



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E  
AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE FORESTALI ED AMBIENTALI DEL SUOLO E DEL  
PAESAGGIO.

**EFFETTI DEI PARAMETRI  
DIMENSIONALI DEL PELLETT SULLA  
PORTATA TERMICA DELLE STUFE.**

**EFFECTS OF PELLETT SIZE  
PARAMETERS ON STOVE THERMAL  
POWER.**

TIPO TESI: SPERIMENTALE.

Studente:  
FEDERICO MASSEI

Relatore:  
PROF. GIUSEPPE TOSCANO

ANNO ACCADEMICO 2020-2021

# SOMMARIO

SOMMARIO.....	2
ELENCO DELLE TABELLE.....	3
ELENCO DELLE FIGURE.....	4
INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI.....	5
CAPITOLO 1 PRODUZIONE DEL PELLET E CARATTERISTICHE QUALITATIVE.....	7
1.1 Filiera del pellet: “Il processo di pellettizzazione”.....	8
1.2 Situazione attuale del mercato in Europa.....	12
1.3 Parametri per la determinazione della qualità del pellet.....	14
1.4 Normativa tecnica e standard di qualità.....	19
CAPITOLO 2 ASPETTI GEOMETRICI E DIMENSIONALI: INFLUENZA DELLA LUNGHEZZA SULLA QUALITÀ DEL PELLET.....	21
2.1 Trasporto e stoccaggio.....	22
2.2 Effetto della lunghezza sulle proprietà del pellet.....	24
CAPITOLO 3 MATERIALI E METODI.....	26
3.1 Campioni pellet.....	26
3.2 Software Metab: analisi dimensionale del pellet.....	27
3.3 Misure di portata.....	32
CAPITOLO 4 RISULTATI.....	35
4.1 Risultati Metalab.....	35
4.2 Risultati misure di portata.....	41
4.3 Diagrammi di sintesi.....	42
CONCLUSIONI.....	44
BIBLIOGRAFIA.....	45

## ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1-1: Parametri analitici in funzione delle classi di qualità ad uso domestico e commerciale .....	19
Tabella 2-1: Misurazione per la prova. ....	21
Tabella 3-1: PCI analizzato a norma (kJ/kg) .....	26
Tabella 3-2: Misure elementi stufa espresse in mm.....	33
Tabella 4-1: Distribuzione delle lunghezze in classi di lunghezza espresse in % massa .....	38
Tabella 4-2: Confronto densità delle particelle analizzata e stimata.....	39
Tabella 4-3: Confronto massa volumica analizzata e stimata.....	40

## ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1: Principio di pellettizzazione (a) e relazione di compressione (b) .....	11
Figura 2: Produzione pellet in Europa 2019 .....	13
Figura 3: Due diversi meccanismi di rottura del pellet (a) Frammentazione (b) Abrasione ..	25
Figura 4: Postazione Metalab .....	27
Figura 5: Interfaccia Metalab .....	28
Figura 6: Posizionamento pellet analisi Metalab .....	29
Figura 7: Foglio Excel analisi dimensionale ID 3 .....	31
Figura 8: Disegno tecnico stufa .....	32
Figura 9: (a) Strumentazione test di portata; (b) Dettaglio serbatoio stufa .....	33
Figura 10: Test portata campione ID 21 .....	34
Figura 11: Errata analisi campione ID 26 .....	35
Figura 12: Corretta analisi campione ID 47 .....	36
Figura 13: Frequenza classi di diametro in % .....	37
Figura 14: Frequenza classi di lunghezza in % .....	37
Figura 15: Confronto densità delle particelle analizzata e stimata .....	38
Figura 16: Confronto massa volumica analizzata e stimata .....	39
Figura 17: Portata massica: frequenza in % .....	41
Figura 18: Frequenza classi portata termica in % .....	41
Figura 19: Portata massica in funzione delle classi di lunghezza .....	42
Figura 20: Lunghezza media in funzione della portata massica e termica .....	43

## INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

Il pellet di legno rientra nella categoria dei biocombustibili solidi densificati. Il prodotto è ottenuto dalla compressione di materiale fine di legno (segatura) mediante una trafilatura in acciaio. I pellet assumono una forma cilindrica e quello più comune presenta un diametro di 6 mm. Il settore dei biocombustibili ha introdotto una standardizzazione del pellet attraverso precise norme che definiscono il livello qualitativo a cui appartiene un determinato tipo di pellet prendendo in considerazione diversi parametri.

Tra questi, la lunghezza del pellet gioca un ruolo importante per definire il suo comportamento nell'occupare gli spazi, sia a livello di logistica di utilizzo negli impianti termici. A seguito delle analisi, nel presente studio, la lunghezza del pellet varia tra 8,2 e 20,2 mm.

La omogeneità di questo parametro, desiderabile a livello di impianto, dipende molto dalla qualità di produzione. La lunghezza è legata a vari aspetti produttivi tra cui la capacità del pellet di mantenersi integro dal momento che esce dalla trafilatura di acciaio e la distanza del coltello dalla trafilatura (questo regola la lunghezza in uscita). Il pellet, inoltre, subendo impatti lungo la catena logistica può ridurre le sue dimensioni dalla produzione fino al suo utilizzo. Gli aspetti geometrico-dimensionali del pellet rivestono particolare importanza per la massa volumica, per la densità energetica e per la portata termica effettiva degli impianti termici. Inoltre, è importante controllare la lunghezza dei pellet per ottimizzare il comportamento in combustione, quindi le performance della stufa e le emissioni in atmosfera. Inoltre, un'uniformità dimensionale porta ad un regolare scorrimento nel sistema di alimentazione o movimentazione del pellet ed una performance più prevedibile e controllabile. Attualmente la misura del pellet a norma è eseguita mediante uso di calibro di precisione sui singoli pellet. Questo metodo richiede molto tempo e restituisce i valori di dimensione di quantità molto piccole. Per tale motivo si sta cercando di utilizzare un metodo veloce basato sul riconoscimento di immagine da parte di uno strumento sperimentale dedicato. L'obiettivo del presente elaborato di tesi è quello di descrivere come i parametri geometrico dimensionali del pellet influenzano la portata termica delle stufe a pellet e se le misure di un prototipo di rilevazione delle dimensioni del pellet mediante riconoscimento di immagine risultano sufficientemente affidabili per gli obiettivi proposti nel lavoro di tesi.

Dopo una panoramica sulla nascita del pellet e sulle attuali condizioni di mercato di questo biocombustibile, verranno introdotti i principali fattori che regolano la qualità del pellet, verrà spiegata l'importanza dei parametri geometrico-dimensionali e saranno mostrate le norme a cui si fa riferimento. Infine, verranno illustrate le analisi geometrico dimensionali e le misure di portata.

# Capitolo 1

## PRODUZIONE DEL PELLETT E CARATTERISTICHE QUALITATIVE

Il pellet è un biocombustibile densificato normalmente di forma cilindrica, derivante da un processo industriale attraverso il quale la biomassa polverizzata viene compressa e trasformata in piccoli cilindri di diametro variabile da 6 a 8 mm e lunghezza tra i 5 ed i 40 mm. Il pellet ha una densità di 650 kg /m<sup>3</sup>, un contenuto idrico inferiore all'11% ed è assolutamente privo di qualsiasi collante o additivo chimico. La forma caratteristica dei pellet, infatti, viene mantenuta grazie all'effetto legante della lignina, naturalmente presente nel legno, che ne determina la compattezza. Il pellet può essere utilizzato sia in stufe che in caldaie appositamente adattate. Il grande interesse suscitato da questo biocombustibile deriva dal fatto che esso, nella movimentazione, si comporti in maniera analoga ai fluidi: ciò permette un elevato grado di automazione degli apparecchi e degli impianti di combustione, al punto che nelle modalità di impiego essi si avvicinano agli impianti alimentati con olio combustibile, e per il solo esercizio, persino a quelli del gas naturale. Per la produzione di pellet possono essere impiegate diverse tipologie di materie prime, di origine legnosa e no, anche se a tutt'oggi l'origine legnosa rimane quella più comune. Nello specifico, per quanto concerne i pellet di legno, la materia prima impiegata può provenire tanto da legno vergine (foreste, piantagioni, etc.), quanto da sottoprodotti e residui dell'industria di lavorazione del legno e da legno usato. Il pellet non di legno, prodotto dall'utilizzo di materie prime generalmente di origine agricola è comunemente caratterizzato da un elevato contenuto di ceneri, cloro, azoto, e zolfo. Il suo utilizzo è, quindi, raccomandato in apparecchi termici specificatamente progettati onde evitare il rischio di corrosione.

## **1.1 Filiera del pellet: “Il processo di pellettizzazione”**

Il pellet di legno si ottiene attraverso il processo di pellettizzazione, cioè un processo di estrusione che consiste nel sottoporre la segatura ad una forte pressione facendola passare attraverso un foro di pochi millimetri. “La tecnica di pellettizzazione si è sviluppata in Canada negli anni 90 ed è stata importata ed adattata in Europa per la richiesta del mercato della produzione di pellet di legno.” (Francescato et al.,2014). Originariamente, infatti, questa tecnica di densificazione di materiale incoerente era nata per l’industria del mangime. Attualmente la pellettizzazione si sviluppa in più fasi operative che caratterizzano l’intera filiera produttiva e vengono riportate di seguito:

### **Approvvigionamento della materia prima**

In Italia, la materia prima per la produzione di pellet è costituita in prevalenza da scarti e residui di segheria, con costi ridotti di approvvigionamento. I parametri da controllare più attentamente sono il contenuto idrico, la granulometria del materiale e l’eventuale livello di alcuni microelementi come cloro, azoto, magnesio, potassio e silicio che possono provocare problemi durante la fase di combustione del pellet. Il contenuto idrico della materia prima è il parametro più importante poiché, in funzione di questo, verrà regolata e adattata la successiva fase di essiccazione. In generale “condizioni di umidità, come l’esposizione per breve tempo alla pioggia o un’elevata umidità dell’ambiente (dovute ad una conservazione della materia prima non ottimale), incidono negativamente sulla resistenza e durabilità del pellet di legno” (Kaliyan e Vance Morey, 2008). Una attenta analisi del contenuto idrico risulta così essere fondamentale per l’efficacia dell’intero processo produttivo e per ottenere un prodotto di qualità.

### **Analisi e controllo materia prima**

Prima di iniziare il processo produttivo, è necessario analizzare e selezionare la materia prima in ingresso poiché la qualità del pellet è direttamente proporzionale a quella della materia prima di partenza e soprattutto è variabile anche in funzione del tipo di impianto di combustione in cui sarà utilizzata.



## **Essiccazione**

Per ottenere un pellet di alta qualità è importante mantenere un appropriato livello di contenuto idrico delle materie prime legnose impiegate, che idealmente è intorno al 12-15%, come dimostrato da Arshadi et al. (2008). L'essiccazione può avvenire in apposite strutture (essiccatoi) che liberano calore e lo trasmettono direttamente o indirettamente alla biomassa.

## **Raffinazione**

In questa fase il materiale essiccato “deve essere sottoposto all'asportazione dei materiali contaminanti (terra, sassi e particelle metalliche), per evitare un'elevata usura e il danneggiamento degli organi di taglio del raffinatore” (Francescato et al., 2014). Ottenere un materiale omogeneo per composizione e dimensioni è l'obiettivo principale di questa fase che viene adattata comunque al tipo di pellet che sarà prodotto. La raffinazione è, inoltre, molto importante perché permette di incrementare la superficie delle piccole particelle di legno. In questo modo si favorisce la rottura della lignina che è il legante naturalmente presente nel legno importantissimo per la fase di densificazione vera e propria.

## **Condizionamento**

Questa fase viene utilizzata per preparare al meglio il materiale alla pressatura. Se il contenuto idrico, rilevato con un sensore di umidità, supera il 15%, viene rinforzato il processo di essiccazione a monte. Al contrario se il contenuto idrico della materia prima è inferiore a questo valore, come accade ad esempio per la segatura proveniente da residui di segheria, l'umidità può essere aumentata tramite il trattamento della biomassa con acqua o vapore. Si utilizza spesso il vapore caldo poiché questo consente l'aumento della temperatura della segatura, che, insieme al rammollimento della lignina dovuto al condizionamento, prepara meglio le particelle legnose alla successiva pellettizzazione, provocandone un aumento della capacità legante. L'acqua contenuta nella segatura è inoltre responsabile della lubrificazione della trafila, abbassando il livello di attrito nel processo di pellettizzazione (Samuelsson et al., 2012).

## **Aggiunta di additivi**

Qualora il materiale di partenza presenti delle caratteristiche qualitative non adatte alla pellettizzazione, si prevede la miscelazione di sostanze additive al materiale stesso. L'acqua è l'additivo per eccellenza, e viene aggiunta nella fase di condizionamento. Oltre a questo, vi sono altre sostanze che possono essere utilizzate per migliorare le capacità leganti della

biomassa (lignina, amido, residui vegetali, corteccia, residui della lavorazione della carta). “La selezione del legante dovrebbe essere effettuata sulla base del suo costo e della sua compatibilità ambientale” (Byoung et al., 2013). Generalmente si utilizzano additivi naturali, biologici, in quantitativi non superiori al 2% in peso che comportano un aumento della durabilità del pellet. Gli additivi aggiunti alla materia prima, hanno, infatti, il compito di favorire la formazione di legami chimici e fisici tra le particelle, con conseguente miglioramento della compattazione del pellet e delle sue caratteristiche qualitative.

