UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
Dip. Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Corso di laurea in Tecnologie Forestali e Ambientali

Analisi della qualità di pellet prodotti da legname delle utilizzazioni forestali

Relatore:
Prof. Raffaele Cavalli
Correlatore:
Dott. Andrea Sgarbossa

Laureanda:
Silvia Santi
Matricola n.
1005256

ANNO ACCADEMICO 2012-2013

Indice

1 Riassunto 5
2 Abstract 7
3 Introduzione 9
3.1 I vantaggi del pellet di legno 9
3.2 La produzione dei pellet 15
3.3 La classificazione e i requisiti qualitativi dei pellet 17
3.4 Situazione attuale del mercato italiano 23
4 Obiettivi 25
5 Materiali e metodi 27
5.1 Raccolta e stoccaggio dei campioni sperimentali 27
5.2 Analisi sul cippato 31
5.3 Produzione del pellet 39
5.4 Analisi sul pellet 43
5.5 Analisi su miscele di legni 47
6 Risultati e discussione 49
6.1 Risultati e discussione delle analisi sul cippato 49
6.2 Risultati e discussione delle analisi sul pellet 55
6.3 Risultati e discussione delle analisi sui materiali per miscele di legni 61
7 Conclusioni 65
8 Bibliografia 67

1 Riassunto

A fronte della necessità di trovare una nuova fonte di rifornimento di materie prime per la produzione italiana di pellet si è effettuato uno studio mirato alla determinazione della qualità di pellet prodotto da assortimenti e residui forestali di differente qualità ottenuti da abete rosso e faggio. I legni e le miscele impiegate sono per quanto riguarda l'abete rosso il tronco scortecciato, il tronco con la corteccia, l'albero intero; per il faggio il fusto con la corteccia e la ramaglia. Le analisi di qualità sono state condotte rispettando la normativa europea in materia di biocombustibili solidi. Si sono svolte prima sul cippato ricavato dalle materie prime sopracitate e poi sul pellet prodotto sperimentalmente con gli stessi campioni. Infine sono stati analizzati ceneri e potere calorifico di altre materie prime potenzialmente utilizzabili per la produzione di miscele per pellet, tra le quali aghi di abete rosso, corteccia di faggio e abete rosso, legno e corteccia di larice.

La produzione di pellet dagli assortimenti selezionati si è rivelata fattibile, con una generale qualità buona, migliorabile tramite l'impiego di additivi nel pellet di abete rosso scortecciato per l'aumento della durabilità meccanica e la scortecciatura parziale o la miscelazione per la diminuzione delle ceneri nel pellet di fusto intero e albero intero di abete e in quello di faggio.

2 Abstract

To fulfill the need to find new raw material sources for the Italian pellet production chain a quality assessment of pellet produced by round wood and forest residues of Norway spruce and Beech has been set up. To do this different woods and wood blends have been used. These are the debarked stem, the whole stem and the whole tree of Norway spruce and the whole stem and branches of Beech. Analyses have been performed following the European Standards for solid biofuels. Firstly the chipped raw material has been analyzed, then the pellet experimentally produced from the same samples. Finally the ash content and the calorific value of other raw material possibly usable for the creation of wood mixtures, such as the needles and the bark of Spruce and the wood and bark of Larch, have been studied.

The production of wood pellets with the selected raw materials resulted to be possible with an overall good quality of the product. The quality can be improved by using addictives in the debarked Spruce pellets to enhance their mechanical durability and by partially debarking the stems or blending the wood to reduce the ash content in whole stem and whole tree of Spruce pellets and in Beech pellets.

3 Introduzione

3.1 I vantaggi del pellet di legno

Con l'aumento del prezzo dei combustibili fossili negli ultimi decenni, e con la sensibilizzazione verso l'impiego di fonti energetiche rinnovabili e sostenibili, l'interesse verso i biocombustibili è andato incontro ad una rinnovata crescita.

Secondo il D. Lgs 152/2006 (Parte V, Allegato X, parte II, sez. 4, n. 1) rientrano nella definizione di biomassa combustibile i seguenti materiali (ITABIA, 2013):

a) Materiale vegetale prodotto da coltivazioni dedicate;

b) Materiale vegetale prodotto da trattamento esclusivamente meccanico di coltivazioni agricole non dedicate;

c) Materiale vegetale prodotto da interventi selvicolturali, da manutenzione forestale e da potatura;

d) Materiale vegetale prodotto dalla lavorazione esclusivamente meccanica di legno vergine e costituito da cortecce, segatura, trucioli, chips, refili e tondelli di legno vergine, granulati e cascami di legno vergine, granulati e cascami di sughero vergine, tondelli, non contaminati da inquinanti;

e) Materiale vegetale prodotto dalla lavorazione esclusivamente meccanica di prodotti agricoli.

I biocombustibili derivano dalla trasformazione delle biomasse. Si tratta di prodotti che è necessario assoggettare a specifiche normative tecniche e certificazioni nazionali, comunitarie ed internazionali (UNI, CEN, ISO) per garantirne la qualità.

Tra i vari biocombustibili esistenti il ruolo preminente è svolto dalla trasformazione meccanica delle biomasse legnose in biocombustibili solidi per la produzione di energia sottoforma di calore.

Il legno può essere impiegato come combustibile in diverse forme, variabili anche a seconda dell'uso – industriale o domestico – che se ne intende fare. Una pianta abbattuta si può quindi ridurre in ciocchi di diversa pezzatura e i suoi rami possono essere tagliati in semplici toppi di legna da ardere.

E' possibile chiedersi perché l'attenzione si stia progressivamente spostando su altre forme di combustibile legnoso, quali cippato e pellet, le cui produzioni sono possibili grazie all'impiego di macchine e tecnologie recenti, quando appare molto più immediato e poco dispendioso utilizzare il legno vergine come tradizionale di legna da ardere, senza o con pochi passaggi intermedi dalla foresta alle stufe.

Il cippato si ottiene sminuzzando il legno mediante una apposita macchina cippatrice in frammenti di ridotte dimensioni, di forma più o meno uniforme.
Mediante una ulteriore lavorazione, che comprende la macinazione fine e la compattazione, si ottiene un prodotto differente, il pellet di legno, dotato di elevate proprietà meccaniche ed energetiche. La forma standard di un pellet combustibile è cilindrica, con un diametro in genere di 6 mm e una lunghezza inferiore ai 40 mm. Occasionalmente vengono prodotti pellet di dimensioni maggiori; se superano i 25 mm di diametro sono chiamati briquettes.
Il primo aspetto da considerare nella valutazione della convenienza dell'uso di pellet è che non risulta sempre che la legna da ardere sia economicamente più vantaggiosa. Poiché nell'intero processo sono richiesti le gestione manuale e l'intervento di manodopera qualificata, i risultati sono bassi livelli di produttività (Lindroos, 2008) e un'alta esposizione dei lavoratori a rischi di infortunio (Lindroos *et al*., 2008; Lindqvist and Nilsson, 2011). Questi parametri possono rendere i costi di produzione di legna da ardere piuttosto elevati e talvolta perfino più elevati in confronto ad altre forme di biomassa combustibile.
Inoltre la semplice legna spaccata presenta alcuni svantaggi non irrilevanti concernenti il trasporto, il commercio e l'utilizzo della stessa. Di seguito si propone una descrizione delle principali problematiche collegate all'impiego della legna da ardere, alle quali si è cercato di dare una soluzione mediante l'introduzione del cippato e soprattutto del pellet.

Massa volumica apparente

Uno degli aspetti svantaggiosi della legna da ardere è il ridotto valore massa volumica sterica o apparente, o densità sterica. Questo parametro è impiegato per misurare la massa di combustibili legnosi riversati, compresi gli spazi vuoti occupati dall'aria presenti tra un elemento e l'altro del cumulo. Si esprime in in $kg/m^3_{accatastato}$ o kg/m^3_{stero}.
La dimensione dei vuoti e il loro volume complessivo dipendono dalla forma e dalla pezzatura delle particelle che formano il cumulo o la catasta; i fattori di conversione per determinare l'equivalente di 1 m3 di tondo di legno in legna spaccata o tronchetti variano da 1.2 a 2 e sono riportati in Tabella 3.1.
E' preferibile avere un'alta densità sterica, che a parità di volume consente di avere una maggiore quantità di effettivo prodotto legnoso: quindi 1 m3 di legna da ardere ammucchiata ha un valore di massa inferiore, e contiene quindi più spazi vuoti e meno materiale combustibile, di 1 m^3 di pellet (Tabella 3.2).
Mentre il cippato presenta massa volumica sterica ancora minore di quella dei ciocchi di legna da ardere, il pellet ha al contrario un valore di massa volumica apparente molto più elevati, grazie alla forma altamente regolare che consente di avere meno spazi vuoti tra un elemento e l'altro e al fatto di essere costituito da legno pressato e quindi più denso.

Contenuto energetico

Il potere calorifico inferiore di un combustibile esprime la quantità di energia rilasciata durante la completa combustione di un'unità di peso del combustibile, posto che l'acqua liberata durante la combustione rimanga allo stato di vapore.

Si differenzia dal potere calorifico superiore, la cui definizione è la medesima posto però che l'acqua, contenuta del legno e formatasi dall'idrogeno presente nel legno, durante il processo di combustione ritorni allo stato liquido; questo secondo valore è superiore rispetto al primo, perché non viene sottratta l'energia necessaria all'evaporazione dell'acqua liberata.

Il potere calorifico del legno è principalmente definito dalla sua composizione chimica ed è influenzato dal contenuto in ceneri e dal contenuto di acqua nelle sue cellule e all'interno delle pareti cellulari. L'aumento di questi due fattori riduce il contenuto energetico del combustibile.

Il potere calorifico di differenti specie legnose allo stato anidro (con materiale seccato in stufa a 105 °C) varia in un intervallo molto ristretto, dai 18 ai 19 MJ/kg. Nelle conifere questo valore è leggermente più elevato a causa di un maggiore contenuto di lignina, cere, resine e oli. Si tratta comunque di un valore molto basso se confrontato con quello dei combustibili fossili (ad esempio, 1 kg di diesel produce 43 MJ di energia).

La densità energetica è il prodotto del valore del potere calorifico e per la massa volumica apparente. Maggiore è il valore di densità energetica di un combustibile legnoso, più energia sarà possibile trasportare con lo stesso carico su base volumetrica. Il cippato non è particolarmente conveniente in questo senso: la densità di ogni frammento di legno è la medesima del tronco dal quale è stata tratta, perciò l'energia per unità di volume è pari a quella del legno vergine; inoltre poiché la massa volumica sterica del cippato è piuttosto bassa, inferiore anche a quella di legna da ardere in ciocchi, la densità energetica sterica del cippato risulta non conveniente.

Il pellet invece è costituito da legno densificato, che comporta un più elevato potere calorifico a parità di volume ed elevata massa volumica apparente, e dunque una corrispondente alta densità energetica sterica, accentuata anche dall'elevata omogeneità del materiale.

Trasportabilità e stoccaggio

Un altro aspetto legato alla massa volumica apparente è quello della sua diretta influenza sulla trasportabilità del combustibile, che spesso richiede soluzioni tecniche per poter essere messo in commercio, come ad esempio la riduzione in frammenti (Junginger *et al*., 2005). Poiché il volume trasportabile è definito dalle dimensioni del corpo dell'autocarro, il carico è molto minore con il decrescere del valore di massa volumica sterica, poiché decresce l'effettivo volume di legno trasportato. Per unità di volume trasportata i costi aumentano al diminuire della massa volumica apparente.

Sono state ricercate soluzioni a questo problema, come ad esempio l'affastellare piccoli tronchi e residui forestali (Jirjis, 1995; Johansson *et al*., 2006; Kärhä and Vartiamäki, 2006; Spinelli *et al*., 2012), o accatastare la legna da ardere in bancali, metodi questi però costosi.
Il pellet è invece materiale facilmente trasportabile e maneggiabile: grazie alle ridotte dimensioni e alla geometria regolare è assimilabile ad un fluido. Questa caratteristica gli permette di essere efficacemente usato in sistemi di convogliamento meccanico e di essere facilmente stoccato in sacchi chiusi, per il basso contenuto idrico che permette la proliferazione di microorganismi responsabili della naturale degradazione e fermentazione del legno, processo che può favorire anche l'autocombustione. (Jirjis 1995; Jirjis, 2005; Casal *et al*, 2010; Larsson *et al*., 2012). Si tratta perciò di un combustibile la cui combustione e manipolazione sono facilmente automatizzabili, al pari dei derivati del petrolio.

	Legno tondo	Spacconi di 1 m	Legna da ardere		Cippato	
			Accatastata	Riversata	Fino	Medio
	m^3	m^3 accatastati	m^3 accatastati	m^3 riversati	m^3 riversati	
1 m^3 legno tondo	1	1.4	1.2	2	2.5	3
1 m^3 accatastato spacconi di 1 m	0.7	1	0.8	1.4	1.75	2.1
1 m^3 accatastato legna da ardere	0.85	1.2	1.	1.7		
1 m^3 riversato legna da ardere	0.5	0.7	0.6	1		
1 m^3 riversato cippato fino	0.4	0.55			1	1.2
1 m^3 riversato cippato medio	0.33	0.5			0.8	1

Tabella 3.1 Fattori di conversione per alcuni combustibili legnosi a diversi gradi di contenuto idrico combustibile dovuto alla raffinazione

Combustibili legnosi	Quantità	Contenuto idrico	Massa volumica	Potere calorifico inferiore	Densità energetica
		%	kg/m^3	MJ/kg	MJ/ m^3
Legna da ardere					
Abete rosso	1 m^3 accatastato	15	304	15.6	4753
		30	349	12.4	4339
Faggio	1 m^3 accatastato	15	455	15.3	6797
		30	495	12.1	6018
Cippato					
Abete rosso	1 m^3 riversato	15	194	15.6	3032
		30	223	12.4	2768
Faggio	1 m^3 riversato	15	295	15.3	4505
		30	328	12.1	3987
Pellet di legno misto					
	1 m^3 riversato	8	650	17.1	11115

Tabella 3.2 Potere calorifico e densità energetica di differenti tipi di combustibile e specie legnose

3.2 La produzione dei pellet

La produzione di pellet di legno (Figura 3.1) comprende i seguenti passaggi (Autori vari, 2006; Morten *et al*, 2009; Francescato *et al*., 2012b)

Approvvigionamento della materia prima

La materia prima per la produzione di pellet in Italia è costituita in prevalenza da scarti e residui di segheria, con costi ridotti di approvvigionamento.

Essicazione

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). Prima della raffinazione, dunque, la materia prima viene essicata in essicatoi che impiegano gas caldi direttamente convogliati sulla biomassa o usati indirettamente per la trasmissione di calore.

Controllo della composizione

Prima che il materiale grezzo possa essere ridotto in segatura è necessario rimuovere sassi, terra e parti metalliche che potrebbero danneggiare il raffinatore e la pellettatrice e contaminare il pellet prodotto.

Raffinazione del materiale grezzo

Le macchine per la produzione di pellet richiedono in genere una biomassa formata da particelle di dimensioni particolari, non più lunghe di 6 mm. Se il materiale di partenza è di grandi dimensioni, come nel caso di tronchi interi, il legno viene prima fatto passare attraverso una cippatrice. In seguito il biocombustibile ridotto in cippato è reso delle dimensioni adatte alla pellettizzazione mediante un mulino a martelli. Obiettivo della raffinazione è quello di ottenere un materiale di elevata omogeneità, per garantire pellet di qualità costante oltre che aumentare la capacità di pellettizzazione della macchina, i cui rulli non devono sminuzzare ulteriormente il materiale.

Condizionamento

Se il contenuto idrico, rilevato con un sensore di umidità, supera il 15%, viene rinforzato il processo di essicazione 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).

Pressatura

La biomassa è compressa da due rulli contro una matrice metallica. La matrice è perforata da innumerevoli fori posti a distanza regolare tra loro, costituiti da una prima parte conica che favorisce la compressione, e da un secondo segmento cilindrico, del diametro richiesto, che dà la forma al pellet. La materia prima viene forzata attraverso le cavità in condizioni di forte pressione e temperatura intorno ai 120 °C; in queste condizioni la lignina si scioglie e agisce come legante naturale tra le particelle che costituiscono il pellet. Talvolta vengono aggiunti degli additivi per aumentare le proprietà meccaniche del prodotto finale; il più impiegato è l'amido di mais, in percentuali dal 0.1 al 2%.

Raffreddamento e vagliatura

Quando escono dalla trafila i pellet sono caldi (90 – 150 °C) e non ancora rigidi. Un rapido raffreddamento a temperatura ambiente favorisce il loro indurimento e la perdita di acqua residua, che potrebbe condizionare la qualità finale. Questo processo avviene in genere in un raffreddatore contro corrente, che soffia aria attraverso i pellet. La fase finale prevede anche un processo di vagliatura per eliminare le particelle non perfettamente pressate e aderenti al pellet; il residuo viene spesso riciclato nel processo di produzione.

