura all'interno delle particelle solide. Le equazioni differenziali per la temperatura del fluido e del letto poroso sono:

$$(\rho c_p)_f \epsilon \frac{\delta T_f}{\delta t} = -(U_0 \rho c_p)_f \frac{\delta T_f}{\delta x} - h S_v (1-\epsilon) LA (T_f - T_s) \quad (2.24)$$

$$(\rho c_p)_s (1-\epsilon) \frac{\delta T_s}{\delta t} = h S_v (1-\epsilon) LA (T_f - T_s) \quad (2.25)$$

dove  $h$  è il coefficiente di trasferimento di calore per unità di superficie tra fluido e solido,  $c_p$  è il calore specifico, mentre  $T_f$  e  $T_s$  rispettivamente la temperatura del fluido e del solido [40].

## 2.4 Letto granulare composto da particelle differenti

La permeabilità di un mezzo poroso per un letto granulare è definita in funzione della porosità, diametro delle particelle, tortuosità, fattore di forma, ecc., e rappresenta uno dei parametri chiave per lo studio di modelli relativi al flusso di un fluido e al trasferimento di massa in un mezzo poroso. Nel caso in cui quest'ultimo è costituito da un sistema caratterizzato da due tipologie di particelle differenti, va presa in considerazione l'influenza della variazione di porosità e tortuosità sulla permeabilità complessiva [41].

## 2.4.1 Proprietà

La porosità di un letto granulare binario è stata studiata in numerosi lavori, ed è emerso che un ruolo importante viene giocato dal meccanismo di impaccamento. Dias et al. [42] hanno investigato e analizzato la relazione tra il rapporto delle dimensioni delle particelle ( $\delta = d/D$ ) e la porosità, funzione della frazione di volume occupata da ciascun tipo di particelle ( $x_D; x_d = 1 - x_D$ ). In particolare è emerso che per valori di  $\delta < 0.1$  la porosità globale può essere ricavata nel seguente modo:

$$\epsilon = \epsilon_d^0 \left( \frac{1 - x_D}{1 - x_D \epsilon_d^0} \right) \quad (\text{per } 0 < x_D < x_{D,min}), \quad (2.26)$$

$$\epsilon = 1 - \left( \frac{1 - \epsilon_D^0}{x_D} \right) \quad (\text{per } x_{D,min} < x_D < 1), \quad (2.27)$$

con una porosità minima  $\epsilon_{min} = \epsilon_d^0 \epsilon_D^0$  che corrisponde a

$$x_{D,min} = \frac{1 - \epsilon_D^0}{1 - \epsilon_d^0 \epsilon_D^0}. \quad (2.28)$$

Questo perché diventa importante l'effetto parete delle particelle piccole intorno a quelle più grandi.

Quando il rapporto tra le dimensioni delle particelle assume valori modesti ( $0.1 < \delta < 1$ ), l'interazione tra le due frazioni costituite da differenti particelle diventa più pronunciata e un modello semi-empirico, ottenuto per particelle sferiche, viene rappresentato da [43]:

$$\epsilon = [1 - (1 - \epsilon_D^0)x_D^{1.35 - x_D F(\delta)}][\epsilon_d^0 + (1 - \epsilon_d^0)x_D^{f(\delta)}], \quad (2.29)$$

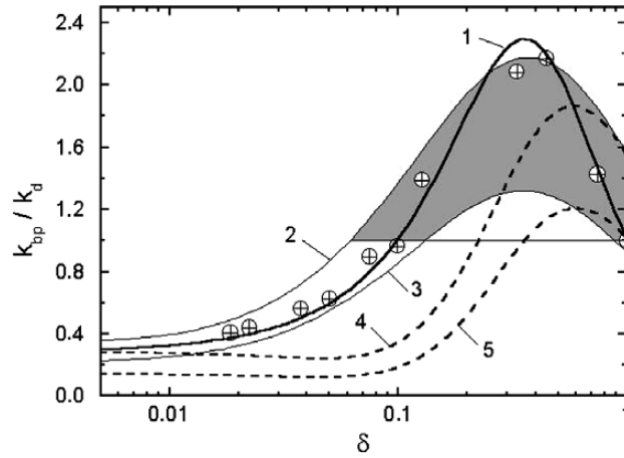
$$F(\delta) = - \left\{ 0.27 - \frac{1.55}{1 + 1/\exp\left(\frac{\delta + 0.06}{0.27}\right)} \right\}^{-1}, \quad (2.30)$$

$$f(\delta) = 5 - 4\sqrt{\delta}. \quad (2.31)$$

La tortuosità gioca un ruolo importante sulla velocità di trasporto di massa e di calore riscontrabili in un mezzo poroso [44]. Secondo l'equazione (2.5), è funzione della porosità e di un fattore  $n$ , dipendente dalle proprietà dell'impaccamento. Tale fattore è compreso tra 0.4–0.5. In particolare si hanno allontanamenti significativi da  $n = 0.5$  nel caso in cui  $\delta < 0.1$  [34]:

$$n = 0.5 - [0.062(\delta^{-1} - 1)] \frac{x_D}{x_D + (1 - x_D)\delta^{-1}}. \quad (2.32)$$





**Figura 2.1:** Dipendenza di  $k_{bp}/k_d$  dal rapporto dei diametri  $\delta$ . Nella figura vengono indicati 5 modelli differenti per descrivere la variazione, per approfondimenti si rimanda all'articolo di Dias et al.[44].

Il diametro medio viene stimato nel seguente modo:

$$D_{av} = \left\{ \frac{x_D}{D} + \frac{1-x_D}{d} \right\}^{-1} \quad (2.33)$$

In un letto granulare composto da particelle differenti, le equazioni 2.6 e 2.13 possono essere riscritte in funzione del diametro medio delle particelle:

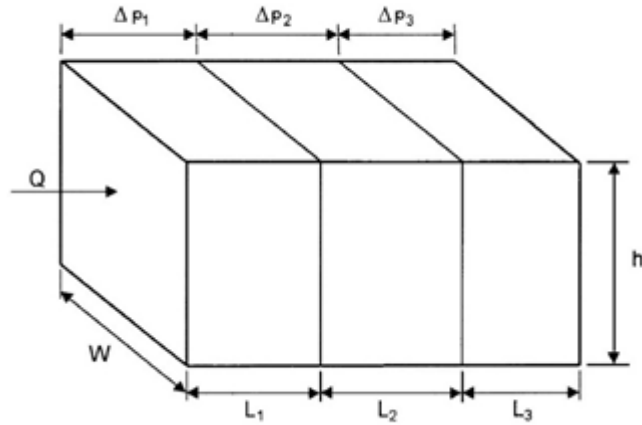
$$k = \frac{D_{av}^2 \epsilon^3}{36K_0 \tau^2 (1-\epsilon)^2} \quad (2.34)$$

con  $K_0 \tau^2 = K$ , coefficiente di Kozeny che per letti granulari varia tra 4.2 – 5.0 [44].

In generale si ha che la permeabilità effettiva varia in un letto granulare binario poiché si ha una porosità che diminuisce e una tortuosità che aumenta, come mostrato in Figura 2.1, dove viene rappresentato il rapporto tra la permeabilità del mezzo poroso binario ( $k_{bp}$ ) e la permeabilità del solido con dimensioni minori ( $k_d$ ), in funzione di  $\Delta$ , come indicato fedelmente nell'articolo di Dias et al. [44].

Come per la permeabilità, anche la conduttività termica effettiva varia, e in particolare aumenta in un sistema costituito da un impaccamento binario, proprio perché la porosità tende a calare [44, 43].

Nel caso in cui il letto poroso è costituito da vari strati con materiale e permeabilità differenti, come in Figura 2.2, è possibile stimare la permeabilità media



**Figura 2.2:** Schematizzazione di un mezzo poroso a strati.

del mezzo secondo la relazione [45]:

$$k_{mean} = \frac{L_{tot}}{\frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \frac{L_3}{k_3}} = \frac{\sum_i L_i}{\sum_i \frac{L_i}{k_i}}. \quad (2.35)$$

Da queste relazioni, si evince come sia possibile modificare le caratteristiche del mezzo poroso, in particolare porosità e permeabilità, mescolando due aggregati granulari con diametri di particelle differenti. Questo modo, infatti, è stato impiegato nel seguente studio sperimentale per l'investigazione del fenomeno di Smouldering.

## Capitolo 3

# Studio sperimentale

In questo capitolo vengono descritti le metodologie sperimentali e le strumentazioni analitiche impiegate durante lo svolgimento del lavoro di ricerca. Lo studio ha richiesto una parte preliminare in cui sono state sviluppate tecniche necessarie alla caratterizzazione dello Smouldering e a rendere possibile l'acquisizione dei dati. Essenzialmente si è partiti da modelli presenti in studi condotti su mezzi porosi in generale, per creare ulteriori sviluppi e modifiche utili per monitorare il sistema sperimentale in particolari condizioni operative. Come già introdotto in precedenza, l'obiettivo della tesi è quello di monitorare in particolare l'andamento dei profili di temperatura e delle perdite di carico di un letto impaccato durante l'evoluzione dello Smouldering.

### 3.1 Descrizione dell'apparecchiatura sperimentale

Nel presente lavoro per lo studio preliminare e di validazione dei metodi introdotti sono stati utilizzati reattori tubolari in acciaio e in quarzo.

Nella Figura 3.1 è possibile osservare il tubo in acciaio caratterizzato da una lunghezza di  $50\text{cm}$  e un diametro interno pari a  $3.6\text{cm}$ . Il tubo viene chiuso tramite delle flange bullonate, le quali presentano uscite per il collegamento della strumentazione di misura. La Figura successiva 3.2 rappresenta il tubo in quarzo lungo  $43\text{cm}$  e con un diametro interno di  $1\text{cm}$ . Anche in questa configurazione sono presenti raccordi a monte e a valle del tubo per garantire le tenute e favorire le misurazioni del gradiente di pressione.

Gli esperimenti sono stati condotti in un altro tubo in acciaio, Figura 3.3(a), caratterizzato da una lunghezza di  $30\text{cm}$  e un diametro interno di  $4\text{cm}$ , posto sotto cappa con disposizione verticale. Lungo questa configurazione vengono collocate delle fasce riscaldanti di tipo resistivo termoregolate da un controllo esterno. Quest'ultimo è costituito da un regolatore OMRON, il quale è collegato ad un

computer e monitorato con un software (Cx Thermo) in grado di caricare e seguire rampe di temperatura preimpostate. Nella parte superiore e inferiore del tubo ci sono quattro fasce da  $250\text{Watt}$ , mentre nella zona centrale due da  $190\text{Watt}$ . Tra le fasce e la superficie esterna del tubo vi sono delle termocoppie che permettono di seguire e controllare la potenza da fornire al sistema.

La scelta di questo tipologia di tubo per la fase sperimentale è stata condizionata dalla necessità di avere un sistema non fragile per le numerose operazioni di montaggio e smontaggio. Inoltre l'acciaio, seppur con una conducibilità termica ridotta, è un materiale poco costoso e normalmente utilizzato a livello industriale.

Successivamente il sistema è stato coibentato con lana di vetro per garantire l'isolamento termico e rivestito con uno strato di alluminio per mantenere l'isolante in posizione. È stato chiuso in alto e in basso con flange rimovibili e forate in modo tale da consentire il flusso del fluido e l'inserimento di termocoppie, Figura 3.3(b). La tenuta sulle flange terminali è assicurata da due guarnizioni in alluminio che si deformano con la chiusura del sistema. I tubi in ingresso e uscita del reattore sono saldati alle flange.

All'interno del reattore è stato posto un supporto treppiede, in Figura 3.4, per dividere il sistema in tre zone con stessa lunghezza, 3.17: una di preriscaldamento del fluido (i.e. aria), una centrale che ospita il materiale combustibile e quindi le reazioni, e una di scarico dove vengono convogliati i gas di uscita. Questo garantisce in particolare sostegno e maggiore stabilità alla zona sovrastante, evitando che si possa avere schiacciamento della zona reattiva.

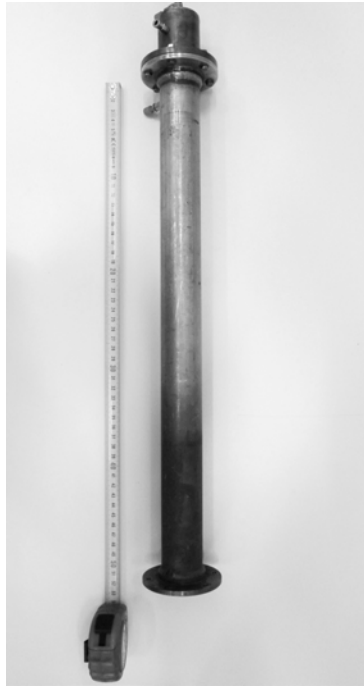
Il sistema è stato così realizzato per avere maggiore flessibilità nella scelta delle tipologie di test e per rendere il caricamento e lo svuotamento del reattore semplice e pratico. L'operazione di inserimento del combustibile avviene dall'apertura superiore tramite versamento, mentre lo svuotamento avviene dal basso.

## 3.2 Strumentazione di misura

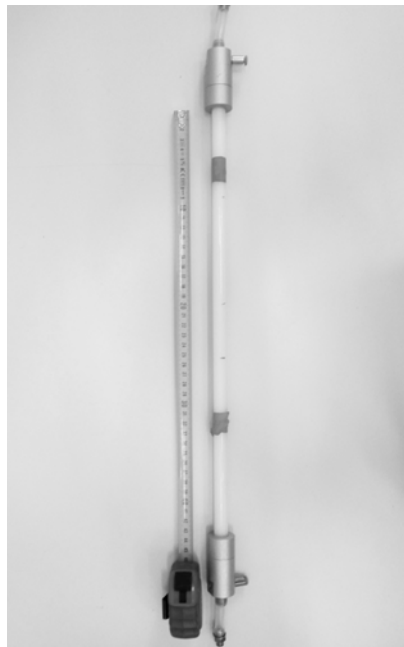
L'analisi termica interna al reattore è stata possibile mediante termocoppia (TC multipoint, Fig. 3.5), inserita dal basso attraverso un foro nella flangia, in grado di misurare le condizioni in cinque punti equidistanti lungo la zona reattiva (tra un punto e l'altro ci sono  $2.5\text{cm}$ ).

Per la misura delle perdite di carico è stato impiegato un sensore di pressione differenziale piezoresistivo con range  $0 - 68\text{mbar}$  e sensibilità modulabile in base alla tensione di alimentazione. È stato usato un manometro ad acqua per calibrarlo.

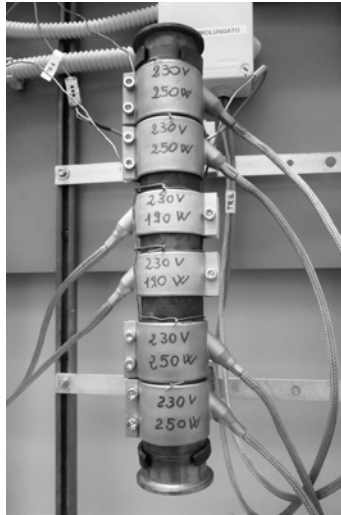
I dati delle misurazioni sono stati raccolti da un sistema di acquisizione multicanale (®Picolog) connesso al computer e alimentato attraverso una porta USB.



**Figura 3.1:** *Reattore tubolare in acciaio: diametro interno 3.6cm; lunghezza 50cm.*



**Figura 3.2:** *Reattore tubolare in quarzo: diametro interno 1.05cm; lunghezza 43cm.*



(a) fasce riscaldanti



(b) con coibentazione

**Figura 3.3:** *Reattore tubolare in acciaio: diametro interno 4cm; lunghezza 30cm.*



**Figura 3.4:** *Supporto interno al reattore.*



**Figura 3.5:** *Termocoppia (TC) Multipoint.*



(a) manometro ad acqua



(b) sensore piezoresistivo

**Figura 3.6:** *Sensori di pressione.*

Tale sistema restituisce in uscita una tensione compresa tra 0 e 2.5V. Con questo strumento è possibile stabilire la frequenza di campionamento e impostare i parametri calcolati in fase di calibrazione.

È stato utilizzato un misuratore di portata per regolare il flusso del fluido ai reattori, caratterizzato da un range pari a 0 – 1400ml/min.

### 3.3 Materiali utilizzati

Nello studio preliminare sono stati impiegati materiali con caratteristiche ben note per facilitare la calibrazione degli strumenti di misura e la validazione del metodo. In particolare sono state utilizzate sfere di vetro e di ferro come materiale di riempimento, Fig. 3.7, formando così dei letti porosi all'interno dei reattori.

Il materiale ferroso (SF1) è costituito da sfere con un diametro pari a 0.85mm, valore indicato dal fornitore, e una porosità  $\epsilon = 0.38$ , valutata con il metodo del volume descritto nel paragrafo 2.2 usando acqua. Le sfere di vetro (SV1) hanno un diametro medio di circa 0.875mm e  $\epsilon = 0.41$ , stimata come in precedenza. Queste sono state impiegate nella fase di calibrazione del trasduttore di pressione differenziale, confrontando i risultati ottenuti con altre sfere di vetro (SV2) di diametro maggiore ( $d_p = 2mm$ ), quest'ultime impiegate per la sola fase di calibrazione.

