



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dip. Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Corso di laurea in Scienze forestali ed Ambientali

**Analisi di pellet di materiale di origine forestale: effetto del contenuto
idrico e dell'aggiunta di additivi**

Relatore

Prof. Raffaele Cavalli

Correlatore

Dott. Stefano Grigolato

Dott. Andrea Sgarbossa

Laureando

Giacomo Corvaro

Matricola n.
1057493

ANNO ACCADEMICO 2013 – 2014

Il Dott. Giacomo Corvaro ha condiviso con il Prof. Raffaele Cavalli l'impostazione del lavoro, il modello sperimentale e la discussione dei risultati; ha condiviso con il Dott. Andrea Sgarbossa la metodologia e le procedure di analisi di laboratorio; ha condiviso con il Dott. Stefano Grigolato l'impostazione e l'analisi statistica dei dati; ha curato l'indagine bibliografica e la stesura del testo.

Indice

1 Riassunto	7
2 Abstract	9
3 Introduzione	11
3.1 Inquadramento generale del pellet e del suo mercato	11
3.2 Caratteristiche qualitative dei biocombustibili	15
3.3 La tecnica di produzione del pellet	21
3.4 La classificazione del pellet	26
4 Ringraziamenti	31
5 Obiettivi	33
6 Materiali e metodi	35
6.1 Raccolta e preparazione del materiale	35
6.2 Analisi della materia prima	36
6.3 Produzione del pellet	39
6.4 Analisi qualitative del pellet	55
6.5 Analisi statistica	69
7 Risultati	71
7.1 Risultati materiali non trattati	72
7.2 Risultati materiali trattati	78
8 Discussione dei risultati	85
9 Conclusioni	95
10 Bibliografia	99

1 Riassunto

Con l'obiettivo di valutare gli effetti sulla qualità del pellet dovuti all'utilizzo di una pellettatrice di piccole dimensioni, alla modifica del contenuto idrico e all'aggiunta di additivi alla materia prima, è stato sviluppato il presente lavoro. I materiali di partenza, ottenuti da diverse parti della pianta di due comuni specie forestali (Faggio e Abete rosso), hanno subito una specifica fase di condizionamento prima della pellettizzazione. La produzione del pellet è avvenuta utilizzando una macchina pellettatrice di tipo non industriale, adatta ad una produzione "hobbystico-domestica". Dopo la produzione, il pellet è stato analizzato in laboratorio seguendo le disposizioni previste dalle normative vigenti in materia di biocombustibili solidi. I parametri del pellet valutati sono stati il contenuto idrico, la massa volumica apparente, la durabilità e la densità. Sia la fase di condizionamento che quella relativa all'aggiunta di additivi si sono dimostrate efficaci nel condizionare le caratteristiche qualitative del prodotto finito. Per i materiali privi di additivi è stato il trattamento (umidificazione) il fattore principale che ha avuto effetto sulla qualità del pellet. Per l'unico materiale trattato, è stata invece l'aggiunta di additivi ad avere l'effetto più importante sulla qualità finale del pellet. In linea generale, la qualità del pellet può essere migliorata sfruttando la fase di condizionamento. Utilizzando la pellettatrice di piccole dimensioni, il processo produttivo si è dimostrato abbastanza efficiente seppur con alcune difficoltà organizzative delle operazioni di contorno alla pressatura. La produttività della macchina è in linea con i valori dichiarati dalla casa produttrice.