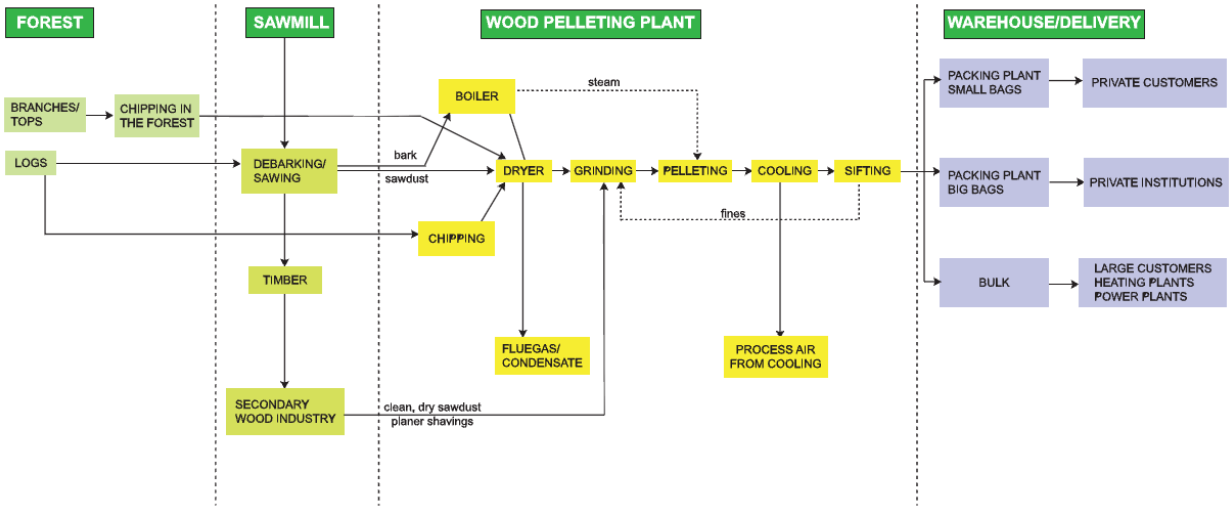


Figura 3.1 Il processo di produzione di pellet di legno (Kofman, 2010)

3.3 La classificazione e i requisiti qualitativi dei pellet

La qualità del pellet di legno come combustibile può variare considerevolmente in base a diversi fattori, tra i quali:

- la materia prima impiegata
- il contenuto idrico
- il contenuto in ceneri
- il potere calorifico
- la durabilità meccanica
- il contenuto di particelle fini

Diverse tipologie di caldaie richiedono particolari caratteristiche di biocombustibile. Specialmente per gli utenti dotati di piccoli apparecchi a uso domestico, una cattiva qualità del pellet può provocare problemi non irrilevanti, quali, ad esempio, la sua corrosione dovuta alla presenza considerevole di componenti volatili come zolfo e cloro o il deposito di grandi quantità di cenere nella caldaia (Hansen e Jain, 2009). La cenere è costituita parzialmente da minerali e metalli non combustibili della biomassa; tutte componenti che non possono essere bruciate, e la cui formazione quindi non è auspicabile. La cenere, infatti, può andare incontro a modificazioni fisiche quanto viene portata ad una temperatura critica (per il legno intorno ai 1300 °C) che ne causa la fusione con successive incrostazioni della caldaia di difficile rimozione. Un altro aspetto problematico può riguardare il contenuto di metalli pesanti o altri elementi che comportano emissioni dannose nell'ambiente. Grosse quantitativi di cenere prodotta durante la combustione si traduce quindi in maggiori spese di smaltimento e manutenzione dell'impianto.

Per garantire all'acquirente un prodotto che risponda a determinate caratteristiche e una corretta crescita del mercato, anche nell'ottica di scambi commerciali internazionali, si sta diffondendo sempre maggiormente la richiesta di certificazione del proprio pellet secondo marchi di qualità. Si tratta di certificazioni volontarie; in Italia sono presenti, ad esempio, la certificazione ENplus che dal 2012 ha sostituito Pellet Gold. Questi e altri marchi sono nati in seguito all'introduzione nel 2011 della norma UN EN 14961-2, che definisce specifiche classi di qualità per il pellet per uso non industriale.

Secondo il Regolamento UE 1025 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 25 ottobre 2012 sulla normazione europea, una norma è "una specifica tecnica, adottata da un organismo di normazione riconosciuto, per applicazione ripetuta o continua, alla quale non è obbligatorio conformarsi". In altre parole le norme sono documenti che definiscono le caratteristiche (dimensionali, prestazionali, ambientali, di qualità, di sicurezza, di organizzazione ecc.) di un prodotto, processo o servizio. Non sono obbligatorie, bensì

volontarie, ma le leggi (europee, nazionali o regionali) possono farvi riferimento e renderle obbligatorie.
A livello europeo, l'organismo che si occupa della redazione delle norme tecniche è il CEN (Comitato Europeo per la Normazione). Il CEN, elabora Norme Europee (EN) che diventano norme tecniche nazionali nei 31 Paesi membri; per l'Italia, dove è l'UNI (Ente Nazionale Italiano per l'Unificazione) che si occupa dell'adozione delle norme, esse diventano norme UNI EN. Il CEN produce anche altri documenti tecnici, quali le *Technical Specifications* (CEN TS) e i *Technical Reports* (CEN TRs), che per l'Italia diventano UNI CEN TS e UNI CEN TR (Autori vari, 2011). In Italia, non dotata di una normativa propria di riferimento per i biocombustibili, ci si riferisce a queste norme.
Anche nell'ambito di questa tesi si è fatto impiego di una serie di norme tecniche UNI EN descriventi i procedimenti delle analisi da eseguire sul pellet per poterlo poi classificare debitamente secondo i parametri dati dalla UNI EN 14961-1, ed eventualmente certificarlo secondo la UNI EN 14961-2.

La UNI EN 14961-1:2010, "Specifiche e classificazione del combustibile - Parte 1: Requisiti generali" definisce le modalità di classificazione e quindi la definizione della qualità dei biocombustibili solidi provenienti da diverse fonti, tra le quali sono interessanti, in questo contesto, i prodotti forestali. Come viene riassunto nella Tabella 3.3 tale norma si concentra sulle forme commercializzate di biocombustibile rappresentate, tra le altre, da cippato e pellet, dividendone le caratteristiche significative in classi separate da determinati valori limite. Allo scopo della tesi in esame risulta importante soffermarsi in modo più approfondito sulla classificazione del pellet, che rappresenta il prodotto finale ipoteticamente commerciabile.

Le norme 14961-2:2011, "Specifiche e classificazione del combustibile - Parte 2: Pellet di legno per uso non industriale" e 14962-4:2011, "Specifiche e classificazione del combustibile - Parte 4: Cippato di legno per uso non industriale" forniscono le regole per una ulteriore differenziazione di pellet e cippato destinato ad un uso non industriale. La qualità del biocombustibile che può essere classificato secondo le classi di qualità A e B è di qualità superiore rispetto a quello che non vi rientra, essendo lo stesso destinato all'utilizzo domestico che ne presuppone l'impiego in stufe più delicate e più soggette all'influenza negativa delle ceneri delle caldaie industriali. Le norme in oggetto riguardano quindi solo pellet e cippato prodotti da determinate materie prime.
In Tabella 3.4 sono riportati i requisiti necessari al pellet per essere classificato A1, A2 o B, mentre per il cippato l'approfondimento si limita a riportare la definizione delle classi dimensionali esistenti per il cippato ad uso non industriale (Tabella 3.5).

Infine sono da citare anche le norme UNI EN 15234-1:2011, “Assicurazione di qualità del combustibile – Parte 1: Requisiti generali”, e 15234-2:2011, “Assicurazione di qualità del combustibile – Parte 2: Pellet di legno per uso non industriale”. Mentre le norme descritte in precedenza si riferiscono alla descrizione della qualità del prodotto finale, queste interessano tutta la filiera produttiva, dalla fornitura della materia prima al punto di consegna dell’utente finale. Descrivono perciò le misure da adottare per assicurare il rispetto delle UNI EN 14961, indicando inoltre le linee guida per una tracciabilità del biocombustibile, la descrizione del processo di produzione e di distribuzione.

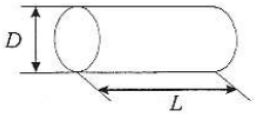
Origine UNI EN 14961-1	Biomassa legnosa Biomassa erbacea Biomassa da residui di frutta Miscele
Forma commerciale	Pellets
Dimensioni (mm)	
Diametro (D) e lunghezza (L)	
D 06 D 08 D 10 D 12 D 25	D = 6 ± 1.0 e 3.15 ≤ L ≤ 40 D = 8 ± 1.0 e 3.15 ≤ L ≤ 40 D = 10 ± 1.0 e 3.15 ≤ L ≤ 40 D = 12 ± 1.0 e 3.15 ≤ L ≤ 50 D = 25 ± 1.0 e 10.0 ≤ L ≤ 50 
Contenuto idrico, M (% sul peso tal quale) UNI EN 14774-1, UNI EN 14774-2	
M 10 M 15	≤ 10 ≤ 15
Ceneri, A (% sul peso secco) UNI EN 14775	
A 0.5 A 0.7 A 1.0 A 1.5 A 2.0 A 3.0 A 5.0 A 7.0 A 10.0 A 10.0+	≤ 0.5 ≤ 0.7 ≤ 1.0 ≤ 1.5 ≤ 2.0 ≤ 3.0 ≤ 5.0 ≤ 7.0 ≤ 10.0 > 10.0 (indicare valore massimo)
Durabilità meccanica, DU (% di pellet dopo il test) UNI EN 15210-1	
DU 97.5 DU 96.5 DU 95.0 DU 95.0-	≥ 97.5 ≥ 96.5 ≥ 95.0 < 95.0 (indicare il valore minimo)
Contenuto di particelle fini, F (% sul peso, < 3.15 mm) successiva alla produzione, UNI EN 15149-1	
F 1.0 F 2.0 F 3.0 F 5.0 F 5.0+	≤ 1.0 ≤ 2.0 ≤ 3.0 ≤ 5.0 > 5.0 (indicare il valore massimo)
Massa volumica sterica, BD (kg/m^3) UNI EN 15103	
BD 550 BD 600 BD 650 BD 700 BD 700+	≥ 550 ≥ 600 ≥ 650 ≥ 700 > 700 (indicare il valore massimo)
Additivi (% del peso pressato)	
Potere calorifico netto, Q (MJ/kg o kWh/kg) UNI EN 14918	Indicare il valore minimo
A livello informativo le specifiche indicano di riportare il contenuto di Azoto, Zolfo e Cloro e la fusibilità delle ceneri	

Tabella 3.3 Valori di riferimento per la classificazione e definizione della qualità dei pellet, come definita dalla UNI EN 14961-1

Classe di proprietà	Unità	A1	A2	B
Origine UNI EN 14961-1	-	Fusto Residui di legno non trattato chimicamente	Pianta intera senza radici Fusto Residui di utilizzazione, Corteccia da processi industriali Residui di legno non trattato chimicamente	Foreste, piantagioni e altro legno vergine Legno proveniente da prodotti e residui delle lavorazioni industriali Legno usato
Diametro (D) e lunghezza (L)	mm	D06: D=6±1.0; 3.15≤L≤ 40 D08: D=8±1.0 3.15≤L≤40	D06: D=6±1.0; 3.15≤L≤ 40 D08: D=8±1.0 3.15≤L≤40	D06: D=6±1.0; 3.15≤L≤ 40 D08: D=8±1.0 3.15≤L≤40
Contenuto idrico, M UNI EN 14774-1 and 14774-2	% sul tal quale	M 10 ≤ 10	M 10 ≤ 10	M 10 ≤ 10
Ceneri, A UNI EN 14775	% sul peso secco	A0.7 ≤ 0,7	A1.5 ≤ 1,5	A3.0 ≤ 3,0
Durabilità meccanica DU, UNI EN 15210-1	% sul tal quale	DU 97.5 ≥ 97,5	DU 97.5 ≥ 97,5	DU 96.5 ≥ 96,5
Particelle fini, F, UNI EN 15149-1	% sul tal quale	F 1.0 ≤ 1,0	F 1.0 ≤ 1,0	F 1.0 ≤ 1,0
Massa volumica sterica, BD, UNI EN 15103	kg/m3	BD 600 ≥ 600	BD 600 ≥ 600	BD 600 ≥ 600
Additivi	% sul tal quale	≤ 2% (indicare tipo e quantitativi)	≤ 2% (indicare tipo e quantitativi)	≤ 2% (indicare tipo e quantitativi)
Potere calorifico inferiore, Q UNI EN 14918	MJ/kg	Q16.5: 16,5≤Q≤19	Q16.3:16,3≤Q≤19	Q16.0: 16,0≤Q≤19
	kWh/kg	Q4.6: 4,6≤Q≤5,3	Q4.5: 4,5≤Q≤5,3	Q4.4: 4,4≤Q≤5,3
Riportare il contenuto di Azoto, Zolfo, Cloro, Arsenico, Cadmio, Cromo, Rame, Piombo, Mercurio, Nickel, Zinco				
A livello informativo le specifiche indicano di riportare la temperatura di fusibilità delle ceneri				

Tabella 3.4 Valori di riferimento per la classificazione dei pellet ad uso non industriale, come definita dalla UNI EN 14961-2: 2011

Classe P	Frazione principale (minimo 75% in peso)	Frazione fine (% in peso < 3.15 mm)	Frazione grossolana (% in peso)
P16A	3.15 ≤ P ≤ 16 mm	≤ 12%	>16 mm ≤ 3%, tutto < 31.5 mm L'area della sezione trasversale delle particelle sovradimensionali < 1 cm^2
P16B	3.15 ≤ P ≤ 16 mm	≤ 12%	>45 mm ≤ 3%, tutto < 120 mm L'area della sezione trasversale delle particelle sovradimensionali < 1 cm^2
P31.5	8 ≤ P ≤ 31.5 mm	≤ 8%	>45 mm ≤ 6% , tutto < 120 mm L'area della sezione trasversale delle particelle sovradimensionali < 2 cm^2
P45	8 ≤ P ≤ 45 mm	≤ 8%	>63 mm ≤ 6%, massimo 3.5% > 100 mm, tutto < 120 mm L'area della sezione trasversale delle particelle sovradimensionali < 5 cm^2

Tabella 3.5 Classificazione granulometrica per il cippato ad uso non industriale, come definita dalla UNI EN 14961-4

3.4 Situazione attuale del mercato italiano

Secondo una recente ricerca dell'AEBIOM (European Biomass Association) (AEBIOM, 2008), l'utilizzo di biomasse legnose a scopi energetici non è finora stato studiato in modo esaustivo, non ponendo sufficiente attenzione sulla possibilità di una produzione sostenibile delle stesse. Alla luce del rapporto annuale del 2011 dell'AEBIOM (AEBIOM, 2011) emerge per l'Italia un'attuale produzione di energia rinnovabile da prodotti forestali corrispondente al 9.9% del potenziale.

Il mercato del pellet è in continua crescita, sia nel mondo sia in Europa, continente che rimane il mercato principale, con una produzione pari nel 2010 a 9.26 milioni di t (61% della produzione mondiale) e un consumo di 11.4 milioni di tonnellate (85% del consumo mondiale) (AEBIOM, 2012).

Il consumo nazionale è superiore a 1.8 milioni t/anno, di cui l'89% in usi domestici e solo la frazione restante in caldaie di impianti industriali, dato che porta l'Italia ad essere il maggiore utilizzatore europeo di pellet a uso domestico (Paniz, 2012).

La produzione italiana è quantificabile intorno a 500.000 t/anno, con una diminuzione negli ultimi anni legata alla crisi dell'industria di lavorazione del legno, che ha determinato una contrazione nella disponibilità di materia prima destinata alla produzione di pellet, oltre che alla sempre più diffusa delocalizzazione della produzione in paesi terzi (soprattutto Est Europa). La maggior parte delle materie prime utilizzate è rappresentata principalmente da segatura e da altri materiali di scarto o secondari che mantengono un prezzo basso in confronto al tondame o ad altri assortimenti grezzi; ma il potenziale dei residui di biomassa da segherie e industria del legno ha già raggiunto il suo limite.

Attualmente la scarsità di materia prima in Italia (dove viene prodotto solo 1/4 del totale richiesto al consumo) e più generalmente nell'Unione Europea è bilanciata dalle importazioni da regioni vicine come la Russia nordoccidentale (Sikkema *et al*., 2011) o da Paesi più distanti, tra i quali spicca il Canada (Hillring, 2006; Ann, 2009; Wood Pellet Association of Canada, 2011).