Nella zona di preriscaldamento vengono inserite sfere di ferro con diametro di 1cm, Fig.3.8, le quali sono riscaldate per conduzione con l'energia termica fornita sulla parete esterna del tubo dai riscaldatori a fasce e a loro volta somministrano



(a) sfere di ferro (SF1)



(b) sfere di vetro (SV1)

**Figura 3.7:** *Materiale per la fase di validazione sperimentale.*

calore al fluido che successivamente investe il materiale combustibile nella zona di reazione. Da un punto di vista termico, queste sfere sono sicuramente poco efficienti poichè vi è poco contatto con la parete e fra loro, ma permettono di non influenzare in maniera importante la velocità del fluido, riducendo la sezione di passaggio. Il fluido è aria, in condizioni ambientali, disponibile nel laboratorio con portata volumetrica regolata da flussometro.

La biomassa usata in questo lavoro è corteccia di pino (Pine Bark; PB), tipicamente utilizzata per applicazioni di giardinaggio e costituisce un sottoprodotto dell'industria del legno. Commercialmente si trova sotto forma di segatura con particelle irregolari e dimensioni maggiori di  $4\text{mm}$ , Fig.3.9(a). Per favorire il processo di Smouldering e il rilevamento delle perdite di carico, il PB è stato macinato e ridotto in polveri mediante un tipico macina-caffè elettrico, Fig.3.9(b), di cui sono state fatte analisi granulometriche con l'utilizzo di un vibro vagliatore composto da una serie di setacci impilati in ordine decrescente di luce netta (parametro utilizzato per determinare l'area di passaggio di una particella attraverso un setaccio). Al termine delle operazioni si sono ottenuti dei campioni in cui le particelle sono distribuite in precisi intervalli granulometrici, Tabella 3.1.

Da questa analisi e tramite l'equazione 2.18 è stato stimato il diametro medio delle particelle di PB pari circa a  $220\mu\text{m}$ .

In alcune configurazioni è stato aggiunto inerte (sabbia) al materiale combustibile, caratterizzato da granuli differenti, Figura 3.10. In particolare il campione A, Fig.3.10(a), è più fine e ha un diametro medio di circa  $123\mu\text{m}$ , il campione B ha  $D_p = 156\mu\text{m}$ , mentre il campione C è grossolano ( $D_p = 1300\mu\text{m}$ ). Questi valori sono stati ottenuti da analisi granulometriche. L'aggiunta di materiale inerte permette di modificare le condizioni iniziali di porosità e permeabilità del materiale solido e influenza il comportamento termico del processo di Smouldering.





**Figura 3.8:** *Sfere di ferro: diametro 1 cm.*



(a) PB



(b) PB macinato

**Figura 3.9:** *Corteccia di pino (Pine Bark).*

maglia	$d_i$ $\mu m$	peso PB trattenuto $g$	Percentuale rispetto massa totale $\%$
>850	850	4.79	15.60
>710	780	1.86	6.06
>600	655	2.75	8.95
>500	550	2.13	6.94
>400	450	2.94	9.57
>300	350	3.21	10.45
>250	275	2.55	8.30
>200	225	2.34	7.62
>150	175	2.60	8.46
fondo	75	5.54	18.04

**Tabella 3.1:** *Analisi granulometrica del PB.*

### 3.4 Validazione sperimentale e analisi preliminare

La prima parte dello studio è stata concentrata sulla validazione dei metodi e della strumentazione. Il sensore di pressione differenziale è stato calibrato per confronto con il manometro ad acqua. La calibrazione è stata effettuata sul tubo in quarzo, Fig. 3.2: una prima quantificazione riguarda i valori di tensione osservati e le letture sul manometro ad acqua con reattore vuoto variando la portata del gas nel range del flussometro, in modo da caratterizzare l'impianto complessivo, rilevando perdite di carico concentrate (come restringimenti, raccordi) e distribuite. Il sistema è stato completamente riempito con sfere di vetro (da diametro di  $2mm$  e, in seguito, da  $0.875mm$ ) raccogliendo i valori di tensione in uscita dal sistema di acquisizione al variare della portata di aria a cui vengono sottratti quelli relativi al tubo vuoto. I dati raccolti hanno permesso di correlare la tensione con le perdite di carico nette lette sul manometro come mostrato in Figura 3.11. Questo parametro è stato implementato nel sistema Picolog, alimentato a  $12Volt$ , affinché il valore in uscita possa essere espresso in  $mbar$ .

Durante la caratterizzazione del grado di vuoto (o porosità) della biomassa utilizzata nei test, si è riscontrato che la densità delle polveri risulta essere inferiore a quella dell'acqua, per cui non è stato possibile utilizzare il metodo ad acqua utilizzato in precedenza. Non avendo a disposizione un liquido con densità inferiore, si è implementato un metodo alternativo a quelli elencati nel paragrafo 2.2. La tecnica consiste nel valutare  $\epsilon$  misurando le perdite di carico del letto impacato al variare della portata d'aria e confrontando i dati ottenuti con il modello di Ergun, eq. 2.14. Questo metodo non è da considerarsi uno standard, in quanto è



(a) sabbia A

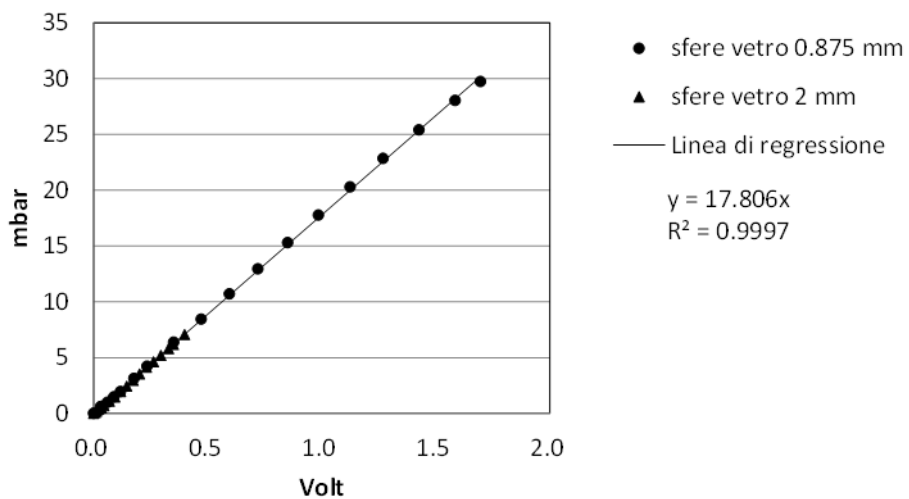


(b) sabbia B



(c) sabbia C

**Figura 3.10:** *Materiale inerte.*

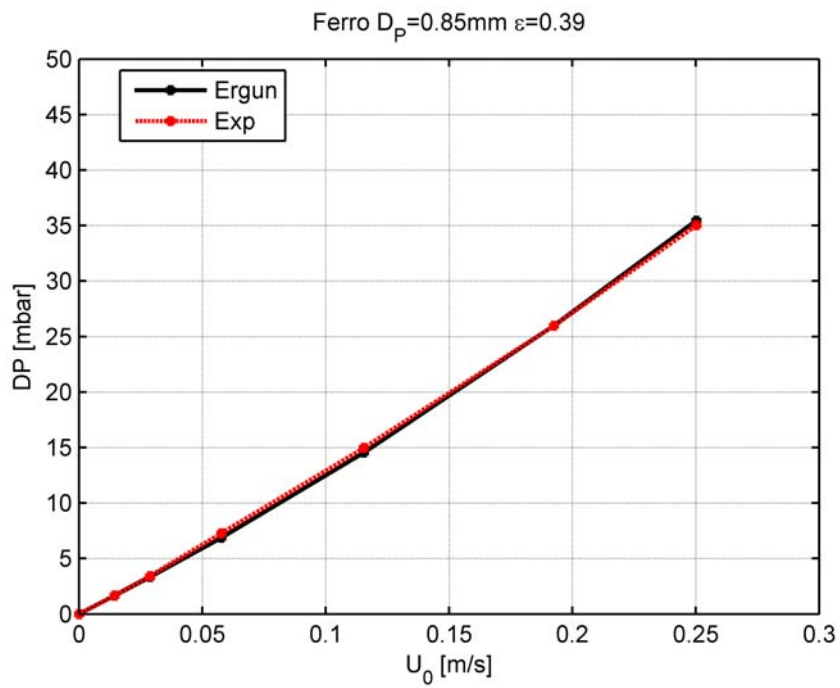


**Figura 3.11:** *Calibrazione del trasduttore di pressione differenziale, grafico Perdite di carico [mbar]-Tensione in uscita [V].*

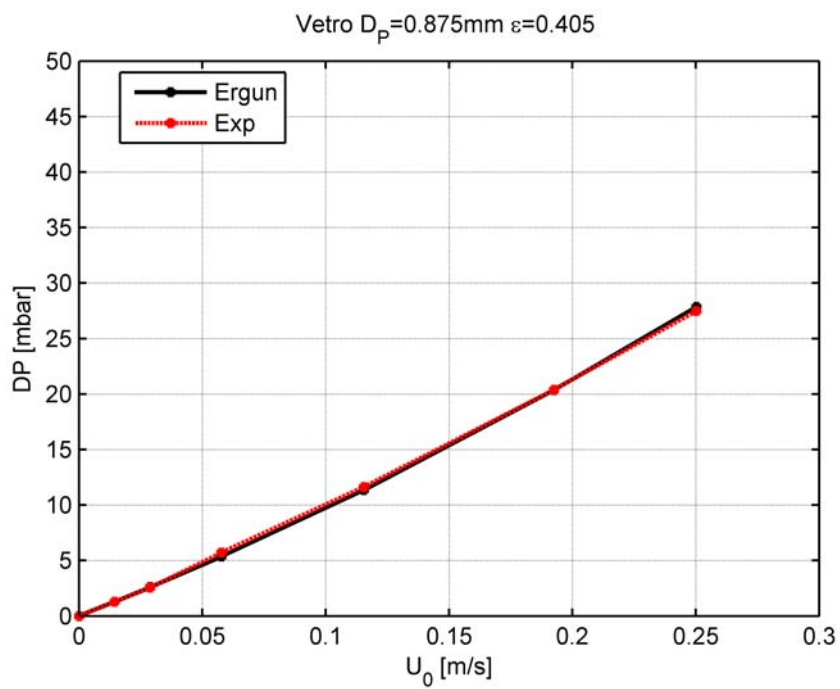
stato implementato empiricamente e risulta difficilmente riproducibile. Infatti la porosità del mezzo dipende, oltre che dalle condizioni di impaccamento, anche dalla distribuzione delle particelle in base alle dimensioni e alla forma. Dato che la permeabilità aumenta al crescere della porosità e del diametro delle particelle, questo fa sì che il gas scelga preferenzialmente zone ad alta porosità rispetto a zone a bassa porosità. In ogni caso rappresenta un metodo per comprendere meglio la fenomenologia e guidare la sperimentazione. Implementare Ergun significa fissare alcuni parametri, in particolare il diametro delle particelle ( $D_p$ ), le condizioni del fluido ( $\mu; \rho$ ), la lunghezza del letto poroso ( $L$ ) e il coefficiente di sfericità ( $\Phi$ ). Il diametro è stato stimato per ciascun materiale con l'analisi granulometrica, come precedentemente esposto. Il fluido è stato ipotizzato in condizioni ambientali. La validazione di questa tecnica è stata effettuata utilizzando le sfere di vetro ( $D_p = 0.875mm$ ) e di ferro di cui è noto il valore di  $\epsilon$ ,  $\Phi$  imposto unitario, e impiegando il tubo in quarzo. Nella Figura 3.12 vengono riportate le perdite di carico al variare della portata in ingresso: dal confronto dei dati sperimentali con il modello di Ergun implementato in  $\text{\textcircled{R}}\text{Matlab}$ , e è emerso come il modello tenda a sovrapporsi ottimamente all'andamento dei dati sperimentali. La stessa operazione è stata ripetuta con il reattore tubolare in acciaio, Fig. 3.1, con sezione trasversale maggiore. A parità di portate del gas, se la sezione di passaggio è maggiore, la velocità (eq. 2.8) è minore. Le perdite di carico sono risultate troppo basse per essere rilevate dal trasduttore di pressione in dotazione. Per il reattore usato nella parte sperimentale insorgono i medesimi problemi (segnale troppo debole o affetto da rumore). Ragion per cui sono stati presi alcuni accorgimenti confermati da uno studio parametrico sull'incidenza di determinate grandezze sulle differenze di pressione misurate:

- Lavorare con portate del gas pari a  $1000ml/min$ . Se fosse impiegata una portata inferiore, le perdite di carico difficilmente potrebbero essere misurate. D'altra parte, una portata maggiore, implicherebbe un regime di flusso turbolento ( $Re_p < Re_{p,critico}$ , eq.2.15) e un raffreddamento maggiore del sistema rischiando di non innescare lo Smouldering.
- Macinare e setacciare la biomassa a disposizione. In questo modo si riduce il diametro delle particelle diminuendo la permeabilità del mezzo poroso e aumentando il segnale di tensione in uscita relativo alle perdite di carico. Si ha inoltre che la velocità di ossidazione è funzione della superficie esterna per unità di volume della particella, quindi riducendo le dimensioni delle particelle questa aumenta [46].

Con questa metodologia, per ogni test sperimentale, si è provveduto a caratterizzare il materiale posto nel reattore, analizzando in particolare il grado di vuoto iniziale a "freddo" ( $\epsilon^0$ ), cioè prima di apportare calore al sistema.



(a) Sferre di ferro



(b) Sferre di vetro

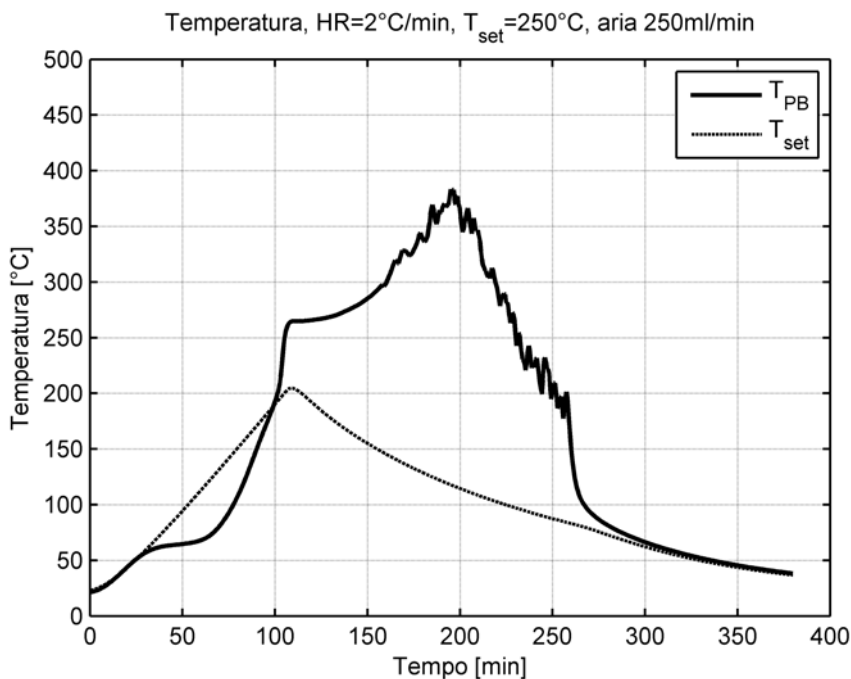
**Figura 3.12:** Confronto delle perdite di carico sperimentali con il modello di Ergun.

Altre considerazioni sono state fatte per uniformare i test svolti nello studio. La biomassa è stata essiccata in forno a muffola a 105°C per 24 ore, poiché l'umidità presente nel PB disturbava il segnale di pressione a causa della formazione di gocce nella zona di scarico.

Per quanto concerne il controllo della fase di riscaldamento è stata fissata una rampa di somministrazione del calore pari a 10°C/min, mentre la temperatura di set-up imposta al termoregolatore delle fasce riscaldanti è stata scelta in base alla temperatura di innesco (detta anche Temperatura critica dell'aria primaria, definita come la minima temperatura alla quale può essere ottenuta l'ignizione [46]) e alle dispersioni del sistema. Le fasce riscaldanti attivate sono solo quelle relative alla zona di preriscaldamento.