2 Abstract

With the aim to evaluate the effects on the pellet's quality due to the use of a small pellet machine, to the change of the moisture content and the addition of additives to the raw material, has been developed this work. The raw materials, obtained from different plant parts of two common tree species (beech and spruce) has been a specific stage of conditioning before pelletization. The production of the pellets was made using a non-industrial pellet machine, suitable for an "hobby-domestic" production. After production, the pellet was analyzed in the laboratory according to the rules contained in current legislation regarding solid biofuels. The parameters evaluated were the pellet moisture content, bulk density, durability and density. The humidification phase and the addition of additives have proved effective in influencing the quality of the finished product. For the materials without additives was the treatment (humidification), the main factor that has had an effect on the pellet's quality. For the only material treated, instead, was the addition of additives to have the most important effect on the final pellet's quality. In general, the pellet's quality can be improved by exploiting the conditioning phase. Using the small pellet machine, the production process proved to be quite efficient although with some organizational difficulties of the pressing's contour operation. The productivity of the machine is in line with the values declared by the manufacturer.

3 Introduzione

3.1 Inquadramento generale del pellet e del suo mercato

Nello scenario energetico mondiale, il pellet di legno rappresenta uno dei biocombustibili più tecnologicamente avanzati presenti attualmente sul mercato. È sicuramente quello che ha avuto negli ultimi anni il più ampio sviluppo sia a livello produttivo che di commercializzazione e vendita. Il motivo principale di questa grande diffusione è da ricercare nel cambiamento degli standard e degli interessi di produzione dell'energia. Le biomasse hanno mano a mano preso piede nel mercato globale dei combustibili, sostituendo in parte i tradizionali combustibili fossili. Quest'ultimi infatti, sono diventati insostenibili sia a livello economico che ambientale. "I prezzi elevati dei combustibili fossili, le tasse sui carburanti fossili, e gli incentivi per combustibili rinnovabili nei paesi europei hanno portato ad una costante crescita del mercato del pellet a partire dal 1990" (Mobini et al. ,2013). Il crescente interesse collettivo verso la riduzione delle emissioni di gas nocivi, testimoniato dalle recenti politiche e leggi comunitarie (per esempio il cosiddetto "Piano" o Pacchetto Clima-Energia 20 20 20), ha dato un forte input all'aumento dell'utilizzo dei biocombustibili. L'utilizzo di pellet a livello domestico comporta una produzione media di CO₂ di 30 Kg per tonnellata di pellet utilizzato. Comparando questo dato con i valori di CO₂ emessa utilizzando i normali combustibili liquidi, si attesta una riduzione del 97% delle emissioni. Secondo quanto riportato dal recente Annual Report 2013 di AEBIOM, le bioenergie rappresentano oggi i due terzi (circa il 68%) delle energie rinnovabili utilizzate e si prevede di mantenere questa quota nel corso degli anni, soprattutto se verranno utilizzate le soluzioni economicamente più efficienti. Sicuramente questo dato testimonia come le nuove fonti energetiche e quindi anche i biocombustibili, saranno un perno fondamentale dello sviluppo energetico mondiale nel prossimo futuro. A riguardo, facendo riferimento al consumo di energia per la produzione di calore, la fonte energetica più utilizzata (95,5%) è rappresentata dalle biomasse (AEBIOM, 2013). Da queste poi verranno ricavati tutti i diversi biocombustibili presenti attualmente nel mercato. Per biocombustibile, o biomassa combustibile, si intende un massa di origine naturale (biomassa appunto), derivante da utilizzazioni agricole o forestali, che grazie a diverse tecnologie produttive viene trasformata e può essere così utilizzata in appositi apparecchi, per la produzione di energia. Il pellet ne è un

esempio. Nella categoria biomassa combustibile rientrano una serie di materiali di diversa origine, che sono definiti a livello nazionale da una legislazione specifica (Decreto legislativo 3.04.2006 n.152. Norme in materia ambientale) In particolare si distinguono i seguenti materiali:

- a) Materiale vegetale prodotto da vegetazioni 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 corteccia, 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.