Mentre quasi tutte le fasi di produzione all'interno degli impianti di pellettizzazione sono state studiate e analizzate per ottimizzare il prodotto finale, considerando ad esempio le miscele ottimali tra diverse specie legnose (Lehtikangas, 2001; Filbakk *et al*., 2011) e i loro poteri calorifici (Gil *et al*., 2010; Telmo and Lousada, 2011), esistono poche informazioni disponibili a proposito delle diverse possibilità di alimentare l'approvvigionamento per la catena di produzione del pellet.

C'è dunque la necessità di investire più risorse per studiare e sviluppare una catena di pellettizzazione organizzata tenendo in considerazione tutti i gradi di rifornimento per sostenere un processo produttivo in grado di rispondere ai requisiti di distribuzione e

domanda. Una possibilità potrebbe essere data dalla produzione di pellet direttamente da assortimenti forestali di scarsa qualità, non impiegabili per altri scopi se non quello energetico. Questi sono in particolare i rami e cimali da utilizzazioni e pianta o tronco intero da sfolli e diradamenti, in genere abbandonati sul letto di caduta o raccolti per la produzione di cippato di bassa qualità (Spinelli *et al*., 2011); o anche il legno ricavato da boschi cedui, tradizionalmente raccolto solo per la produzione di legna da ardere.

Per dare ulteriore stabilità al mercato è auspicabile l'approvazione di norme obbligatorie che regolino l'intera filiera di produzione (Zaetta *et al*., 2004).

4 Obiettivi

L’obiettivo specifico del lavoro è compreso all’interno di una ricerca più ampia, che mira a studiare la fattibilità tecnica di una catena di produzione di pellet basate su assortimenti e residui forestali.

Si è voluto valutare le caratteristiche del cippato ottenuto da assortimenti forestali di bassa qualità, e valutare se sia tecnicamente fattibile produrre pellet di qualità da materie prima quali ad esempio piante ancora dotate di corteccia o della ramaglia. Sono state impiegate a tal scopo le procedure e le classificazioni previste dalle Norme Europee recepite dall’Ente Nazionale di Unificazione (UNI EN) in materia di biocombustibili.

5 Materiali e metodi

L'analisi di fattibilità per la produzione di pellet forestale consiste nella verifica delle caratteristiche qualitative, definite dalle Norme tecniche Europee UNI EN 14961, del pellet ottenuto dalla lavorazione di fusti di due specie forestali tipiche del contesto regionale: faggio e abete.

Le norme UNI EN 14961 prevedono che per lo svolgimento delle analisi vengano seguite le procedure dettate dalle norme tecniche. Spesso tali norme forniscono anche parametri di ripetibilità dell'esperimento. Per ripetibilità di intende la possibilità di effettuare la stessa determinazione (in un intervallo di tempo ridotto, ma non simultaneamente) ottenendo un risultato uguale o compreso in un determinato scarto, nello stesso laboratorio, dallo stesso operatore, impiegando lo stesso apparato su porzioni rappresentative ricavate dallo stesso campione.

5.1 Raccolta e stoccaggio dei campioni sperimentali

Il materiale di partenza, costituito da alcune piante in piedi di abete rosso e di faggio, è stato individuato in un cantiere aperto dai Servizi Forestali Regionali (SFR) nei boschi del Comune di Nevegal (BL) nell'ottobre 2012. Agli operai forestali è stato richiesto di prelevare in bosco rispettivamente 9 e 6 piante di abete rosso e di faggio che fossero rappresentative del popolamento in quanto a vigore e condizione vegetativa. E'stato richiesto che per l'abete rosso i diametri delle piante scelte fossero compresi tra i 15 e i 30 cm di diametro; per gli alberi di faggio diametri compresi tra i 10 e i 20 cm. Tali dimensioni sono state considerate rappresentative delle misure medie delle piante tagliate durante interventi come sfolli e diradamenti. Tre delle piante di abete rosso, inoltre, sono state scortecciate direttamente in bosco. Gli operatori del SFR hanno poi proceduto a sezionare in toppi le 15 piante abbattute al fine di facilitarne il trasporto.

Sono poi state ridotte in cippato in bosco lungo la strada forestale, scomponendole in modo da ottenere delle categorie di materiale di differenti tipologie e qualità, che presumibilmente troveranno corrispondenza in pellet di diversa qualità (Tabella 5.1):

1. 3 piante intere di abete rosso (scarsa qualità)
2. 3 fusti di abete rosso con corteccia (media qualità)
3. 3 fusti di abete rosso senza corteccia (alta qualità)

4. 3 fusti interi di faggio (alta qualità)
5. 3 cumuli di ramaglia (Ø < 5 cm) di faggio senza foglie (media/scarsa qualità)

Il materiale è quindi stato chiuso in sacchi e trasportato in un capannone dell'Azienda Agraria Sperimentale L. Toniolo sita a Legnaro.

Qui ognuna delle 5 tipologie di cippato è stata riversata in bidoni di dimensioni 1x1 m circa provvisti di forature laterali rivestite in rete (Figura 5.1).

	Abete rosso	**Faggio**
Alta qualità	Fusto senza corteccia*	Fusto intero
Media qualità	Fusto con corteccia	Ramaglia (Ø < 5 cm) senza foglie
Scarsa qualità	Pianta intera	

* per "senza corteccia" si indende fusto in cui è simulata la scortecciatura parziale a seguito di allestimento con processore o *harvester.* Per il faggio il taglio con l'*harvester* o comunque la scortecciatura in bosco non è praticata nelle utilizzazioni forestali.

Tabella 5.1 Schema di campionamento del materiale iniziale di abete rosso e faggio

Abete rosso: fusto scortecciato

Abete rosso: fusto intero

Abete rosso: pianta intera

Faggio: fusto intero

Faggio: ramaglia Ø < 5 cm

Figura 5.1 Il cippato ottenuto dalle specie selezionate

5.2 Analisi sul cippato

Il cippato è andato incontro ad un processo di stagionatura simulante quella naturale in condizioni di assenza di precipitazione, essendo stato stoccato in luogo riparato e ben areato. La stagionatura, durata 80 giorni, è stata parzialmente forzata ribaltando a terra i cassoni periodicamente, ogni 20 giorni. Questo allo scopo di ridurre i naturali processi di fermentazione, indotti da batteri e funghi, fenomeno che avrebbe reso lo studio sperimentale più oneroso e meno preciso. Durante la stagionatura, infatti, i mucchi di cippato vanno incontro ad una certa perdita di peso dovuta ai processi biologici degradativi indotti dalle attività di funghi e batteri, accomunati in un generico processo di fermentazione (Hellrigl, 2006). Nella cataste ben ventilate, tuttavia, queste perdite sono poco accentuate (1-3% della massa iniziale) e in questo lavoro non se ne è tenuto conto.
Per legno stagionato si intende che al suo interno l'acqua libera, contenuta nelle porosità del legno in quantità variabile, è evaporata e quella igroscopica, contenuta nelle pareti cellulari, è in equilibrio con l'ambiente circostante. In genere il legno fresco ha un contenuto idrico intorno al 50% mentre il legno stagionato raggiunge un valore del 10-13% (o comunque inferiore al 20%); questi valori sono molto sensibili alle condizioni esterne di umidità, essendo il legno un materiale poroso e igroscopico.
Umidità e contenuto idrico sono due indicatori del tenore idrico del campione, che deve essere misurato per poter riferire le analisi effettuate in seguito ad una condizione sempre identica del legno, quella anidra: la condizione di assoluta assenza di acqua.
Tutte le analisi che sono di seguito descritte sono state effettuate presso il Laboratorio Analisi BioCombustibili dell'Università di Padova.

I due criteri per la misurazione del contenuto di acqua del campione, espressi in termini percentuali, si distinguono per il peso del legno al quale si riferiscono: l'umidità viene calcolata in rapporto al campione allo stato anidro, mentre il contenuto idrico è calcolato su base umida.

L'umidità, detta anche umidità sul secco e siglata *U*, si calcola in rapporto al legno allo stato anidro. Si calcola con la formula:

$$U = \frac{(\mathrm{P1} - \mathrm{P2})}{(\mathrm{P2} - \mathrm{P0})} * 100 \qquad (5.1)$$

dove

U è l'umidità, in %;

P1 è la tara;

P1 è la massa umida, in g, del campione;

P2 è la massa anidra, in g, del campione.

Il contenuto idrico, o umidità sul peso umido o sul tal quale , è siglato *M* e si riferisce al legno nello stato idrico in cui si trova al momento dell'analisi. Si calcola come:

$$M = \frac{(\mathrm{P1} - \mathrm{P2})}{(\mathrm{P1} - \mathrm{P0})} * 100 \qquad (5.2)$$

dove

M è il contenuto idrico, in %;

P0, P1 e P2 come sopra.

Nello svolgimento di questo lavoro si è impiegato come indicatore del tenore idrico dei campioni il contenuto idrico. Il procedimento per la determinazione di tale valore è descritto nella norma UNI EN 14774-1:2009, "Determinazione dell'umidità – Metodo di essicazione in stufa. Parte 1: Umidità totale – Metodo di riferimento".

Per ognuno dei campioni di cippato sono state riempite e pesate da vuote (P0) e da piene con minimo 300 g di materiale (P1) 3 vaschette di alluminio mediante bilancia con precisione di 0.01 g,. Sono poi state riposte in stufa a 105 °C, fino al raggiungimento di una massa costante: cioè per un periodo sufficiente lungo affinché due pesate successive, intervallate di 60 min, presentassero variazioni di peso inferiori allo 0.2% della perdita totale di peso. Infine i campioni sono stati pesati ancora caldi (P2), ponendo sulla bilancia tondello di legno per proteggere il piatto dal diretto contatto con il calore ed assicurare così la ripetibilità della misura. Si è poi applicata l'equazione 5.2.

Seguendo questo procedimento è stato calcolato il contenuto idrico dei campioni appena stoccati all'interno del capannone e perciò in uno stato idrico fresco assimilabile a quello delle piante da poco abbattute. Per ogni tipologia di cippato stagionato è inoltre stato prelevato un sub-campione, poi macinato mediante un mulino a martelli. La segatura così ottenuta è stata riposta in sacchetti alimentari di plastica, mantenuti aperti per qualche giorno per permettere al contenuto di entrare in equilibrio idrico con l'ambiente ed è poi richiusi. Questo passaggio è stato effettuato per valutare, come si vedrà in seguito, quanto la stagionatura del legno comporta un cambiamento del contenuto in ceneri e del potere calorifico rispetto al materiale fresco.

Dopo aver calcolato il contenuto idrico iniziale di ogni campione si è proceduto pesando ogni cassone tramite una cella di carico, sollevandolo con un martinetto idraulico e calcolandone il peso netto. Questi dati, uniti ai 5 contenuti idrici, hanno permesso di ricavare il corrispondente peso di acqua di ogni campione, ottenuto come percentuale sul netto. Infine è stato possibile calcolare la sostanza secca di ogni campione, calcolata come differenza tra peso netto e peso dell'acqua. In questa fase tutti i pesi sono stati calcolati in kg.
Per monitorare la progressiva perdita di peso dei campioni di cippato dovuta all'evaporazione dell'acqua si è proceduto tramite pesate successive con la cella di carico. Infatti conoscendo i progressivi pesi netti e la sostanza secca di ogni campione si è potuto applicare l'equazione 5.2 e calcolare i contenuti idrici gradualmente più bassi.
Dopo 80 giorni dalla verifica iniziale di umidità tutti i 5 campioni presentavano un contenuto idrico inferiore al 20% e sono perciò stati considerati stagionati.

Sul cippato sono state inoltre effettuate le prove per la massa volumica sterica e per la distribuzione granulometrica.

Per calcolare la massa volumica sterica si è fatto riferimento alla norma UNI EN 1503:2010, "Determinazione della massa volumica apparente", che prevede la determinazione di tale valore utilizzando un recipiente di misura normalizzato. Si può scegliere se impiegare un recipiente da 5 l (0.005 m^3) o da 50 l (0.05 m^3) di volume: in questo caso è stato selezionato il secondo che, come specificato dalla norma, può essere usato per tutte le tipologie di biocombustibile le cui singole componenti non superino il diametro di 100 mm.
Il procedimento per la determinazione in oggetto consiste in alcuni semplici passaggi. Inizialmente si pesa la tara, cioè il recipiente prescelto vuoto (P0). Si riempie poi con il materiale da valutare, versandolo dall'alto affinché formi un cono della massima altezza possibile sopra al bordo superiore del contenitore. Poi il recipiente riempito viene esposto a una serie di tre scosse, sollevandolo di 150 mm e lasciandolo ricadere verticalmente su un piano di legno. Questo passaggio serve a simulare il processo di assestamento tra frammenti che si incastrano tra loro lasciano libero il meno spazio possibile; un'azione che avviene naturalmente durante le operazioni di carico, scarico, trasporto del combustibile legnoso, sia esso legna da ardere, cippato o pellet. In seguito lo spazio vuoto creatosi nella parte superiore del contenitore viene riempito con altro materiale e livellato con un'asse di legno rimuovendo il cippato in eccesso. Il campione viene ripesato (P1), il campione riunito al resto del cippato, e si effettuano due ulteriori ripetizioni.
Una volta ottenuti i 3 valori di massa per ogni campione si calcolano, con l'Equazione 5.3, le tre masse volumiche steriche corrispondenti e se ne fa la media.

$$BD = \frac{(\mathrm{P1} - \mathrm{P0})}{V} \tag{5.3}$$

dove:

BD è la massa volumica apparente, in kg/m^3_{stero};

P0 è la massa, in kg, della tara;

P1 è la massa, in kg, del recipiente contenente il cippato;

V è il volume, in m^3, del recipiente.

Si noti che il valore di massa volumica sterica è fortemente condizionato dal contenuto idrico del campione: la stessa analisi effettuata su cippato fresco e stagionato presenterebbe risultati notevolmente inferiori nel secondo caso, dovuti alla perdita di acqua, che condiziona il peso del legno (Francescato *et al*., 2008). Nell'ambito di questa tesi la massa volumica apparente è stata misurata sui campioni freschi, cioè sul tal quale.

Perché il calcolo della massa volumica apparente sia ripetibile la massima differenza accettabile tra le ripetizioni eseguite sullo stesso campione siano inferiori a:

- 3.0% per campioni con massa volumica apparente inferiore a 300 kg/m^3_{stero};
- 2.0% per campioni con massa volumica apparente uguale o superiore a kg/m^3_{stero}.

Per determinare la distribuzione granulometrica dei frammenti cippati si è invece rispettata la norma UNI EN 15149-2-2011, "Determinazione della distribuzione granulometrica. Parte 1: Metodo del vaglio vibrante con apertura maggiore o uguale a 1 mm". Il meccanismo di vagliatura impiegato è costituito da una serie di 5 setacci sovrapposti, dotati di aperture circolari di diametro decrescente dall'alto verso il basso. Il fondo dell'apparecchiatura è dotato di un piatto raccoglitore nel quale si convogliano le particelle con diametro inferiore a 3,5 mm, la cosiddetta frazione fine. La strumentazione così costituita è oscillante in senso orizzontale in due direzioni, per favorire la discesa del cippato aggiunto dall'alto (Figura 5.2).
Per effettuare la prova è stato prelevato un campione di cippato da ognuno dei 5 cassoni. I campioni sono stati pesati con una bilancia di precisione 0.1 g, e poi, uno alla volta, riversati in uno strato uniforme nel setaccio superiore del sistema di vagliatura. Il meccanismo oscillante è stato poi azionato e lasciato agire per la durata di 15 min.
Una volta terminata la vagliatura di un campione questo risulta quindi suddiviso nelle seguenti 7 frazioni:

1. frammenti con Ø > 63 mm
2. frammenti con 63 mm ≥ Ø > 45 mm
3. frammenti con 45 mm ≥ Ø > 31.5 mm
4. frammenti con 31.5 mm ≥ Ø > 16 mm

5. frammenti con 16 mm ≥ Ø > 8 mm
6. frammenti con 8 mm ≥ Ø > 3.15 mm
7. frazione fine, con Ø ≤ 3.15 mm.

Ognuna delle frazioni è stata pesata con la precisione di 0.1 g e se ne è calcolata la percentuale sul peso iniziale. La differenza tra la massa iniziale del campione e la somma della massa di tutte le frazioni deve essere inferiore del 2% del totale iniziale.