Tali condizioni operative sono state dettate da osservazioni fatte su test preliminari (TP) mirati:

- TP-1: Verifica del valore della Temperatura critica e della capacità di autosostenersi dello Smouldering, Figura 3.13. La temperatura si attesta intorno ai 200 – 220°C, come riscontrato in [46], [47]. Spegnendo le fasce riscaldanti dopo l'innesco si è osservato invece come il fenomeno evolve in autonomo. Nei successivi test sperimentali ciò non è stato considerato e le fasce sono state spente solo alla fine della reazione, quando il profilo di temperatura della zona reattiva eguaglia quella dell'aria in ingresso.
- TP-2: Influenza della rampa di riscaldamento (Heating Rate - HR), Figura 3.14, con aggiunta di inerte (sabbia B, al 50 % in volume). Nel caso di basso HR (0.1°C/min) non si ha innesco e il prodotto finale risulta carbonizzato con un consumo minimo di materiale. Aumentando HR si ha ignizione. Con  $HR = 10^\circ\text{C}/\text{min}$ , si riduce il tempo necessario per raggiungere il valore di temperatura critica senza andare ad influenzare in maniera evidente il fenomeno.
- TP-3: Numero di fasce riscaldanti attive. Inizialmente le fasce attive erano quelle superiori e inferiori con l'idea di simulare il comportamento termico di un forno, utilizzato in alcuni test di in uno studio precedente, in modo da ridurre al minimo le dissipazioni di calore. Le fasce erano termoregolate allo stesso modo e ciò comportava una asimmetria termica verticale nel reattore dovuta principalmente al flusso dell'aria e a problemi di regolazione delle fasce inferiori. Sono comunque interessanti le osservazioni che si possono fare sul test i cui risultati sono rappresentati in Figura 3.15: per le ragioni di cui sopra, l'innesco avviene inizialmente nella parte inferiore del letto di combustibile (TC5) e dopo qualche minuto contemporaneamente si innesca in testa, dove viene insufflata aria. Il processo di Smouldering nella



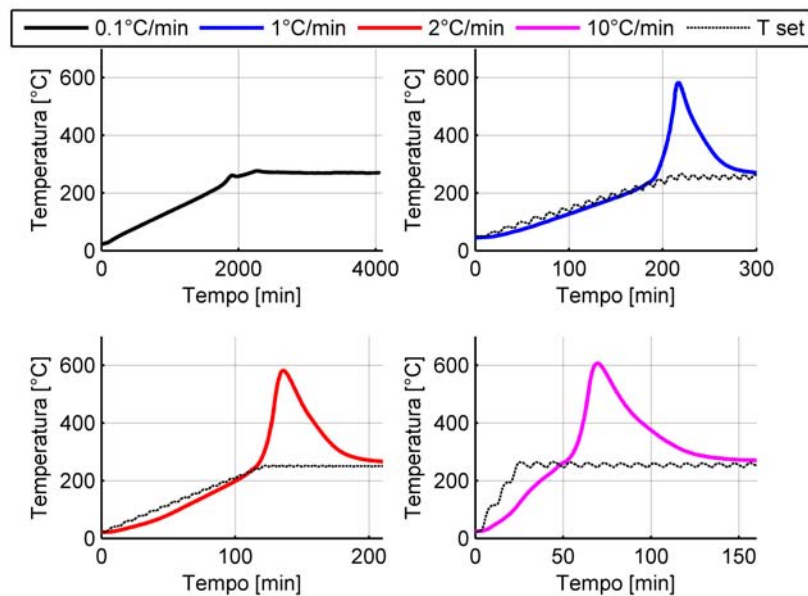
**Figura 3.13:** TP-1: Verifica della capacità di autosostenersi dello Smouldering.

zona di coda viene rallentato dalla mancanza di ossidante, che nel frattempo viene consumato nella parte superiore. Solo dopo che il fronte partito da testa raggiunge la zona in basso il processo riprende. Onde evitare tali situazioni, sono state attivate le sole fasce superiori di preriscaldamento dell'aria primaria.

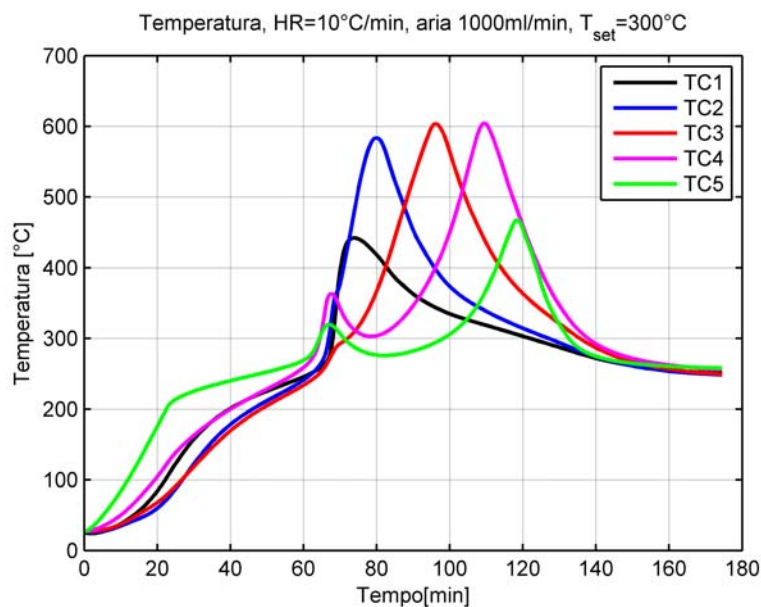
- TP-4: Comportamento termico del sistema senza reazione, Fig 3.16. Le fasce riscaldanti attive sono quelle della zona di ingresso dell'aria, in questo caso il gas viene insufflato dall'alto. Le altre sono disattivate. La temperatura imposta al programma Cx-Thermo è pari a  $300^{\circ}\text{C}$ , in modo tale che l'aria entri nella zona reattiva ad una temperatura di  $250^{\circ}\text{C}$  (TC1). Gli altri profili descrivono l'intera zona centrale vuota e assumono un tale andamento a causa del fatto che l'energia termica fornita dalle fasce riscaldanti attive si trasmette lungo la parete del reattore.

### 3.5 Geometria impianto sperimentale

Di seguito viene descritto la geometria del reattore utilizzato per i test sperimentali con tutti gli accorgimenti raccolti nello studio preliminare. In Figura 3.17 si

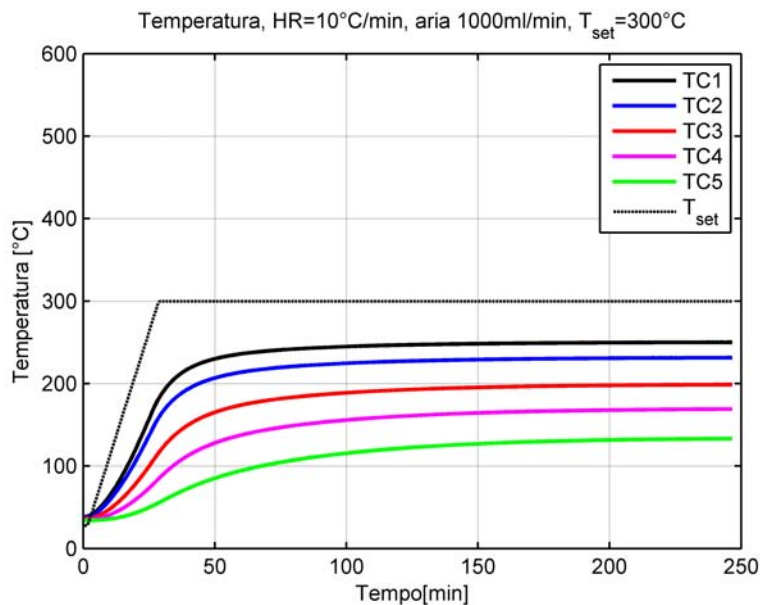


**Figura 3.14:** TP-2: Analisi termica (Temperatura nel punto centrale della zona reattiva) al variare della rampa di riscaldamento (HR). Aria insufflata a 1000ml/min e  $T_{set} = 250^{\circ}\text{C}$ .



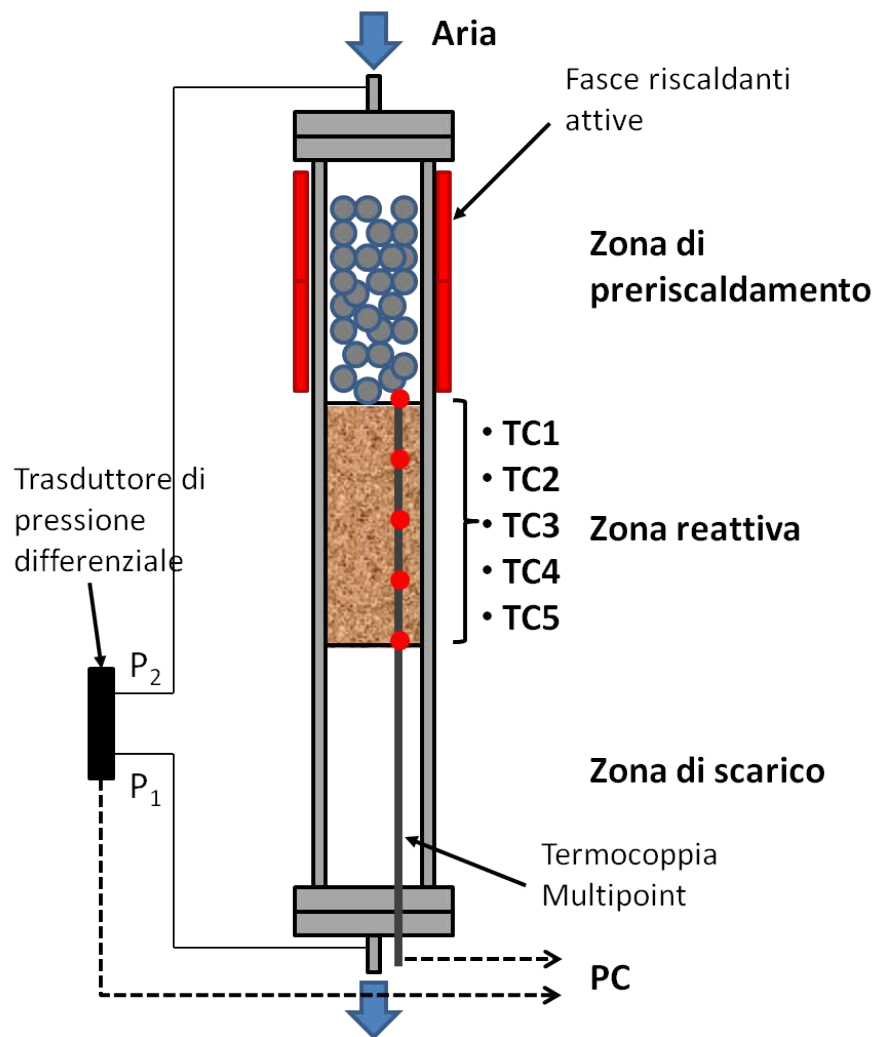
**Figura 3.15:** TP-3: Profili di temperatura con fasce riscaldanti attive nella parte superiore e inferiore del reattore, combustibile caricato misto a sabbia di tipo B, aria insufflata dall'alto a 1000ml/min,  $T_{set} = 300^{\circ}\text{C}$ .





**Figura 3.16:** TP-4: Comportamento termico del reattore con  $T_{set} = 300^{\circ}\text{C}$ .

osserva come l'aria venga insufflata dall'alto, attraverso la zona di preriscaldamento tra le sfere di ferro (SF2) in temperatura grazie al calore somministrato dalle fasce riscaldanti superiori (le uniche attive) e permea nel materiale combustibile. In corrispondenza della TC1, punto iniziale della termocoppia Multipoint e in testa alla zona reattiva, l'aria è a  $250^{\circ}\text{C}$ . A distanza di  $2.5\text{cm}$  l'uno dall'altro, si trovano gli altri punti di rilevamento, da TC2 a TC5. I gas vengono convogliati verso l'uscita, la quale scarica direttamente all'esterno. I gas di scarico vengono quindi aspirati dalla cappa.



**Figura 3.17:** Geometria del reattore con PB.

# Capitolo 4

## Risultati sperimentali

In questo capitolo si analizzano in maniera critica i test sperimentali effettuati, osservando i dati raccolti sulle temperature e perdite di carico nelle varie configurazioni. Si valutano poi l'influenza di porosità e permeabilità sullo Smouldering.

### 4.1 Esperimenti e caratterizzazione iniziale del mezzo poroso

La campagna sperimentale è stata condotta tipicamente fissate le seguenti condizioni operative:

- aria in condizioni ambientali insufflata dall'alto ad una portata volumetrica di  $1000\text{ml}/\text{min}$ .
- Zona di preriscaldamento termoregolata con una rampa (HR) di  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  e  $T_{set} = 300^\circ\text{C}$ , ciò garantisce che l'aria entri nella zona di reazione a circa  $250^\circ\text{C}$ . Le fasce vengono spente solo al termine dei test, per uniformarli.
- Il riempimento della zona di reazione avviene dall'alto per versamento. Il combustibile PB immesso pesa circa  $30\text{g}$  occupando un volume caratterizzato da una sezione del tubo ( $A_R$ ) pari a  $1.26 \times 10^{-3}\text{m}^2$  e una lunghezza ( $L$ ) di  $0.1\text{m}$ . Nel caso in cui viene aggiunto inerte l'operazione di mescolamento si ha prima del versamento.
- Nella zona di scarico vengono convogliati i gas e i condensati prodotti nella zona sovrastante verso l'uscita.

In Tabella 4.1 si riporta un sommario sintetico della tipologia dei test condotti, in cui le quantità indicate raggiungono sempre i 10cm di altezza del letto impaccato.

Test	Materiale	% in vol. <i>PB/inerte</i>	Peso <i>g<sub>PB</sub>/g<sub>Inerte</sub></i>	Note
TS-Base	PB	100/0	30/0	
TS-A	PB e sabbia A	50/50	15/85	
TS-B	PB e sabbia B	50/50	15/75	
TS-C	PB e sabbia C	50/50	15/95	
TS-D	PB e sabbia B	70/30	24/46	
TS-E	PB e sabbia B	50/50	15/75	a strati
TS-F	PB e sabbia B	50/50	25/125	compattato

**Tabella 4.1:** Condizioni dei test sperimentali.

Prima di avviare ciascun test, ossia prima di attivare i sistemi di riscaldamento dell'aria, è stato caratterizzato il mezzo poroso rilevando in particolare le perdite di carico al variare della portata di aria. L'elaborazione dei dati e l'utilizzo del metodo per confronto con il modello di Ergun, ha permesso di stimare il valore iniziale di permeabilità e di porosità del letto impaccato. Il coefficiente di sfericità  $\Phi$  è stato ricavato per ciascun materiale come medie su un campione di più test. Il diametro medio è stato determinato secondo l'equazione 2.18. I valori stimati per i vari materiali sono riassunti nella Tabella 4.2.

Campione	$k$ $m^2$	$Dp_{mean}$ $\mu m$	$\Phi$ [-]	$\epsilon^0$ [-]
PB	1e-10	220	0.8*	0.512
sabbia A	1e-11	123	0.9*	0.385
sabbia B	4e-11	156	0.9*	0.467
sabbia C	8e-9	1300	0.7*	0.618

**Tabella 4.2:** Caratterizzazione della porosità iniziale dei materiali (confronto con Modello di Ergun). \*stime medie su un campione di più test

La permeabilità è stata valutata con l'eq. 2.2. Il valore di  $k$  indicato in tabella è quello corrispondente alla portata di 1000ml/min, poiché per valori inferiori si ha maggiore disturbo nel segnale e il mezzo poroso tende ad assestarsi verso portate alte, Figura 4.1. Questo perché, aumentando la velocità, le particelle del letto poroso tendono a consolidarsi tra loro [48] e ad assumere una struttura ben

definita. Nel caso della sabbia C il valore è molto variabile in quanto le perdite di carico registrate sono piuttosto basse, tuttavia tale valore è stato comunque inserito per completezza.

Nei test che coinvolgono mezzi costituiti da due materiali (da TS-A a TS-F) la porosità iniziale è stata valutata secondo la relazione 2.29. Infatti in sistemi costituiti da miscele di elementi con diametro differente, la porosità e la permeabilità dipendono dal rapporto delle dimensioni delle particelle e dalla frazione di volume occupata da ciascun elemento. Il diametro medio delle particelle è stato determinato con l'equazione 2.33, mentre la permeabilità è stata ricavata come in precedenza, dalla Legge di Darcy. Il coefficiente di sfericità è stato invece stimato per confronto con il modello di Ergun. Nella tabella 4.3 è stata riepilogata la caratterizzazione iniziale del mezzo poroso dei test eseguiti.

Nel test TS-E il valore misurato sperimentalmente di  $k$  ( $4 \times 10^{-11} m^2$ ) è confrontabile con quello ottenuto analiticamente secondo l'eq. 2.35 pari a  $5 \times 10^{-11} m^2$ , prendendo i valori di permeabilità per il singolo strato dalla Tabella 4.2.