### **Pelletizzazione (pressatura)**

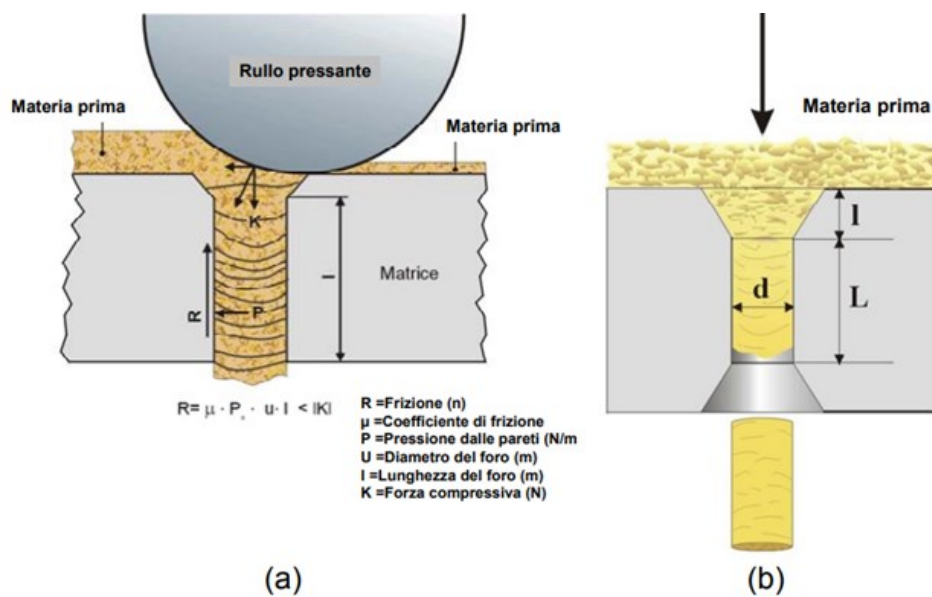
È la fase produttiva principale, con la quale il materiale precedentemente preparato subisce una trasformazione fisica e meccanica, che porta ad un cambiamento sostanziale di forma, dimensioni, densità. La biomassa (segatura, trucioli) viene pressata da due, fino a cinque rulli contro una matrice di materiale metallico. Questa matrice forata permette al materiale pressato di passarci attraverso e di dare origine al pellet vero e proprio. In particolare, i fori della matrice, in numero variabile, presentano la parte più superficiale di forma conica che favorisce l'ingresso del materiale e la compressione, e la parte finale di forma cilindrica che dà la forma al pellet (Figura 1). È proprio il diametro finale di questi fori che darà la dimensione definitiva al pellet. La lunghezza viene determinata dall'azione di una lama che taglia i pellet ottenuti dalla trafila.

“Le dimensioni del pellet da combustibile variano tra i 3 e i 25 mm di diametro a seconda della matrice usata nella produzione. La lunghezza generalmente varia tra 5 e 40 mm” (Hansen e Jein, 2002).

Una volta che il materiale entra nella pressa, determinate condizioni di pressione (regolabili) e temperatura (da 80 a circa 130°, dovute alle frizioni tra le particelle di materiale e gli organi meccanici) favoriscono il processo di densificazione ed estrusione. È in questa fase che si verificano delle importanti modifiche a livello chimico-fisico delle sostanze che compongono la materia prima. Sono proprio queste modifiche che portano a un cambiamento sostanziale delle caratteristiche della materia prima. Una di queste avviene a carico della lignina, una sostanza (polimero amorfo complesso) naturalmente presente nelle pareti cellulari della biomassa. Per effetto del calore, la lignina si scioglie ed agisce da legante tra le particelle, favorendo la compattazione del materiale e quindi la produzione del pellet. È la stessa lignina che una volta sciolta si raffredda, e conferisce il tipico aspetto vitreo, lucido alla superficie dei singoli pellet. Lo scioglimento della lignina dipende quindi dalla temperatura della trafila che di conseguenza, diventa uno dei parametri più importanti responsabili della qualità del

prodotto finito. Secondo uno studio di Stelte W. et al (2010) “... le forze di compressione del pellet, sono in generale più elevate per pellet prodotti a temperature più alte.” La necessità quindi di raggiungere temperature ideali nella pellettizzazione è fondamentale per ottenere un prodotto di qualità, soprattutto per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche.

Inoltre, nello studio condotto da Lam et al. è stato dimostrato che, in campioni di pellet di Douglasia (*Pseutotsuga menziesii*), le caratteristiche meccaniche migliori del pellet si ottengono con 100 °C di temperatura della trafilatura, 126 MPa di pressione e 30 s di tempo di rilassamento. Oltre alla temperatura e alla pressione esercitata, anche la composizione chimica influenza il processo produttivo e la qualità del pellet, in particolare la presenza di composti chimici o di acqua che migliorano le capacità leganti. Nel complesso, le capacità leganti delle particelle sono garantite dalla presenza a livello chimico di lignina ed emicellulosa (entrambi polimeri amorfi) che con il calore subiscono delle trasformazioni termoplastiche, responsabili della formazione di legami (legami covalenti, forze di van der Waals) tra le particelle.



**Figura 1: Principio di pellettizzazione (a) e relazione di compressione (b)**

### Raffreddamento e vagliatura

Una volta che il pellet fuoriesce dalla trafilatura, è ancora morbido e molto caldo. L'elevata temperatura dipende dal calore che si sviluppa durante la pressatura e in particolare dall'attrito tra i diversi componenti. Per questo motivo, per garantire l'indurimento del pellet e la perdita ulteriore di acqua, è necessario un immediato raffreddamento del prodotto. L'ideale sarebbe quello di portare il pellet ad una temperatura di circa 25° C. Questo processo avviene in genere in un raffreddatore contro corrente, che soffia aria attraverso i pellet permettendone la perdita

di calore. Dopo il raffreddamento avviene il processo di vagliatura, dove attraverso un vaglio vibrante vengono allontanate le particelle fini residue o il materiale che non è stato perfettamente pressato. Il materiale separato, a seguito della vagliatura, viene generalmente reinserito nel processo produttivo, in modo tale da limitare gli scarti di produzione.

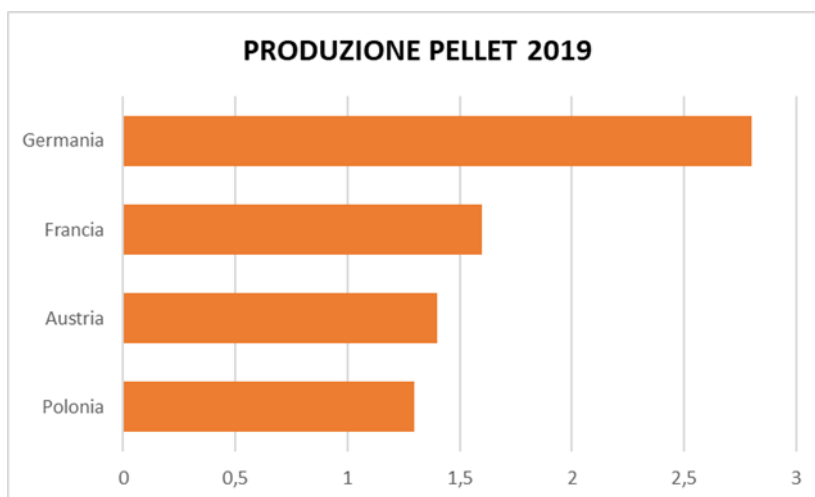
### **Confezionamento, stoccaggio e trasporto del pellet**

Una volta raffreddato, il pellet può essere confezionato in sacchi oppure rimanere sfuso e trasportato grazie a particolari autobotti. La scelta del tipo di trasporto avviene in funzione della tipologia di confezionamento utilizzata. Il pellet sfuso può subire una fase di stoccaggio intermedia in appositi magazzini. Prima della consegna finale il materiale viene tuttavia sottoposto ad un ulteriore vagliatura.

## **1.2 Situazione attuale del mercato in Europa**

Nello scenario energetico mondiale, il pellet di legno rappresenta uno dei biocombustibili più tecnologicamente avanzati presenti attualmente sul mercato. È sicuramente quello che ha avuto negli ultimi anni il più ampio sviluppo sia a livello produttivo che di commercializzazione e vendita. Il motivo principale di questa grande diffusione è da ricercare nel cambiamento degli standard e degli interessi di produzione dell'energia. Le biomasse hanno a mano a mano preso piede nel mercato globale dei combustibili, sostituendo in parte i tradizionali combustibili fossili. Quest'ultimi, infatti, sono diventati insostenibili sia a livello economico che ambientale. "I prezzi elevati dei combustibili fossili, le tasse sui carburanti fossili, e gli incentivi per combustibili rinnovabili nei paesi europei hanno portato ad una costante crescita del mercato del pellet a partire dal 1990" (Mobini et al., 2013). Il crescente interesse collettivo verso la riduzione delle emissioni di gas nocivi ha dato un forte input all'aumento dell'utilizzo dei biocombustibili. L'utilizzo di pellet a livello domestico comporta una produzione media di CO<sub>2</sub> di 30 Kg per tonnellata di pellet utilizzato. Comparando questo dato con i valori di CO<sub>2</sub> emessa utilizzando i normali combustibili liquidi, si attesta una riduzione del 97% delle emissioni. Secondo quanto riportato dal recente Statistical Report Bioenergy Europe (2020), la produzione di pellet in Europa nel 2019, ha registrato una crescita del 7,2% (rispetto al 2018) raggiungendo 22 milioni di tonnellate. Nello specifico, nonostante alcune avversità registrate nel 2017-2018 soprattutto per effetto delle inondazioni in Nord Europa (Scandinavia e Paesi baltici) e degli incendi in Portogallo, il 2019 ha favorito un ampio recupero dei livelli produttivi ed è stato anche un anno record per alcuni produttori storici come Germania e Austria che hanno raggiunto quote di produzione rispettivamente di 2,8 e

1,4 milioni di tonnellate, mentre Francia di 1,6 milioni di tonnellate e Polonia di 1,3 milioni di tonnellate (Figura 2). Per quanto riguarda il consumo di pellet, nel 2019 l'Italia ha toccato le 3,2 milioni di tonnellate, perlopiù impiegate in stufe a pellet domestiche. Tuttavia, il dominio italiano è messo alla prova dalla Francia, uno tra i mercati in più rapida crescita sia in termini di produzione che di consumo. Infatti, mentre l'Italia vanta un numero di stufe a pellet installate significativamente maggiore, con 2 milioni di apparecchi nel 2019 contro circa 1,1 milioni in Francia, le vendite annuali mostrano invece differenze molto meno marcate, con una tendenza in flessione a 170.000 unità per l'Italia e in crescita a 165.000 unità in Francia (Statistical Report Bioenergy Europe, 2020).



*Figura 2: Produzione pellet in Europa 2019*

### 1.3 Parametri per la determinazione della qualità del pellet

La qualità del pellet viene determinata attraverso la misura di una serie di proprietà fisiche e chimiche correlate con le prestazioni energetico-ambientali del prodotto. Il corretto campionamento del prodotto da analizzare è fondamentale per dare rappresentatività e forza ai risultati delle analisi. Sebbene il processo di produzione del pellet sia realizzato attraverso una serie di passaggi operativi standardizzabili e potenzialmente soggetti a controllo, la qualità del prodotto è in gran parte soggetta alle caratteristiche della materia prima e alla sua variabilità. In effetti, la biomassa grezza utilizzata per la produzione del pellet può provenire da fonti molto diverse tra loro presentando differenze nelle caratteristiche qualitative, anche nell'ambito della stessa tipologia di materia prima. Ad esempio, lo stesso tipo di legno può provenire da biomasse forestali di piante dedicate e non, da residui della lavorazione in bosco, da residui della segheria o da cascami dell'industria del legno. Ciascuno di questi prodotti presenta caratteristiche fisiche e chimiche diverse tra loro che si riflettono sulla qualità del pellet. Pertanto, per i produttori di pellet l'adozione di sistemi di controllo della qualità della biomassa grezza in ingresso al processo rappresenta un aspetto importante, soprattutto se lungo la filiera di approvvigionamento della materia prima e la linea di gestione della biomassa in impianto vi sono numerosi passaggi operativi. Alcuni aspetti della qualità del pellet sono condizionati anche dal processo di pellettizzazione. Differenze di impiantistica e modalità di lavoro della biomassa possono determinare delle variazioni di alcuni parametri qualitativi. Un esempio su tutti è il ricorso o meno della scortecciatura del legno. Questa operazione viene introdotta nel processo produttivo per ottenere pellet della migliore qualità e con un basso contenuto di ceneri, fattore che vedremo influire in misura preponderante su di essa. Tuttavia, non tutti i produttori di pellet praticano la scortecciatura del legno a causa degli elevati costi di esercizio. Per determinare la qualità del pellet è necessario tenere in considerazione la tipologia di biomassa utilizzata per la produzione del pellet, il comportamento del prodotto in fase di combustione, il quale, può risultare sensibilmente diverso con conseguenze importanti su una serie di aspetti. Tra questi:

- **Aspetti energetici:** relativi alla capacità del pellet di produrre energia termica durante la fase di combustione;
- **Aspetti tecnici:** si riferiscono principalmente alle interazioni tra la struttura e le componenti degli impianti termici con cui la biomassa, in relazione alle sue caratteristiche fisico-chimiche, entra in contatto ed interagisce;
- **Aspetti ambientali:** riguardanti gli effetti sull'ambiente da parte di alcuni composti inquinanti generatisi nel corso della combustione.

La conoscenza delle proprietà della biomassa che costituisce il pellet costituisce quindi un elemento necessario per valutare il corretto utilizzo del prodotto e prevedere le sue prestazioni negli impianti termici. Le principali proprietà che contraddistinguono i pellet e su cui si valuta la qualità e il valore merceologico sono principalmente il contenuto di umidità, la massa volumica, il potere calorifero, la durabilità meccanica, il contenuto di ceneri e il contenuto di azoto, cloro e zolfo. In seguito, si prendono in considerazione tali parametri introducendo alcuni elementi di sintesi.

### **Contenuto di umidità**

Questo parametro, misurato in percentuale su peso e solitamente al di sotto del 10%, incide principalmente su aspetti di carattere energetico del prodotto e sul comportamento termico negli impianti. La misura del contenuto di umidità è eseguita mediante l'uso di una stufa a 105°C con pesate di campioni prima e dopo l'essiccazione su bilancia tecnica. Il basso contenuto di umidità del pellet oltre a garantire elevate prestazioni energetiche produce anche una serie di vantaggi di carattere gestionale e logistico. In particolare: - elevata densità energetica (MJ/m<sup>3</sup>): la limitata presenza di acqua nel pellet determina un aumento del contenuto energetico e quindi un incremento di densità energetica. - ridotta attività biotica: il basso contenuto di umidità del pellet impedisce lo sviluppo di microrganismi che innescano fenomeni di degradazione della sostanza organica lignocellulosica aumentando in questo modo la stabilità nel tempo del prodotto che può essere conservato per lunghi periodi ed utilizzato all'occorrenza.