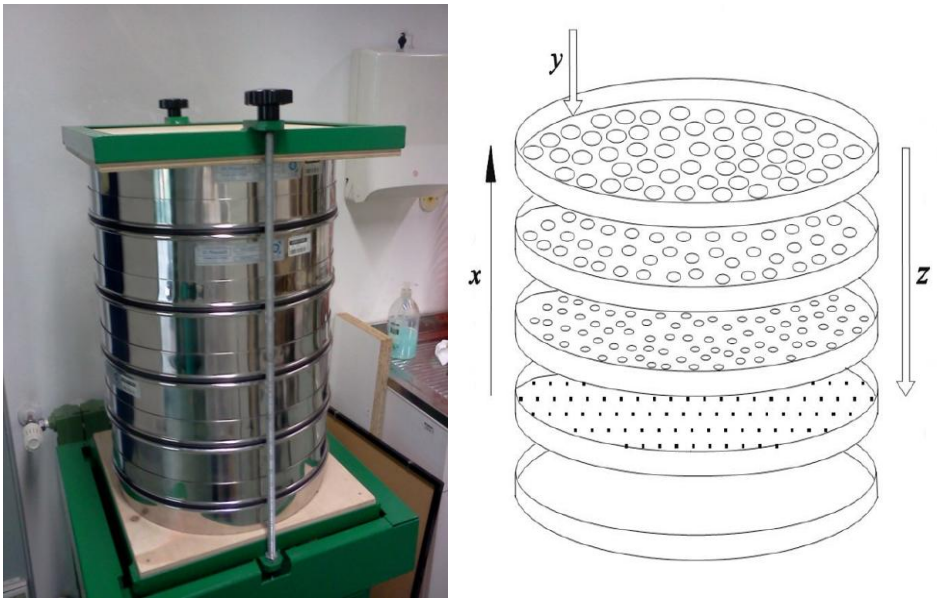


Figura 5.2 Vaglio vibrante e rappresentazione esemplificativa del posizionamento dei vagli.

Si sono in seguito effettuate le analisi per la determinazione del contenuto in ceneri e del potere calorifico dei 5 campioni di faggio e abete rosso, determinazione che viene eseguita sulla segatura. 5 sub-campioni di cippato fresco erano già stati macinati prima della stagionatura. Successivamente è stato macinato con il mulino a martelli il cippato rimanente, ormai stagionato, e di questo sono stati prelevati altri 5 sub-campioni da portare in laboratorio. In totale si disponeva perciò di 10 campioni, a coppie prelevati dallo stesso tipo di cippato.

Allo scopo di determinare il contenuto in ceneri dei campioni è stata rispettata la norma UNI EN 14775-2010, “Determinazione del contenuto di ceneri”, valida per tutti i biocombustibili solidi.

Il contenuto in ceneri è determinato calcolando la massa dei residui rimanenti dopo che il campione è stato calcinato in muffola a 550 °C. La prova è stata eseguita riempiendo per ognuno dei 10 campioni 3 crogioli di porcellana con un minimo di 1 g di segatura. Gli stessi crogioli erano prima stati posti in muffola a 550 °C per 60 min al fine di eliminare ogni traccia di acqua e poi lasciati raffreddare in un disidratatore. I crogioli sono in seguito stati pesati con la precisione di 0.0001 g; prima vuoti per determinarne la tara (P0) e poi pieni (P1). Così

riempiti sono stati messi in forno a 105 °C per una notte e ripesati il giorno dopo (P2), seguendo il procedimento sopra descritto per la determinazione del contenuto idrico (Equazione 5.2), dato necessario nella prossima formula. In seguito i crogioli sono stati posti in muffola ventilata, aumentando gradualmente la temperatura fino a giungere a 550 °C, temperatura che è stata mantenuta per minimo 120 min. Durante questa fase avviene il processo di combustione della segatura, che prevede inizialmente la rottura dei composti a catena lunga (cellulosa), trasformati in composti a catena corta, dai quali si formano gas combustibili che vengono aspirati. Con l'aumento della temperatura avviene la gassificazione, che brucia le parti carboniose liberando CO_2.
Una volta completata la calcinazione i crogioli contenevano solo le ceneri, formate da residui solidi della combustione quali sali di silicio e altri minerali e metalli pesanti. I crogioli contenenti le ceneri sono stati messi in deumidificatore fino al raggiungimento della temperatura ambiente, e infine pesati (P3).
Con questi dati a disposizione è possibile calcolare il contenuto di ceneri su base secca, con la formula:

$$A_d = \frac{(\mathrm{P3} - \mathrm{P0})}{(\mathrm{P2} - \mathrm{P0})} * 100 * \frac{100}{100 - M} \qquad (5.4)$$

dove:

A_d è il contenuto in ceneri su base secca, in %, del campione;
P0 è la massa, in g, della tara;
P2 è la massa, in g, del crogiolo riempito con il campione;
P3 è la massa, in g, del crogiolo con le ceneri rimaste;
M è il contenuto idrico, in %, del campione.

Perché la ripetibilità sia possibile, la massima differenza accettabile tra le ripetizioni della determinazione del contenuto in ceneri sullo stesso campione è dello 0.2% assoluto (per campioni con contenuto in ceneri inferiore al 10%).

Per determinare il potere calorifico dei 10 campioni macinati si è fatto riferimento alla norma UNI EN 14918-2010, "Determinazione del potere calorifico", impiegando una bomba calorimetrica.
Tale strumento impiega la differenza di temperatura causata dalla combustione di una pastiglia di legno in un'atmosfera satura di ossigeno, alla temperatura di 25 °C, per restituire il valore di potere calorifico superiore del combustibile, cioè con tutta l'acqua prodotta durante la combustione allo stato liquido. Le pastiglie di legno sono state ottenute comprimendo con una pressa circa 0.5 g di segatura, e pesate con bilancia di precisione fino

a 0.0001 g. Il risultato è espresso dalla bomba calorimetrica in MJ/kg, e rappresenta il potere calorifico superiore su base umida o sul tal quale, dipendente cioè dal contenuto idrico proprio del campione al momento della misura.
La precisione richiesta per la ripetibilità dell'esperimento è che le replicazioni del test sullo stesso campione non differiscano di più di 0.120 MJ/kg.

Dal valore risultante dall'esperimento con la bomba calorimetrica è possibile, attraverso specifiche equazioni, esprimere il potere calorifico in modi differenti che possono essere interessanti per diversi motivi.
Il valore di potere calorifico forse più significativo e confrontabile è il potere calorifico superiore su base anidra, cioè non condizionato dall'acqua contenuta all'interno del campione, la quale richiede una spesa di energia per essere fatta evaporare di cui la bomba calorimetrica non tiene conto.
Per passare dal potere calorifico superiore su base umida a quello su base anidra si applica l'equazione:

$$q_{V,gr,d} = q_{V,gr} * \frac{100}{100 * M} \tag{5.5}$$

dove:

$q_{V,gr,d}$ è il potere calorifico superiore su base anidra, in MJ/kg, del combustibile;

$q_{V,gr}$ è il potere calorifico superiore, in MJ/kg, calcolato dalla bomba calorimetrica;

M è il contenuto idrico del campione al momento dell'analisi, in %, calcolato secondo l'Equazione 5.2.

Per applicare questa formula è stato quindi necessario calcolare il contenuto idrico dei campioni analizzati in contemporanea agli esperimenti con la bomba calorimetrica.
Si può inoltre parlare di potere calorifico superiore su base umida come ricevuto, che tiene conto delle condizioni di umidità iniziali del campione, così com'è stato portato al laboratorio.
E'possibile anche calcolare il potere calorifico senza ceneri, cioè al netto delle ceneri: per passare dal potere calorifico superiore su base secca a quello senza ceneri si applica l'equivalenza prevista dalla UNI EN 1529:2011, "Conversione dei risultati analitici da una base all'altra":

$$q_{V,gr,af} = q_{V,gr,d} * \frac{100}{100 - A_d}$$

dove:

$q_{V,gr,af}$ è il potere calorifico superiore su base anidra senza ceneri, in MJ/kg, del combustibile;

$q_{V,gr,d}$ è il potere calorifico superiore su base anidra, in MJ/kg, del combustibile;

A_d è il contenuto in ceneri su base anidra, in %, del campione impiegato.

Infine, per completezza, è possibile calcolare il potere calorifico inferiore su base anidra e su base umida. Come già detto nel capitolo 3, il potere calorifico inferiore si riferisce al valore di potere calorifico con l'acqua di combustione allo stato di vapore; quindi al netto dell'energia necessaria a far evaporare l'acqua liberata durante l'esperimento di combustione.

5.3 Produzione del pellet

Una volta eseguita questa serie di analisi si è proceduto al condizionamento del contenuto idrico della segatura rimanente, poiché il valori del contenuto di acqua della segatura stagionata non erano ottimali per la pellettizzazione prevista. Il condizionamento è avvenuto aggiungendo una certa massa di acqua, specifica per ogni campione di segatura in base al suo attuale tenore idrico, per portarla al valore di contenuto idrico ideale del 12-15%.
La fase di pellettizzazione si è svolta presso l'azienda La Meccanica di Reffo S.r.l., sita a Cittadella (PD). L'azienda produce trafile e macchine per la pellettizzazione ed è dotata di una pellettatrice sperimentale (Figura 5.3).
Per trasformare i cinque campioni di segatura in pellet è stata utilizzata una trafila con diametro pari a 5 mm e spessore 30 mm. L'assorbimento del motore durante la produzione è stata di 18 A per i 3 tipi di abete rosso e 20 A per i 2 di faggio. La

Tabella 5.2 riporta tutte le caratteristiche di produzione, mentre la Figura 5 illustra i pellet ottenuti.
Appena fuoriusciti dalla pellettatrice i pellet sono stati setacciati per eliminare la polvere di produzione. Poi, per raffreddarlo in tempi brevi, è stato introdotto in un raffreddatore contro corrente. Il dispositivo è costituito da una cassa aperta superiormente dotata di una griglia posta orizzontalmente a metà altezza delle pareti e dotata nella parte inferiore di un'apertura in corrispondenza della quale una ventola alimentata a corrente elettrica convoglia l'aria circostante (Figura 5.4). I pellet caldi sono stati sparsi sopra alla griglia ventilata fino al raggiungimento della temperatura ambiente e poi riposti in 5 sacchi di plastica resistente per il trasferimento in laboratorio.

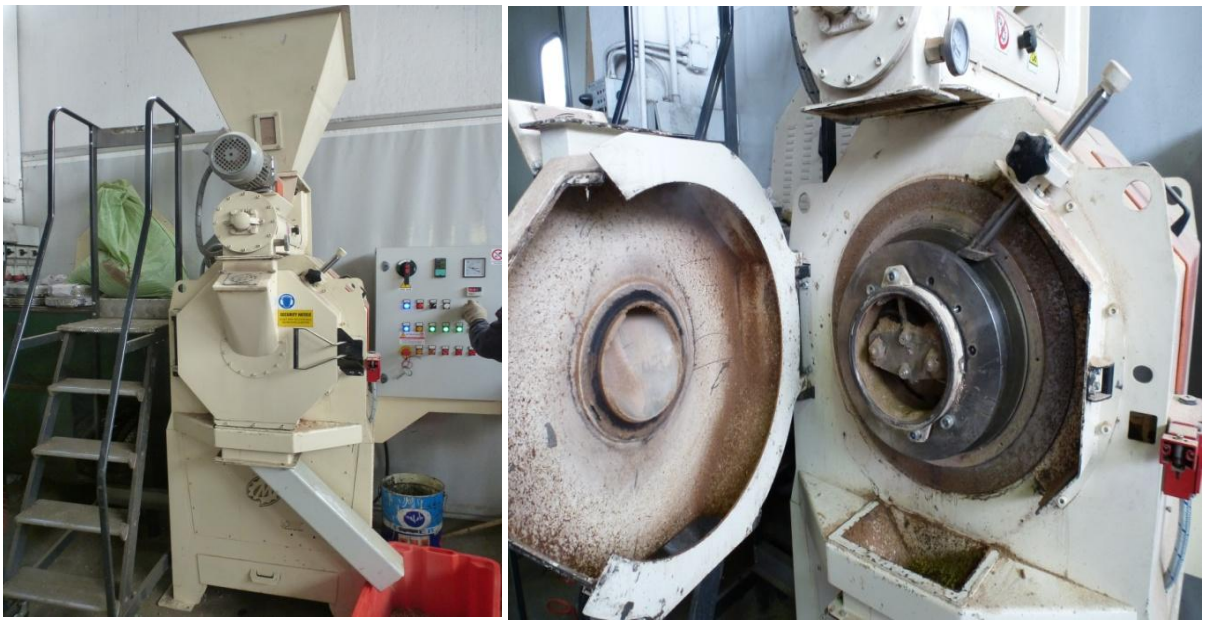


Figura 5.3 La macchina pellettatrice e il dettaglio della matrice

Figura 5.4 Il setaccio per l'eliminazione della polvere di produzione e il dispositivo di raffreddamento in contro corrente

Abete rosso: fusto scortecciato

Abete rosso: fusto intero

Abete rosso: pianta intera

Faggio: fusto intero

Faggio: ramaglia

Figura 5.5 I pellet prodotti sperimentalmente

Materiale		Abete scortecciato	Abete fusto intero	Abete pianta intera	Faggio fusto	Faggio ramaglia
Diametro trafila	mm	5	5	5	5	5
Spessore trafila	mm	30	30	30	30	30
Assorbimento motore	A	18	18	18/20	20	20
Coclea di alimentazione	giri/min	90/95	125	115/125	70/73	87
Produzione	kg/h	33.27	41.37	73.63	54.23	56.40
Contenuto idrico segatura	%	14.35	13.16	10.97	11.95	11.46
Temperatura pellet	°C	70/90	80/85	86	85	83
Durata prova	min	39	29	22	26	20
Quantità prodotta	kg	21.63	20.00	27.00	23.50	18.80

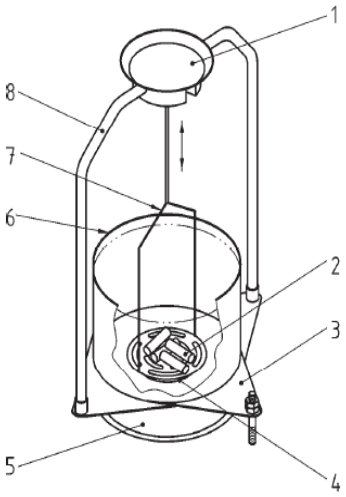
Tabella 5.2 Caratteristiche di produzione del pellet

5.4 Analisi sul pellet

Come già per il cippato, anche per i 5 campioni di pellet (abete rosso pianta intera, fusto intero e fusto scortecciato; faggio fusto e ramaglia) alcune analisi sono state eseguite sul pellet intero, altre sulla segatura. Le valutazioni sul pellet non macinato sono state le dimensioni, la massa volumica, la massa volumica sterica e la durabilità meccanica.

Le accortezze da adottare per la misurazione delle dimensioni dei pellet sono descritte nella norma UNI EN 16127:2012, “Determinazione della lunghezza e del diametro del pellet”. Si tratta di parametri da rilevare poiché pellet sovradimensionati rispetto a quanto dichiarato possono causare problemi agli alimentatori a coclea. Per pellet con diametro medio inferiore ai 6 mm, come in questo caso, deve essere valutata una quantità di pellet compresa tra i 60 e gli 80 g. Questi dovranno essere misurati con un calibro di precisione di almeno 0.1 mm. Di ogni particella viene misurata e annotata la lunghezza, di cui si fa la media aritmetica; per il calcolo del diametro si misurano almeno 10 pellet e se ne fa la media aritmetica.

La massa volumica o densità dei pellet è stata calcolata rispettando la norma UNI EN 15150-2011, “Determinazione della massa volumica delle singole particelle”. La norma descrive il metodo per la determinazione della massa volumica delle singole particelle che costituiscono un combustibile pressato come il pellet. La massa volumica può variare nel tempo a causa dell’influenza sul materiale organico di umidità, abrasione e degradazione biologica e deve essere intesa come proprietà "momentanea" del combustibile.
Il principio prevede che vengano determinate sia la massa che il volume di ogni particella. Il volume è calcolato determinando la galleggiabilità in un liquido, seguendo il principio fisico (principio di Archimede) che la spinta di galleggiamento di un corpo è uguale al peso del volume spostato: la differenza di peso tra una misurazione in aria e quella seguente in acqua evidenzia il suo galleggiamento. Il volume del campione è calcolato passando attraverso la densità del liquido scelto, in questo caso acqua potabile della rete idrica a temperatura ambiente (20 °C).
La strumentazione è costituita da un apparato specifico per il calcolo della densità da montare su bilancia con precisione fino a 0.0001 g, raffigurato in Figura 5.6. Lo strumento è dotato di un ponte che passa sopra alla bilancia per impedire che questa risenta del peso del becher riempito di acqua. Il piatto pesante sopraelevato, in grado di contenere almeno 4 pellet, sostiene con un filo metallico un secondo piatto forato immerso nel liquido sottostante. Il sistema di due piattini è rimuovibile per essere caricato con i pellet ed è collegato mediante un supporto ad arco alla bilancia. La bilancia viene tarata mentre il piattino sommerso, vuoto, è sotto la superficie dell’acqua alla massima profondità.