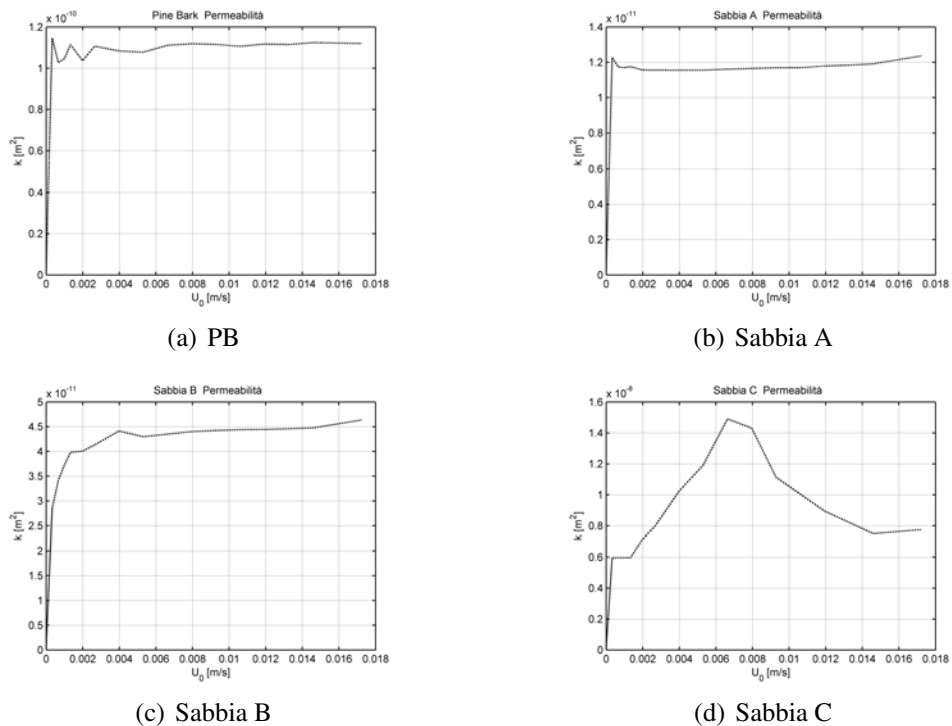
Test	Materiale	% in vol. PB/inerte	$k$ $m^2$	$Dp_{mean}$ $\mu m$	$\epsilon^0$ [-]	$\Phi$ [-]	$u_{sml}$ $mm/min$
TS-Base	PB	100/0	1e-10	220	0.512	0.8	ND
TS-A	PB e sabbia A	50/50	2e-11	0.158	0.398	0.8	1.9
TS-B	PB e sabbia B	50/50	5e-11	0.182	0.470	0.8	1.9
TS-C	PB e sabbia C	50/50	2e-10	0.38	0.432	0.75	ND
TS-D	PB e sabbia B	70/30	7e-11	0.197	0.488	0.8	1.5
TS-E	PB e sabbia B	50/50	4e-11	0.182	–	–	ND
TS-F	PB e sabbia B	50/50	2e-11	0.182	0.371	0.8	1.7

**Tabella 4.3:** Caratterizzazione test al tempo iniziale.

## 4.2 Temperatura e perdite di carico

Dopo la caratterizzazione iniziale fluidodinamica del letto impaccato, si è passati allo studio sperimentale orientato alla comprensione dei fenomeni chimici e fisici che vanno ad influenzare il processo di Smouldering. Nello specifico si è analizzato l'andamento delle temperature all'interno della zona reattiva e delle perdite di carico a seguito di un riscaldamento imposto.

Nel TS-base è stata versata la biomassa (PB) dopo le operazioni di macinazione ed essiccamento. La quantità immessa è di circa 30g in modo da riempire la zona reattiva lunga 10cm. Dopo aver effettuato il test per la caratterizzazione iniziale (ciò garantisce anche un maggior consolidamento del letto poroso),

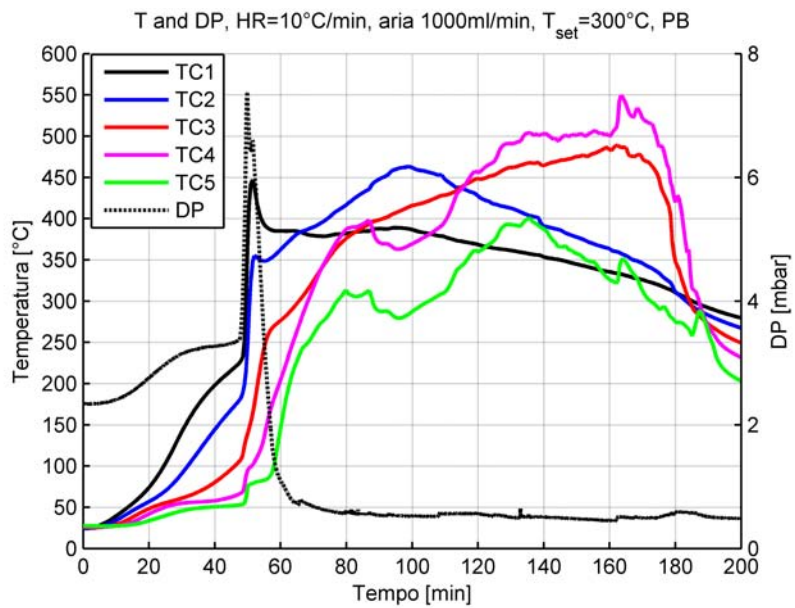


**Figura 4.1:** *Permeabilità iniziale.*

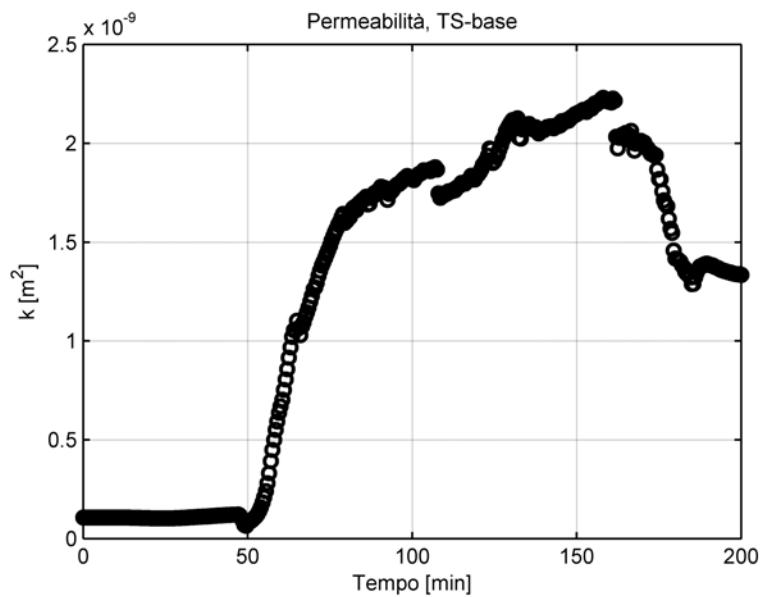
viene imposta una portata d'aria pari a  $1000\text{ml}/\text{min}$  e vengono attivate le fasce riscaldanti poste in corrispondenza della zona di riscaldamento.

Nella Figura 4.2(a) è possibile osservare la prima fase di riscaldamento del sistema. Raggiunti i  $220^\circ\text{C}$  circa viene rilevato l'innescò del processo, in corrispondenza della testa della zona reattiva (TC1). Si assiste infatti ad un improvviso aumento di temperatura e allo stesso tempo un picco molto accentuato delle perdite di carico. L'evoluzione nel tempo dei rilevamenti permette di fare alcune ipotesi su come procede il fronte dello Smouldering all'interno del reattore. Subito dopo il picco, le perdite di carico diminuiscono rapidamente, sintomo che il flusso del gas all'interno della matrice porosa è riuscito ad attraversare il materiale mediante una strada preferenziale (i.e. un canale nel letto poroso). Questo consente di immaginare un fronte che procede dall'alto verso il basso e in direzione radiale, quindi non in modo unidirezionale. Il motivo di ciò può essere ricondotto al supporto treppiede posto all'interno della zona reattiva.

Altre considerazioni sono possibili sulla variazione della permeabilità del letto poroso nel tempo, durante la propagazione del fronte di Smouldering, sempre dall'equazione di Darcy (eq. 2.7) e considerando gli effetti termici che si hanno sulle caratteristiche fluidodinamiche dell'aria. In Figura 4.2(b) è possibile notare



(a) Temperatura e perdite di carico durante la prova.



(b) Permeabilità nel tempo.

**Figura 4.2:** *TS-base*.

una diminuzione di  $k$  in corrispondenza dell'innesco dello Smouldering, calo dovuto principalmente alle sostanze volatili liberate dalle reazioni di pirolisi. Tali prodotti, avendo una consistenza semi-solida appiccicosa, vanno ad aumentare la

resistenza opposta al passaggio del gas intasando i canali tra le particelle. Tale risultato è confermato nei test successivi. Subito dopo tale calo, la permeabilità aumenta nel tempo, quando in contemporanea sussistono reazioni di ossidazione, a cui sono imputate le variazioni sostanziali delle caratteristiche strutturali del letto poroso. In questa fase le reazioni infatti vanno a produrre carbone ( $\alpha - char$  e  $\beta - char$ ), con porosità e diametro differente. terminate tali ossidazioni, il fenomeno di Smouldering continua a sussistere agendo sul carbone prodotto attraverso ulteriori ossidazioni (reazioni 1.4, 1.5). Il letto poroso tende a calare verso il basso, poiché la perdita di massa organica bruciata rilascia ceneri, gas e peci. Questa particolare situazione non è stata presa in considerazione nella formula per la determinazione della permeabilità, ipotizzando la lunghezza del letto costante. Al termine del TS-base il PB è risultato completamente decomposto, osservando solo ceneri nella zona reattiva e peci nella zona di scarico.

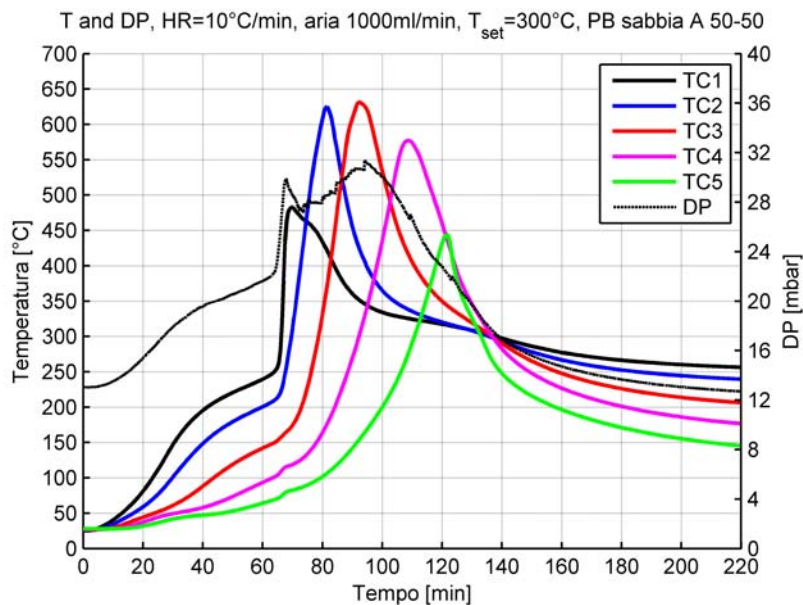
#### **4.2.1 Aggiunta di inerte con granulometria e quantità differenti**

L'idea di aggiungere della sabbia al combustibile è legata principalmente alla modifica della porosità iniziale del letto impaccato e a voler garantire una struttura omogenea durante l'avanzamento del fronte dello Smouldering. In questo modo è possibile studiare il fenomeno in maniera più semplice, uniformandone la direzione (dall'alto verso il basso, Downward Smouldering), inoltre, in questo modo, il sistema risente della presenza dell'inerte, il quale riduce le dissipazioni termiche verso l'esterno.

Nel TS-A la sabbia A è la più fine tra quelle a disposizione. Ciò caratterizza il letto impaccato con una permeabilità e porosità relativamente bassa. In Figura 4.3 sono rappresentati i profili termici e le perdite di carico rilevate. È stato evidenziato come i valori massimi, nei punti in corrispondenza delle TC, si susseguono nel tempo. È possibile quindi immaginare il fronte che avanza, stimandone la velocità media ( $0.19\text{cm}/\text{min}$ ). Quest'ultima è funzione della portata di ossidante e del bilancio termico del sistema [1] e, in ogni test, è stata valutata considerando la distanza tra i punti di misura della termocoppia ( $2.5\text{cm}$ ) e l'intervallo temporale tra i picchi di temperatura registrati, Figura4.4. Considerando le perdite di carico si assiste ad un aumento lineare subito dopo l'innesco (picco) a differenza del TS-base, dove vi era un calo netto. Raggiunto un valore massimo intorno ai  $100\text{min}$ , quando il fronte è in una posizione centrale rispetto alla zona reattiva, le  $\Delta P$  incominciano a diminuire linearmente nel tempo.

Nel TS-B, la granulometria della sabbia è maggiore rispetto al TS-A. Nell'osservare la Figura4.5 si trovano conferme sulla possibilità di stabilire l'istante in cui avviene l'innesco confrontando l'aumento di temperatura della TC1 e la presenza



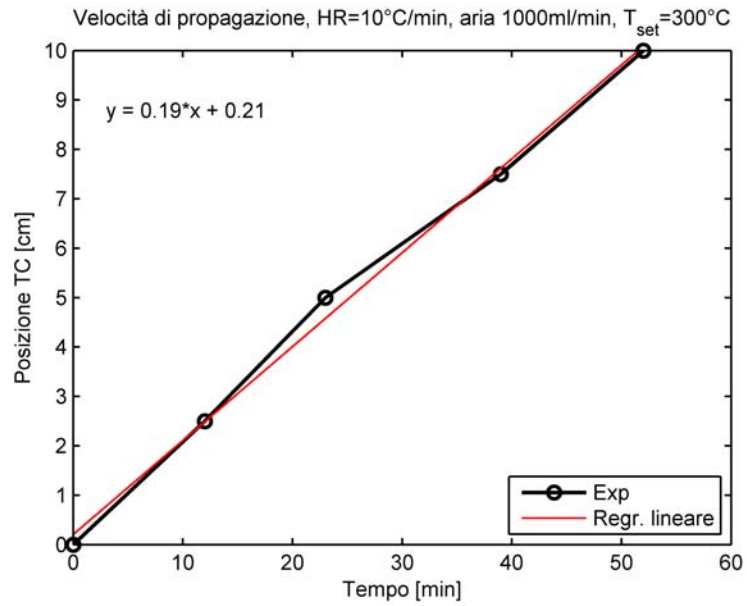


**Figura 4.3:** Confronto profili termici e perdite di carico: TS-A.

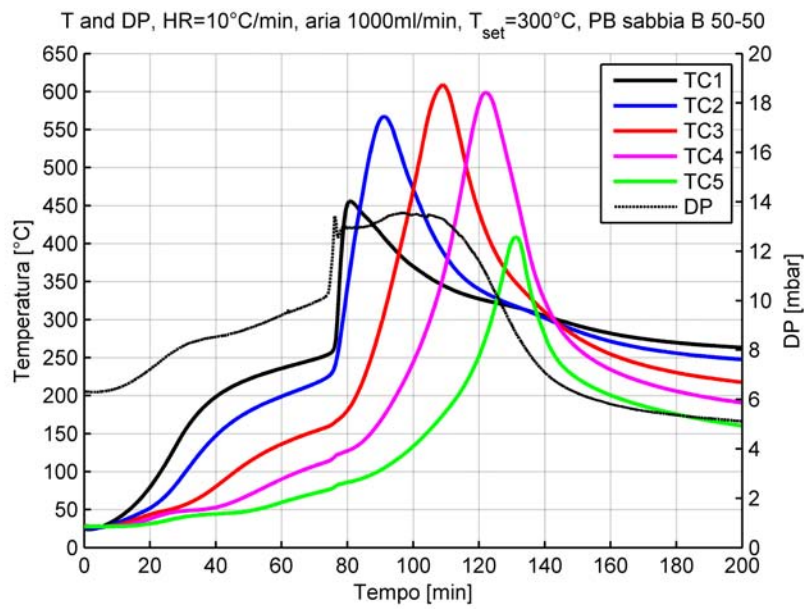
del picco nelle perdite di carico. In particolare si ha tra i 70 – 80min, in ritardo rispetto al caso precedente. Osservando la stima della velocità di propagazione si hanno stessi valori del precedente test ( $0.19\text{cm}/\text{min}$ ), Fig.4.5.

Mescolando PB con il campione di sabbia C, la più grossolana tra le tipologie in possesso, si ha un’aumento della permeabilità, il cui valore è prossimo a quello della biomassa. Al contrario il grado di vuoto non aumenta. Questo perché l’inerte ha diametri delle particelle molto grandi rispetto al PB e va a costituire la struttura principale del mezzo poroso. La biomassa invece va ad occupare lo spazio libero rimanente, riducendo così la porosità del sistema. Dall’analisi del comportamento termico si nota come in questo test (TS-C) la temperatura risulta essere molto inferiore, circa  $150^{\circ}\text{C}$ , rispetto ai test precedenti. Analizzando i prodotti dell’ossidazione si è visto come la biomassa non risulta essere completamente degradata in cenere e peci, ma principalmente in carbone. Viene meno quindi la seconda ossidazione. Non si è determinato la velocità di propagazione in quanto l’andamento dei picchi di temperatura è poco uniforme. Dalle perdite di carico rimane la possibilità di individuare l’istante di tempo in cui avviene l’innesco. Subito dopo si ha un calo con un profilo diverso dai precedenti test.