Prendendo in considerazione il pellet, la sua produzione mondiale ha avuto una crescita esponenziale soprattutto nell'ultimo decennio. L'origine di questo biocombustibile risale agli inizi degli anni '70 del secolo scorso e sia l'Europa che il Nord America ne sono stati e lo sono ancora oggi, i principali produttori. "Dal 2000, il mercato mondiale del pellet è cresciuto molto rapidamente con un incremento di più di dieci volte in 12 anni" (AEBIOM,2013). All'inizio del ventunesimo secolo, la produzione mondiale di pellet era pari a 1,8 milioni di tonnellate, ed è arrivata alla fine del 2012 ad un livello di produzione oscillante tra 22,4 e 24,5 milioni di tonnellate (Figura 3.1.1). Da questi dati si capisce come lo sviluppo significativo di questo materiale sia oggi un elemento fondamentale negli scambi economici internazionali.

Dagli ultimi dati forniti da AEBIOM il continente europeo con le sue 7,8 milioni di tonnellate consumate nel 2012 risulta essere di gran lunga il maggior consumatore di pellet al mondo (consumo di pellet per riscaldamento). Tra tutti i paesi dell'UE, l'Italia è quello che a livello di consumo si ritrova in prima posizione. Nel 2013, infatti, il consumo italiano di pellet è stato di quasi 2,5 milioni di tonnellate con un incremento

di circa 400.000 tonnellate rispetto all'anno precedente, e con un trend di crescita in continuo aumento. A questi dati si scontrano tuttavia quelli relativi alla produzione italiana. L'Italia, non è in grado di soddisfare questa crescente richiesta e ciò rende il Paese fortemente dipendente dalle importazioni. Basti pensare che nel 2012 la produzione italiana di pellet era pari a 300.000 tonnellate, una quota di gran lunga inferiore rispetto al consumo. Questa situazione dipende strettamente dal limitato approvvigionamento interno di materiale, cioè vi è una limitata disponibilità della materia prima utilizzata per la produzione. Tutto ciò ha creato una differenza significativa tra produzione e consumo che negli ultimi anni è continuata ad aumentare. Questa è la motivazione principale per cui l'Italia ricorre all'importazione di pellet da fornitori esteri. Tra i paesi da cui l'Italia importa più pellet ci sono Austria, Slovenia, Croazia e negli ultimi anni anche Stati Uniti d'America e Canada. Attualmente l'Italia è il maggior importatore europeo di pellet dopo Danimarca e Regno Unito, a testimonianza di come nel mercato italiano ci sia una forte differenza tra domanda e offerta. A partire dal 2007 (Baù, 2013), prendendo in considerazione le tonnellate complessive di pellet (pellet prodotto più pellet importato), la quota di pellet importato è salita dal 35% all'80% rispettivamente nel 2007 e nel 2012. Questo trend testimonia come nel mercato italiano ci sia un consumo in crescita al pari dell'importazione di materiale, che può essere quanto meno ridotta incrementando la produzione interna. Il pellet di legno deriva da un processo di pellettizzazione di materiale incoerente (segatura, macinato, trucioli), proveniente da scarti della lavorazione industriale del legname (segherie, industrie del mobile) oppure da quelli derivanti dalle utilizzazioni forestali. L'origine del materiale può essere così diversa ed influenza significativamente la qualità del prodotto finito. Ci sono altri parametri che influenzano la qualità del pellet, ma l'origine e le caratteristiche chimico-fisiche della materia prima sono sicuramente il primo aspetto da prendere in considerazione per la produzione. Ottenere pellet da scarti delle lavorazioni, sia industriali che delle utilizzazioni forestali, significa nella maggior parte dei casi partire da una materia prima di scarsa qualità o comunque che presenta delle caratteristiche chimico-fisiche (umidità, presenza di contaminanti) non ottimali per la pellettizzazione. L'umidità della materia prima influenza fortemente il processo di produzione e di conseguenza anche la qualità del pellet ottenibile. L'utilizzo di materie prime al giusto valore di umidità è fondamentale quindi per garantire la buona qualità del prodotto. A riguardo è possibile