### **Contenuto in ceneri**

Le ceneri rappresentano la frazione inorganica di un biocombustibile che rimane residuale dopo un processo di completa combustione e che non contribuisce alla produzione di energia. La qualità delle biomasse è fortemente condizionata da questo parametro in conseguenza di una serie di problematiche di cui ne sono causa, tra queste: - lo smaltimento: questa operazione rappresenta un costo di produzione a cominciare dal loro trasporto alla sede di riutilizzo o smaltimento; - la produzione di aggregati solidi e stabili in caldaia: si tratta di un fenomeno che interessa le ceneri a bassa temperatura di fusione e che può determinare deterioramenti di alcune componenti delle caldaie, fermate di funzionamento degli impianti e perdita di efficienza energetica per imbrattamento degli scambiatori di calore. In genere un pellet di legno non presenta questo tipo di problematica; - processi di corrosione: a seconda della natura chimica delle ceneri (es. potassio e sodio) e della presenza nella biomassa di specifici elementi

chimici (es. zolfo e cloro) possono essere favorite quelle reazioni chimiche alla base dei processi di corrosioni a carico delle parti interne dell'impianto di combustione; - polveri sottili: queste componenti inquinanti emesse a camino si formano a seguito della volatilizzazione di alcuni elementi chimici alle temperature degli impianti di combustione. La misura del contenuto in ceneri viene eseguita mediante principio termogravimetrico utilizzando una muffola per l'incenerimento a 550 °C del campione di biomassa. Mediante una bilancia analitica si misura il peso delle ceneri prodotte che viene rapportato al peso della biomassa utilizzata per l'analisi. Il dato viene espresso come peso percentuale di ceneri su sostanza secca.

### **Durabilità meccanica**

La durabilità meccanica è una delle caratteristiche qualitative dei pellet per eccellenza. Rappresenta la capacità del materiale di rimanere integro in seguito a delle sollecitazioni meccaniche che possono avvenire tipicamente durante il trasporto. È espressa in percentuale e sta ad indicare appunto la quota di pellet (x %) che rimane intatta, cioè sotto forma di cilindri delle dimensioni caratteristiche. Anche la durabilità dipende da altre variabili come il contenuto idrico, il tipo di legno utilizzato e la sua densità. Ovviamente avere dei valori di durabilità più elevati possibile è sinonimo di un pellet di qualità elevata. La durabilità influenza fortemente il contenuto di particelle fini nel materiale, le quali se presenti in concentrazioni elevate, possono disturbare la regolazione dei sistemi di riscaldamento automatizzati o interrompere l'alimentazione del combustibile. Per questo motivo "è molto importante per i produttori di pellet, offrire pellets sufficientemente forti in grado di resistere ai rigori della manipolazione e del trasporto" (Byoung et al., 2013). Una durabilità elevata garantisce così, oltre che una maggiore integrità del prodotto durante tutta la catena produttiva (dalla produzione al trasporto fino all'utilizzazione finale) anche una migliore qualità del processo di combustione e una sua maggiore efficienza.

### **Massa volumica apparente**

La massa volumica apparente o massa volumica sterica (Mv o Mvs), è chiamata anche Densità apparente (BD, Bulk Density) da non confondere con la densità vera e propria del materiale (che è il rapporto tra la massa ed il volume). La Bulk Density è infatti il rapporto tra il peso ed il volume del corpo legnoso, facendo riferimento al volume che il materiale occupa normalmente in funzione del suo stato e delle sue caratteristiche dimensionali. Si parla infatti di massa volumica sterica quando il materiale è riversato in cumuli o cataste, come tipicamente



avviene per la legna da ardere, il cippato ed il pellet. Questa grandezza, espressa in  $\text{g/cm}^3$  o  $\text{kg/m}^3$  o  $\text{kg/m}^3$  accatastato o  $\text{kg/m}^3$  stero dipende strettamente dalla quantità di materiale solido presente e dalla quantità di vuoti che si generano per la particolare conformazione del materiale stesso. Quindi la presenza di aria all'interno del cumulo o della catasta di materiale così come la pezzatura dello stesso, giocano un ruolo fondamentale nel condizionare la massa volumica. Più il materiale è irregolare e disomogeneo e maggiori saranno gli spazi vuoti presenti, con conseguente riduzione del valore di massa volumica. Al contrario se il materiale è di forma regolare ed omogeneo gli spazi vuoti saranno inferiori e così la massa volumica avrà valori più alti. Per questo motivo se prendiamo in considerazione la legna da ardere e anche il cippato, data l'irregolarità più o meno accentuata dei singoli elementi, la massa volumica sarà bassa. Al contrario, nel caso del pellet, la massa volumica sarà molto più alta grazie alla grande regolarità dei singoli cilindretti che rendono questo materiale molto omogeneo. Ai fini energetici è molto importante avere un'alta densità sterica, che a parità di volume di materiale garantisce la presenza di una maggiore quantità di sostanza solida che ovviamente è quella che sarà utilizzata per la combustione. La massa volumica condiziona, infatti, sia il potere calorifero che la densità energetica del materiale.

### **Potere calorifico**

Il potere calorifico, misurato in  $\text{J/g}$  e distinto in superiore e inferiore, è il principale parametro che definisce il contenuto energetico del combustibile. Il potere calorifico superiore viene misurato mediante un calorimetro in laboratorio ed è il punto di partenza per poter calcolare il potere calorifico inferiore, che in genere oscilla tra 16 e 18  $\text{kJ/g}$ , attraverso la determinazione mediante analizzatore elementare del contenuto di idrogeno della biomassa. Quest'ultimo dato definisce l'energia potenzialmente liberata dalla combustione di una unità di massa di biomassa. Il dato del potere calorifico inferiore combinato opportunamente con quello del contenuto di umidità permette il calcolo del potere calorifico netto, dato che rappresenta il valore energetico reale di una biomassa tal quale e quindi fondamentale per valutazioni di natura economica e per il computo dell'efficienza energetica di un impianto di conversione energetica.

### **Contenuto in azoto, zolfo e cloro.**

Il contenuto di questi elementi chimici varia a seconda del tipo di biomassa: legnosa, erbacea o da agroindustria. Nel caso del cippato di legno le variazioni possono essere legate a vari aspetti, tra cui la presenza di corteccia, oppure di parti giovani di piante normalmente più ricche in questi elementi. Quando i valori delle concentrazioni sono particolarmente elevati è possibile supporre che il prodotto possa contenere inerti o derivati di trattamenti chimici come, ad esempio, i residui dell'industria del legno. Le problematiche generate dalla presenza di questi elementi chimici sono principalmente di carattere tecnico ed ambientale:

- I composti a base di cloro rappresentano una delle principali cause dei fenomeni di corrosione delle diverse parti di impianto. Normalmente i maggiori problemi si incontrano con prodotti residuali dell'agricoltura, in particolare le paglie, molto ricche di questo elemento;
- Gli stessi problemi del cloro sono generati da composti contenente zolfo, lavorando in maniera sinergica nel favorire tali processi negativi. Normalmente questo elemento chimico è presente a basse concentrazioni nel legno vergine;
- Il problema che riguarda l'azoto è fondamentalmente di carattere ambientale per la produzione di ossidi di azoto durante la combustione; è un parametro richiesto dalla specifica del pellet e viene espresso in percentuale in peso su sostanza secca. Normalmente il pellet di legno presenta valori molto bassi di tali elementi e quindi le problematiche considerate si manifestano solo nel tempo. Per ciò che concerne la produzione di ossidi di azoto dall'impianto termico va ricordato che questa avviene anche in assenza di azoto del combustibile ma a seguito dell'azoto atmosferico nell'ambiente di combustione.

#### 1.4 Normativa tecnica e standard di qualità

Il settore dei biocombustibili ha riscontrato la necessità di introdurre standard o specifiche di prodotto, attraverso normative tecniche, per stabilire i livelli di qualità. Si tratta di documenti tecnici nei quali viene definito il concetto di qualità del pellet e stabilite le sue proprietà fisiche e chimiche per poter appartenere a determinate categorie o classi qualitative. Alla normativa tecnica può essere integrato il sistema di certificazione, cioè un insieme di attività ed operazioni condotte da una parte terza che dichiara, con una certa attendibilità, che un prodotto risponde a dei requisiti di produzione e/o di qualità definiti da uno standard o da più norme. La qualità del pellet viene definita da specifiche tecniche sviluppate a vari livelli. A livello internazionale la norma a cui fanno riferimento i biocombustibili solidi è la ISO 17225. Per il pellet di legno il riferimento nazionale è la UNI EN ISO 17225-2 “Biocombustibili solidi – Specifiche e classificazione del combustibile – Parte 2: Definizione delle classi di pellet di legno” che di fatto recepisce la norma ISO.

La norma stabilisce i parametri qualitativi di riferimento e le soglie entro le quali un determinato pellet deve rientrare affinché possa ritenersi conforme o meno ad una determinata classe di qualità. Vengono definite per il pellet ad uso domestico e commerciale le seguenti classi A1, A2 o A3 (Tabella 1-1).

**Tabella 1-1: Parametri analitici in funzione delle classi di qualità ad uso domestico e commerciale**

Classe di proprietà	Unità	A1	A2	A3
<b>Origine e fonte</b>		a. fusto b. residui legnosi non trattati chimicamente	a. alberi interi senza radici b. fusto c. residui legnosi non trattati chimicamente	a. boschi, piantagioni e legno vergine b. residui dell'industria del legno c. legno non trattato chimicamente
<b>Diametro e Lunghezza</b>	mm	D06, 6 ± 1, 3,15 < L < 40 D08, 8 ± 1, 3,15 < L < 40	D06, 6 ± 1, 3,15 < L < 40 D08, 8 ± 1, 3,15 < L < 40	D06, 6 ± 1, 3,15 < L < 40 D08, 8 ± 1, 3,15 < L < 40
<b>Ceneri</b>	w- %	A0,7 < 0,7	A1,2 < 1,2	A2,0 < 2,0
<b>Umidità</b>	w- %	M10 < 10	M10 < 10	M10 < 10
<b>Durabilità</b>	w- %	97,5 < DU < 99	97 < DU < 99	96,5 < DU < 99

Tuttavia, la nuova norma introduce anche specifiche classi di qualità per il pellet di legno ad uso industriale denominate I1, I2 e I3 (Tabella 1-2).

**Tabella 1-2: Parametri analitici in funzione delle classi di qualità ad uso industriale**

<b>Classe di proprietà</b>	<b>Unità</b>	<b>I1</b>	<b>I2</b>	<b>I3</b>
<b>Origine e fonte</b>		a. boschi, piantagioni e legno vergine b. legno non trattato chimicamente	a. boschi, piantagioni e legno vergine b. legno non trattato chimicamente	a. boschi, piantagioni e legno vergine b. sottoprodotti e residui dell'industria del legno c. legno non trattato chimicamente
<b>Diametro e Lunghezza</b>	mm	D06, 6 ± 1, 3,15 < L < 40 D08, 8 ± 1, 3,15 < L < 40	D06, 6 ± 1, 3,15 < L < 40 D08, 8 ± 1, 3,15 < L < 40 D10, 10 ± 1, 3,15 < L < 40	D06, 6 ± 1, 3,15 < L < 40 D08, 8 ± 1, 3,15 < L < 40 D10, 10 ± 1, 3,15 < L < 40 D12, 12 ± 1, 3,15 < L < 40
<b>Ceneri</b>	w- %	A1.0 < 1.0	A1.5 < 1.5	A3.0 < 3.0
<b>Umidità</b>	w- %	M10 < 10	M10 < 10	M10 < 10
<b>Durabilità</b>	w- %	97,5 < DU < 99	97 < DU < 99	96,5 < DU < 99

## Capitolo 2

### ASPETTI GEOMETRICI E DIMENSIONALI: INFLUENZA DELLA LUNGHEZZA SULLA QUALITÀ DEL PELLET

La norma UNI EN ISO 17225-2 "Biocombustibili solidi - Specifiche e classificazione del combustibile - Parte 2: Definizione delle classi di pellet di legno", la quale definisce la qualità del pellet di legno ad uso energetico, prevede il controllo del biocombustibile mediante la verifica del rispetto dei limiti di alcuni parametri chimico-fisici. Tra questi, la lunghezza ed il diametro determinati mediante metodica stabilita dalla norma UNI EN ISO 17829. Il principio di misura della lunghezza e diametro del pellet si basa sulla determinazione mediante un calibro. In particolare, per la lunghezza è stabilito che la misura si considera l'asse del cilindro, mentre per il diametro si deve prendere la misura perpendicolarmente all'asse del pellet. Inoltre, il calibro di misurazione deve avere una risoluzione di almeno 0,1 mm e la bilancia per la misura dei pellet campionati deve essere in grado di leggere l'approssimazione di 0,01 g, mentre il setaccio utilizzato per eliminare le polveri residue deve avere fori rotondi di diametro a 3,15. Il campione da analizzare scelto con modalità random deve essere diviso in due porzioni di prova, una composta da 10 pellet e l'altra composta da una massa minima (Tabella 2-1).

**Tabella 2-1: Misurazione per la prova.**

Dimensione del pellet	Porzione di prova minima stimata
≤ 6 mm	30 g – 40 g
> 8 mm	40 g – 50 g
> 10 mm	50 g – 70 g
> 12 mm	70 g – 120 g
> 25 mm	0 g – 500 g (minimo 50 pellets)

La determinazione della classe diametrica avviene tramite la misurazione del diametro di ogni pellet utilizzando il calibro. La media delle misure del diametro più vicine alla classe definita dalla norma UNI EN ISO 17225-2 determina la classe di diametro del pellet.