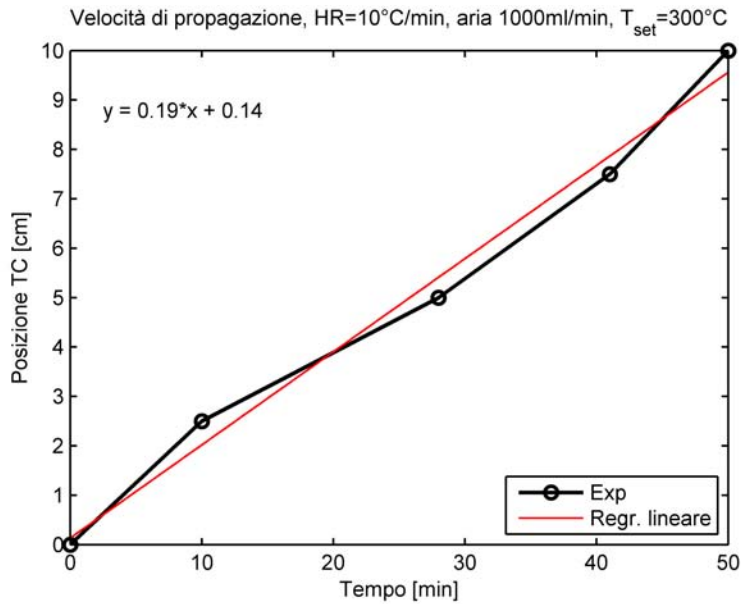
Confrontando le perdite di carico misurate nel tempo ottenute nei test in esame, Fig. 4.8, si osserva come l’aggiunta di sabbia a granulometria via via maggiore incide sull’innesco dello Smouldering, ritardandolo. Inoltre dopo l’innesco le curve assumono andamenti differenti: con piccole particelle di inerte si ha un aumento, tendono a rimanere costanti nel caso di sabbia B, calano a ”gradino” nel



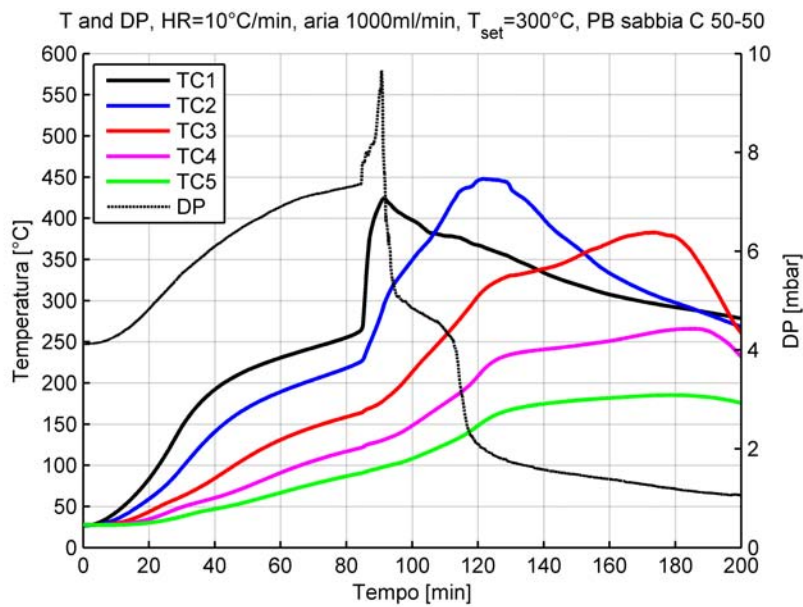
**Figura 4.4:** Velocità di propagazione dell'onda termica: TS-A.



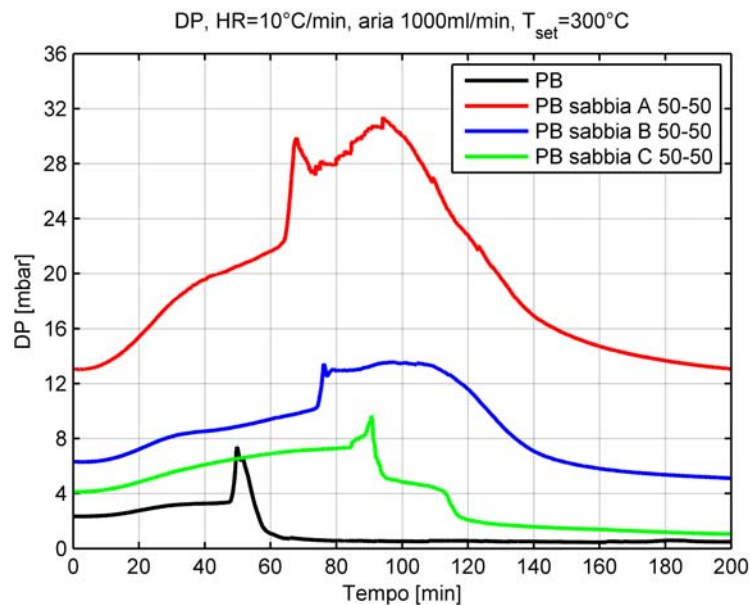
**Figura 4.5:** Confronto profili termici e perdite di carico: TS-B.



**Figura 4.6:** Velocità di propagazione dell'onda termica: TS-B.



**Figura 4.7:** Confronto profili termici e perdite di carico: TS-C.



**Figura 4.8:** Confronto perdite di carico nel tempo: TS-base, TS-A, TS-B, TS-C.

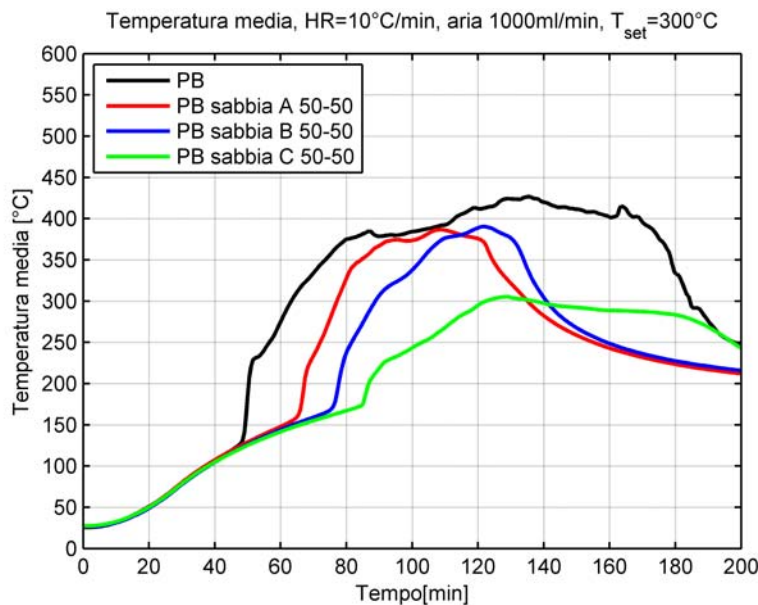
caso di sabbia C grossolana.

In Figura 4.9 è stata confrontata la temperatura media dell'intera zona reattiva nei diversi test per ogni istante di tempo, definita come:

$$T_{media} = \frac{TC1 + TC2 + TC3 + TC4 + TC5}{5} \quad (4.1)$$

L'aumento delle dimensioni delle particelle di inerte va a sottrarre energia al processo di Smouldering, oltre che ritardare l'innesco. Nel TS-C è possibile che le reazioni si spengano perchè diminuisce la superficie per unità di volume della particella di combustibile.

È interessante analizzare il comportamento delle perdite di carico in funzione della temperatura media del sistema, Fig. 4.10. In tutti i casi si ha un aumento iniziale al crescere della temperatura. Successivamente viene visualizzato un repentino incremento (dati sperimentali più radi) nell'istante in cui avviene l'innesco e nonostante la temperatura continui a crescere le perdite di carico risentono meno di tale influenza. Ha maggior peso in questo caso la variazione della porosità del letto, la quale sta aumentando man mano che il fronte avanza (prima ossidazione), come mostrato in Fig.4.11. Infine un'altra considerazione da fare è legata al tratto delle perdite di carico in cui la temperatura media rimane all'incirca costante (tra 350 e i 400 °C, TS-A e TS-B): le  $\Delta P$  diminuiscono in maniera piuttosto lineare, un aspetto che può essere ricondotto al letto poroso che riduce la propria altezza lentamente, contemporaneamente alla seconda ossidazione. Si



**Figura 4.9:** Confronto della temperatura media nel tempo: *TS-base*, *TS-A*, *TS-B*, *TS-C*.

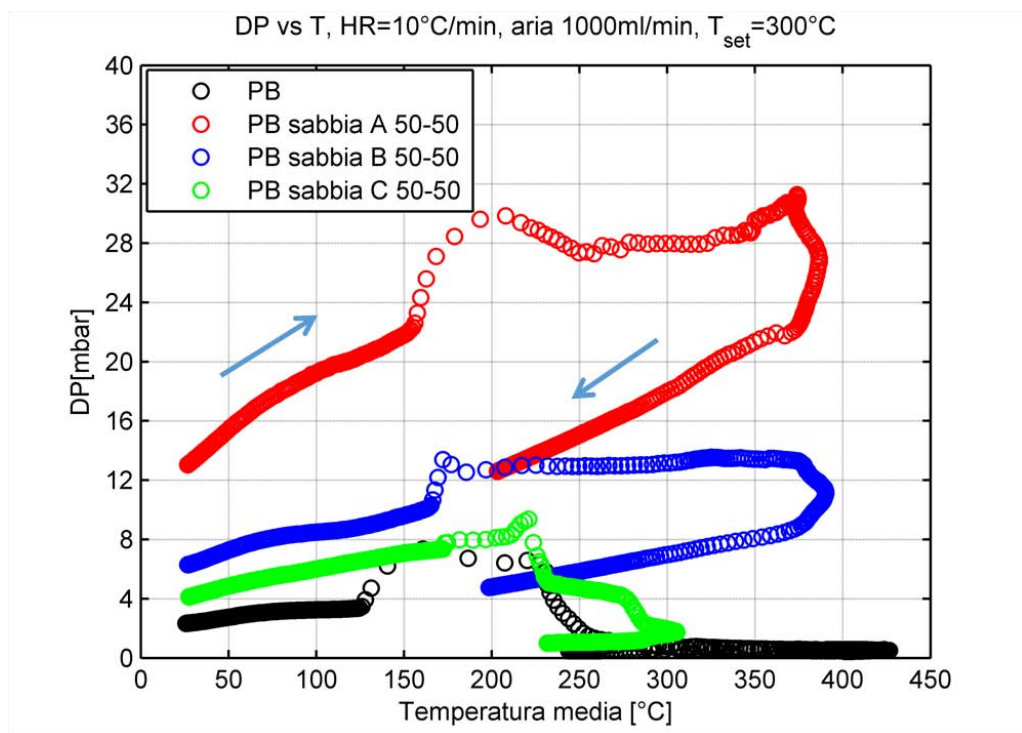
ricorda infatti che le  $\Delta P$  sono direttamente proporzionali alla lunghezza o altezza del mezzo poroso, eq. 2.7, la quale non è possibile misurare durante il processo a caldo.

Confrontando inoltre come varia la permeabilità durante lo Smouldering nei casi con granulometria dell'inerte differente (Fig. 4.11), si evince come questa aumenti maggiormente nel caso del *TS-C*. In tutti gli andamenti si riscontra nella parte finale un leggero calo, questo è determinato principalmente dall'ipotesi semplificativa fatta sulla lunghezza del letto tenuta costante.

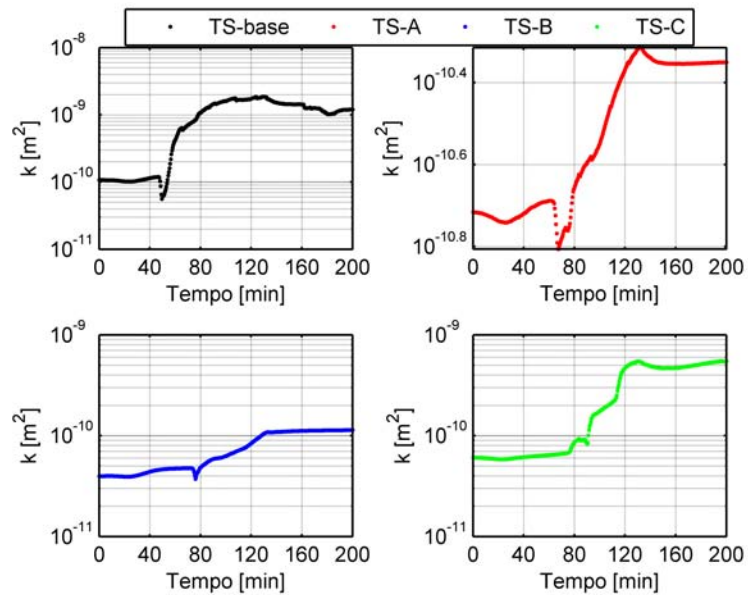
Variando la percentuale in volume dell'inerte mescolato con la biomassa vengono confermate le osservazioni fatte in precedenza. È infatti possibile osservare nella Figura 4.12, il ritardo dell'innesco. Nel momento in cui si fa riferimento alla potenza termica generata (eq. 1.10), quest'ultima si riduce diminuendo la quantità iniziale di combustibile. Rispetto al *TS-B*, la velocità del fronte si riduce a causa della maggior quantità di biomassa, Figura 4.13.

## 4.2.2 Stratificazione biomassa/sabbia

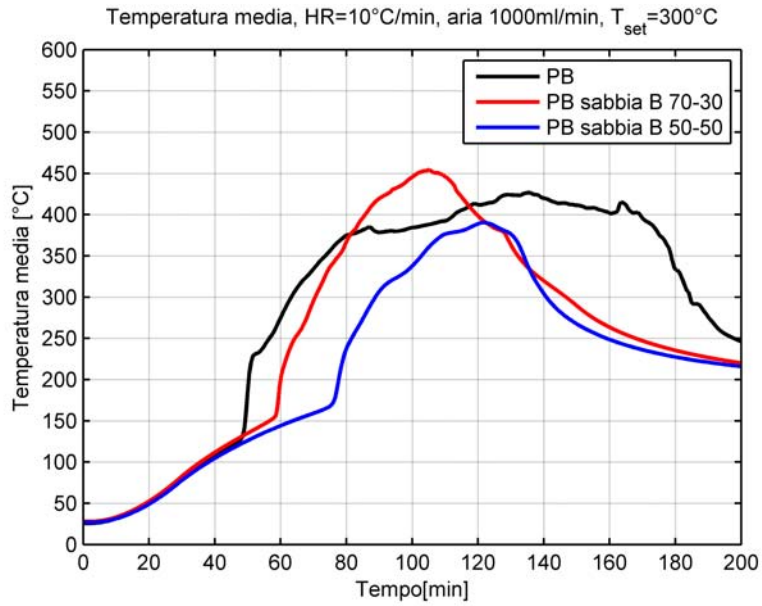
Nel *TS-E* è stato analizzato come una diversa distribuzione dell'inerte influenza il fenomeno di Smouldering e in particolare come varia la permeabilità del mezzo poroso. Sempre per versamento dall'alto è stato riempita la zona reattiva alternando strati di sabbia a strati di PB.



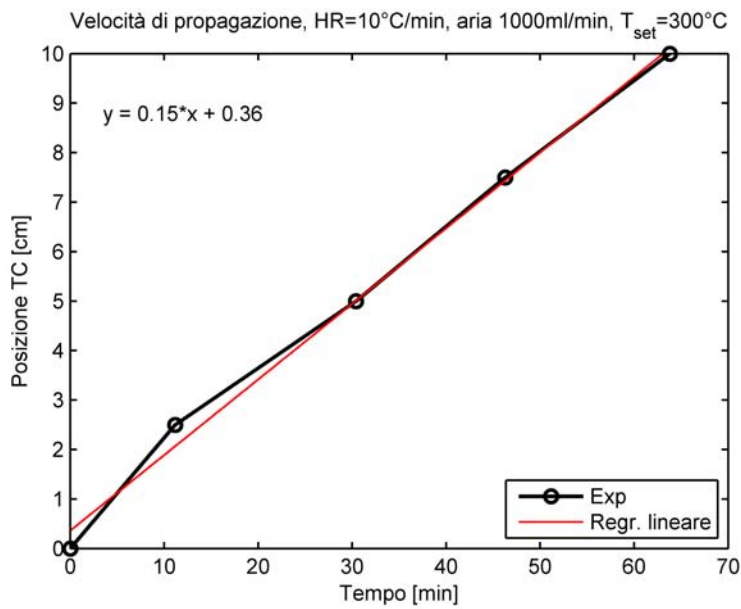
**Figura 4.10:** Confronto delle perdite di carico in funzione della temperatura media: TS-base, TS-A, TS-B, TS-C. La freccia verso destra indica riscaldamento, l'altra il raffreddamento del solido.



**Figura 4.11:** Permeabilità: TS-base, TS-A, TS-B, TS-C.



**Figura 4.12:** Confronto della temperatura media nel tempo: TS-base, TS-D, TS-B.



**Figura 4.13:** Velocità di propagazione dell'onda termica: TS-D.



La struttura finale del mezzo poroso è rappresentata in Figura 4.14, dove si ha, a partire dal basso, uno strato di sabbia B con uno spessore di 1.5cm e uno strato con biomassa pura di spessore pari a 2.5cm. Lo strato centrale invece è costituito da sabbia con uno spessore di 2cm e infine ancora corteccia di pino e sabbia in testa alla zona. Il riempimento è stato effettuato sempre dall'alto con versamento, tale operazione non permette di avere perfettamente zone ben definite e precise. Infatti a complicare il tutto vi è la presenza della TC multipoint e il supporto metallico costituito da un treppiede per garantire sostegno alla zona superiore di preriscaldamento. Si è cercato comunque di far corrispondere a ciascuno strato almeno un punto di rilevamento della temperatura.

Intervallare sabbia a biomassa ha determinato i profili termici in Figura 4.15, dove il fronte dello Smouldering si sviluppa solo in corrispondenza degli strati occupati dalla biomassa con punti di rilevamento della temperatura TC2 e TC4. In questo caso lo strato di sabbia in testa alla zona reattiva costituisce un mezzo che distribuisce in maniera più omogenea il gas in ingresso da un punto di vista termico e meccanico. Gli strati sottostanti quelli con la biomassa fungono da filtri alle sostanze volatili liberate dalle reazioni. Infatti nella Figura 4.16 è possibile notare, dal confronto con gli altri test, il valore elevato delle  $\Delta P$  in corrispondenza del picco e quindi dell'innesco (circa 10mbar).