Intervenire con una serie di lavorazioni preliminari per la modifica e regolazione del grado di umidità della materia prima, in maniera tale da portarla ai valori più adeguati per il processo di pellettizzazione. Anche la contaminazione del materiale con altre sostanze, per esempio il terreno o altri detriti con cui si viene a contatto durante le lavorazioni in bosco o durante i processi di lavorazione industriale, influenza non poco la qualità del pellet. C'è una forte relazione tra la qualità della materia prima e quella del prodotto finale che deve essere così opportunamente presa in considerazione. Per questo motivo, la ridotta qualità del materiale di partenza, rende necessario molto spesso l'utilizzo di additivi alla materia prima con l'obiettivo di incrementare la qualità del prodotto finito. Gli additivi che vengono miscelati sono sostanze di origine naturale che migliorano le caratteristiche fisicomeccaniche del pellet. La possibilità di utilizzare queste sostanze per il miglioramento della qualità del pellet rappresenta oggi una valida opportunità per cercare di incrementare la produzione interna di pellet in Italia. Infatti, utilizzando gli additivi si possono migliorare le caratteristiche qualitative (migliorando anche l'efficacia nella pellettizzazione) del materiale di partenza di per sé di scarso valore e qualità. In questo modo è possibile produrre pellet anche da materiali legnosi di qualità limitate e di conseguenza ampliare la disponibilità di materia prima per la produzione. Questi interventi possono rappresentare la giusta via per valorizzare le materie prime nazionali e di conseguenza incrementare la produzione di pellet, ridurre le importazioni e quindi migliorare le potenzialità del mercato interno.

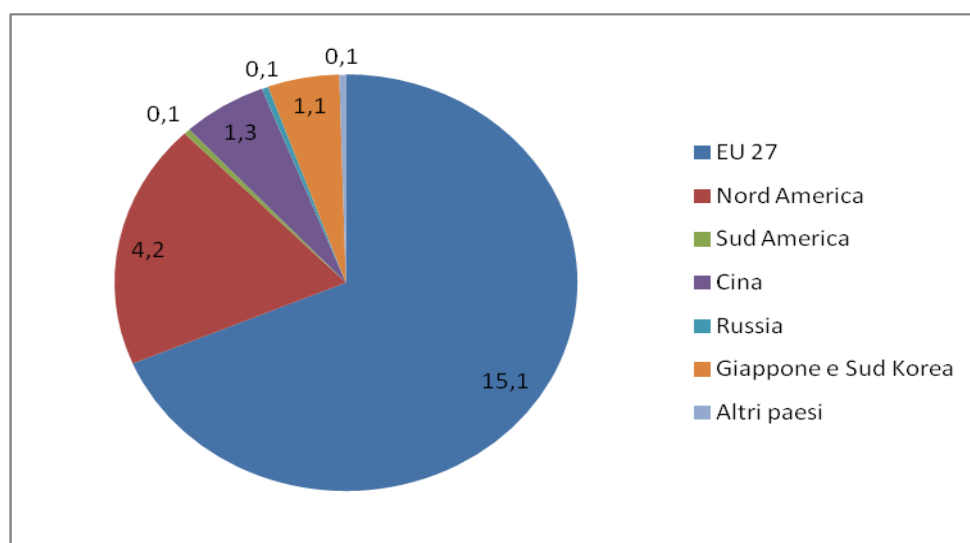


Figura.3.1.1. Produzione mondiale di pellet. (AEBIOM,2013).