Legenda

1 piatto della bilancia per peso in aria
2 pellets
3 ponte
4 piatto forato per peso in immersione
5 bilancia
6 beaker
7 sospensione del piatto forato
8 supporto

Figura 5.6 Bilancia analitica impiegata nel calcolo della densità dei singoli pellet e il meccanismo di funzionamento.

E' necessario riempire il becher in modo che il piattino sommerso resti sempre sotto il livello dell'acqua. All'acqua vengono aggiunti 1.5 g/l di detergente e si mescola fino a completa omogeneità del liquido: questo passaggio consente ai pellet di non iniziare immediatamente ad assorbire l'acqua.

Vengono poi pesati in aria almeno 4 pellet, che sono poi rimossi dal piattino superiore e posizionati su quello inferiore. Quando il gruppo di pellet è sommerso si legge velocemente, entro 3-5 s, il secondo peso poiché entro breve tempo il legno inizia ad assorbire acqua.

Si ripete questa procedura fino ad avere un totale di 10 ripetizioni.

Per determinare la densità del pellet si applica la formula:

$$\rho = \frac{m_{\mathrm{a}}}{(m_a - m_l)} * \rho_l \qquad (5.6)$$

dove

ρ è la densità del gruppo di pellet, in g/cm^3;

m_a è la massa del gruppo di pellet in aria, in g;

m_l è la massa del gruppo di pellet nel liquido, in g;

ρ_l è la densità del liquido (acqua e detergente), normalmente pari a 0.9958 g/cm^3.

Si calcola la densità per ogni replicazione effettuata e poi se ne fa la media aritmetica, ottenendo come risultato la densità media delle singole particelle con precisione di 0.01 g/cm^3.

Per calcolare la massa volumica sterica dei cinque campioni di pellet è stato impiegato lo stesso metodo già descritto per il cippato: è stata quindi applicata l'equazione 5.3. L'unica differenza è constata nell'utilizzo del contenitore di dimensioni minori (Figura 5.7), con volume interno di 5 l invece che 50 l, impiegabile quando le singole particelle del materiale hanno lunghezza inferiore ai 12 mm.

Figura 5.7 La strumentazione utilizzata per la determinazione della massa volumica sterica dei pellet

La durabilità meccanica è la misura della resistenza di combustibili densificati alle sollecitazioni meccaniche e abrasioni conseguenti alla movimentazione e al trasporto. Le modalità per la sua determinazioni sono indicate nella norma UNI EN 15210-1-2010, "Determinazione della durabilità meccanica di pellet e di bricchette. Parte 1: Pellet". Viene descritto dettagliatamente come assemblare un meccanismo di scatole rotanti ermetiche alla fuoriuscita di polvere, che vengono fatte girare alla velocità di 50 giri al minuto per 500 rotazioni (Figura 5.8). L'esperimento vuole simulare le collisioni dei pellet tra loro e contro le pareti del recipiente, per verificare quanto rimangono integri e di conseguenza quante particelle fini vengono a formarsi.

Si procede dunque a riempire per ogni tipologia di pellet tre scatole rettangolari di metallo con 500 g di combustibile, previa setacciatura dello stesso per eliminare la polvere presente prima dell'agitazione. Le scatole sono posizionate nel dispositivo rotante, che viene azionato impostandolo a 500 giri. Poi si estraggono i contenitori e per ognuno il contenuto è passato al setaccio con aperture di 3.15 mm. Il pellet rimanente nella parte superiore del setaccio viene pesato e si calcola la durabilità meccanica, in % sul peso iniziale, con l'equazione:

$$D_u = \frac{m_A}{m_E} * 100 \qquad (5.7)$$

dove

D_u è la durabilità meccanica, in %;

m_E è la massa dei pellet pre-setacciati prima del trattamento rotante, in g;

m_A è la massa dei pellet setacciati dopo il trattamento rotante, in g.

I 3 valori ottenuti per ogni campione vengono mediati e il risultato finale di durabilità viene espresso arrotondandolo allo 0.1%.

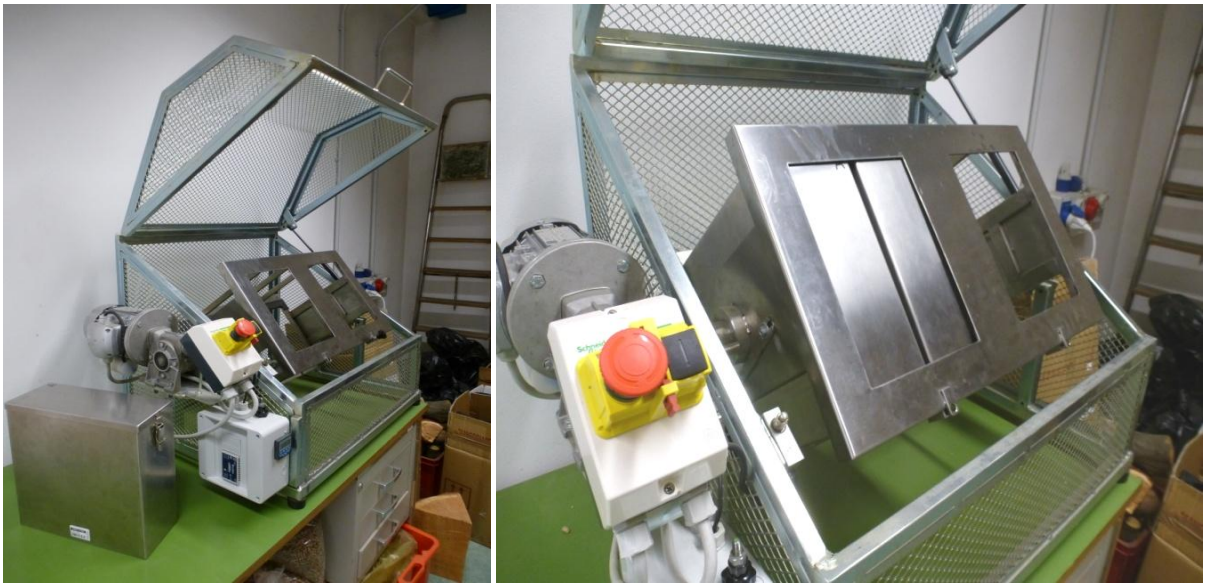


Figura 5.8 Il macchinario a scatole rotanti impiegato nel calcolo della durabilità meccanica dei pellet

Per calcolare contenuto idrico, potere calorifico e contenuto in ceneri del pellet si è prima proceduto alla sua macinazione tramite mulino a martelli. Poi si sono seguiti gli stessi passaggi già descritti in precedenza per il cippato: per la valutazione del contenuto idrico si è impiegata l'equazione 5.2, per il contenuto in ceneri la 5.4, per il potere calorifico la 5.5.

5.5 Analisi su miscele di legni

Sono stati effettuati diversi studi focalizzati sulla ricerca della miscela ideale di biomasse per la produzione di pellet di buona qualità, mescolando sia parti diverse della stessa specie (legno, corteccia e aghi) che specie diverse. I miscugli di diverse materie prime hanno buoni risultati sulle caratteristiche meccaniche del pellet, la cui durabilità risulta migliorata; il potere calorifico dei pellet così ottenuti, invece, rimane simile a quello dei materiali di partenza (Gil *et al*., 2010).

Variando perciò il contenuto di corteccia e di aghi nelle miscele per pellet, le caratteristiche che vengono principalmente influenzate sono durabilità meccanica, potere calorifico e contenuto in ceneri. Questi valori crescono all'aumentare della percentuale di corteccia nella miscela; tuttavia l'aspetto che più influenza la qualità del pellet, in modo negativo specialmente per i piccoli utenti, è l'alto contenuto di ceneri, la cui eccessiva sedimentazione può provocare problemi nella circolazione dell'aria all'interno delle stufe domestiche.

Il pellet con alto contenuto di corteccia, d'altra parte, può essere impiegato senza lo stesso problema negli impianti industriali che sono dotati di caldaie la cui camera di combustione viene meccanicamente liberata dai depositi di cenere. Sviluppi mirati a questo scopo, come ad esempio griglie mobili che consentono un miglioramento nel processo di rimozione delle ceneri dalla griglia, sono sempre più richiesti dal mercato (Francescato *et al*., 2012a).

Per poter verificare queste osservazioni si è studiata l'influenza che la presenza di corteccia e aghi ha sul potere calorifico e sul contenuto in ceneri delle miscele di abete rosso; che influenza abbia la corteccia di faggio sulla miscela costituita da corteccia e legno di faggio; e infine quale apporto in ceneri e potere calorifico potrebbe apportare un'altra specie legnosa presente nei nostri territori, il larice, a miscele con le altre due specie.

Per fare ciò si sono svolte le analisi di contenuto in ceneri (equazione 5.4) e potere calorifico (equazione 5.5) sui seguenti materiali, ottenuti in luoghi e tempi differenti da quelli abbattuti appositamente nell'ambito di questo lavoro.

- corteccia di abete rosso;
- ramaglia senza aghi di abete rosso;
- ramaglia con aghi di abete rosso;
- aghi di abete rosso;
- legno di faggio scortecciato;
- corteccia di faggio;
- pianta intera di larice;
- corteccia di larice;
- legno di larice.

Le analisi su questo materiale saranno poi confrontate con quelle effettuate sui campioni impiegati in precedenza, valutando la possibilità di modificare la qualità del pellet ottenuto con la pellettizzazione descritta nel paragrafo 5.3.
Tutti di dati raccolti durante le analisi sui campioni di cippato e su quelli corrispondenti di pellet e sui campioni delle altre essenze sono stati trasferiti in un foglio Excel per la loro trattazione e valutazione in funzione degli obiettivi preposti nel paragrafo 4.

6 Risultati e discussione

6.1 Risultati e discussione delle analisi sul cippato

Per quanto riguarda la definizione delle dimensioni del campione iniziale, tutte e cinque le tipologie di cippato sono risultate rientranti nella categoria dimensionale P31.5 (Tabella 6.1). Possedevano perciò una distribuzione granulometrica concentrata per un minimo di 75% tra gli 8 e i 31.5 mm e una frazione di particelle fini minore dell'8% del peso totale del campione (Tabella 3.5).

Con un cippato di queste dimensioni la perdita di acqua durante il processo di stagionatura è stata in media del 35.59% (Grafico 6.1). Il contenuto idrico iniziale era compreso per tutti i materiali tra il 40 e il 50%, valore di norma riscontrato in legname recentemente abbattuto, mentre quello finale del cippato stagionato si è attestato sull'8.6%, risultato dipendente dall'umidità atmosferica presente nel luogo di stoccaggio.

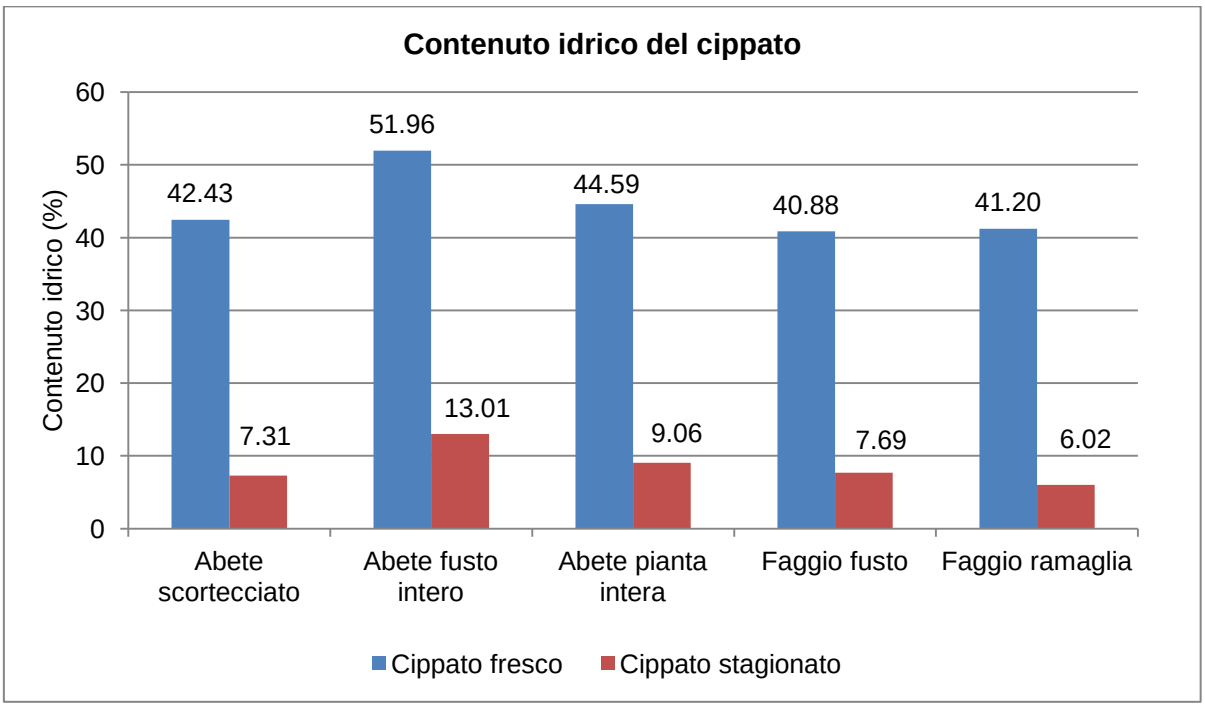


Grafico 6.1 Contenuto idrico del cippato fresco e stagionato

La misurazione della massa volumica sterica sul cippato di legno fresco ha prodotto per l'abete rosso un valore medio di 315 kg/m$^3_{sterico}$ e per il faggio di 423 kg/m$^3_{sterico}$. Tali risultati sono conformi alle aspettative, considerato che la massa volumica solida dell'abete rosso al 40% di contenuto idrico è in media 631 kg/m^3 mentre il faggio con lo stesso contenuto idrico

ha una massa volumica solida di 930 kg/m^3, notevolmente più elevato (Francescato *et al*., 2012b); ciò si riflette su una corrispondente differente massa volumica apparente sul tal quale.

Passando ai risultati ottenuti dalle analisi sul cippato per la determinazione del contenuto in ceneri e del potere calorifico, si premette che i risultati di riferimento devono essere quelli relativi al cippato fresco, in quanto i valori appartenenti al legno stagionato sono relativi alle particolari condizioni in cui la stagionatura viene effettuata. Nel caso presente, quindi, tali condizioni si riferiscono a campioni stoccati in un ambiente coperto e ben areato in cassoni con aperture laterali, periodicamente riversati a terra.

Il contenuto in ceneri dei cinque campioni cippato fresco è riportato in Tabella 6.2. La classificazione rispetto alle ceneri è analoga, secondo la UNI EN 14961-1, a quella per il pellet (Tabella 3.3). Il cippato di abete scortecciato presenta un contenuto piuttosto basso di ceneri (classe A0.5), trattandosi di legno puro; i fusti non scortecciati di abete e faggio appartengono entrambi alla classe A1.0, più elevata, a causa della presenza di corteccia. L'incremento del contenuto in ceneri a fronte di un aumento della percentuale di corteccia è già stato osservato da Filbakk *et al* (2011) in piante di pino silvestre.

Nella ramaglia di faggio il rapporto tra legno puro e corteccia è ancora inferiore, il contenuto in ceneri ha quindi il valore elevato di 2.16%. Anche la pianta intera di abete presenta un alto contenuto di ceneri (2.1%): questo è in parte dovuto alla normale presenza di corteccia, in parte a causa della campionatura.

Infatti è possibile incorrere nel rischio, scegliendo un campione di cippato di abete rosso per macinarlo e analizzarlo, di prelevare dal mucchio di cippato non una miscela bilanciata di legno, corteccia e aghi, bensì una maggiore quantità, rispetto agli altri due materiali, di rametti con gli aghi ancora attaccati. Il contenuto di aghi più elevato del normale è quindi la ragione di una percentuale sul secco di ceneri così marcatamente maggiore del fusto con corteccia di abete.

Dalle analisi sul cippato stagionato emerge un aumento del contenuto in ceneri (Tabella 6.3; Grafico 6.2) dovuto alla fermentazione e conseguente perdita della sostanza organica, che difficilmente può essere impedita del tutto seppur aerando il cippato. Con la fermentazione, a parità di peso il materiale stagionato ha una minore parte di sostanza organica e una maggiore percentuale di ceneri. L'aumento non si riscontra per il fusto intero di abete, la cui percentuale di ceneri è rimasta sostanzialmente la stessa, fatto spiegabile poiché il cassone di questo materiale è stati ribaltato a terra precedentemente agli altri.