### 4.2.3 Compattazione del letto poroso

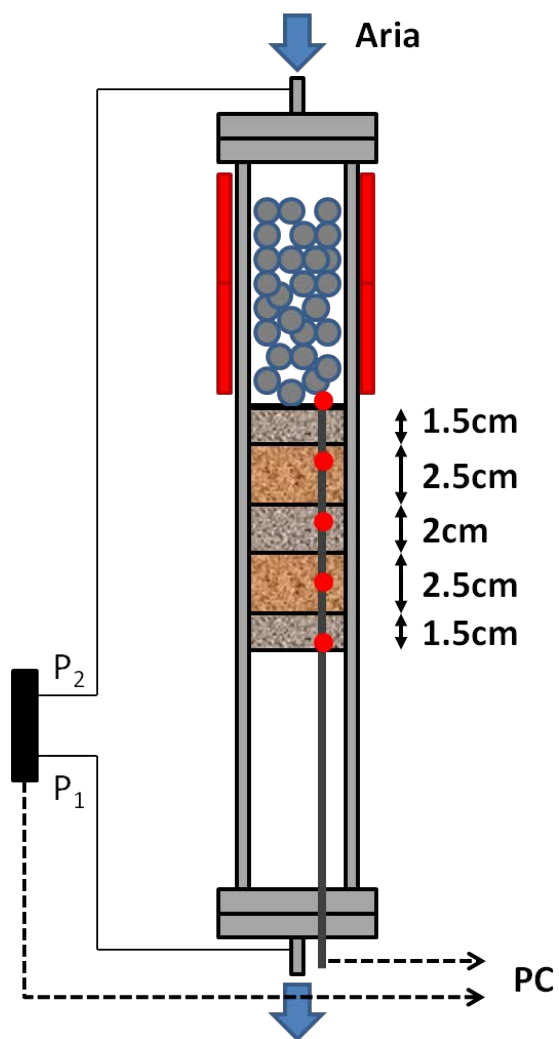
Un modo per ridurre la comparsa di reazioni endotermiche è quello di compattare il cumulo di combustibile, poichè viene ridotta la presenza di ossigeno interstiziale [7, 9].

L'idea della compattazione in questo lavoro di tesi è stata sfruttata per variare la porosità iniziale del letto impaccato. Infatti nel TS-F, utilizzando PB misto a sabbia B, è stata versata una quantità di materiale maggiore rispetto al TS-B (+67%), a parità di altezza del letto ( $L$ ). È stato così ridotto il grado di vuoto a circa 0.37, valore comunque elevato per poter inibire lo sviluppo dello Smouldering.

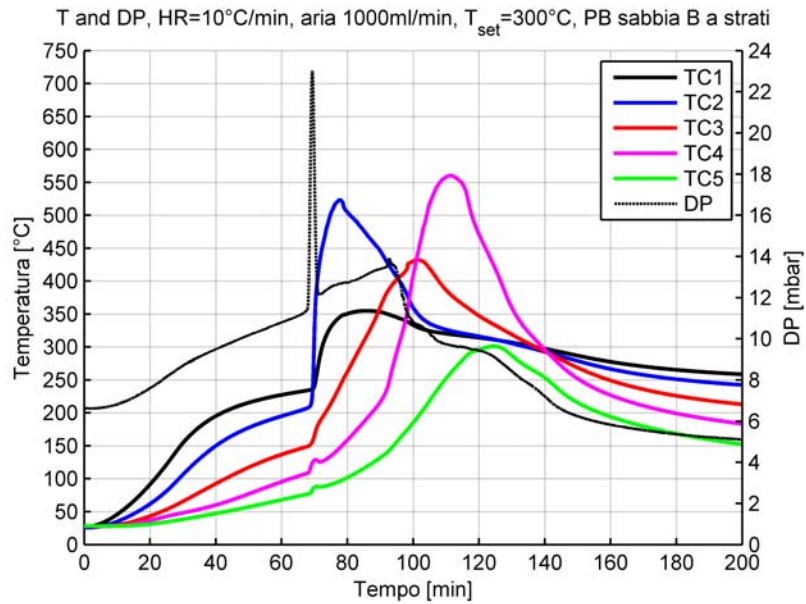
In Figura 4.18 è possibile osservare come i valori massimi delle temperature raggiunte sono leggermente inferiori, mentre le perdite di carico hanno valori maggiori, ma andamenti comunque confrontabili con il TS-B. Riguardo al tempo d'innesco non sono stati osservati ritardi dal confronto delle perdite di carico di Fig.4.19.

Osservando l'andamento della permeabilità durante l'avanzamento del fronte di Smouldering è possibile notare come i due profili siano molto simili (Fig. 4.20). Ciò permette di ipotizzare che durante l'avanzamento del fronte, la permeabilità sia principalmente influenzata dalla variazione del diametro delle particelle piuttosto che dalla porosità iniziale del letto impaccato.

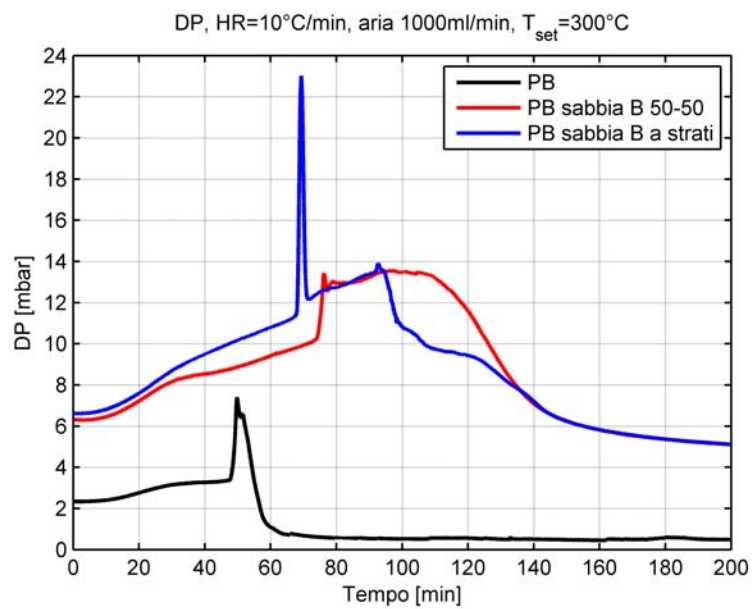




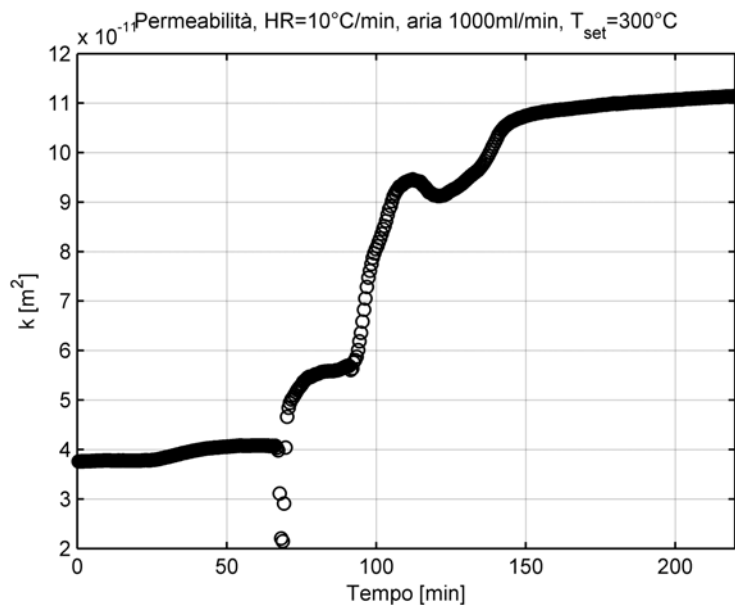
**Figura 4.14:** Geometria del reattore: TS-E.



**Figura 4.15:** Temperatura e perdite di carico, TS-E.



**Figura 4.16:** Confronto delle perdite di carico nel tempo: TS-base, TS-B, TS-E.



**Figura 4.17:** Permeabilità nel tempo: TS-E.

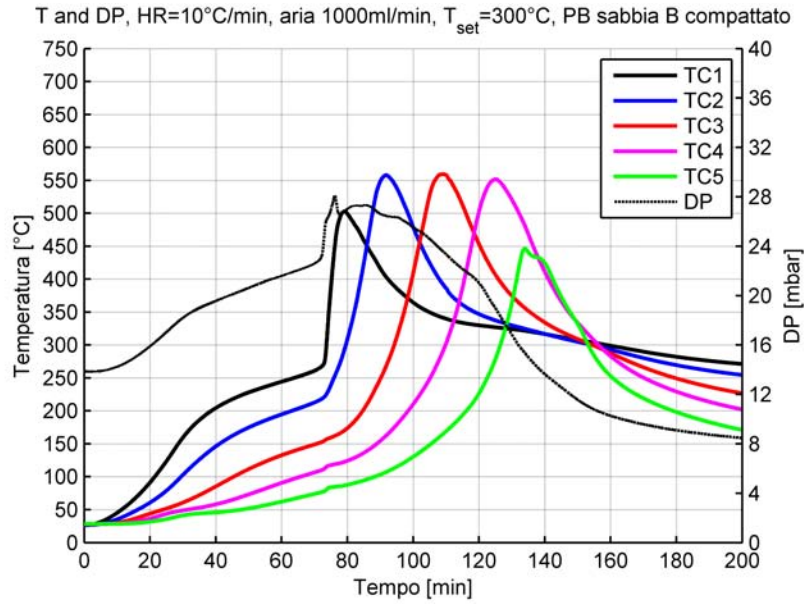
Una riduzione della porosità del letto incide invece sulla velocità di propagazione del fronte (1.7mm/min, Fig. 4.21), infatti va a ridursi leggermente rispetto ai 1.9mm/min misurati per TS-A e TS-B.

#### 4.2.4 Ripetibilità e limiti dei test sperimentali

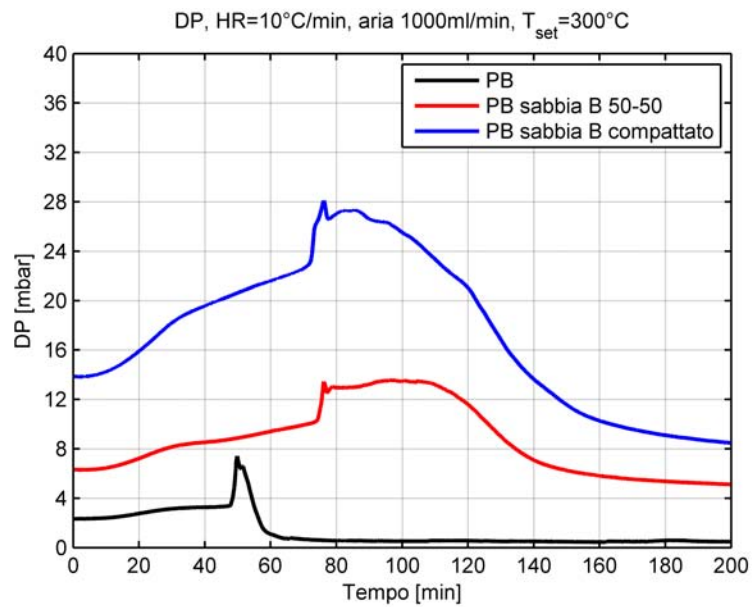
Le reazioni che alimentano lo Smouldering avvengono all'interno di un cilindro di acciaio, sorretto in verticale tramite bracci metallici. Nonostante la coibentazione, sono presenti dispersioni termiche attraverso le pareti del reattore e all'interno dello stesso a causa del supporto presente per la suddivisione in più zone. Tali dispersioni sono difficili da quantificare.

Come spiegato in precedenza, l'aggiunta di sabbia alla biomassa avviene per mescolamento. Tale operazione non garantisce una totale omogeneità al mezzo poroso, caratterizzandolo con zone ad alta e bassa permeabilità. Si ha che la porosità non è uniforme radialmente nella zona reattiva, poiché le particelle sono influenzate dall'effetto parete, dove si hanno valori minori. Inoltre questo va ad incidere sul rilevamento della temperatura nei vari punti di misura, infatti è possibile avere un'area in prossimità di un particolare punto di rilevamento costituita da maggior combustibile.

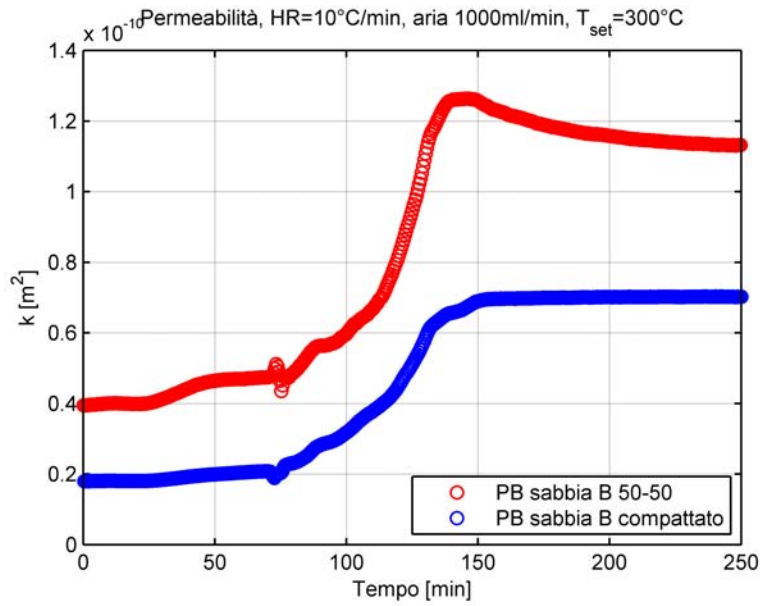
L'impianto è posto sotto cappa per motivi di sicurezza e ciò va ad influenzare il rilevamento delle perdite di carico. Infatti uno dei punti di misura si ha in



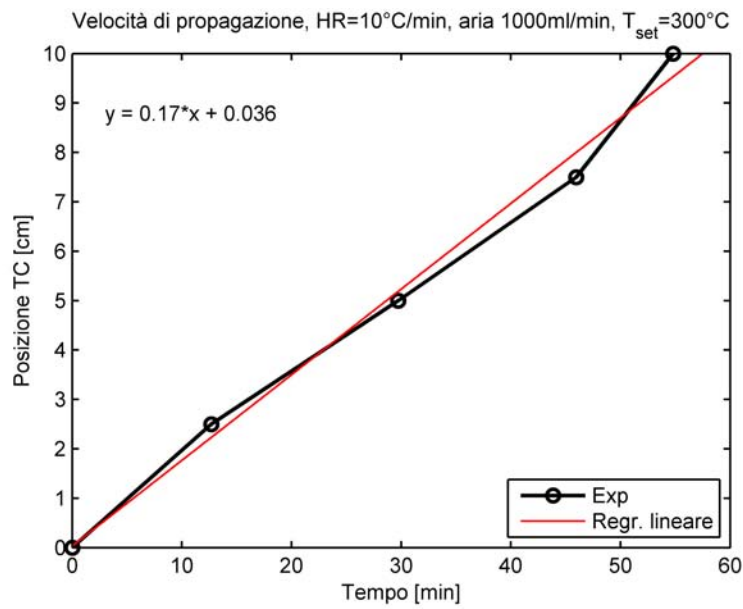
**Figura 4.18:** Temperatura e perdite di carico, TS-F.



**Figura 4.19:** Confronto delle perdite di carico nel tempo: TS-base, TS-B, TS-F.



**Figura 4.20:** Permeabilità nel tempo: TS-B e TS-F.



**Figura 4.21:** Velocità di propagazione dell'onda termica: TS-F.

corrispondenza dello scarico che è direttamente immesso in cappa, dove è presente una forte aspirazione.

Inoltre è opportuno sottolineare che i vari test sono stati condotti in un arco temporale di diversi mesi; questo ha comportato condizioni ambientali differenti.

### 4.3 Conclusioni

Dall'analisi termica condotta sullo smouldering di corteccia di pino, si è visto come l'innescò avvenga a 220°C circa, e che il fronte non risulta essere omogeneo e unidirezionale. Variando le caratteristiche del letto reattivo, aggiungendo sabbia, si riesce a modulare la permeabilità del letto, così da avere un fronte controllato. In particolare, agendo sulla granulometria dell'inerte, è possibile frenare o sostenere la reattività della biomassa, a seconda se il fenomeno di smouldering costituisce un problema o un'alternativa positiva per determinati processi industriali. Mentre dallo studio delle perdite di carico è stato possibile determinare facilmente l'istante in cui si ha l'innescò e quindi, tra le varie modalità di riconoscimento di tale momento (analisi termica, studi su concentrazioni di prodotti o ossigeno in uscita ecc.), risulta essere un'alternativa importante.

Dal confronto dei test con granulometria di inerte differente si evince come il momento dell'innescò viene ritardato nel tempo, perché l'inerte assorbe parte dell'energia generata dalle reazioni e viene meno superficie, per unità di volume, disponibile alle reazioni di ossidazione. Quindi l'aggiunta di inerte incide in maniera importante sul delicato bilancio termico che coinvolge la reattività, il calore generato dallo Smouldering e le dissipazioni termiche attraverso l'involucro esterno.