Per la lunghezza occorre prendere la misura in mm di ogni pellet verificando in seguito la percentuale dei pellet con lunghezza fuori misura. Infine, si registra il peso dei pellet con una bilancia che abbia l'approssimazione di 0,01 g.

La quantità di pellet con lunghezza superiore a 40 mm può essere al massimo di 1 w-%. La lunghezza massima è di 45 mm. I pellet sono considerati più lunghi di 3,15 mm, se rimane su un setaccio a fori rotondi di 3,15 mm. Quindi, la quantità di pellet inferiore a 10 mm deve essere indicata (ISO 17829). Successivamente, si calcola il valore medio e lo scarto quadratico medio della classe di diametri dei pellet registrati esprimendo i risultati con l'approssimazione di 0,1 mm. Se la porzione da analizzare contiene pellet di diverse classi di diametro (ad es. miscela di D06 e D08), la media e la deviazione standard del diametro del precipitato per ciascuna delle classi sono calcolate separatamente e indicate come percentuale del numero di pellet misurati. In conclusione, si redige il rapporto di prova, cioè un verbale che contiene le seguenti informazioni: i valori riportati dalle misure effettuate, la percentuale di pellet con lunghezza superiore a 40 mm, il numero di pellet di lunghezza superiore alla lunghezza massima specificata in precedenza, l'identificazione del prodotto di partenza, l'identificazione del laboratorio che effettua le analisi e un riferimento alle norme utilizzate. Queste misurazioni richiedono molto tempo e la significatività statistica dei risultati è scarsa a causa delle piccole dimensioni del campione. Pertanto, risulta necessario attuare e implementare sistemi di misurazione ottica che consentono di esaminare campioni più grandi in minor tempo. Il presente elaborato di tesi propone metodi di misura innovativi di analisi attraverso il riconoscimento di immagini. Questo argomento verrà approfondito nei capitoli successivi.

## **2.1 Trasporto e stoccaggio**

Uno dei punti di forza del pellet è rappresentato dalla sua uniformità dimensionale che ne permette la facile movimentazione e l'automazione del sistema di alimentazione degli impianti termici, anche quelli di piccola potenza quali stufe e piccole caldaie domestiche. Tale aspetto, rende il suo impiego confortevole in maniera analoga ai sistemi termici alimentati da combustibili fossili. Le caratteristiche geometrico-dimensionali di un pellet dipendono dal tipo di trafilatura utilizzato ed il limite posto alla lunghezza dei pellet è utile soprattutto per garantire il regolare scorrimento nei sistemi di alimentazione o movimentazione del pellet. Le dimensioni del pellet sono importanti anche in relazione alla dimensione e tipologia del sistema di combustione, ma a parità di condizioni di combustione i pellet con diametri e lunghezze elevate richiedono tempi di combustione maggiori rispetto a pellet di dimensioni inferiori. Inoltre, potrebbero innescarsi altri fenomeni legati sempre al rapporto aria-

combustibile. Questo potrebbe determinare un problema di combustione dell'impianto termico che è progettato per funzionare con pellet di dimensioni stabilite. Pertanto, al fine di mantenere elevate le performance ed i rendimenti degli impianti termici, i costruttori di impianti forniscono anche indicazioni sulle dimensioni ottimali del pellet da utilizzare. Come detto in precedenza la lunghezza può essere variabile ma normalmente compresa tra 10 e 40 mm. Questo prodotto è adatto alle stufe domestiche ed alle piccole caldaie, per gli impianti di maggiore potenza è possibile impiegare pellet di diametri superiori. Una delle caratteristiche più evidenti del pellet di legno è l'estrema regolarità ed omogeneità dei singoli elementi rendendo questo biocombustibile legnoso differente da tutti gli altri. Infatti, rispetto alla legna da ardere e anche al cippato, risulta essere molto più maneggevole in termini logistici rendendolo così un materiale dall'indubbio valore sia per il trasporto che per lo stoccaggio.

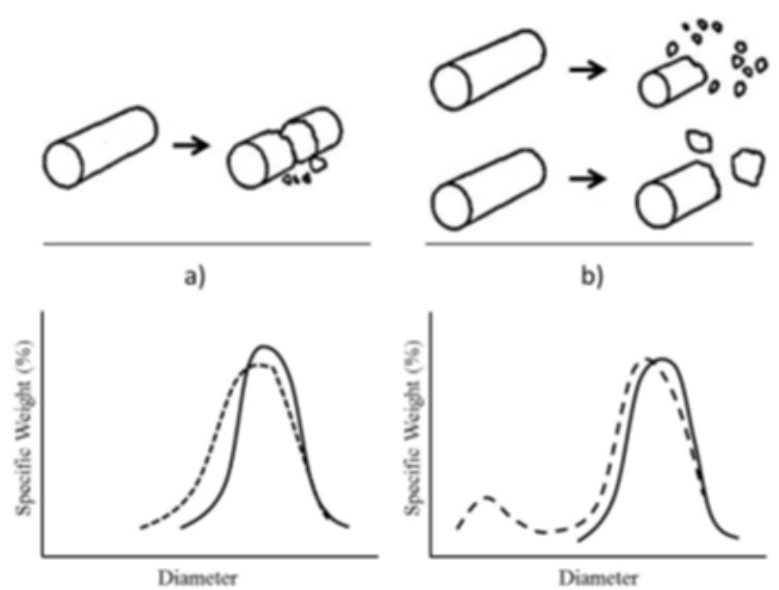
La pellettizzazione della biomassa riduce i costi di gestione, e i risultati sono un combustibile con una maggiore omogeneità strutturale (Stelte et al., 2010). Il pellet può essere assimilato, infatti, ad un fluido proprio per queste sue peculiarità, diventando così un combustibile di origine naturale molto simile a quelli di origine fossile favorendone la grande diffusione di questi ultimi anni. Con il trasporto del pellet, inoltre, c'è la possibilità di caricare sui mezzi adibiti a questa operazione, una maggiore quantità di massa legnosa rispetto ad un altro combustibile (legna da ardere o il cippato). Il pellet è un materiale facilmente trasportabile, più maneggiabile e in grado di permettere un'automazione del processo produttivo. A tal riguardo, infatti, durante le ultime fasi della produzione, il materiale può essere direttamente convogliato all'interno di sacchi per poi essere stoccato in attesa del trasporto. Quest'ultimo può avvenire anche con delle autobotti dotate di un sistema di scarico automatico molto più simile a quello che viene utilizzato per i combustibili liquidi. Questo aspetto è molto importante per semplificare notevolmente le operazioni di consegna del materiale, con conseguente miglioramento dell'efficacia complessiva.

## 2.2 Effetto della lunghezza sulle proprietà del pellet

Come anticipato nel capitolo precedente, la lunghezza del pellet, a seconda della geometria, influenza notevolmente la qualità della combustione nelle stufe a pellet. La cattiva combustione dovuta a delle irregolarità di forma determina anche emissioni di monossido di carbonio e di particolato, note per essere nocive per la salute umana. In generale, le emissioni derivanti dalla combustione del legno variano notevolmente a seconda del tipo di tecnologia di combustione (es: sistemi di combustione alimentati automaticamente e manualmente) e del tipo di combustibile (es: legna da ardere, trucioli di legno, pellet). La qualità delle emissioni delle stufe a pellet è fortemente influenzata dal tipo di stufa, dalla fase di combustione e dalle proprietà del pellet di legno. Due studi (Boman et al., 2011; Bafver et al., 2011) hanno affermato che i test di combustione con stufe a pellet che utilizzano combustibile identico possono portare a livelli di emissione significativamente diversi per stufe diverse. Queste differenze sono molto probabilmente dovute ad una progettazione della camera di combustione della stufa differente, inoltre, dal sistema di controllo della combustione e dai parametri di combustione risultanti come il rapporto aria-combustibile e la temperatura di combustione. Secondo lo studio Wohler et al., (2017), la variazione della lunghezza del pellet verso pellet più lunghi porta a un ridotto trasporto di carburante nella camera di combustione che di conseguenza riduce la potenza termica della stufa. I pellet più lunghi potrebbero in certe condizioni portare ad un aumento significativo delle emissioni gassose e di particolato. Inoltre, il parametro della lunghezza, svolge un ruolo molto importante nella determinazione della durabilità meccanica del pellet. Secondo lo standard ISO 16559, la durabilità meccanica è definita come "la capacità delle unità di biocarburanti densificati (ad esempio, briquette, pellet) di rimanere intatte durante il carico, lo scarico, l'alimentazione e il trasporto". La quantità di polveri fini e polveri generate durante il trasporto e la movimentazione è legata alla resistenza del pellet, che a sua volta dipende dall'origine del materiale, dai processi di pretrattamento e dal processo di densificazione. Maggiore è la durata meccanica del pellet, minore è il contenuto di polveri sottili e la generazione di polvere durante il trasporto e la movimentazione. Secondo lo studio Gilvari et al., (2020), i valori di durabilità meccanica dei pellet dipendono dalla lunghezza. Ciò è dovuto al numero di pellet per unità di massa, che determina il numero di collisioni pellet-pellet e pellet-contenitore. Thomas et al., (1998) ha mostrato nel suo studio che la rottura del pellet avviene in due modi: attraverso l'attrito e la



frammentazione, come mostrato nella Figura 3. Pertanto, in questo studio, la frammentazione è il principale meccanismo di rottura per i pellet più lunghi, mentre l'abrasione è più comune per i pellet più corti. In sintesi, indipendentemente dall'origine, dalle caratteristiche del processo di pellettizzazione e dai processi di pretrattamento, la tendenza dei pellet di biomassa a generare polveri fini e polveri (particelle che passano attraverso fori di setaccio da 3,15 mm) dipende fortemente dalla lunghezza del pellet. Minore è la lunghezza del pellet per unità di massa, maggiore è il numero di pellet e, quindi, più collisioni che si traducono in un contenuto di particelle fini più elevato e quindi in una minore durabilità meccanica.



**Figura 3: Due diversi meccanismi di rottura del pellet (a) Frammentazione (b) Abrasione**

## Capitolo 3

### MATERIALI E METODI

In questo capitolo, vengono espone le analisi e le corrispondenti procedure effettuate per la stesura del presente elaborato di tesi. In particolare, è stato effettuato il riconoscimento delle dimensioni del pellet attraverso il software Metalab e sono stati effettuati i test di portata con bilancia elettronica a piattaforma “DINI ARGEO” collegata al software Weimonitor.

#### 3.1 Campioni pellet

In questo studio sono stati analizzati 51 campioni di pellet presenti sul mercato e non, prodotti a partire da varie specie legnose: latifoglie, latifoglie tropicali, conifere e miscele di conifere e latifoglie. I campioni sono stati forniti da un ente di ricerca Europeo, il quale ha analizzato a norma la densità apparente (BD a.r. ( $\text{kg/m}^3$ )), la densità delle particelle (PD a.r. ( $\text{kg/m}^3$ )), il potere calorifico netto (NCV ( $\text{kJ/kg}$ )) e infine, il potere calorifico inferiore (PCI ( $\text{J/g t.q.}$ )) (Tabella 3-1). Nel capitolo successivo, i dati forniti verranno confrontati con quelli stimati dal software Metalab.

*Tabella 3-1: PCI analizzato a norma ( $\text{kJ/kg}$ )*

ID	PCI ( $\text{kJ/kg}$ )	ID	PCI ( $\text{kJ/kg}$ )	ID	PCI ( $\text{kJ/kg}$ )
1	17255,11	18	17117,13	36	17160,91
2	17347,20	19	17088,14	37	17392,33
3	17253,58	20	17106,48	38	17231,71
4	17353,67	21	16759,66	39	17190,63
5	17131,56	22	17261,29	40	17499,47
6	17534,14	23	17469,11	41	17499,47
7	17438,41	25	17557,57	42	18099,96
8	17387,01	26	17628,93	43	17673,97
9	17322,33	27	17927,33	44	17304,47
10	17546,27	28	17584,32	45	17137,00
11	17609,00	29	17543,75	46	17214,75
12	16836,57	30	17177,64	47	17416,20
13	17190,63	31	17204,65	48	16979,12
14	16731,27	32	18071,80	49	17398,94
15	17191,75	33	17486,24	50	17347,20
16	16957,91	34	17700,99	52	16902,44
17	17008,12	35	17332,83	53	16970,84

### 3.2 Software Metab: analisi dimensionale del pellet

Il MetaLab è stato sviluppato per poter accelerare l'operazione di misure dei pellet cercando di mantenere un determinato livello di precisione ed efficienza delle misure del pellet. La norma europea per la determinazione della lunghezza del pellet è poco efficiente, specie per i lunghi tempi, per la misurazione della distribuzione della lunghezza a causa della necessità di misurare manualmente ogni pellet individualmente. Pertanto, gli operatori del settore sono alla ricerca di metodi alternativi.