Nella pianta intera di abete, invece, il contenuto in ceneri diminuisce sensibilmente. La motivazione risiede nel fatto che prima di effettuare le analisi sul cippato stagionato è stato ridotto in segatura tutto il contenuto dei cassoni; quindi il cippato della pianta intera di abete è

stato completamente mescolato, e le quantità di aghi, corteccia e legno puro correttamente bilanciate tra loro riducendo così l'inevitabile errore di campionamento.

Riguardo il potere calorifico, in generale quello calcolato sul legno tal quale è inferiore al potere calorifico calcolato sul secco.
Per il cippato fresco la differenza tra potere calorifico superiore tal quale e sul secco è in media di 9.32 MJ/kg per l'abete rosso e di 7.97 MJ/kg per il faggio.
Il potere calorifico sul secco è intorno a 19.41 MJ/kg per il faggio, con un valore poco più elevato per la ramaglia di faggio a causa della presenza di corteccia. L'abete scortecciato e fusto intero presentano un potere calorifico medio di 20.08 MJ/kg mentre la pianta intera di abete 20.20 MJ/kg.
Per apprezzare meglio la differenza di potere calorifico tra le diverse tipologie di legno è utile osservare il potere calorifico superiore senza ceneri. Infatti un alto contenuto di ceneri abbassa il valore di potere calorifico calcolato dalla bomba calorimetrica, perché a parità di peso la sostanza bruciabile risulta inferiore. Questo passaggio consente di rendere più marcata la differenza di potere calorifico tra fusto (inferiore) e ramaglia di faggio (maggiore) e tra le tre tipologie di abete rosso. Senza tenere conto delle ceneri l'abete scortecciato è meno calorifico del fusto con la corteccia che a sua volta ha un valore inferiore della pianta intera. Il risultato è valido in quanto si ricorda che per il cippato fresco della pianta intera di abete si è campionata una quantità soprannumeraria di aghi, responsabili di un eccessivo contenuto in ceneri ma allo stesso tempo di un elevato potere calorifico, grazie alla presenza di resina.
Dopo la stagionatura non si registrano differenze apprezzabili (superiori ai 0.120 MJ/kg) rispetto al cippato fresco (Grafico 6.3), tranne nel caso della pianta intera di abete, il cui cippato stagionato è inferiore rispetto a quello fresco di 218 J/kg. Il motivo è lo stesso già esplicato per il contenuto in ceneri: per le analisi sul cippato secco c'è stato un miglior bilanciamento tra legno, corteccia e aghi e la quantità di questi ultimi è diminuita, causando l'abbassamento di potere calorifico.

Materiale	Classificazione distribuzione granulometrica	Massa volumica apparente sul tal quale
	UNI EN 14961-4:2011	kg/m^3_{stero}
Abete scortecciato	P31.5	286
Abete fusto intero	P31.5	320
Abete pianta intera	P31.5	339
Faggio fusto	P31.5	428
Faggio ramaglia	P31.5	419

Tabella 6.1 Caratteristiche dimensionali del cippato analizzato

Materiale	Ceneri	Classe di appartenenza ceneri	Potere calorifico superiore stimato tal quale	Potere calorifico superiore sul secco	Potere calorifico superiore senza ceneri
(Cippato fresco)	% sul secco	UNI EN 14961-1:2010	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Abete scortecciato	0.3	A0.5	11.56	20.08	20.15
Abete fusto intero	0.8	A1.0	9.64	20.07	20.23
Abete pianta intera	*2.1*	*A3.0*	*11.19*	*20.20*	*20.46*
Faggio fusto	0.77	A1.0	11.45	19.4	19.55
Faggio ramaglia	2.16	A3.0	11.48	19.52	19.95

Tabella 6.2 Risultati delle analisi di contenuto in ceneri e potere calorifico sul cippato fresco. In corsivo i risultati condizionati dal contenuto eccessivo di aghi causato dalla modalità di campionamento

Materiale	Ceneri	Potere calorifico superiore stimato tal quale	Potere calorifico superiore sul secco
(Cippato stagionato)	% sul secco	MJ/kg	MJ/kg
Abete scortecciato	0.68	18.64	20.11
Abete fusto intero	0.74	17.44	20.04
Abete pianta intera	1.56	18.17	19.94
Faggio fusto	1.18	18.00	19.50
Faggio ramaglia	2.55	18.43	19.61

Tabella 6.3 Risultati delle analisi di contenuto in ceneri e potere calorifico sul cippato stagionato

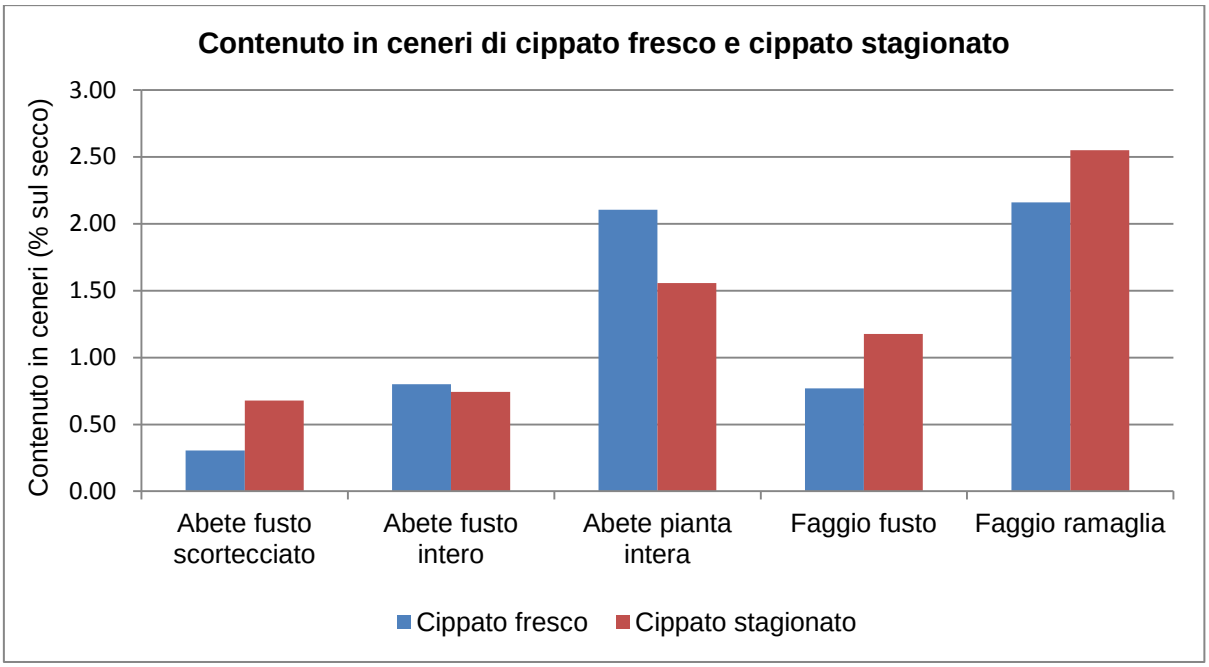


Grafico 6.2 Confronto tra i contenuti in ceneri del cippato fresco e stagionato

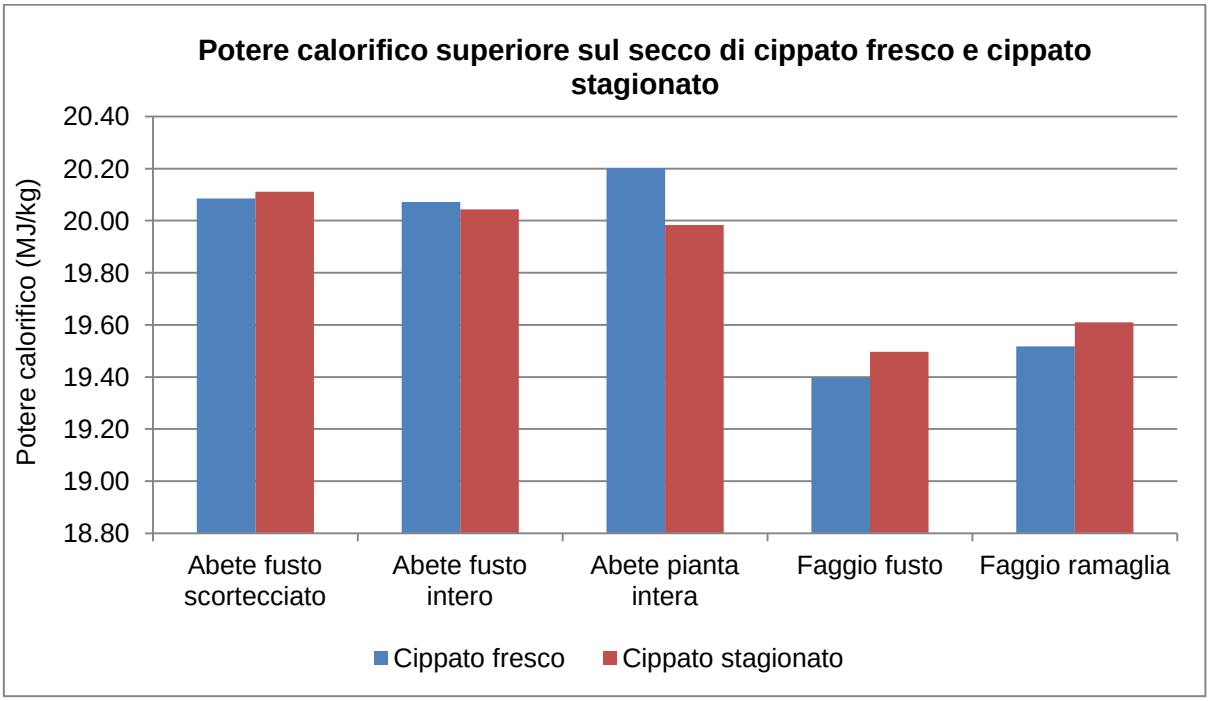


Grafico 6.3 Confronto tra i poteri calorifici superiori del cippato fresco e stagionato

6.2 Risultati e discussione delle analisi sul pellet

Dal cippato così caratterizzato i pellet ottenuti risultano classificabili in classi differenti secondo la norma UNI EN 14961-2.

I pellet di abete scortecciato possono entrare nella classe A1 se non fosse per un'anomalia osservata: contenuto in ceneri, potere calorifico, massa volumica sterica e le altre caratteristiche determinanti rientrano negli intervalli previsti dalla norma, tranne il valore di durabilità meccanica, insolitamente basso (95.88%). Poiché la durabilità degli altri pellet prodotti è da considerarsi normale, con valori intorno al 98.20%, ed essendo stati tutti prodotti nelle stesse condizioni, è da escludere che vi sia stato un condizionamento della durabilità del pellet di abete scortecciato causato da fattori di e post produzione (brusche variazioni di umidità, raffreddamento troppo veloce (Wilson, 2010), trasporto e manipolazione inadeguati). Si può dunque affermare che il valore inaspettato dipenda da caratteristiche proprie del legno impiegato. Nel caso dei pellet di fusto di abete con corteccia e di pianta intera di abete la durabilità meccanica è mitigata dalla presenza di corteccia che d'altro canto comporta un aumento del contenuto in ceneri. Si sconsiglia dunque una miscela di abete scortecciato con corteccia, prediligendo invece l'aggiunta di additivi durante la produzione, quali ad esempio amido di mais, per il miglioramento della durabilità meccanica e la conseguente diminuzione di particelle fini, aspetto che gli varrebbe il pieno collocamento nella classe qualitativa A1.

I pellet ricavati da fusto con corteccia e da pianta intera di abete e dal fusto del faggio rientrano nella categoria A2, intermedia; dalla ramaglia di faggio si ottengono invece pellet di classe B, di minore qualità rispetto alle altre due, ma sempre con un contenuto in ceneri accettabile. Si tratta in tutti i casi di pellet adatto anche ad un uso non industriale, ma comunque preferibilmente impiegabile in grandi impianti. Secondo la norma 14961-1, i biocombustibili per uso non industriale sono quelli raccomandati per un utilizzo in piccoli impianti domestici o di edifici pubblici.

Valutando più in particolare le caratteristiche dei pellet (Tabella 6.4; Grafico 6.4; Grafico 6.5), emerge che quelli ottenuti dal fusto intero e dalla pianta intera di abete sono simili sotto diversi aspetti; rientrano infatti nella medesima classe A2.

Così come tutti gli altri pellet prodotti sono classificati nella classe dimensionale D06, senza presentare alcuna sovralunghezza (L>40 mm). La loro densità è pari a 1.34 kg/m^3, uguaglianza significativa anche statisticamente ($p<0.05$ con test di Tukey-Cramer). Le due masse volumiche sono quasi identiche: 679 kg/m^3_{stero} per il fusto con corteccia e 676 kg/m^3_{stero} per la pianta intera. La durabilità è del 98.05% per il fusto intero e 98.51% per la pianta intera, il risultato più alto di durabilità meccanica, corrispondente al più basso

contenuto di particelle fini. Il contenuto idrico misurato immediatamente dopo la produzione risulta del 8.40% per il fusto intero di abete e del 8.97% per la pianta intera. Un'altra similitudine riguarda il potere calorifico potere superiore sul secco dei due pellet, che vale per 20.13 MJ/kg per l'abete fusto intero e 20.16 MJ/kg per l'intera pianta ($p<0.05$).

Le due miscele si differenziano nel contenuto in ceneri ($p<0.05$), che appare sensibilmente più alto nella pianta intera di abete, come già era per il cippato. La percentuale di ceneri sul secco è pari a 0.82% per il fusto intero, questa si alza fino a 1.38% per la pianta intera.

L'abete scortecciato ha consentito la produzione di pellet con lo stesso elevato potere calorifico (20.16 MJ/kg), che i test statistici hanno confermato essere in linea con i valori degli altri due campioni di abete rosso; ma con un contenuto in ceneri meno elevato, pari a 0.62% sul secco, il risultato migliore tra i pellet prodotti sperimentalmente, determinante per la potenziale classificazione A1. La massa volumica è vicina a quella degli altri due pellet di abete (1.35 kg/m^3); la massa volumica sterica è risultata essere di 717 kg/m^3_{stero}, il valore più alto tra tutti i pellet analizzati.

Passando ai pellet di faggio, dal confronto nel grafico 6.4 risalta il fatto che possiedono entrambi un potere calorifico inferiore all'abete rosso, 19.23 MJ/kg per il fusto con corteccia e 19.52 MJ/kg per la ramaglia; test statistici confermano la significatività della differenza con i pellet di abete rosso e dell'uguaglianza tra i due ($p<0.05$). Mentre però i pellet prodotti dal fusto presentano un contenuto di ceneri sul secco di 1.21%, quelli ottenuti dalla ramaglia di faggio presentano il contenuto in ceneri più alto con un valore di 2.45%. Il loro contenuto idrico si mantiene compreso tra quello dell'abete scortecciato e quello del fusto intero e della pianta intera, con una media di 6.75%. Per quanto riguarda le lunghezze dei pellet di faggio, sono di pochi mm superiori a quelle di fusto intero e pianta intera di abete; mentre la durabilità meccanica, la massa volumica e la massa volumica sterica sono di poco inferiori.