3.2 Caratteristiche qualitative dei biocombustibili

I biocombustibili possono essere ottenuti grazie a diverse trasformazioni della biomassa di origine agricola o forestale. Tuttavia la trasformazione di tipo meccanico è quella più utilizzata, e permette di arrivare ad un prodotto finito che può essere utilizzato per la produzione di energia. In questo caso si parla di biocombustibili solidi e tra questi vi sono il pellet, la legna da ardere, il cippato, le briquettes. Tutti questi prodotti derivano dal legno ricavato dalle utilizzazioni forestali. Di per sé il legno può essere così utilizzato in diverse forme per la produzione di energia sia a livello domestico che industriale. Attualmente, è a livello domestico che si produce e consuma la maggior parte dell'energia per il riscaldamento, con valori che superano il 50 % dell'utilizzo complessivo di biomassa (AEBIOM, 2013). Da questo dato si capisce come la necessità di utilizzare una biomassa e quindi un biocombustibile con determinate forme e caratteristiche, risente molto delle esigenze energetiche, economiche e anche logistiche degli impianti domestici. È chiaro che utilizzare legname tal quale, quindi legna da ardere ricavata dalle utilizzazioni forestali attraverso delle lavorazioni piuttosto semplici, rappresenta la scelta economicamente più vantaggiosa (Figura 3.2.1). Infatti è possibile utilizzare questo prodotto direttamente per la produzione di energia, solo dopo pochi passaggi produttivi a partire dalla risorsa primaria, o comunque in seguito a lavorazioni che risultano essere più semplici e meno costose. In questo modo la filiera produttiva risulta essere più corta e sostanzialmente più economica. Tuttavia negli ultimi decenni, c'è stato una forte richiesta dei nuovi biocombustibili legnosi, ottenuti grazie a tecnologie produttive più avanzate. Quest'ultime riescono a migliorare le caratteristiche qualitative del prodotto finale e soprattutto a valorizzare la stessa materia prima, il legno vergine, o addirittura gli scarti delle utilizzazioni forestali che altrimenti sarebbero qualitativamente poco soddisfacenti. Queste nuove forme di biocombustibili (cippato, pellet, briquettes) si sono sviluppate grazie proprio alle migliori caratteristiche rispetto alla comune legna da ardere, anche se il prezzo risulta essere superiore.

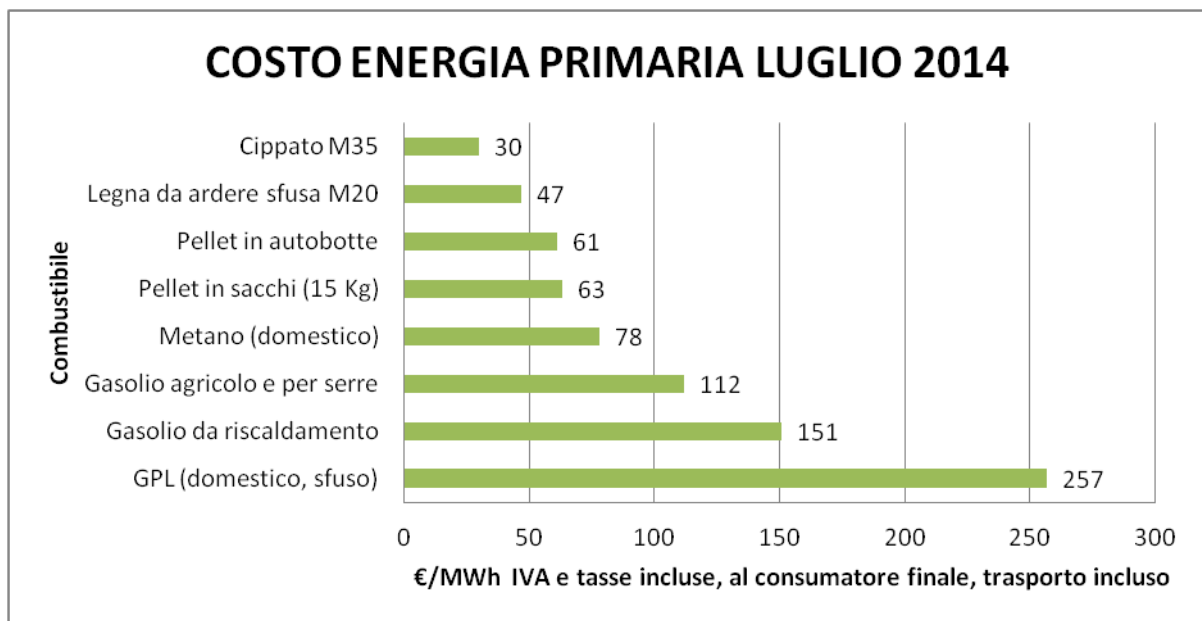


Figura 3.2.1. Costo dell'energia primaria a Luglio 2014. (AIEL,2014).