Inoltre questa tipologia di studio ha permesso di comprendere maggiormente come evolve la struttura porosa del materiale combustibile durante il fenomeno dello Smouldering. In particolare una variazione delle caratteristiche iniziali del mezzo poroso con il combustibile consente di avere una maggiore o minore variazione permeabilità del sistema. Ad incidere maggiormente su tale modifica è il diametro medio delle particelle, rispetto ad un diverso grado di vuoto iniziale. È possibile ipotizzare che le particelle di biomassa riducano il proprio diametro man mano che si sviluppano le reazioni, lasciando maggior spazio al comburente che coincide con un aumento della porosità. Allo stesso tempo vanno considerate reazioni che si sviluppano internamente alla particella dovute al grado di vuoto intrinseco. Solo a reazioni avvenute, al termine delle seconde ossidazioni sulla biomassa carbonizzata (char), il letto impaccato tende a riassetarsi.

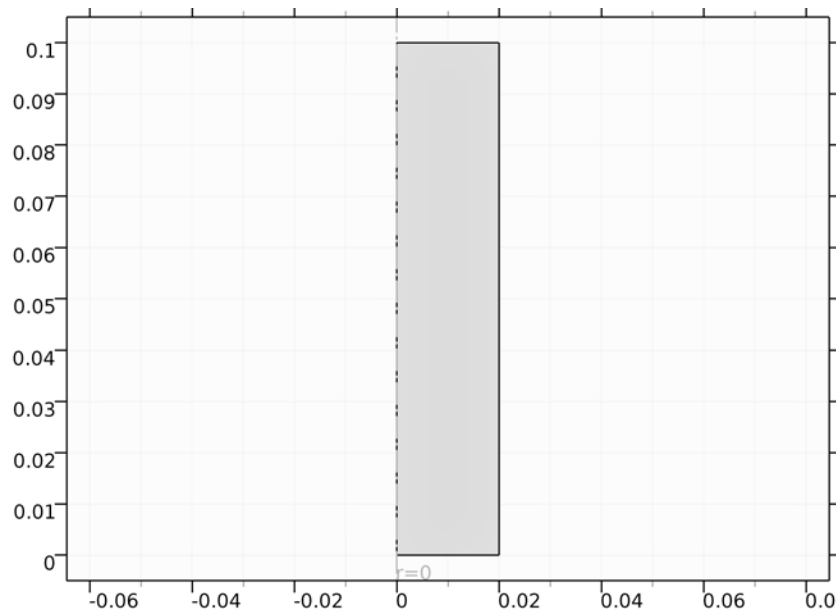
## Capitolo 5

# Simulazione della fluidodinamica nel letto poroso

In parallelo allo studio sperimentale orientato al monitoraggio del fenomeno di Smouldering, è stata condotta un'indagine modellistica attraverso la quale si è cercato di riprodurre sia la geometria che la caratterizzazione iniziale del letto impaccato di materiale granulare presente nella zona reattiva dei test sperimentali descritti in precedenza.

La modellazione di un reattore consente di sviluppare possibili geometrie 0D, 1D, 2D e 3D. Nei modelli 0D viene assunto che le grandezze fisiche siano omogeneamente distribuite in tutti i punti del reattore; negli altri casi invece, esse manifestano gradienti in una, due o in tutte e tre le direzioni. Nei casi 2D e 3D è preferibile l'uso di codici di CFD (es. COMSOL). La CFD (Computational Fluid Dynamics), è la tecnica orientata allo studio dei problemi di fluidodinamica mediante risoluzione numerica delle PDE risultanti dalle leggi di Navier-Stokes.

In questo capitolo vengono presentate le approssimazioni geometriche usate per descrivere il reattore tubolare sperimentalmente usato, e le equazioni utilizzate all'interno del simulatore COMSOL Multiphysics per descrivere reattori cilindrici in flusso con un riempimento granulare. Attraverso la CFD è possibile risolvere le equazioni della meccanica dei fluidi e ottenere informazioni sulla distribuzione della pressione e sull'andamento della velocità del fluido all'interno del letto poroso di geometria, temperatura e composizione fissate.



**Figura 5.1:** Geometria utilizzata in Comsol. Vista laterale.

## 5.1 Geometria del modello

Il letto poroso è chiaramente solo una parte dell'intero reattore ma, per semplicità, in questa simulazione viene considerata soltanto la matrice porosa; inoltre, come già detto, si studia solo l'aspetto fluidodinamico per permettere la caratterizzazione iniziale del materiale, in assenza di reazione.

Essendo il reattore di forma cilindrica, è utile assumere una simmetria assiale. La geometria utilizzata nel modello è dunque quella riportata nella Figura 5.1. L'asse verticale rappresenta la coordinata  $z$  (la linea tratteggiata è l'asse di simmetria) mentre l'asse orizzontale rappresenta la coordinata  $r$ , raggio del cilindro. L'altezza della zona reattiva è di  $10\text{cm}$ , il diametro è di  $4\text{cm}$ .

## 5.2 Definizione del modello

Dopo aver individuato la geometria più opportuna, sono stati selezionati i materiali da inserire nel dominio. Dal database del Software si è richiamato come fluido *ARIA*, ed è stato creato un materiale con caratteristiche simili alla biomassa utilizzata e alle sabbie.

Per quanto riguarda la fisica del modello, si è utilizzato il "pacchetto" *Equazioni di Brinkman* per la descrizione del moto di un fluido in un mezzo poroso. Tale fisica viene usata per descrivere il campo di velocità e di pressione di un fluido



monofase che attraversa il mezzo poroso, attraverso le equazioni di Brinkman. Se il mezzo poroso è adiacente a una parete solida, i modelli visti nel Capitolo 2 (eq. 2.7 e 2.9) non sono ritenuti soddisfacenti. È stata pertanto proposta (Brinkman, 1949) la relazione dove si tiene conto del contributo delle forze esterne [49].

Le proprietà dell'aria richiamate dal database sono in particolare densità e viscosità. Una condizione al contorno è rappresentata da *Ingresso*, dove viene descritta la velocità del fluido in ingresso al dominio, che rappresenta una media data semplicemente dal rapporto tra la portata volumetrica e la sezione del tubo. L'altra condizione è *uscita*, dove viene indicata la pressione relativa pari a 0[atm]. In corrispondenza della parete la velocità del fluido viene considerata nulla. Nel caso della matrice porosa, è stato necessario specificarne la porosità e la permeabilità. Sono infatti stati inseriti i valori ottenuti dal metodo spiegato nel Capitolo 4, relativo ai risultati sperimentali.

Le equazioni per il moto sono le seguenti:

$$0 = \nabla[-p\mathbf{I} + \frac{\mu}{\epsilon_p}(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T)] - (\mu k^{-1} + \beta_F u + \frac{Q_{br}}{\epsilon_p^2})\mathbf{u} + \mathbf{F} \quad (5.1)$$

$$\rho\nabla\mathbf{u} = Q_{br} \quad (5.2)$$

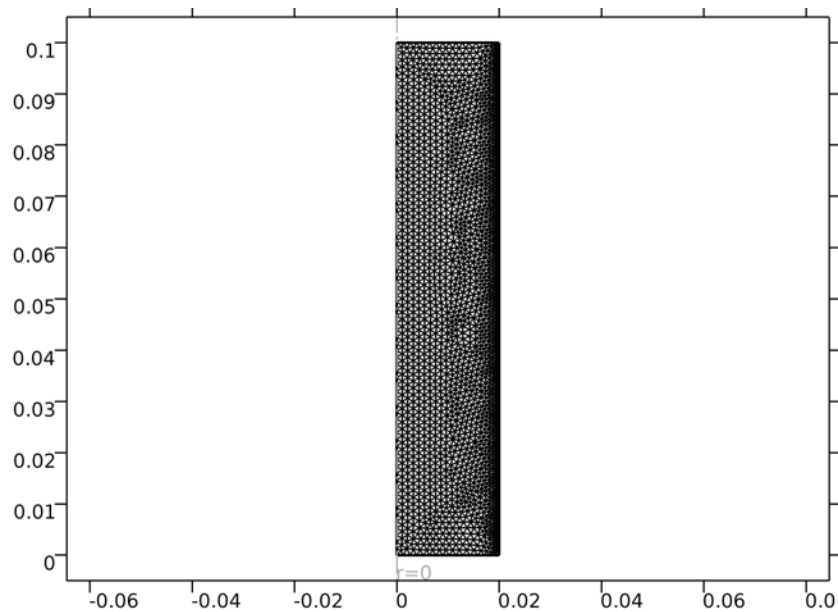
Le equazioni sono riportate esattamente come in Comsol [50].

È stata poi costruita la *Mesh*, Fig. 5.2, ovvero la discretizzazione del dominio. La forma delle celle è di tipo triangolare. È stata scelta una mesh in base alla fisica utilizzata. Si hanno celle più piccole in corrispondenza delle pareti esterne, dove sono attesi gradienti maggiori.

### 5.3 Studio e risultati

È necessario specificare il tipo di studio che si vuole condurre: in questo caso è stato adottato uno studio in stato stazionario. Infatti si vuole verificare quanto fatto nello studio della caratterizzazione iniziale del mezzo poroso soggetto al fenomeno di Smouldering, in cui è stata variata la portata in ingresso e, dopo qualche istante di stabilizzazione del segnale, è stato registrato il valore delle perdite di carico. Questi valori misurati sperimentalmente sono rappresentati nelle Figure 5.3, 5.4, 5.5, 5.6. Tali punti sperimentali sono stati confrontati con i profili dettati dal modello costruito in Comsol. In particolare per ciascuna simulazione, e quindi per ogni matrice porosa, è stato indicato il valore di porosità e permeabilità determinati dal confronto con la legge di Ergun, di cui si è parlato nel Capitolo 3, e dalle correlazioni descritte nel Capitolo 2 (eq. 2.29).

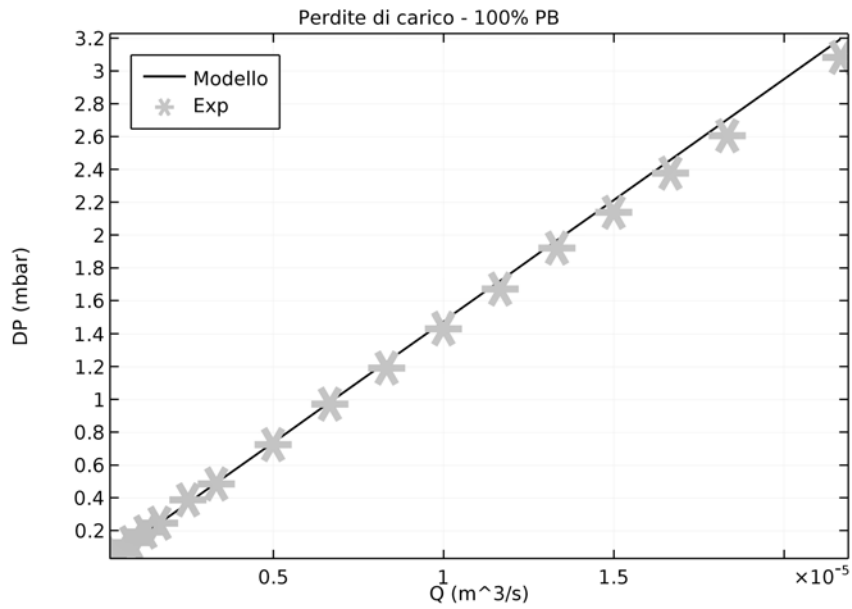
Mediante l'applicazione di *Parametric Sweep*, contenuto nel pacchetto dello studio di Comsol, è stato possibile studiare una sequenza di problemi stazionari



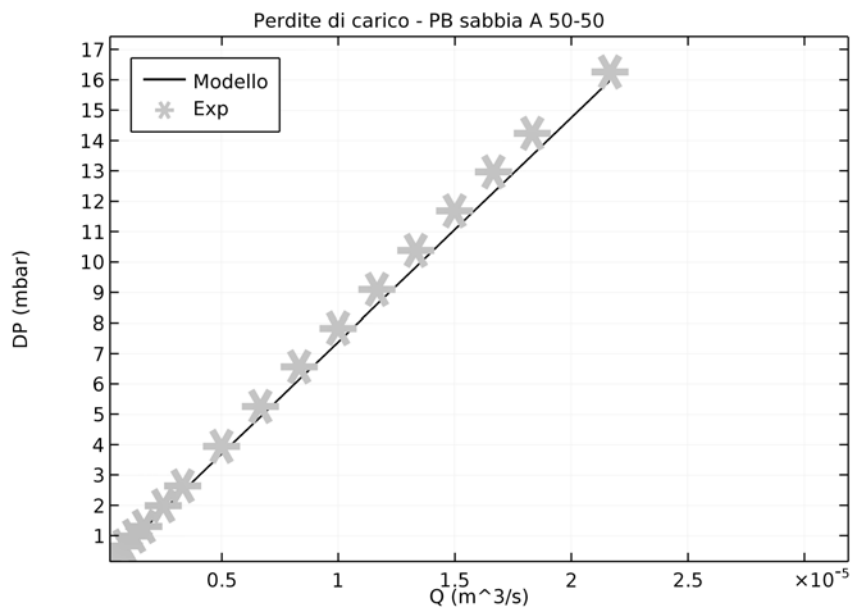
**Figura 5.2:** *Mesh Modello Comsol*

variando una o più variabili di interesse. In questo caso si è fatta variare la portata in ingresso nello stesso range utilizzato nei test sperimentali.

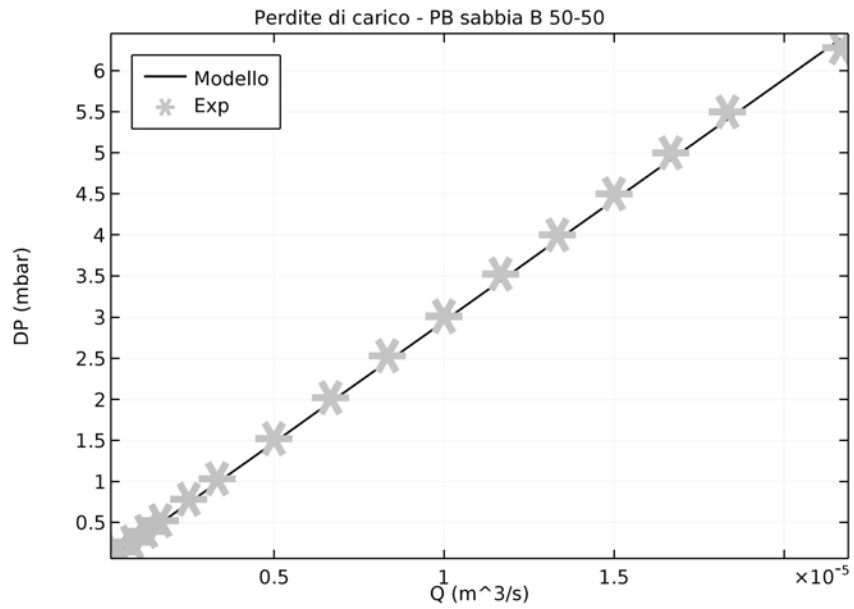
Dal confronto emerge una buona approssimazione delle simulazioni alle caratteristiche fisiche del letto impaccato utilizzato in fase di sperimentazione, con scostamenti in prossimità di portate maggiori, questo perché nel modello si tiene conto dell'influenza della parete dell'involucro sulle caratteristiche del mezzo poroso. Infatti, non si riesce a considerare nell'analisi condotta sperimentalmente; e dunque il valore di porosità e permeabilità determinato con il modello di Ergun costituisce una media dell'intero volume di controllo sede del mezzo poroso.



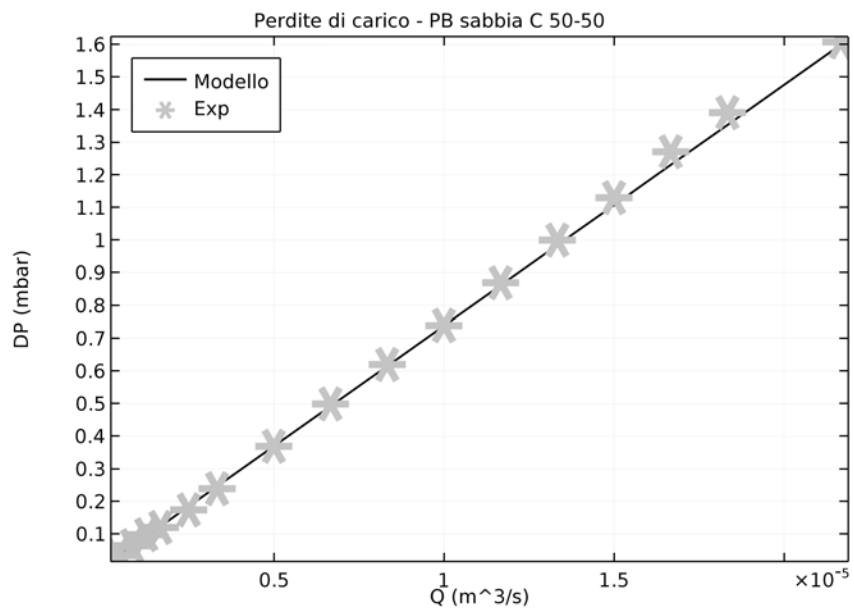
**Figura 5.3:** Confronto dati sperimentali con Modello Comsol: PB.