Il Metalab, che si basa sul riconoscimento di immagine, lavora in modo automatizzato sostituendo l'attività dell'analista di laboratorio mediante un'operazione semplice e veloce. Attraverso l'utilizzo di combinazioni di noti algoritmi, MetaLab è un sistema hardware e software che permette di poter misurare il pellet interagendo con il sensore IR e di salvare su database le misure prodotte dall'elaborazione effettuata. È costituito da una scatola metallica 400x400x220mm (MetaLab-Box) dotata di maniglie laterali per il trasporto, dove all'interno sono presenti (Figura 4):

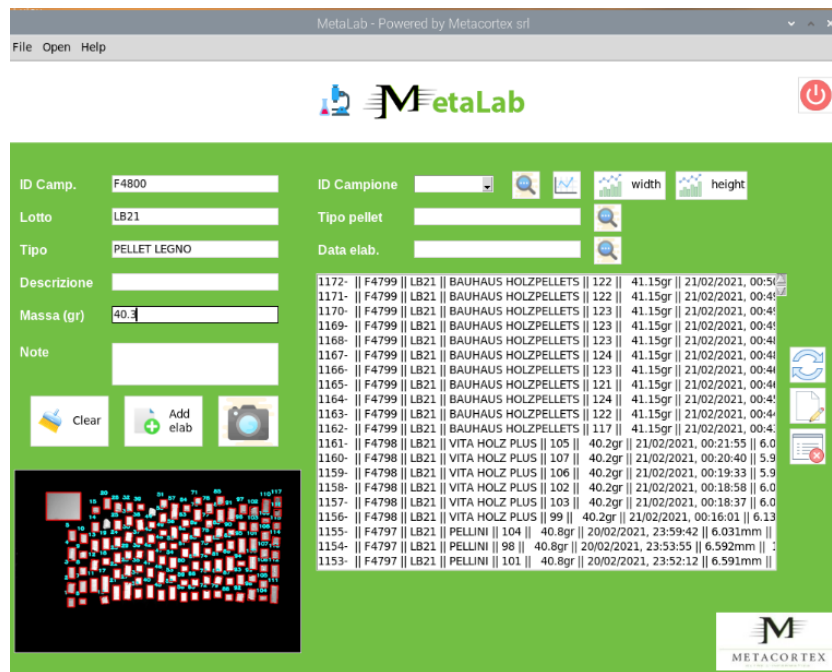
- Microcomputer Raspberry Pi 4;
- Sensore IR: Raspberry Pi 4 Camera IR;
- Ventole di raffreddamento;
- Piatto 297x210mm (MetaLabPlat) removibile per poter posizionare i pellet sui quali effettuare l'elaborazione;
- Software di elaborazione grazie al quale si possono acquisire le immagini utilizzate per avviare il processo computazionale ed ottenere le misure dei pellet dell'immagine (Figura 5).



*Figura 4: Postazione Metalab*

Per la determinazione dei parametri dimensionali del pellet, attraverso l'analisi delle immagini, si migliorano le tempistiche di elaborazione dei dati e la rappresentatività dei campioni analizzati con la possibilità di analizzare quantitativi maggiori e potendo svolgere più repliche di misurazione. Inoltre, si migliora la ripetibilità e riproducibilità dell'analisi che non sarà più operatore/laboratorio dipendente. Un operatore di media capacità impiega circa quindici minuti per poter svolgere un'analisi completa.

Per il presente studio, sono stati analizzati 51 campioni di pellet, per ogni sacchetto è stato prelevato un campione rappresentativo di 40 g, ottenuto a seguito della miscelazione e setacciatura del campione di partenza. Il campione in esame viene poi posizionato sopra il piatto facendo attenzione a non sovrapporre un pellet sopra l'altro (Figura 6), poiché il sensore li leggerebbe come un pellet unico; inoltre, occorre lasciare un margine tra il riquadro di riferimento e i pellet stessi poiché il sensore potrebbe non interpretare l'intera analisi.



**Figura 5: Interfaccia Metalab**

Successivamente, si procede con l'inserimento dei dati quali ID del campione, lotto analizzato, tipologia di pellet e massa espressa in grammi nell'"Elaboration form", ossia la sezione presente nella parte sinistra della GUI e si procede con l'avvio del processo di acquisizione ed elaborazione dell'immagine tramite il sensore IR e cropping (ritaglio) dell'immagine; il ritaglio viene effettuato per far sì che l'immagine abbia al proprio interno solo il piatto ed il pellet. L'immagine viene poi convertita in scala di grigio e si effettua uno smoothing utilizzando il filtro Gaussiano Blur per ridurre i "rumori" dell'immagine generati da fenomeni di disturbo (es: riflessi).



***Figura 6: Posizionamento pellet analisi Metalab***

In seguito, si ricercano i contorni che corrispondono agli oggetti nella mappa dei bordi e si verifica che ogni contorno sia sufficientemente grande, altrimenti la regione viene scartata. I contorni vengono ordinati da sinistra a destra in modo da permettere prima l'individuazione dell'oggetto di riferimento, le cui dimensioni sono note, poi la misura in pixel. Si calcola il rapporto tra pixel e mm dell'oggetto di riferimento conoscendo le misure reali in mm di quest'ultimo, poi si applica la funzione di conversione da pixel a mm anche sui pellet identificati. A seguito di ogni analisi, nel database vengono calcolate e salvate le misure di ogni singolo pellet, viene salvata l'immagine elaborata nella quale tutti gli elementi individuati sono numerati ed evidenziati da un contorno rosso e tutti questi dati vengono salvati anche all'interno di un foglio di calcolo; inoltre, è possibile visualizzare l'ultima elaborazione e la corrispondente immagine attraverso la GUI, ovvero la piattaforma che raccoglie i risultati delle

misure effettuate, la quale è composta a sinistra dall'“Elaboration Form” e dalla sezione dove si può visualizzare l'immagine ottenuta e nella parte destra dalla barra di ricerca e dal totale dei risultati ottenuti.

La GUI permette inoltre di eliminare un'elaborazione, visualizzare la cartella contenente tutti i file Excel relativi alle elaborazioni e creare un file unico contenente tutti i risultati relativi ad un dato campione.

I dati ottenuti con l'analisi Metalab di ogni campione sono stati elaborati con un foglio di calcolo Excel composto da:

**1. Foglio Report:**

- Informazione identificative del campione utilizzato;
- I risultati dell'analisi quali medie, minimo, massimo, deviazione standard e coefficiente di variabilità relative a diametro, lunghezza, volume e massa;
- Il confronto tra i pellet analizzati e i requisiti della iso 17225-2;
- Stima dei parametri correlati quali volume totale, densità, bulk stimato, superficie specifica, densità energetica e densità energetica bulk;
- Elenco del numero dei pellet rilevati con relativo diametro, lunghezza e volume;
- Due grafici a linee che mostrano la distribuzione dei pellet in base a % numerica e % in massa, suddivisi in 9 classi che vanno da 3,15-5 mm, 5-10 mm, 10-15 mm, 15-20 mm, 20-25 mm, 25-30 mm, 30-35 mm, 35-40 mm, 40- 45 mm a > 45 mm (Figura 7);

**2. Foglio Calcolo:**

- Elenco dei pellet rilevati con le proprie caratteristiche dimensionali e volumetriche;
- Proprietà del campione analizzato;
- Algoritmo utilizzato;
- Frequenza dei pellet rilevati rappresentati da grafici a colonna;

**3. Foglio Input:**

- Tabella dati campione analizzato che verranno riportati nel foglio report;

**4. Foglio Riepilogativo DB\_lab:**

- Sintesi parametri principali del campione analizzato;

**5. Foglio ISO 17225-2**

- Valori specifica tecnica.

Per una maggiore rappresentatività, l'analisi Metalab e l'elaborazione dei dati ottenuti, sono state effettuate due ripetizioni per ogni campione, per un totale di 102 tabelle Excel. La tabella complessiva di tutte le elaborazioni verrà proposta nel capitolo successivo.

ID Campione: **F4819\_1006**  
 Data: 25/05/2021  
 Descrizione: HD Pellets length distribution middle with  
 Massa (g): 40,30  
 PCI (kJ/kg t.q.): 17254

No. Classi: 9  
 Range (mm): 3,15 to 45  
 Ampiezza (mm): 5,0  
 Out of range: 0

> Risultati dell'analisi

	D (mm)	L (mm)	V (mm <sup>3</sup> )	M (g)
Media	6,0	17,8	511,7	0,54
Minimo	5,5	9,5	260,9	0,28
Massimo	6,7	23,3	726,1	0,77
Dev. St.	0,2	3,2	107,9	0,11
Coeff. Var.	4,0	18,2	21,1	21,08

> Confronto con i requisiti della ISO 17225-2

	Req. ISO	No. pellets	w-%	Conformità
Pellet analizz.	(No. ≥50?)	74	100%	Sì
L < 10mm	-	1	0,9%	-
L > 40mm	(w-% ≤1)	0	-	Sì
L > 45mm	(No. = 0?)	0	-	Sì
D < 5mm	(No. = 0?)	0	-	Sì
D > 7mm	(No. = 0?)	0	-	Sì

> Stima dei parametri correlati

Densità Particelle	(ka/m <sup>3</sup> )	1324	(a/cm <sup>3</sup> )	1,324
Bulk Density	(ka/m <sup>3</sup> )	705	(kg/l)	0,705
Sup. Specifica	(m <sup>2</sup> /kg)	0,725	(cm <sup>2</sup> /kg)	7246,1
D.tà Ener. Partic.	(J/cm <sup>3</sup> )	22840	(Wh/cm <sup>3</sup> )	6,3
D.tà Ener. Bulk	(MJ/m <sup>3</sup> )	12167	(kWh/m <sup>3</sup> )	3380
Void Ratio	% Vol.	46,7	(V/a)	663

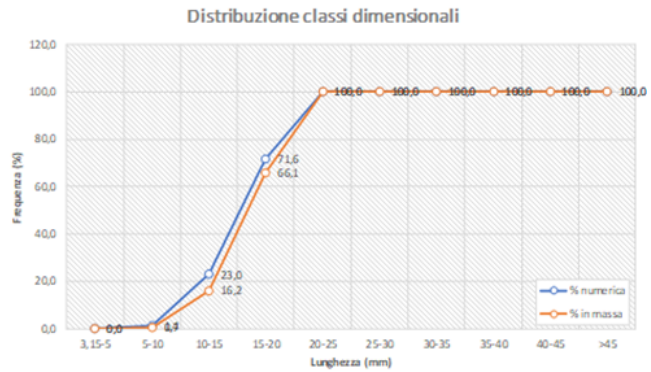
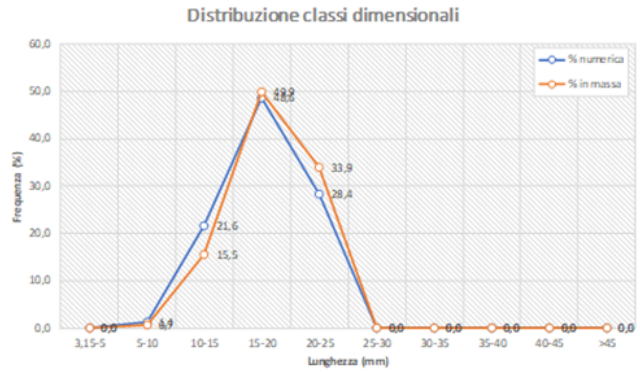
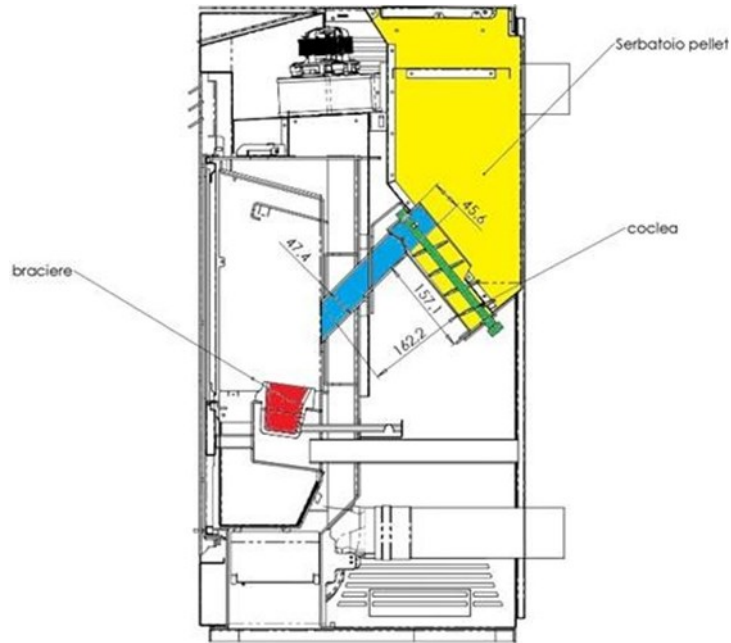


Figura 7: Foglio Excel analisi dimensionale ID 3

### 3.3 Misure di portata

Per portata massica (relativa alla massa) si intende la quantità di biocombustibile movimentato dalla coclea (vite senza fine), espressa in kg/h, che raggiunge il braciere della stufa nell'unità di tempo. Nella presente analisi, è stata calcolata mediante l'utilizzo di un serbatoio estratto da una stufa a pellet dotato di coclea a movimento continuo alimentata da motore elettrico (Figura 8), collegato ad una bilancia elettronica a piattaforma.



*Figura 8: Disegno tecnico stufa*

La strumentazione utilizzata presenta le seguenti caratteristiche:

#### **Bilancia a piattaforma “DINI ARGEO”:**

- Piatto: 40x40 cm;
- Modello: DFW06;
- Portata: Max 60 Kg Min 0,4 Kg;

#### **Scheda tecnica stufa serbatoio e coclea (Tabella 3-2):**

- Larghezza: 23 cm;
- Lunghezza: 61 cm;
- Profondità: 47 cm;

#### **Motore coclea Mellor Electrics:**

- Modello: FP1218;
- Alimentazione: 230v 50 Hz 3 rpm.



*Tabella 3-2: Misure elementi stufa espresse in mm*

	Lunghezza	Diametro
<b>Coclea</b>	157,1	65,2
<b>Cilindro coclea</b>	202,7	70,3
<b>Cilindro uscita braciere</b>	162,2	47,4

I test di portata hanno inizio nel momento in cui viene versato il campione all'interno del serbatoio, a motore della coclea acceso. La coclea gira in maniera continua non simulando i cicli di funzionamento caratteristici della stufa a pellet domestica. A mano a mano che la coclea gira trasporta i pellet all'interno di un contenitore posizionato sopra la bilancia elettronica (Figura 6), la quale misura ogni singola variazione di peso e registra i dati in un foglio di calcolo Excel. Data l'esigua quantità in kg dei singoli campioni, l'analisi si conclude una volta trasportato 1 kg di campione dalla coclea. Tra un'analisi e l'altra si procede con la pulizia dei residui presenti all'interno del serbatoio e al cilindro della coclea con dispositivo aspiratore. I test sono stati eseguiti con una singola ripetizione sui 51 campioni precedentemente utilizzati per le analisi dimensionali.