Tra le peculiarità di questi nuovi biocombustibili vi sono sicuramente le caratteristiche fisiche ed energetiche che dipendono strettamente dalla tecnologia impiegata per la produzione e ovviamente dalla tipologia di materia prima utilizzata. “La qualità del pellet, facendo riferimento all'utilizzazione termica, dipende dalle proprietà chimiche, meccaniche e fisiche della biomassa” (García-Maraver et al., 2011,). Il pellet, deriva dalla densificazione di particelle fini di legno e si capisce così come, le caratteristiche del materiale di partenza influenzino poi quelle del prodotto finale. La materia prima, utilizzata per la produzione del pellet, come per esempio la segatura, può essere prodotta a sua volta dalla macinazione del cippato, ossia di piccole chips di legno, (in genere di 2 cm di lunghezza) ottenute dalla triturazione del legno con delle macchine cippatrici. La segatura così ottenuta viene pressata ottenendo un prodotto particolare, sotto forma di piccoli cilindri di legno di dimensioni variabili. In genere i singoli pellet hanno un diametro variabile da 6 ad 8 mm e una lunghezza che va da 10 a 30 mm. Queste dimensioni ridotte oltre alle altre caratteristiche meccaniche rendono questo materiale particolarmente adatto al trasporto, allo stoccaggio e alla produzione di energia. Di seguito vengono descritte le principali caratteristiche meccaniche del pellet che devono essere adeguatamente valutate dopo la produzione in quanto

fondamentali per stabilire la qualità del prodotto stesso. Tra queste vi sono la Densità, la Massa volumica apparente, la Durabilità meccanica e anche il Contenuto idrico.

Massa volumica apparente

La massa volumica apparente o massa volumica sterica (Mv o Mvs), è chiamata anche Densità apparente (BD, Bulk Density) da non confondere con la densità vera e propria del materiale (che è il rapporto tra la massa ed il volume). La Bulk Density è infatti il rapporto tra il peso ed il volume del corpo legnoso, facendo riferimento al volume che il materiale occupa normalmente in funzione del suo stato e delle sue caratteristiche dimensionali. Si parla infatti di massa volumica sterica quando il materiale è riversato in cumuli o cataste, come tipicamente avviene per la legna da ardere, il cippato ed il pellet. Questa grandezza, espressa in g/cm^3 o kg/m^3 o kg/m^3 accatastato o kg/m^3 sterico dipende strettamente dalla quantità di materiale solido presente e dalla quantità di vuoti che si generano per la particolare conformazione del materiale stesso. Quindi la presenza di aria all'interno del cumulo o della catasta di materiale così come la pezzatura dello stesso, giocano un ruolo fondamentale nel condizionare la massa volumica. Più il materiale è irregolare e disomogeneo e maggiori saranno gli spazi vuoti presenti, con conseguente riduzione del valore di massa volumica. Al contrario se il materiale è di forma regolare ed omogeneo gli spazi vuoti saranno inferiori e così la massa volumica avrà valori più alti. Per questo motivo se prendiamo in considerazione la legna da ardere e anche il cippato, data l'irregolarità più o meno accentuata dei singoli elementi, la massa volumica sarà bassa. Al contrario, nel caso del pellet, la massa volumica sarà molto più alta grazie alla grande regolarità dei singoli cilindretti che rendono questo materiale molto omogeneo. Ai fini energetici è molto importante avere un alta densità sterica, che a parità di volume di materiale garantisce la presenza di una maggiore quantità di sostanza solida che ovviamente è quella che sarà utilizzata per la combustione. La massa volumica condiziona, infatti, sia il potere calorifero che la densità energetica del materiale. Nella Tabella 3.2.2 vengono riportati i valori di massa volumica di diversi tipi di combustibile e specie legnose.