**Figura 5.4:** Confronto dati sperimentali con Modello Comsol: PB-sabbia A.



**Figura 5.5:** Confronto dati sperimentali con Modello Comsol: PB-sabbia B.



**Figura 5.6:** Confronto dati sperimentali con Modello Comsol: PB-sabbia C.

## Capitolo 6

# Conclusioni

Dopo un'attenta analisi dello stato dell'arte, dalle applicazioni ai possibili pericoli che può costituire la Smouldering combustion, è emerso quanto sia necessario poter controllare il fenomeno e capire come evolve nel tempo dopo l'innesco. Una delle condizioni necessarie affinché lo Smouldering possa svilupparsi è rappresentata da una matrice porosa, la quale consente al comburente di raggiungere la superficie solida del combustibile e di ridurre le dispersioni termiche. È importante, quindi, comprendere a pieno le caratteristiche del mezzo poroso, in particolare i gradienti termici e le proprietà come porosità e permeabilità, e in che modo queste variano durante il processo. Per poter raggiungere tale scopo, sono state misurate le perdite di carico al variare della portata di aria in ingresso in condizioni ambientali e, sfruttando una tecnica di confronto tra i rilevamenti sperimentali e le leggi principali della teoria dei mezzi porosi, è stato possibile stimare i valori iniziali di porosità e permeabilità del letto poroso, costituito da biomassa e biomassa mista a sabbia.

Dallo studio sperimentale condotto sono emerse alcune informazioni utili per lo studio dello Smouldering.

Dall'analisi termica condotta sullo smouldering di corteccia di pino, si è visto come l'innesco avvenga a 220°C circa, e che il fronte non risulta essere omogeneo e unidirezionale. Variando le caratteristiche del letto reattivo, aggiungendo sabbia, si riesce a modulare la permeabilità del letto, così da avere un fronte controllato. In particolare, agendo sulla granulometria dell'inerte, è possibile frenare o sostenere la reattività della biomassa, a seconda se il fenomeno di smouldering costituisce un problema o un'alternativa positiva per determinati processi industriali. Mentre dallo studio delle perdite di carico è stato possibile determinare facilmente l'istante in cui si ha l'innesco e quindi, tra le varie modalità di riconoscimento di tale momento (analisi termica, studi su concentrazioni di prodotti o ossigeno in uscita ecc.), risulta essere un'alternativa importante.

Allo stesso tempo dallo studio delle perdite di carico è stato possibile determinare facilmente l'istante in cui si ha l'innesco e dunque tenere in considerazione questa alternativa tra le varie modalità di riconoscimento di tale momento (analisi termica, studi su concentrazioni di prodotti o ossigeno in uscita ecc.).

Dal confronto dei test con granulometria di inerte differente si evince come l'innesco viene ritardato nel tempo, perché la sabbia assorbe parte dell'energia generata dalle reazioni, e viene ridotta la superficie, per unità di volume, disponibile alle reazioni di ossidazione. Quindi l'aggiunta di inerte incide in maniera importante sul delicato bilancio termico che coinvolge la reattività, il calore generato dallo Smouldering e le dissipazioni termiche attraverso l'involucro esterno.

Inoltre, questa tipologia di studio, ha permesso di comprendere maggiormente come evolve la struttura porosa del materiale combustibile durante il fenomeno dello Smouldering. In particolare una variazione delle porosità e del diametro medio delle particelle del letto impaccato consente di avere una maggiore o minore variazione della permeabilità del sistema. Ad incidere maggiormente su tale modifica è il diametro medio delle particelle, rispetto ad un diverso grado di vuoto iniziale. È possibile ipotizzare che le particelle di biomassa riducano il proprio diametro man mano che si sviluppano le reazioni, lasciando maggior spazio al comburente che coincide con un aumento della porosità. Allo stesso tempo vanno considerate reazioni che si sviluppano internamente alla particella dovuta al grado di vuoto intrinseco. Solo a reazioni avvenute, al termine delle seconde ossidazioni sulla biomassa carbonizzata (char), il letto impaccato tende a riassetarsi.

Uno studio numerico è stato infine condotto per definire le caratteristiche fluidodinamiche nel mezzo poroso, introducendo i valori di porosità e permeabilità, ricavati nello studio sperimentale, nell'implementazione. Sono stati in particolare confrontati i valori delle perdite di carico ottenuti dalle sperimentazioni, con simulazioni ottenute con il software CFD, Comsol. È emerso una buona approssimazione delle simulazioni delle caratteristiche fisiche del letto impaccato utilizzato in fase di sperimentazione, con piccoli scostamenti in prossimità di portate maggiori, dovuti all'influenza della parete interna sulle caratteristiche del mezzo poroso. Tale influenza, infatti, non si riesce a considerare nell'analisi condotta sperimentalmente, e quindi il valore di porosità e permeabilità costituisce una media dell'intero volume di controllo sede del mezzo poroso. Quest'ultimo studio rappresenta una base per le implementazioni future di simulazioni CFD.

# Capitolo 7

## Lista dei Simboli

$A, A_I, A_R$	Sezione di passaggio del fluido, Eqn 2.2
$c$	costante
$c_p, c_{ps}$	calore specifico del gas a pressione costante, calore specifico del solido
$D_p, D_{av}$	diametro particelle, diametro medio
$d$	diametro del canale
$E$	energia di attivazione
$g$	costante gravitazione
$h$	coefficiente di trasferimento di calore per unità di superficie tra fluido e solido
$k$	permeabilità, Eqn. 2.6, 2.13, 2.2, 2.34
$K$	costante di Kozeny
$L$	lunghezza del mezzo poroso
$n$	esponente in Eq. 2.5
$p, p_a$	pressione e pressione ambientale
$\Delta P, DP$	perdite di carico
$Q$	portata volumetrica del fluido, eq. 2.2
$R$	costante universale dei gas
$Re_p, Re_{p,critico}$	numero di Reynolds modificato e critico

$x_D$	frazione di volume occupata da particelle con diametro D
t	tempo
$U_0$	velocità iniziale del fluido
U	velocità interstiziale del fluido
$u_{sml}$	velocità del fronte di propagazione dello Smouldering
$w_i$	frazione di massa tra setacci del vibro vagliatore
$S_v$	superficie specifica
T, $T_0$	temperatura e temperatura ambiente
$T_{SET}$	temperatura di set point delle fasce riscaldanti

## Simboli greci

$\beta$	fattore d'inerzia, eq. 2.9
$\delta$	rapporto tra diametri particelle differenti, $\delta = d/D$
$\epsilon$	porosità, Eq. 2.1, 2.26, 2.27, 2.29
$\epsilon^0$	porosità iniziale
$\mu$	viscosità
$\nu_{ij}$	coefficiente stechiometrico dell'i-esima specie nella j-esima reazione, eq. 1.1,1.2, 1.3, 1.4, 1.5
$\rho, \rho_s$	densità del gas, densità del solido
$\tau$	tortuosità, Eqn. 2.5
$\Phi$	Indice di sfericità, Eqn. 2.14

## Pedice

w	acqua
e	evaporazione
c	char
p	pirolisi eq.1.2; particella eq.2.18
g	gas
po	prima ossidazione
so	seconda ossidazione
$\beta$	char di tipo beta
a	ash, ceneri
sml	smouldering



## **Acronimi**

STARx	Self-sustaining Treatment for Active Remediation applied ex-situ
PB	Pine Bark
TC	Termocoppia
TP	Test Preliminari
TS	Test Sperimentali
HT	Rampa di riscaldamento, Heating Rate
PC	Elaboratore
SF	Sfere di ferro
SV	Sfere di vetro



# Bibliografía

- [1] G.Rein. Smouldering combustion phenomena in science and technology. *International Review of Chemical Engineering*, 2009.
- [2] Fang He and Frank Behrendt. Comparison of natural upward and downward smoldering using the volume reaction method. *Energy & Fuels*, 23(12):5813–5820, 2009.
- [3] T.J. Ohlemiller. Modeling of smoldering combustion propagation. *Progress in Energy and Combustion Science*, 11(4):277 – 310, 1985.
- [4] Amnon; Rein Guillermo; Fernandez-Pello A. Carlos; Urban David L. Putzeys, Olivier; Bar-Ilan. The role of secondary char oxidation in the transition from smoldering to flaming. *The Combustion Institute*, 2006.
- [5] G Rein, AC Fernandez-Pello, and DL Urban. Computational model of forward and opposed smoldering combustion in microgravity. *Proceedings of the Combustion Institute*, 31:2677–2684, 2007.
- [6] John N. Carras and Brian C. Young. Self heating of coal and related materials: Models, application and test methods. *Progress in Energy and Combustion Science*, 20(1):1 – 15, 1994.
- [7] V. Fierro, J.L. Miranda, C. Romero, J.M. Andrés, A. Pierrot, E. Gómez-Landesa, A. Arriaga, and D. Schmal. Use of infrared thermography for the evaluation of heat losses during coal storage. *Fuel processing technology*, 60(3):213–229, 1999.
- [8] V. Fierro, J.L. Miranda, C. Romero, J.M. Andrés, A. Arriaga, D. Schmal, and G.H. Visser. Prevention of spontaneous combustion in coal stockpiles. experimental results in coal storage yard. *Fuel processing technology*, 59(1):23–24, 1999.

- [9] V. Fierro, J.L. Miranda, C. Romero, J.M. Andrés, A. Arriaga, and D. Schmal. Model predictions and experimental results on self heating prevention of stockpiled coals. *Fuel*, 80(1):125–134, 2001.
- [10] C.J. Kim and C.H. Sohn. A novel method to suppress spontaneous ignition of coal stockpiles in a coal storage yard. *Fuel Processing Technology*, 100:73–83, 2012.
- [11] Juha Sipil. Risk and mitigation of self-heating and spontaneous combustion in underground coal storage. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 25(3):617 – 622, 2012.
- [12] Cos'è il biochar?, associazione italiana biochar,<http://www.ichar.org/>.
- [13] Xin-Rui Li, Woo-Sub Lim, Yusaku Iwata, and Hiroshi Koseki. Safety evaluation of sewage-sludge-derived fuels by comparison with other fuels. *Fire and Materials*, 33(4):187–200, 2009.
- [14] Tarek L. Rashwan, Jason I. Gerhard, and Gavin P. Grant. Application of self-sustaining smouldering combustion for the destruction of wastewater biosolids. *Waste Management*, 50:201 – 212, 2016.
- [15] Grant C. Scholes, Jason I. Gerhard, Gavin P. Grant, David W. Major, John E. Vidumsky, Christine Switzer, and José L. Torero. Smoldering remediation of coal tar contaminated soil: Pilot field tests of STAR. *Environmental Science & Technology*, 49(24):14334–14342, 2015.
- [16] Paolo Pironi, Christine Switzer, Jason I. Gerhard, Guillermo Rein, and José L. Torero. Self sustaining smoldering combustion for NAPL remediation: Laboratory evaluation of process sensitivity to key parameters. *Environmental Science & Technology*, 45(7):2980–2986, 2011.
- [17] M. S. Blinderman, D. N. Saulov, and A. Y. Klimenko. Exergy optimisation of reverse combustion linking in underground coal gasification. *Journal of the Energy Institute*, 81(1):7–13, 2008.
- [18] Jean Pierre Vantelon, Bénigne Lodeho, Stephane Pignoux, Janet L. Ellzey, and José L. Torero. Experimental observations on the thermal degradation of a porous bed of tires. *Proceedings of the Combustion Institute*, 30 II:2239–2246, 2005.
- [19] L. Yermán, Rory M. Hadden, J. Carrascal, Ivo Fabris, Daniel Cormier, José L. Torero, Jason I. Gerhard, Michal Krajcovic, Paolo Pironi, and Yu-Ling Cheng. Smouldering combustion as a treatment technology for faeces: Exploring the parameter space. *Fuel*, 147:108 – 116, 2015.

- [20] B. Moghtaderi, B.Z. Dlugogorski, and E.M. Kennedy. Effects of wind flow on self heating characteristics of coal stockpiles. *Process Safety and Environmental Protection*, 78(6):445–453, 2000.
- [21] S. Krishnaswamy, P.K. Agarwal, and R.D. Gunn. Low temperature oxidation of coal 3. modelling spontaneous combustion in coal stockpiles. *Fuel*, 75(3):353–362, 1996.
- [22] Xinyan Huang, Francesco Restuccia, Michela Gramola, and Guillermo Rein. Experimental study of the formation and collapse of an overhang in the lateral spread of smouldering peat fires. *Combustion and Flame*, 168:393 – 402, 2016.
- [23] M. Della Zassa, M. Zerlottin, D. Refosco, A.C. Santomaso, and P. Canu. Improved compaction of dried tannery wastewater sludge. *Waste Management*, 46:472 – 479, 2015.
- [24] Wiwik Sujanti and Dong ke Zhang. A laboratory study of spontaneous combustion of coal: the influence of inorganic matter and reactor size. *Fuel*, 78(5):549 – 556, 1999.
- [25] Haixiang Chen, Guillermo Rein, and Naian Liu. Numerical investigation of downward smoldering combustion in an organic soil column. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 84:253 – 261, 2015.
- [26] Xinyan Huang and Guillermo Rein. Thermochemical conversion of biomass in smouldering combustion across scales: The roles of heterogeneous kinetics, oxygen and transport phenomena. *Bioresource Technology*, 207:409 – 421, 2016.
- [27] Andrés Anca-Couce, Nico Zobel, Anka Berger, and Frank Behrendt. Smouldering of pine wood: Kinetics and reaction heats. *Combustion and Flame*, 159(4):1708 – 1719, 2012.
- [28] F.A.L. DULLIEN. Introduction. In *Porous Media (Second Edition)*, pages 1 – 3. Academic Press, San Diego, 1992.
- [29] Paolo Bonfiglio Francesco Pompoli. Apparecchiatura per la misura della porosità di materiali a cella aperta. *Associazione Italiana di Acustica 34°Convegno Nazionale*, 2007.
- [30] R. Panneton and E. Gros. A missing mass method to measure the open porosity of porous solids. *Acta Acustica united with Acustica*, 91(2):342–348, 2005.

- [31] Yvan Champoux, Michael R. Stinson, and Gilles A. Daigle. Air based system for the measurement of porosity. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 89(2):910–916, 1991.
- [32] F.A.L. DULLIEN. 1 - Pore structure. In *Porous Media (Second Edition)*, pages 5 – 115. Academic Press, San Diego, 1992.
- [33] Richard G. Holdrich. *Fundamentals of particle technology*. Midland Information Technology and Publishing, Department of Chemical Engineering, Loughborough University, Leicestershire, UK, 2002.
- [34] Ricardo Dias, José A. Teixeira, Manuel Mota, and Alexander Yelshin. Tortuosity variation in a low density binary particulate bed. *Separation and Purification Technology*, 51(2):180 – 184, 2006.
- [35] A. Koponen, M. Kataja, and J. Timonen. Permeability and effective porosity of porous media. *Phys. Rev. E*, 56:3319–3325, Sep 1997.
- [36] Emrah Ozahi, Mehmet Yasar Gundogdu, and Melda Carpinlioglu. A modification on Ergun’s correlation for use in cylindrical packed beds with non-spherical particles. *Advanced Powder Technology*, 19(4):369 – 381, 2008.
- [37] Edwin N. Lightfoot R. Byron Bird, Warren E. Stewart. *Transport Phenomena*. John Wiley and Sons, 2007.
- [38] Zhengwen Zeng and Reid Grigg. A criterion for non-Darcy flow in porous media. *Transport in Porous Media*, 63:57–69, 2006.
- [39] De Souza-Santos. Thesis: Modeling, simulation of fluidized-bed boilers and gasifiers for carbonaceous solids. *University of Sheffield, Department of Chemical Engineering and Fuel Technology*, 1987.
- [40] William A. Beckman John A. Duffie. *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley and Sons, 2013.
- [41] J.A. Teixeira M. Mota A. Yelshin R.P. Dias, C.S. Fernandes. Permeability analysis in bisized porous media: Wall effect between particles of different size. *Journal of Hydrology*, 349:470 – 474, 2008.
- [42] M. G. Mota A. I. Yelshin R. P. Dias, J. A. Teixeira. Particulate binary mixtures: Dependence of packing porosity on particle size ratio. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 43(24):7912–7919, 2004.

- [43] Carla S. Fernandes Ricardo P. Dias. *Porous Media: Heat and Mass Transfer, Transport and Mechanics. Granular beds composed of different particle sizes: Experimental and CFD approaches.* José Luis Acosta and Andrés Felipe Camacho. 2009.
- [44] M. Mota J.A. Teixeira A. Yelshin R.P. Dias, C.S. Fernandes. Permeability and effective thermal conductivity of bisized porous media. *Heat and Mass Transfer*, 50:1295–1301, 2007.
- [45] Tarek Ahmed. *Reservoir Engineering Handbook-Ch. 4: Fundamental of rock properties.* Gulf Professional Publishing, 2001.
- [46] Maarten van Blijderveen, Eyerusalem M. Gucho, Eddy A. Bramer, and Gerit Brem. Spontaneous ignition of wood, char and RDF in a lab scale packed bed. *Fuel*, 89(9):2393 – 2404, 2010.
- [47] Tanzeer Hasan, Jason I. Gerhard, Rory Hadden, and Guillermo Rein. Self-sustaining smouldering combustion of coal tar for the remediation of contaminated sand: Two-dimensional experiments and computational simulations. *Fuel*, 150:288 – 297, 2015.
- [48] B.R. Corrochano, J.R. Melrose, A.C. Bentley, P.J. Fryer, and S. Bakalis. A new methodology to estimate the steady-state permeability of roast and ground coffee in packed beds. *Journal of Food Engineering*, 2015.
- [49] H. C. Brinkman. A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on a dense swarm of particles. *Flow, Turbulence and Combustion*, 1(1):27–34, 1949.
- [50] Comsol Multiphysics. [www.comsol.com](http://www.comsol.com).