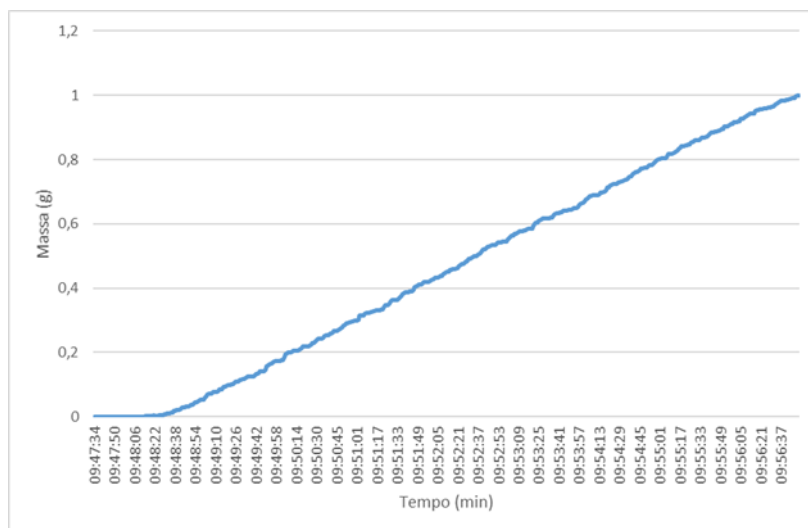


**Figura 9: (a) Strumentazione test di portata; (b) Dettaglio serbatoio stufa**

I dati registrati dalla bilancia sono stati inseriti all'interno di un foglio di calcolo Excel predisposto per calcolare le misure di portata. Il foglio di calcolo vengono riportati i seguenti dati:

- Orario della singola pesata;
- Peso netto;
- Peso lordo;
- Tara;
- Grafico rappresentativo massa su tempo (Figura 10).
- Portata relativa alla massa:  $Q[\text{kg/h}] = \frac{\Delta \text{massa} [\text{kg}]}{\Delta \text{tempo} [\text{h}]}$ .

Successivamente, si procede con il calcolo della portata termica cioè l'energia potenziale (contenuta nel pellet) introdotta nella camera di combustione. Si tratta di una portata termica sperimentale calcolata con la coclea a ciclo continuo, ovvero nella stufa ho portate diverse molto più basse, rispetto ad una stufa domestica con taratura della coclea programmabile.



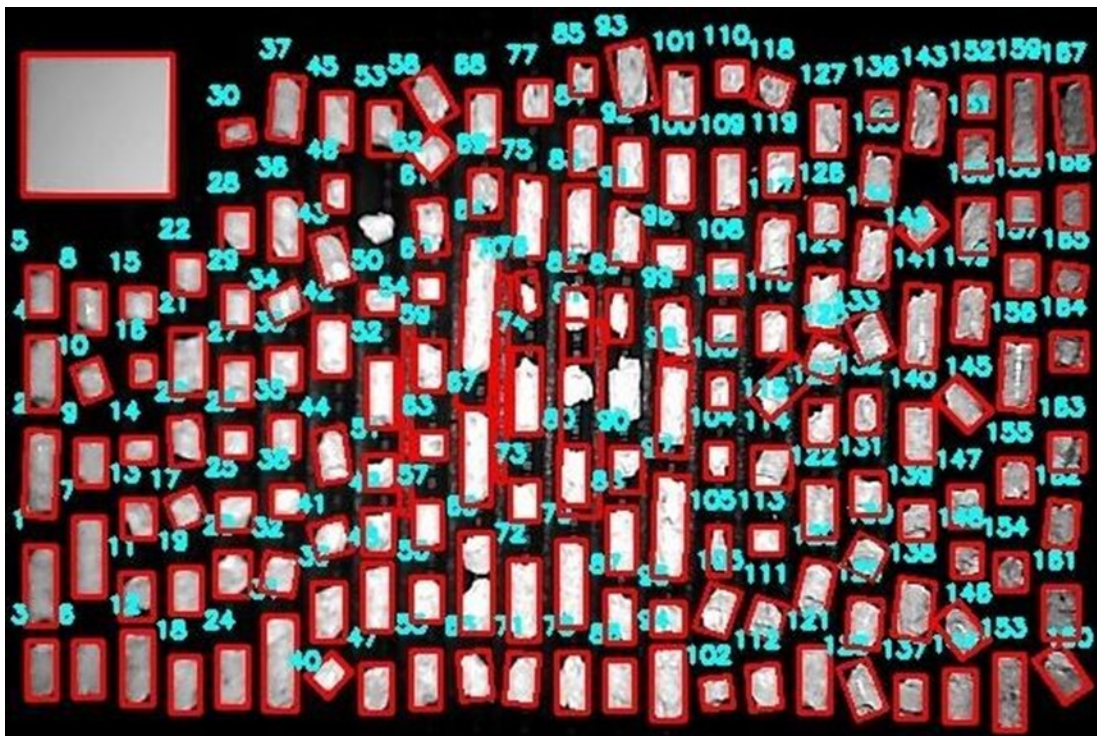
**Figura 10: Test portata campione ID 21**

## Capitolo 4 RISULTATI

Nelle pagine seguenti vengono riportati i risultati ottenuti dai test con il Metalab e le misure di portata nel sistema sperimentale di simulazione di alimentazione della stufa a pellet. I dati ottenuti sono da riferirsi a precise condizioni di laboratorio e a specifiche caratteristiche tecniche della strumentazione utilizzata. Tuttavia, le indicazioni generale emerse dal lavoro si ritengono applicabili a sistemi analoghi.

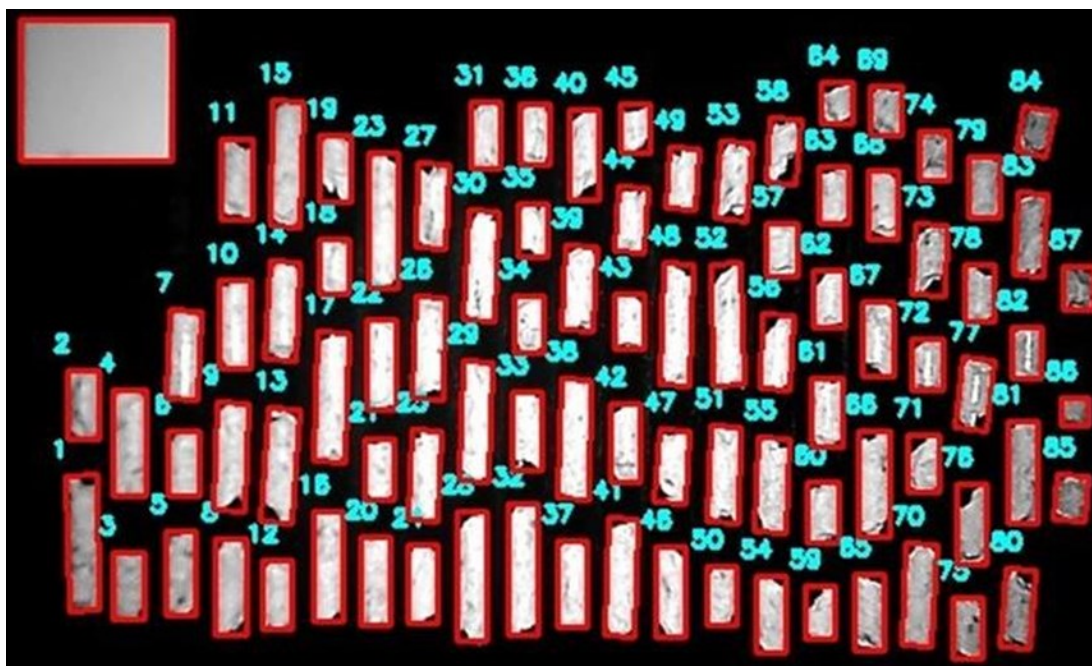
### 4.1 Risultati Metalab

Durante i test preliminari sono stati riscontrati alcuni problemi relativi alla lettura delle immagini da parte del sensore IR, dovuti ad una eccessiva riflettanza del piatto (MetaLabPlat) nella zona centrale, la quale ha portato all'errata lettura di alcuni pellet o ha evidenziato la presenza di pellet inesistenti (Figura 11).



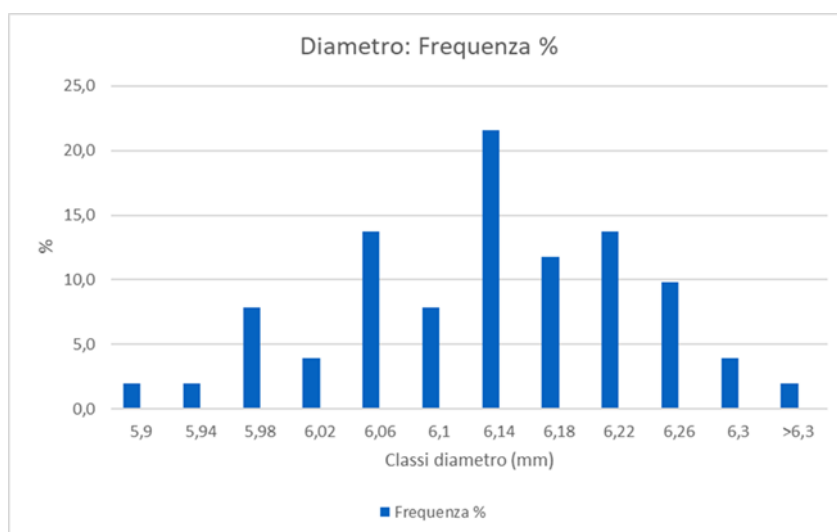
*Figura 11: Errata analisi campione ID 26*

Entrambe le tipologie di misure errate sono state scartate e la loro massa è stata sottratta dalla massa totale. Il problema è stato risolto ravvivando la vernice nera del piatto e utilizzando l'aria compressa, per la pulizia dei residui, tra un campione e l'altro. Con queste accortezze, è stato possibile procedere con la corretta misurazione dei pellet (Figura 12).



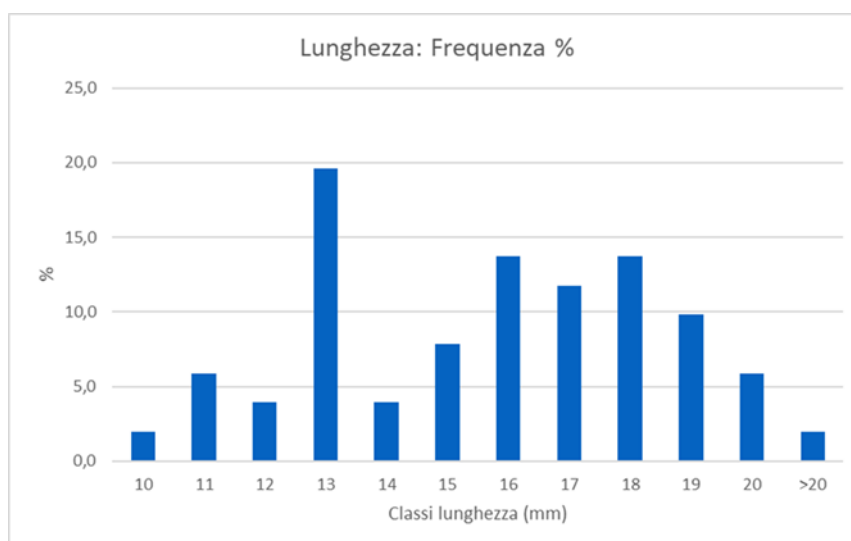
*Figura 12: Corretta analisi campione ID 47*

A seguito dell'elaborazione dei dati ottenuti con il software Metalab è stato possibile identificare le classi di diametro (Figura 13) e le classi di lunghezza (Figura 14) maggiormente rappresentative.



**Figura 13: Frequenza classi di diametro in %**

La frequenza in percentuale della classe di diametro maggiormente rappresentata è la classe tra 6,10 mm e 6,14 mm, poi c'è la classe tra 6,02 mm e 6,06 mm e infine tra 6,18 mm e 6,22 mm.



**Figura 14: Frequenza classi di lunghezza in %**

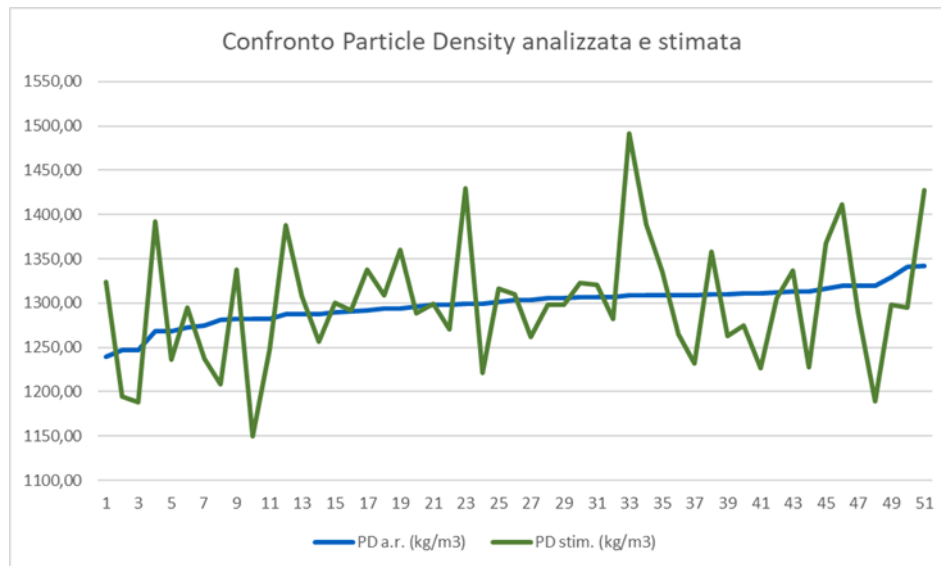
Per quanto riguarda la frequenza in percentuale della classe di lunghezza maggiormente rappresentata è la classe tra 12 mm e 13 mm, poi c'è la classe tra 15 mm e 16 mm e tra 17 mm e 18 mm.

Nella tabella 4-1 viene indicata la distribuzione delle lunghezze in classi di lunghezza espresse in percentuale massa. Le classi più diffuse sono comprese tra 10-15 mm, 15-20 mm, 20-25 mm.