Combustibili legnosi	Quantità	Contenuto idrico	Massa volumica
		%	kg/m ³
Legna da ardere			
Abete rosso	1 m ³ accatastato	15	304
		30	349
Faggio	1 m ³ accatastato	15	455
		30	495
Cippato			
Abete rosso	1 m ³ riversato	15	194
		30	223
Faggio	1 m ³ riversato	15	295
		30	328
Pellet di legno misto			
	1 m ³ riversato	8	650

Tabella 3.2.2 Contenuto idrico e Massa volumica di diversi combustibili e specie legnose. (Francescato et al.,2014)

Durabilità meccanica

La Durabilità meccanica, espressa dalla sigla DU, è una delle caratteristiche qualitative dei pellet per eccellenza. Rappresenta la capacità del materiale di rimanere integro in seguito a delle sollecitazioni meccaniche che possono avvenire tipicamente durante il trasporto. È espressa in percentuale e sta ad indicare appunto la quota di pellet (x %) che rimane intatta, cioè sotto forma di cilindri delle dimensioni caratteristiche. Anche la durabilità dipende da altre variabili come il contenuto idrico, il tipo di legno utilizzato e la sua densità. Ovviamente avere dei valori di durabilità più elevati possibile è sinonimo di un pellet di qualità elevata. La durabilità influenza fortemente il contenuto di particelle fini nel materiale, le quali se presenti in concentrazioni elevate, possono disturbare la regolazione dei sistemi di riscaldamento automatizzati o interrompere l'alimentazione del combustibile. Per questo motivo “ è molto importante per i produttori di pellet, offrire pellets sufficientemente forti in grado di resistere ai rigori

della manipolazione e del trasporto” (Byoung et al., 2013). Una durabilità elevata garantisce così, oltre che una maggiore integrità del prodotto durante tutta la catena produttiva (dalla produzione al trasporto fino all'utilizzazione finale) anche una migliore qualità del processo di combustione e una sua maggiore efficienza.

Contenuto idrico

Il Contenuto idrico, indicato dalla lettera M (Moisture) è un parametro che esprime la quantità di acqua (massa) che è presente nel legno in rapporto alla massa fresca del legno stesso. Non è da confondere con l'umidità del legno che invece esprime la massa di acqua presente in rapporto alla massa di legno allo stato anidro (cioè completamente secco). Il contenuto idrico del legno o comunque del materiale utilizzato per la produzione di pellet è estremamente importante perché condiziona tutto il processo produttivo (dalla fase di condizionamento alla pelletizzazione) e soprattutto influisce sulle caratteristiche meccaniche ed energetiche del prodotto finale. All'aumentare del contenuto idrico infatti, il potere calorifero (che è la quantità di energia liberata durante la combustione completa di un'unità di peso di materiale) tende a diminuire poiché parte dell'energia che si libera in fase di combustione viene utilizzata per far evaporare l'acqua. Quindi più acqua c'è nel legno, più energia sarà necessaria per la combustione e di conseguenza il potere calorifero sarà inferiore. Oltre a condizionare le caratteristiche energetiche del pellet, il contenuto idrico influisce molto sulle qualità meccaniche del prodotto che si andrà ad ottenere con la pelletizzazione. Innanzitutto prima che il processo produttivo vero e proprio abbia inizio, è necessaria una fase di condizionamento in cui il materiale legnoso viene portato al contenuto idrico ideale per la pelletizzazione. Quando il contenuto idrico del materiale supera il 15% si ricorre ad un'essiccazione necessaria per far evaporare l'acqua, che richiede quindi un consumo energetico ulteriore. Qualora il materiale è troppo secco, con un M inferiore al 10%, si procede con una umidificazione per riportarlo al valore ideale. Il contenuto idrico è importante anche nella fase di pressatura vera e propria e per questo è uno dei parametri che viene costantemente monitorato a partire dalle prime fasi del processo produttivo.