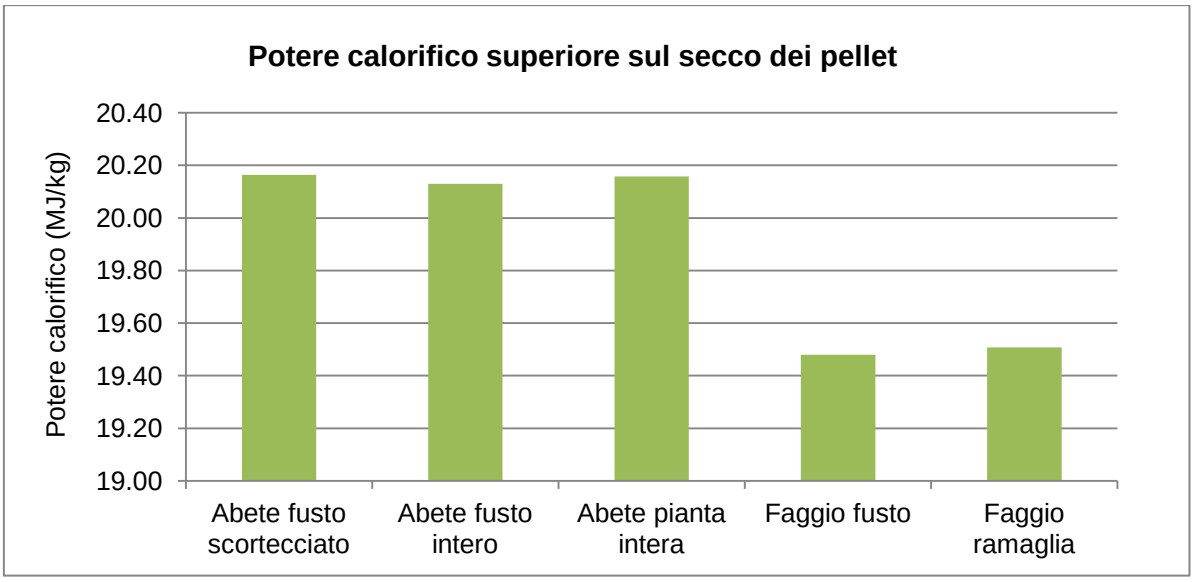


Grafico 6.4 Potere calorifico superiore sul secco in MJ/kg delle cinque tipologie di pellet prodotte

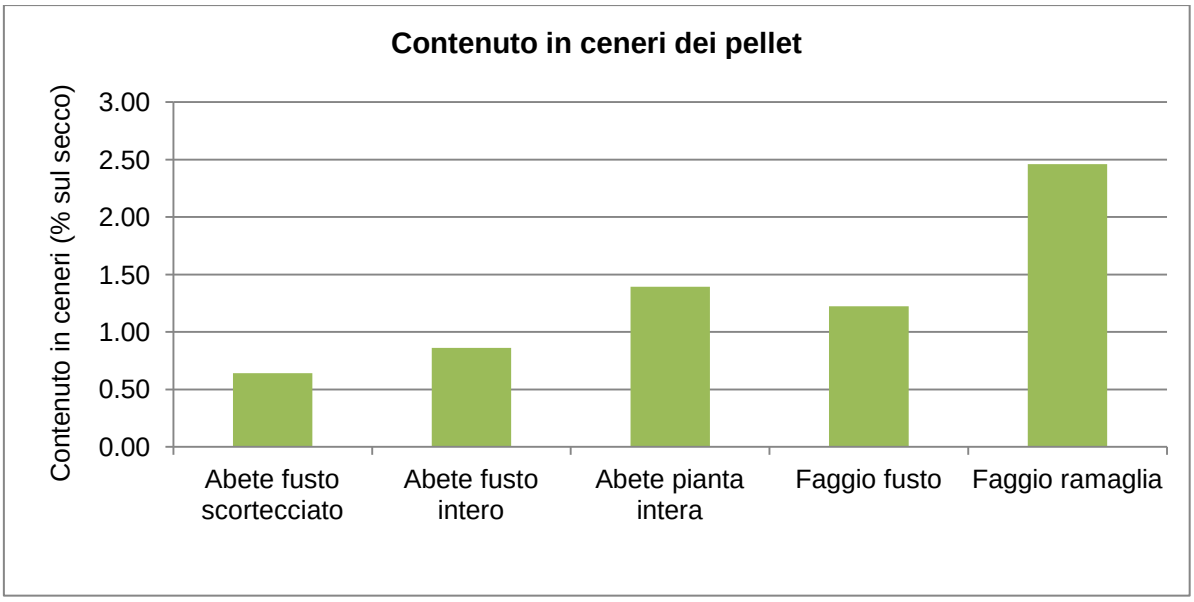


Grafico 6.5 Contenuto in ceneri delle cinque tipologie di pellet prodotte

Materiale		Abete scortecciato	Abete fusto intero	Abete pianta intera	Faggio fusto	Faggio ramaglia
Classe di appartenenza	UNI EN 14961-2:2011	(A1)	A2	A2	A2	B
Contenuto idrico	%	5.20	8.40	8.97	6.80	6.70
Ceneri	% sul secco	0.62	0.82	1.38	1.21	2.45
Classe di appartenenza ceneri	UNI EN 14961-1:2010	A0.7	A1.0	A2.0	A1.5	A3.0
Potere calorifico superiore stimato tal quale	MJ/kg	19.12	18.44	18.35	18.16	18.20
Potere calorifico superiore sul secco	MJ/kg	20.16	20.13	20.16	19.23	19.52
Lunghezza	mm	17	20	20	21	22
Diametro	mm	5	5	5	5	5
Durabilità	%	95.88	98.05	98.51	98.20	98.05
Densità singoli pellet	kg/m^3	1.35	1.34	1.34	1.32	1.29
Massa volumica apparente sul tal quale	kg/m^3stero	717	679	676	672	659

Tabella 6.4 Caratteristiche dei pellet prodotti sperimentalmente. L'abete scortecciato rientra nella classe qualitativa A1 a meno della durabilità meccanica

Si possono confrontare i pellet prodotti sperimentalmente con un pellet medio, le cui caratteristiche sono mediate tra quelle di 51 diversi pellet commerciali (Tabella 6.5). Il contenuto idrico dei pellet prodotti dal fusto e dalla ramaglia di faggio corrisponde alla media, ma anche quelli di abete scortecciato e del fusto e della pianta intera sono compresi tra il valore minimo e il valore massimo riscontrati, pur essendo il primo leggermente inferiore e i secondi leggermente superiori alla media.

Riguardo alle dimensioni i pellet prodotti nell'ambito di questa tesi sono più lunghi rispetto alla lunghezza media e inferiori di diametro, ma non si tratta di un particolare svantaggio in quanto sono tutti compresi entro gli estremi della classe dimensionale D06, senza presentare alcuna sovralunghezza potenzialmente limitante per l'uso in caldaie ad alimentazione automatica.

Anche per la densità dei singoli pellet si osserva un valore leggermente superiore nei pellet sperimentali rispetto alla media di quelli commerciali analizzati, tranne per i pellet ottenuti dalla ramaglia di faggio, che corrispondono. Vale la stesso per quanto riguarda la massa volumica sterica, condizionata appunto dalla densità delle singole particelle. Si tratta di un aspetto favorevole in quanto un'elevata massa volumica sterica influenza positivamente la densità energetica del materiale.

Confrontando le percentuali di cenere, i pellet sperimentali che si allontanano negativamente dal valore corrispondente del pellet medio sono quelli ricavati dalla pianta intera di abete rosso e i due prodotti dal faggio, pur essendo stati registrati pellet commerciali con un contenuto in ceneri superiore al 2.45% proprio dei pellet di ramaglia di faggio.

Infine, mentre tutti e tre i pellet prodotti da abete rosso hanno un potere calorifico superiore alla media, i due di faggio presentano una capacità calorifica inferiore.

Questo aspetto si ripercuote sulla densità energetica sterica (Tabella 6.6; Grafico 6.6). Considerato il valore medio del pellet commerciale di 13.40 $10^3 MJ/m^3_{stero}$, i pellet di abete scortecciato gli sono nettamente superiori, grazie al forte potere calorifico e all'elevata massa volumica apparente. Seguono i pellet prodotti con fusto intero e pianta intera di abete, entrambi superiori alla media; mentre sono inferiori i pellet di fusto intero e ramaglia di faggio, penalizzati, soprattutto il secondo, dalla non elevata densità sterica, ed entrambi dal potere calorifico non eccelso. Si tratta in ogni caso di valori ancora apprezzabili e superiori ad alcuni pellet destinati al mercato.

Contenuto idrico	%	6.88	(3.34 – 11.96)
Lunghezza	mm	12.82	(7.13 – 21.77)
Diametro	mm	6.27	(5.94 – 6.89)
Densità dei singoli pellet	kg/m^3	1.28	(1.18 – 1.34)
Massa volumica apparente sul tal quale	kg/m^3_{stero}	670.94	(503.69 – 762.67)
Durabilità meccanica	%	98.19	(91.13 – 99.61)
Contenuto in ceneri sul secco	% sul secco	0.90	(0.32 – 3.06)
Potere calorifico superiore sul secco	MJ/kg	19.97	(19.03 – 22.33)
Densità energetica	$10^3MJ/m^3_{stero}$	13.40	(10528 – 17028)

Tabella 6.5 Valori medi per 51 tipologie di pellet commerciale analizzate. Tra parentesi il valore minimo e il valore massimo riscontrati per ogni caratteristica

Densità energetica sterica ($10^3MJ/m^3_{stero}$)				
Abete scortecciato	**Abete fusto intero**	**Abete pianta intera**	**Faggio fusto**	**Faggio ramaglia**
14.45	13.67	13.62	12.93	12.86

Tabella 6.6 Densità energetica, in $10^3MJ/m^3_{stero}$, dei pellet sperimentali. Prodotto tra potere calorifico superiore sul secco e massa volumica sterica

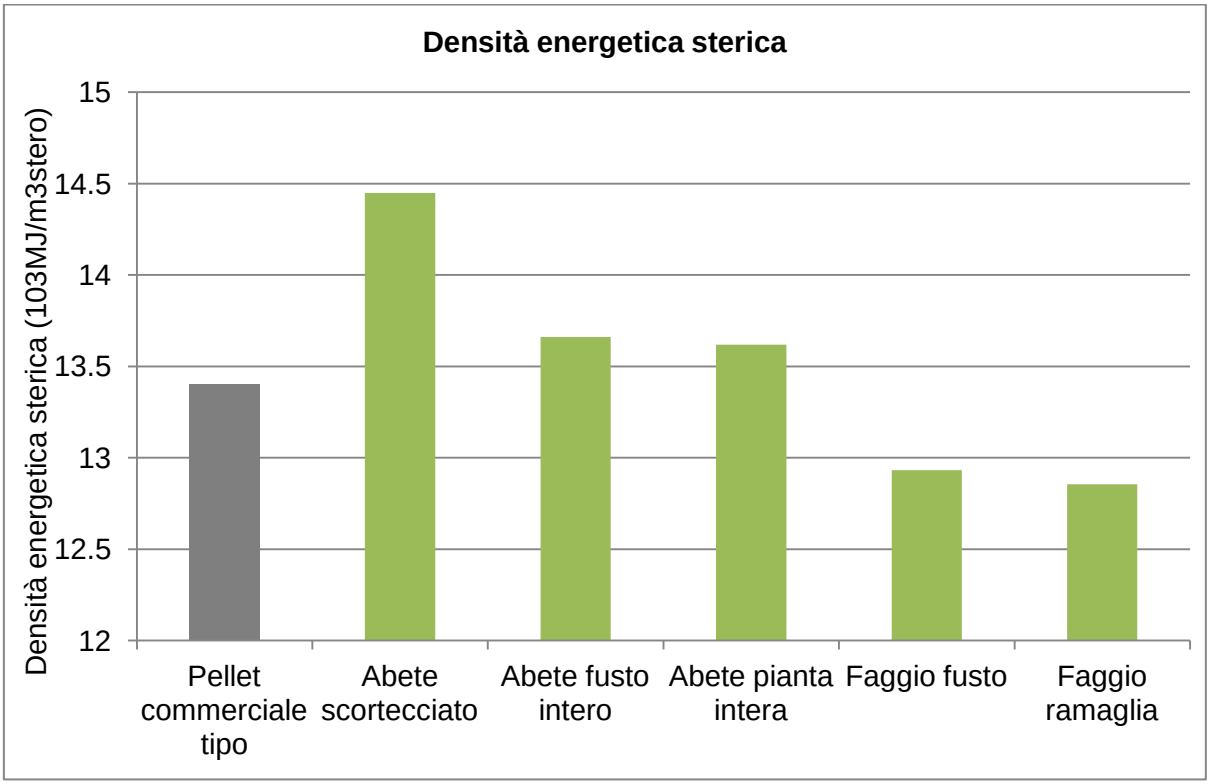


Grafico 6.6 Densità energetica sterica dei pellet sperimentali

6.3 Risultati e discussione delle analisi sui materiali per miscele di legni

Vengono valutati infine l'apporto in ceneri e potere calorifico forniti dalle diverse componenti vegetali delle specie legnose, impiegate nella pellettizzazione, abete rosso e faggio, e del larice.

Nella Tabella 6.7 e nei grafici Grafico 6.7 e Grafico 6.8 sono riportati i valori in questione insieme ai risultati già discussi del cippato fresco dal quale è poi stato prodotto il pellet, per un confronto più completo.

Per tutte e tre le specie legnose è la corteccia che fornisce il maggior apporto di ceneri rispetto alle altre parti della pianta: 7.08% l'abete rosso, 1.60% il larice, 8.89% il faggio. Nel fusto intero, tuttavia, questo valore si abbassa notevolmente poiché rispetto al legno la percentuale di corteccia è bassa. Anche gli aghi di abete rosso contengono una quantità importante di ceneri, il 3.90%.

L'elevato contenuto in ceneri comporta un abbassamento in alcuni casi rilevante (come nel caso della corteccia di abete rosso e di faggio) del potere calorifico in confronto a quello potenzialmente raggiungibile senza considerare l'apporto delle ceneri (potere calorifico superiore senza ceneri).

Ivask (1999) aveva rilevato che nell'abete rosso il potere calorifico senza ceneri era, nell'ordine, legno < aghi < corteccia; mentre in questo caso la sequenza è legno < corteccia < aghi. Questa diversità può essere prodotta da cause differenti, la cui principale è di incerta individuazione; si può trattare di diversi contenuti di lignina nelle varie piante (White, 1986), o più in generale dalle diverse condizioni stazionali di crescita, o ancora dalle particolari circostanze di stoccaggio e stagionatura.

In ogni caso, non solo per l'abete rosso ma anche per il faggio e il larice, il legno puro presenta il contenuto in ceneri minore rispetto agli altri organi della pianta; in questo senso il larice è al primo posto, seguito dall'abete rosso. Il legno di quest'ultimo ha il più alto contenuto energetico fra le tre specie considerate (20.15 MJ/kg, potere calorifico superiore senza ceneri), con il faggio che anche in questo caso presenta il valore meno favorevole (18.77 MJ/kg) e il larice in posizione intermedia (19.56 MJ/kg).

Si dovrebbe quindi provare a regolare il contenuto in ceneri dei pellet di faggio, abete con corteccia e abete intero. Già Lehtikangas (2001) era giunto ad una simile conclusione in riferimento a pellet ottenuti da corteccia e residui di lavorazione forestale misti di due tipiche piante presenti in Svezia, l'abete rosso e il pino silvestre. Li aveva infatti giudicati fattibili specialmente se fosse stato controllato il contenuto in ceneri. Questo potrebbe essere fatto idealmente riducendone il contenuto di corteccia, che pur fornendo un'elevata energia causa una grande quantità di ceneri.

Nell’abete rosso una scortecciatura sommaria sarebbe possibile, anche direttamente in bosco, pratica che potrebbe essere vista con favore anche in un’ottica di rilascio di biomassa al suolo. Per l’abete rosso intero, inoltre, potrebbe risultare utile alla riduzione delle ceneri il ridimensionamento del contenuto di aghi: questo sarebbe fattibile tramite lo stoccaggio in cassoni o simili con un fondo a griglia che permetta la caduta a terra degli aghi durante il processo di stagionatura.

Tuttavia nella pratica delle utilizzazioni forestali il faggio non viene scortecciato e molto raramente si taglia con l’*harvester* che toglie in parte la corteccia. La soluzione potrebbe perciò essere data dalla mescolanza del faggio con il larice, che innalzerebbe inoltre il potere calorifico rispetto ai pellet di puro faggio. Il larice, infatti, oltre ad avere un bassissimo contenuto in ceneri nel legno, ne ha relativamente poche anche nella corteccia, a fronte di un notevole potere calorifico.