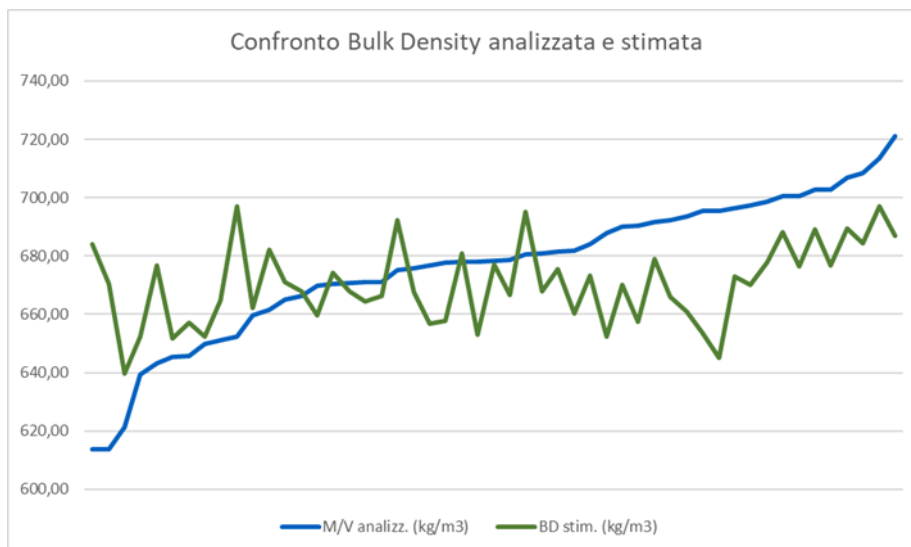
**Tabella 4-1: Distribuzione delle lunghezze in classi di lunghezza espresse in % massa**

		% MASS																					
ID	3,15-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	>45	ID	3,15-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	>45		
1	0,98	14,55	19,64	34,17	24,23	6,43					27	0,19	22,81	44,88	25,03	5,07	2,02						
2	4,75	25,64	30,06	32,35	7,21						28	0,19	19,39	47,25	26,97	6,19							
3	0,65	20,16	50,98	26,98		1,23					29		22,03	53,32	18,65	6,00							
4		17,45	55,71	24,73	2,10						30		13,11	36,37	30,45	16,45	3,62						
5		7,95	27,82	20,30	34,96	8,98					31		15,18	43,47	26,95	11,14	1,86		1,39				
6	0,21	6,70	17,46	32,60	30,22	12,81					32		25,85	48,40	18,88	5,83	1,04						
7		3,33	22,23	30,94	31,91	11,59					33	1,82	72,08	24,28	0,54				1,28				
8		1,73	14,77	22,75	52,33	8,42					34		33,98	51,17	14,04	0,81							
9		4,14	17,93	22,37	43,32	12,24					35		8,39	33,07	27,31	17,59	13,64						
10	0,56	19,94	40,34	28,34	7,98	2,84					36		7,32	34,78	32,27	14,41	5,68	3,71				1,82	
11	1,41	35,41	38,51	21,38	3,30						37		1,00	16,81	27,08	38,52	15,54	1,04					
12		2,52	6,88	26,72	57,19	6,69					38		8,20	33,77	23,45	26,59	7,99						
13	0,24	19,60	44,80	20,97	14,39						39	0,18	22,77	43,24	25,70	4,28	2,75	1,10					
14		4,89	11,82	29,99	42,99	9,04	1,27				40	0,21	19,60	42,07	27,91	9,29	0,92						
15		10,90	17,48	29,44	27,25	14,94					41		11,59	40,09	26,76	17,24	4,32						
16	0,36	5,85	8,21	20,56	33,93	28,79	2,31				42	0,49	22,57	32,54	22,53	17,86	4,01						
17		5,32	18,72	24,65	30,41	20,90					43	0,18	9,49	26,73	30,98	20,85	5,28	6,50					
18		2,15	6,10	25,04	37,28	29,43					44		7,04	34,16	40,76	13,45	1,84	1,47	1,28				
19	0,23	8,29	22,41	21,20	29,25	17,47	1,15				45		22,15	46,53	19,11	8,40	1,69	2,12					
20	0,20	7,28	23,15	30,01	21,80	17,55					46		11,12	36,18	33,10	12,51	7,11						
21	0,16	11,82	33,48	38,76	14,72	1,07					47		5,60	24,08	33,46	23,96	12,91						
22		3,78	16,25	17,24	35,95	25,28	1,50				48		7,86	23,27	36,13	18,24	7,89	6,62					
23	0,39	7,62	9,92	18,36	33,24	30,47					49		8,69	24,52	27,81	24,41	13,25	1,31					
25		17,83	45,55	29,10	7,52						50		2,09	23,97	28,92	36,69	6,89	1,46					
26	0,26	44,56	38,90	10,62	3,37		1,15	1,14			52		3,52	12,56	22,56	52,79	8,57						
											53		8,55	31,12	28,07	30,29	1,96						

I dati ottenuti a seguito delle elaborazioni sono stati confrontati con quelli forniti dall'Ente di ricerca europeo, in particolare sono stati messi a confronto la densità delle particelle (PD (kg/m<sup>3</sup>)) (Figura 15) e la massa volumica (MV (kg/m<sup>3</sup>)) (Figura 16).



**Figura 15: Confronto densità delle particelle analizzata e stimata**



**Figura 16: Confronto massa volumica analizzata e stimata**

Nella tabella 4-2 sono riportati i valori analizzati e stimati relativi alla densità delle particelle e la differenza tra questi dati. Si nota che le media dello scarto si attesta a -1,1 (kg/m<sup>3</sup>). Nonostante, si evidenzia una discreta variabilità tra i due valori si delinea una certa tendenza.

**Tabella 4-2: Confronto densità delle particelle analizzata e stimata**

ID	PD a.r.	PD stim.	Scarto	ID	PD a.r.	PD stim.	Scarto
34	1239,00	1323,79	-84,79	49	1304,00	1261,55	42,45
39	1247,00	1195,01	51,99	40	1306,00	1298,58	7,42
13	1247,00	1187,83	59,17	37	1306,00	1298,56	7,44
52	1268,00	1392,64	-124,64	42	1307,00	1322,31	-15,31
18	1268,06	1236,20	31,86	21	1307,00	1320,26	-13,26
43	1273,00	1294,80	-21,80	47	1307,00	1282,23	24,77
14	1274,95	1237,80	37,15	33	1309,00	1491,52	-182,52
29	1281,00	1207,93	73,07	46	1309,00	1389,01	-80,01
26	1282,00	1337,91	-55,91	44	1309,00	1335,95	-26,95
25	1282,00	1149,18	132,82	2	1309,00	1265,24	43,76
16	1282,58	1248,08	34,50	50	1309,00	1231,48	77,52
11	1287,00	1387,46	-100,46	5	1310,00	1358,02	-48,02
30	1288,00	1308,07	-20,07	8	1310,00	1262,90	47,10
48	1288,00	1256,34	31,66	31	1311,00	1274,41	36,59
28	1290,00	1300,12	-10,12	1	1311,00	1226,96	84,04
17	1290,99	1291,94	-0,95	7	1312,00	1305,12	6,88
15	1291,74	1337,71	-45,98	45	1313,00	1336,30	-23,30
20	1293,71	1308,92	-15,20	35	1313,00	1227,15	85,85
32	1294,00	1360,47	-66,47	4	1316,00	1367,97	-51,97
19	1296,42	1288,83	7,59	3	1319,00	1411,80	-92,80
41	1298,00	1298,73	-0,73	9	1319,00	1289,82	29,18
38	1298,00	1270,63	27,37	12	1319,00	1189,70	129,30
23	1299,00	1429,49	-130,49	27	1329,00	1298,31	30,69
22	1299,00	1221,10	77,90	53	1341,00	1295,13	45,87
10	1301,00	1315,82	-14,82	6	1342,00	1427,74	-85,74
36	1304,00	1310,09	-6,09				<b>-1,1</b>

Allo stesso modo, per la massa volumica abbiamo un errore intorno al 20% che nelle classi più rappresentate si compensa. Nella tabella 4-3 sono riportati i valori analizzati e stimati relativi alla massa volumica e la differenza tra loro. Si nota che le media dello scarto si attesta a 6,2.

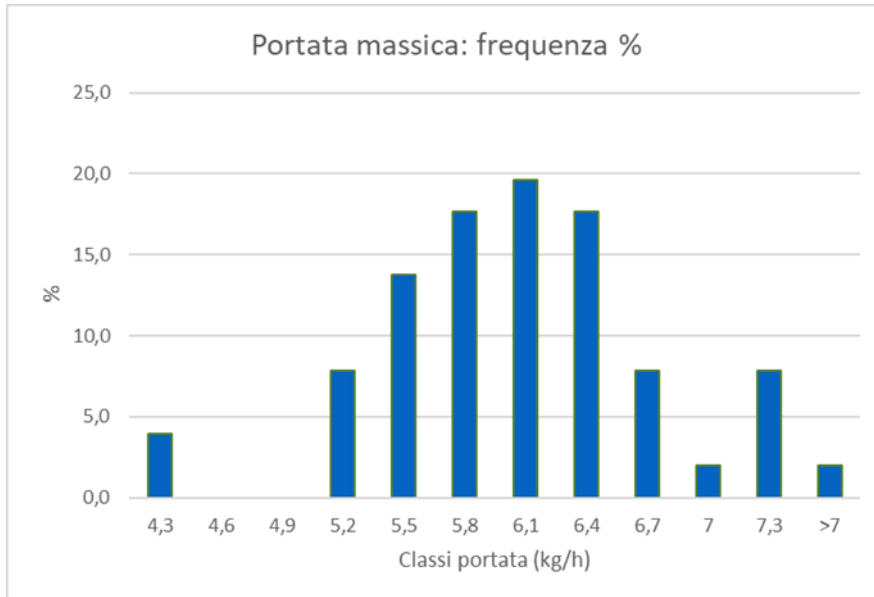
**Tabella 4-3: Confronto massa volumica analizzata e stimata**

ID	M/V analizz.	BD stim.	Scarto	ID	M/V	BD stim.	Scarto
34	613,67	684,20	-3,84	35	678,53	666,61	1,32
29	613,78	670,51	13,56	8	680,48	695,10	-56,73
26	621,34	639,56	17,36	40	680,84	667,86	-5,87
48	639,37	652,25	16,53	47	681,51	675,59	21,45
18	643,13	676,70	33,00	31	681,80	660,34	-20,63
39	645,55	651,72	34,13	23	684,01	673,26	-44,84
16	645,87	657,23	12,63	22	687,81	652,51	-70,53
13	650,00	652,52	-14,62	53	690,00	670,09	11,92
17	650,99	664,78	24,32	5	690,50	657,50	25,22
33	652,29	697,13	-2,47	7	691,72	679,09	-2,89
10	659,66	662,13	2,96	49	692,19	665,85	6,45
32	661,45	682,08	12,39	46	693,63	660,92	-6,18
30	665,09	670,96	-2,52	43	695,37	653,74	12,98
14	666,28	668,02	-1,74	42	695,54	645,24	8,27
15	669,73	659,66	10,06	27	696,38	672,95	50,30
1	670,49	674,32	-11,36	21	697,20	670,06	41,63
11	670,89	667,92	-13,79	25	698,53	677,78	24,20
38	670,99	664,53	-33,57	12	700,51	688,13	19,74
20	671,05	666,43	19,97	44	700,53	676,34	32,72
52	675,30	692,30	4,62	2	702,71	689,15	5,91
41	675,84	667,57	27,14	50	702,71	676,65	-12,89
45	676,65	656,91	35,30	3	706,95	689,59	26,34
19	677,75	657,78	10,75	9	708,55	684,23	26,06
37	678,09	680,98	20,75	4	713,53	697,00	-17,00
36	678,09	652,87	-18,22	6	721,09	686,97	19,91
28	678,43	677,11	23,43				<b>6,2</b>



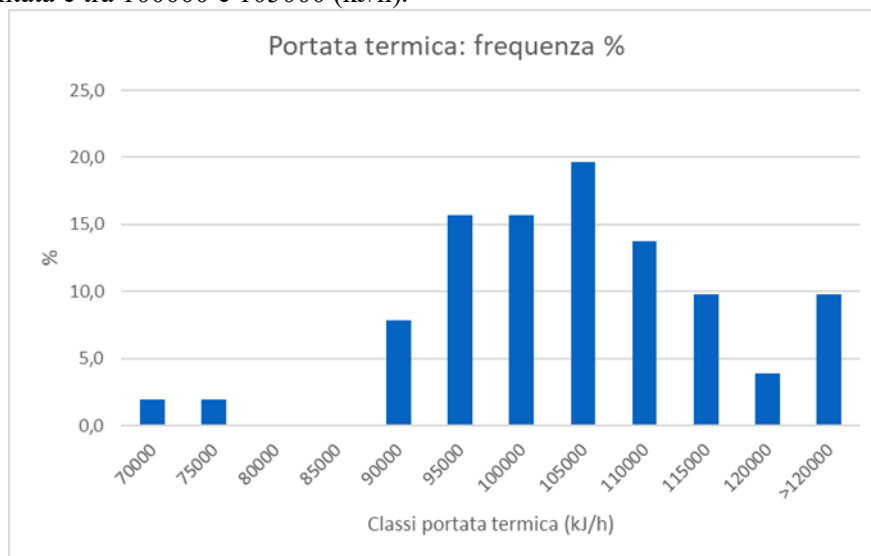
## 4.2 Risultati misure di portata

Le misure di portata sono state svolte in condizioni sperimentali a coclea continua per velocizzare le analisi. Nella Figura 14 viene riportata la frequenza in percentuale delle classi di portata massica (kg/h) maggiormente rappresentate. La classe più rappresentata è la classe tra 5,8 e 6,1 (kg/h) poi c'è la classe tra 5,5 e 5,8 (kg/h) e infine la classe tra 6,1 e 6,4 (kg/h).



**Figura 17: Portata massica: frequenza in %**

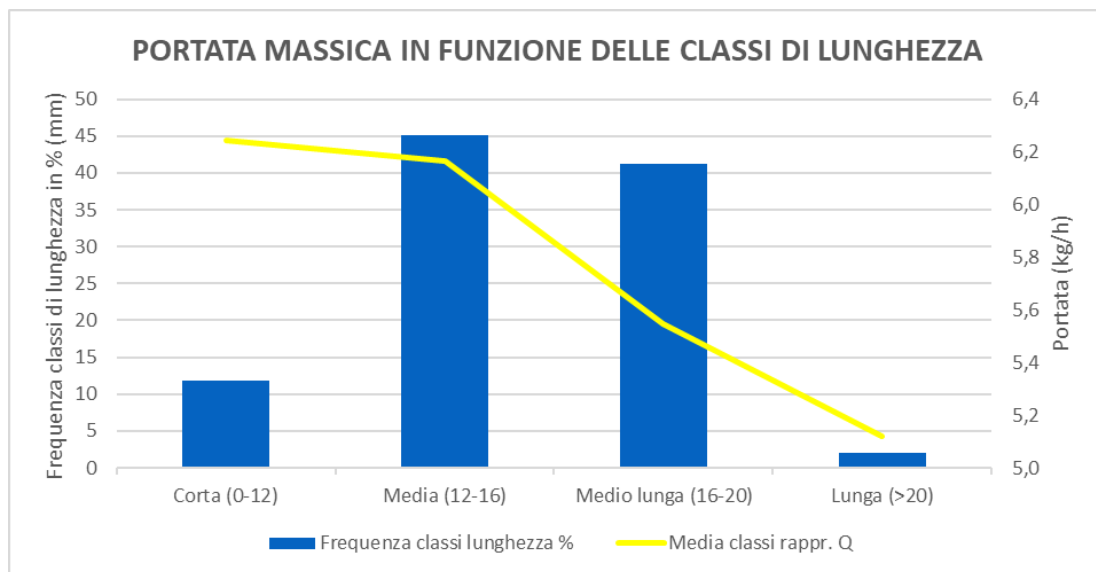
Successivamente, attraverso il PCI di ogni campione e la relativa portata massica è stata calcolata la portata termica. Nella Figura 15 viene riportata la frequenza in percentuale delle classi di portata termica (kJ/h) maggiormente rappresentate. Si evidenzia che la classe più rappresentata è tra 100000 e 105000 (kJ/h).



**Figura 18: Frequenza classi portata termica in %**

### 4.3 Diagrammi di sintesi

Mettendo in relazione portata massica e frequenza delle classi di lunghezza espresse in percentuale è possibile osservare che nella classe media (12-16 mm) composta dal 45,10 percento dei campioni la portata, raffigurata con la linea gialla, si attesta a 6,17 (kg/h); mentre nella classe medio lunga (16-20 mm) composta dal 41,18 percento dei campioni, la portata si attesta a 5,55 (kg/h) con una diminuzione dello 0,62 (kg/h) dalla precedente classe. Infine, tra la classe corta (0-12 mm) e la classe lunga (>20 mm) la portata da 6,24 (kg/h) è scesa a 5,12 (kg/h) con una diminuzione dello 1,12 (kg/h) (Figura 19).



**Figura 19: Portata massica in funzione delle classi di lunghezza**

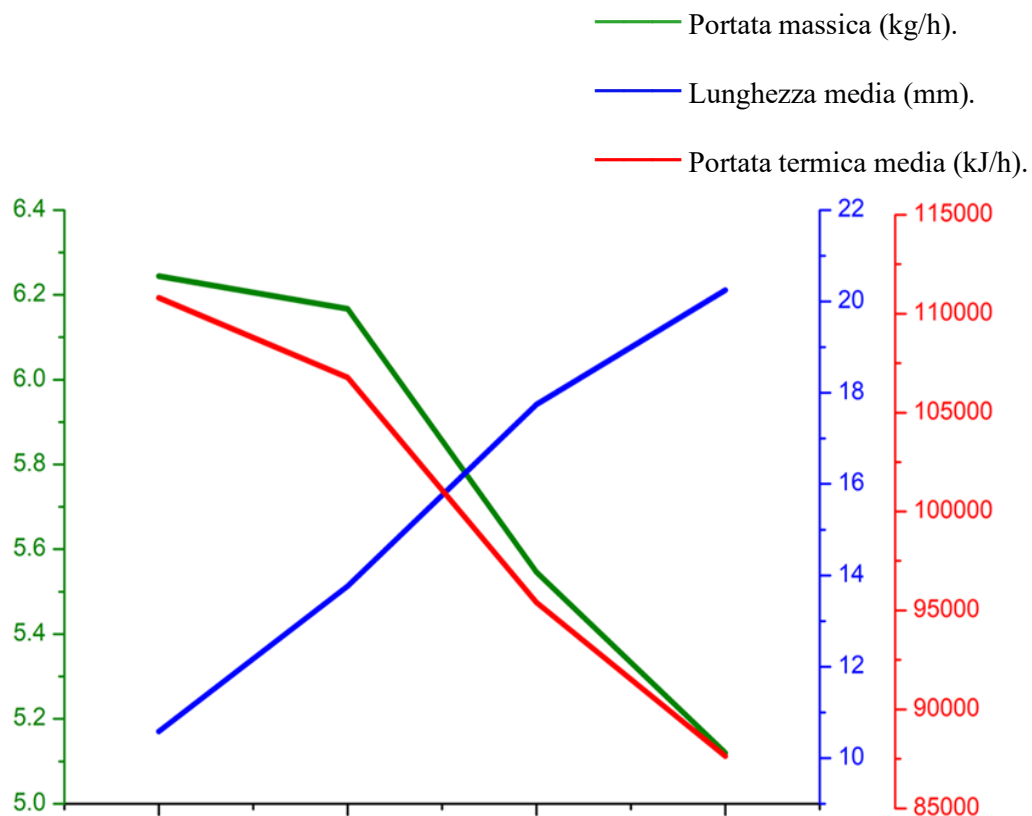
In Figura 20, si riporta un diagramma più esaustivo che mette in relazione le caratteristiche dimensionali del pellet con le portate termiche e massiche. In definitiva si evidenzia che prendendo in considerazione l'ipotesi di produrre un pellet utilizzando la stessa materia prima così da ottenere un prodotto con un PCI uniforme, a seconda delle lunghezze che lo caratterizzano otterremmo delle portate massiche e delle portate termiche differenti.

Nella presente analisi, i campioni di pellet presi in esame presentano i seguenti valori:

- Classe corta (0-12 mm): portata massica media 6,24 (kg/h), PCI medio di 17737,4 (kJ/kg), portata termica media 110801,2 (kJ/h);
- Classe media (12-16 mm): portata massica media 6,17 (kg/h), PCI medio 17315,1 (kJ/kg), portata termica media 106778,76 (kJ/h);

- Classe medio lunga (16-20 mm): portata massica media 5,55 (kg/h), PCI medio 17218,4 (kJ/kg), portata termica media 95406,33 (kJ/h);
- Classe lunga (>20 mm): portata massica media 5,12 (kg/h), PCI medio 17117,1(kJ/kg), portata termica media 87639,01 (kJ/h).

Tenendo in considerazione i seguenti campioni si nota che all'aumentare della classe dimensionale portata massica e PCI diminuiscono e di conseguenza anche la portata termica. In sintesi, qualora producessimo un pellet ottenuto dalla medesima materia prima con classi di lunghezza differenti ma con PCI analogo, otterremmo un comportamento affine a quanto sopra evidenziato.



*Figura 20: Lunghezza media in funzione della portata massica e termica*

## CONCLUSIONI

Dalle analisi e dall'elaborazione dei dati, si può affermare che a seguito dell'analisi geometrico dimensionali del pellet, le classi di lunghezza maggiormente rappresentate sono comprese tra i 12-13 mm, tra i 15-16 mm e infine tra i 17-18 mm. I valori stimati, ottenuti attraverso il Metalab, ad eccezione di alcuni valori anomali, risultano in linea con i valori analizzati a norma dall'Ente di europeo di ricerca. Il software Metalab, sistema prototipale di misura delle dimensioni dei pellet, sembrerebbe essere una alternativa interessante alle misure tradizionali secondo normativa per la determinazione della lunghezza del pellet. Attualmente, la norma non è adatta per la misurazione di grandi quantità di pellet, a causa della necessità di misurare ogni singolo pellet con il calibro. Questo ostacolo potrebbe essere superato con metodi di misura basati dunque sul riconoscimento di immagini.

Le misure di portata evidenziano che all'aumentare delle classi di lunghezza la portata massica e la portata termica diminuiscono. In particolare, con una diminuzione di 1,12 (kg/h) per la portata massica media tra classe dimensionale corta e classe dimensionale lunga. Mentre per portata termica media si nota una diminuzione di 23162,1 (kJ/h) tra classe dimensionale corta e classe dimensionale lunga.

Inoltre, come evidenziato da Wohler et al. (2017), la variazione della lunghezza del pellet verso pellet più lunghi porta ad un ridotto trasporto di combustibile nella camera di combustione che di conseguenza riduce la potenza termica della stufa. Gli effetti potrebbero anche portare ad un aumento significativo delle emissioni gassose e di particolato che indicano un rapporto emissioni e potenza termica non ottimale. I risultati ottenuti in questa tesi sono applicabili al modello di apparecchio termico considerato. Al netto di queste considerazioni, il presente elaborato mette le basi per studi futuri sull'influenza della lunghezza del pellet, aprendo nuove prospettive nel campo della determinazione della qualità del pellet. Infine, sarebbe importante verificare in futuro come gli aspetti geometrici dimensionali del pellet influenza l'efficienza della combustione e la qualità delle emissioni.

## BIBLIOGRAFIA

- Arshadi M., Gref R., Geladi P., Dahlqvist S. e Lestander T. 2008. The influence of raw material characteristics on the industrial pelletizing process and pellet quality. *Fuel Processing Technology* 89 (12): 1442-1447.
- ARSIA, Agenzia Regionale per lo Sviluppo e l'Innovazione del settore Agricolo forestale, 2009. Impianti termici a legno, cippato e pellet.
- Avagianos I., Calderón C., Gauthier G., Vaskyte B. 2020. *Bioenergy Europe Statistical Report - Report Pellets*. 37-83.
- Bafver L.S., B. Leckner, C. Tullin, M. Berntsen, Particle emissions from pellets stoves and modern and old-type wood stoves, *Biomass Bioenergy* 35 (8) (2011) 3648-3655.
- Boman C., E. Pettersson, R. Westerholm, D. Bostrom, A. Nordin, Stove performance and emission characteristics in residential wood Log and pellet combustion, Part 1: pellet stoves, *Energy Fuels* 25 (1) (2011) 307-314.
- Byoung J. et al., 2013, Effect of binders on the durability of wood pellets fabricated from *Larix kaemferi* C. and *Liriodendron tulipifera* L. sawdust, *Renewable Energy*, 62 (2014), 18-23.
- Byoung J. et al., 2013, Effect of binders on the durability of wood pellets fabricated from *Larix kaemferi* C. and *Liriodendron tulipifera* L. sawdust. *Renewable Energy*, 62 (2014), 18-23.
- ENEMA, Ente nazionale per la meccanizzazione agricola, 2008. Caratteristiche tecniche delle biomasse e dei combustibili, *Biomasse ed energia*.
- Francescato et al., 2014. *Biocombustibili Agroforestali*. Padova: AIEL – Associazione italiana Energie Agroforestali.
- Gilvari, H.; Cutz, L.; Tiringier, U.; Mol, A.; de Jong, W.; Schott, D.L. The Effect of Environmental Conditions on the Degradation Behavior of Biomass Pellets. *Polymers* 2020, 12, 970.
- H.Gilvari, W. De Jong and Dingena, L.Schott, The Effect of Biomass Pellet Length, Test Conditions and Torrefaction on Mechanical Durability Characteristics According to ISO Standard 17831-1, *Energies* (2020), 13, 3000. 1-16.
- Hansen M., Jain A. 2002. *Manuale italiano per la combustione di pellet da legno*. Firenze. ETA – Florence Renewable Energies.

- ISO 16559. Solid Biofuels- Terminology, Definitions and Descriptions; ISO: Geneva, Switzerland, 2014
- Kaliyan N., Vance Morey R. 2008. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass & Bioenergy*. 33 (2009) 337-359.
- Kaliyan,N., Morey, R.V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass Bioenergy* 2009, 33, 337–359.
- Kjallstrand J., M. Olsson, Chimney emissions from small-scale burning of pellets and fuel wood examples referring to different combustion appliances, *Biomass Bioenergy* 27 (6) (2004) 557-561.
- Lam PY, Lama PS, Sokhansanja S, Bia XT, Lima CJ, Melina S(2013). “Effects of pelletization conditions on breaking strength and dimensional stability of Douglas fir pellet”. *Fuel* 117 (2014) 1085-1092.
- Mobini M. et al., 2013. A simulation model for the design and analysis of wood pellet supply chains. *Applied Energy* 111 (2013) 1239-1249.
- Samuelsson R., Larsson S. H., Thyrel M. e Lestander T. A. 2012. Moisture content and storage time influence the binding mechanisms in biofuel wood pellets. *Applied Energy* 99(0): 109-115.
- Schmidl C., M. Luisser, E. Padouvas, L. Lasselsberger, M. Rzaca, C. Ramirez- Santa Cruz, M. Handler, G. Peng, H. Bauer, H. Puxbaum, Particulate and gaseous emissions from manually and automatically fired small scale combustion systems, *Atmos. Environ.* 45 (39) (2011) 7443-7454.
- Stelte W. et al. 2010. A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources. *Biomass & Bioenergy*. 35 (2011) 910-918.
- Thomas, M. Physical Quality of Pelleted Feed: A FeedModel Study; Thomas: Wageningen, The Netherlands, 1998.
- Wohler M., D.Jaeger, G.Reichert, C.Schmidl, S K.Pelz; Influence of pellet length on performance of pellet room heaters under real life operation conditions. *Renewable Energy* 105 (2017) 66-75.