Specie	Parte della pianta	Ceneri (%)	Potere calorifico superiore sul secco (MJ/kg)	Potere calorifico superiore senza ceneri (MJ/kg)
Abete rosso	*fusto scortecciato*	*0.30*	*20.08*	*20.15*
	fusto con corteccia	*0.8*	*20.07*	*20.23*
	pianta intera	*2.1*	*20.2*	*20.63*
	ramaglia senza aghi	2.12	21.07	21.53
	ramaglia con aghi	2.73	21.37	21.97
	ramaglia fine con aghi	3.12	21.05	21.73
	aghi	3.90	20.78	21.63
	corteccia	7.08	19.53	21.02
Faggio	legno	0.55	18.67	18.77
	fusto con corteccia	*0.77*	*19.3*	*19.45*
	ramaglia	*2.16*	*19.52*	*19.95*
	corteccia	8.89	19.38	21.27
Larice	legno	0.10	19.54	19.56
	pianta intera	1.23	20.44	20.69
	corteccia	1.60	21.90	22.25

Tabella 6.7 Contenuto in ceneri e potere calorifico superiore delle miscele di legni di abete rosso, faggio e larice; in corsivo i valori già discussi, relativi al cippato fresco

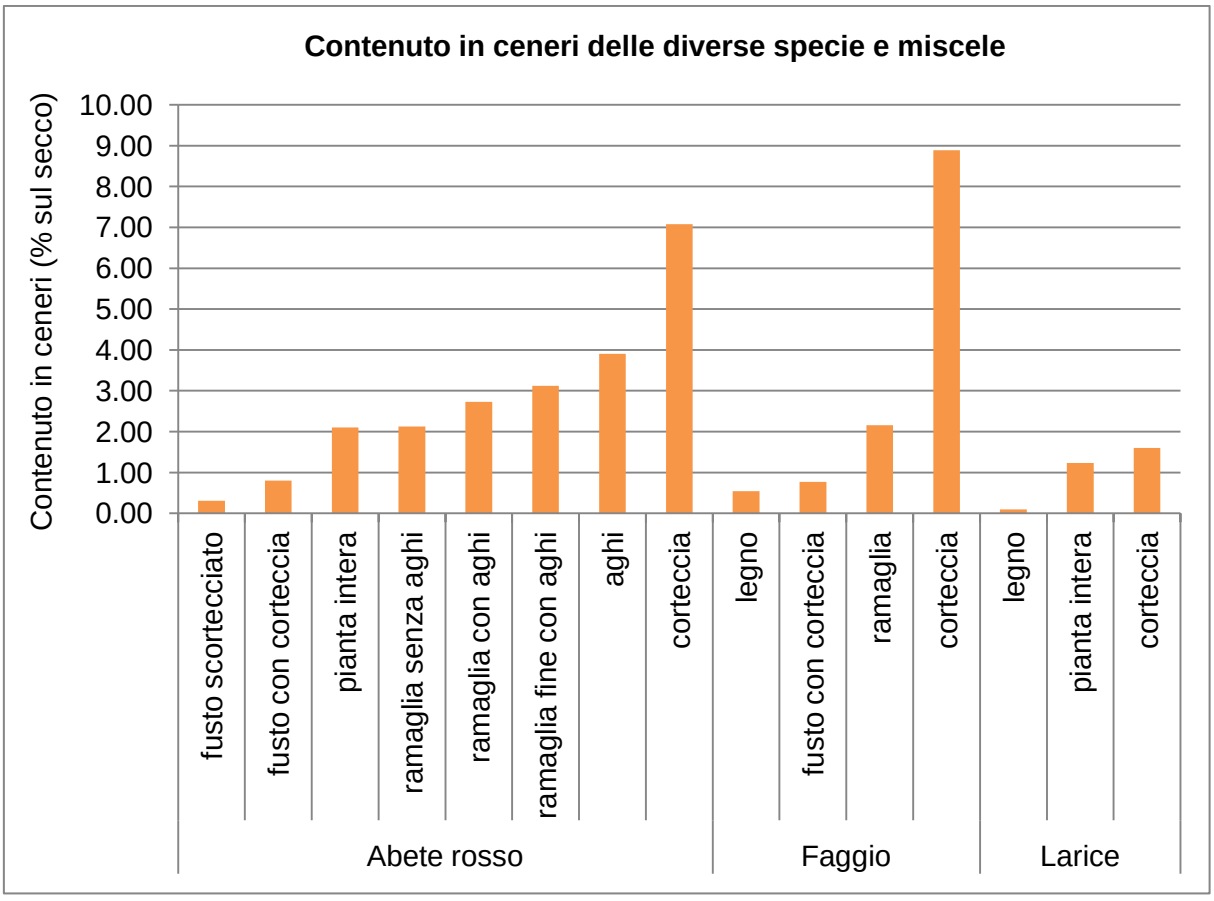


Grafico 6.7 Rappresentazione grafica del contenuto in ceneri delle miscele di legni di abete rosso, faggio e larice

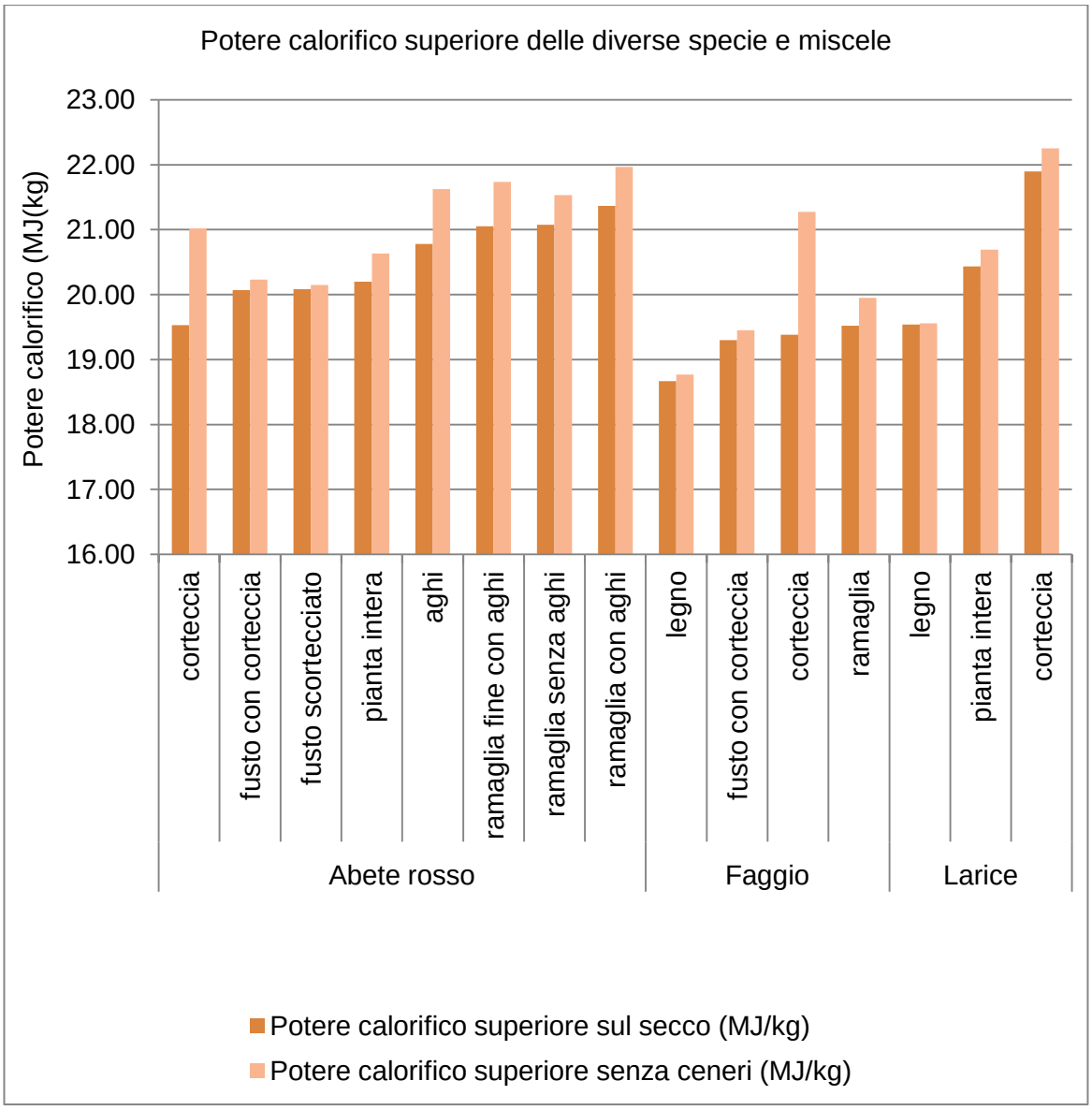


Grafico 6.8 Rappresentazione grafica del potere calorifico superiore e del potere calorifico superiore senza ceneri delle miscele di legni di abete rosso, faggio e larice

7 Conclusioni

Tutti e cinque i tipi di pellet prodotti sono di buona o accettabile: il migliore è quello ottenuto da legno di abete scortecciato, classificabile A1 secondo la norma UNI EN 14961-2:2011 tranne che per il valore di durabilità, facilmente migliorabile con l'aggiunta di additivi. Nella classe A2 rientrano il pellet da fusto intero di abete, che è secondo in quanto a contenuto di ceneri e potere calorifico, e quello ottenuto dall'albero intero di abete e dal fusto con corteccia del faggio. In ultimo, il pellet prodotto con ramaglia di faggio rientra nella classe di qualità B.

Si può quindi concludere che secondo le analisi fin quei eseguite possono tutti essere destinati al mercato, possibilmente miscele adatte al miglioramento della qualità dei pellet nelle categorie meno elevate tramite il controllo del contenuto in ceneri.

È però necessaria per una classificazione più precisa del pellet sia lo studio della fusibilità delle ceneri che la determinazione della quantità dei microelementi (zolfo, azoto e cloro) in essi contenuti e responsabili, insieme alle ceneri, del livello di emissioni nocive prodotte durante la combustione.

Se i requisiti qualitativi dettati dalla normativa in materia fossero pienamente rispettati, potrebbe esserci la possibilità concreta di fornire un più alto valore aggiunto e un rinnovato interesse agli assortimenti di bassa qualità, valorizzandoli come risorsa di materia prima nella catena di produzione del pellet. Risultati positivi potranno risultare utili in successivi studi sulla realizzabilità anche dal punto di vista economico di una catena di produzione di pellet che sia approvvigionata da residui e assortimenti forestali di scarsa e scarsissima qualità. Verrebbero così ad avere un valore aggiunto, e in tal modo si restituirebbe una funzione produttiva alla moltitudine di boschi abbandonati e invecchiati, anche nell'ottica di una necessità sempre maggiore dello sfruttamento delle risorse rinnovabili.

8 Bibliografia

2006. Decreto legislativo 03.04.2006 n. 152. Norme in materia ambientale. Gazzetta Ufficiale n. 88, supplemento ordinario n. 96, 14 aprile 2006

AEBIOM – European Biomass Association. 2008. A Pellet Roadmap for Europe.

AEBIOM – European Biomass Association. 2011. Annual Statistical Report on the contribuition of Biomass to the Energy System in the EU27.

AEBIOM – European Biomass Association. 2012. European bioenergy outlook.

Ann P. 2009. Streamlined LCA of wood pellets: export and possible utilization in UBC boiler house.

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

Autori vari. 2006. Energia dalle biomasse - Le tecnologie, i vantaggi per i processi produttivi, I valori economici e ambientali, 48-52. Trieste, AREA Science Park

Autori vari. 2011. Guida alla normative tecnica di interesse per il settore del riscaldamento a biomassa. http://www.forestprogramme.com, CTI Energia e Ambiente.

Casal M. D., Gil M. V., Pevida C., Rubiera F. e Pis J. J. 2010. Influence of storage time on the quality and combustion behaviour of pine woodchips. *Energy* 35(7): 3066-3071

Filbakk T., Jirjis R., Nurmi J. e Høibø O. 2011. The effect of bark content on quality parameters of Scots pine (Pinus sylvestris L.) pellets. *Biomass and Bioenergy* 35(8): 3342-3349

Francescato V., Antonini E. e Zuccoli Bergomi L. 2008. Wood Fuel Handbook - Production, quality requirements and trading. Padova, AIEL Italian Agriforestry Energy Association

Francescato V., Paniz A. e Antonini E. 2012a. Moderne caldaie e impianti a legna, cippato e pellet. Padova, AIEL Italian Agriforestry Energy Association

Francescato V., Paniz A., Negrin M., Antonini E. e Zuccoli Bergomi L. 2012b. Legna, cippato e pellet – Produzione, requisiti qualitativi, compravendita. Padova, AIEL Italian Agriforestry Energy Association

Gil M. V., Oulego P., Casal M. D., Pevida C., Pis J. J. e Rubiera F. 2010. Mechanical durability and combustion characteristics of pellets from biomass blends. *Bioresource technology* 101(22): 8859-8867

Hansen M. e Jein A. 2009. English handbook for wood pellet combustion. Knowhill, National Energy Foundation

Hellrigl B. 2006. Elementi di xiloenergetica – Definizioni, formule, tabelle. Padova, AIEL Italian Agriforestry Energy Association

Hillring B. 2006. World trade in forest products and wood fuel. *Biomass and Bioenergy* 30(10): 815-825

ITABIA. 2013. Biocombustibili. http://www.itabia.it/

Ivask M. 1999. Caloric value of Norway spruce organs and its seasonal dynamics. Baltic Forestry, I: 44-49.

Jirjis R. 1995. Storage and drying of wood fuel. Biomass and Bioenergy 9(1-5): 181-190

Jirjis R. 2005. Effects of particle size and pile height on storage and fuel quality of comminuted Salix viminalis. Biomass and Bioenergy 28(2): 193-201

Johansson J., Liss J., Gullberg T. e Björheden R. 2006. Transport and handling of forest energy bundles—advantages and problems. Biomass and Bioenergy 30(4): 334-341

Junginger M., Faaij A., Björheden R. e Turkenburg W. C. 2005. Technological learning and cost reductions in wood fuel supply chains in Sweden. Biomass and Bioenergy 29(6): 399-418

Kärhä K. e Vartiamäki T. 2006. Productivity and costs of slash bundling in Nordic conditions. Biomass and Bioenergy 30(12): 1043-1052

Kofman P. D. 2010. The production of wood pellets. Coford connect 10: 1-6

Larsson S. H., Lestander T. A., Crompton D., Melin S. e Sokhansanj S. 2012. Temperature patterns in large scale wood pellet silo storage. *Applied Energy* 92(0): 322-327

Lehtikangas P. 2001. Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. *Biomass and Bioenergy* 20(5): 351-360

Lindqvist A. e Nilsson O. 2011. Hand injury from powered wood splitters: Machine safety, patterns of use and injury events. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics 17(2): 175-186

Lindroos O. 2008. The Effects of increased mechanization on time consumption in small-scale firewood processing. Silva Fennica 42(5): 791-805

Lindroos O., Aspman E. W., Lidestav G. e Neely G. 2008. Accidents in family forestry's firewood production. Accident Analysis and Prevention 40(3): 877-886

Morten T. H., Rosentoft A. J., Hayes S. e Patrick B. 2009. English handbook for wood pellet combustion

Paniz A. 2012. Guida all' acquisto di pellet di qualità. Padova, AIEL Italian Agriforestry Energy Association

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

Sikkema R., Steiner M., Junginger M., Hiegl W., Hansen M. T. e Faaij A. 2011. The European wood pellet markets: current status and prospects for 2020. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 5(3): 250-278

Spinelli R., Nati C., Sozzi L., Magagnotti N. and Picchi G. 2011. Physical characterization of commercial woodchips on the Italian energy market. *Fuel* 90(6): 2198-2202

Spinelli R., Magagnotti N. e Picchi G. 2012. A supply chain evaluation of slash bundling under the conditions of mountain forestry. Biomass and Bioenergy 36(0): 339-345

Telmo C. e Lousada J. 2011. Heating values of wood pellets from different species. Biomass and Bioenergy 35(7): 2634-2639

UNI EN 14774-1. 2009. Biocombustibili solidi. Determinazione dell'umidità - Metodo di essiccazione in stufa. Parte 1: Umidità totale - Metodo di riferimento

UNI EN 14775. 2010. Biocombustibili solidi. Determinazione del contenuto di ceneri

UNI EN 14778. 2011. Biocombustibili solidi. Campionamento

UNI EN 14918. 2010. Biocombustibili solidi. Determinazione del potere calorifico

UNI EN 14961-1. 2010. Biocombustibili solidi. Specifiche e classificazione del combustibile. Parte 1: Requisiti generali

UNI EN 14961-2. 2011. Biocombustibili solidi. Specifiche e classificazione del combustibile. Parte 2: Pellet di legno per uso non industriale

UNI EN 14961-4. 2011. Biocombustibili solidi. Specifiche e classificazione del combustibile. Parte 4: Cippato di legno per uso non industriale

UNI EN 15103. 2010. Biocombustibili solidi. Determinazione della massa volumica apparente

UNI EN 15149-1. 2011. Biocombustibili solidi. Determinazione della distribuzione granulometrica. Parte 1: Metodo del vaglio oscillante con apertura maggiore o uguale a 1 mm

UNI EN 15150. 2011. Biocombustibili solidi. Determinazione della massa volumica delle singole particelle

UNI EN 152010-1. 2010. Biocombustibili solidi. Determinazione della durabilità meccanica di pellet e di bricchette. Parte 1: Pellet

UNI EN 15234-1. 2011. Biocombustibili solidi. Assicurazione di qualità del combustibile. Parte 1: Requisiti generali

UNI EN 15234-2. 2012. Biocombustibili solidi. Assicurazione di qualità del combustibile. Parte 2: Pellet di legno per uso non industriale

UNI EN 15296. 2011. Biocombustibili solidi. Conversione dei risultati analitici da una base all’altra

UNI EN 16127. 2012. Biocombustibili solidi. Determinazione della lunghezza e del diametro del pellet

Wilson T. O. 2010. Factors affecting wood pellet durabilità. Department of Agricultural and Biological Engineering, Graduate School, Pennsylvania State University, Pennsylvania

Wood Pellet Association of Canada. 2011.http://www.pellet.org