Trasportabilità e stoccaggio

Una delle caratteristiche più evidenti del pellet di legno è l'estrema regolarità ed omogeneità dei singoli elementi. Questo status lo rende un biocombustibile legnoso differente da tutti gli altri. Rispetto, infatti, alla legna da ardere e anche al cippato, risulta essere molto più maneggevole in termini logistici rendendolo così un materiale dall'indubbio valore sia per il trasporto che per lo stoccaggio. "La pellettizzazione della biomassa riduce i costi di gestione, e i risultati sono un combustibile con una maggiore omogeneità strutturale" (Stelte et al., 2010). Il pellet può essere assimilato, infatti, ad un fluido proprio per queste sue peculiarità, diventando così un combustibile di origine naturale molto simile ai derivati del petrolio. È questo un altro motivo per cui c'è stata l'esplosione negli ultimi decenni di questo prodotto così diverso dagli altri biocombustibili. Con il trasporto del pellet inoltre, c'è la possibilità di caricare sui mezzi adibiti a questa operazione, una maggiore quantità di massa legnosa rispetto ad un altro combustibile (legna da ardere o il cippato). Per esempio, a parità delle dimensioni del rimorchio, la quantità di massa effettiva trasportata sarà di gran lunga superiore in caso di pellet piuttosto che di cippato. Questo dipende direttamente dalla massa volumica del materiale che, come ribadito in precedenza è di molto superiore. Inoltre per unità di volume trasportato, utilizzando pellet i costi saranno più bassi, proprio perché questi tendono ad aumentare al diminuire della massa volumica apparente. Per queste motivazioni il pellet è un materiale facilmente trasportabile, più maneggiabile e anche in grado di permettere un'automazione del processo produttivo. A riguardo, infatti, durante le ultime fasi della produzione, il materiale può essere direttamente convogliato all'interno di sacchi per poi essere stoccato in attesa del trasporto. Il trasporto inoltre può avvenire anche con delle autobotti dotate di un sistema di scarico automatico molto più simile a quello che viene utilizzato per i combustibili liquidi. Questo aspetto è molto importante per semplificare notevolmente le operazioni di consegna del materiale, con conseguente miglioramento dell'efficacia complessiva. Anche lo stoccaggio e il prelievo del materiale dalle zone di deposito agli impianti (sia industriali che domestici) può essere automatizzato, semplificando notevolmente il processo di utilizzazione energetica e rendendolo più efficace.

3.3 La tecnica di produzione del pellet

Il pellet di legno viene ottenuto attraverso il processo di pellettizzazione. “La tecnica di pellettizzazione si è sviluppata in Canada negli anni ‘90 ed è stata importata ed adattata in Europa per la richiesta del mercato della produzione di pellet di legno.”(Francescato et al.,2014). Originariamente, infatti, questa tecnica di densificazione di materiale incoerente era nata per l’industria mangimistica. Attualmente la pellettizzazione si sviluppa in più fasi operative che caratterizzano l’intera filiera produttiva (Fig. 3.3.1) e vengono riportate di seguito:

Raccolta della materia prima

In Italia, la produzione di pellet di legno avviene utilizzando della materia prima rappresentata essenzialmente da scarti e residui della lavorazione industriale del legname (segherie in particolare) o delle utilizzazioni forestali. In sostanza si tratta di materiali di scarsa qualità ma anche con costi ridotti per quanta riguarda l’approvvigionamento.

Analisi della materia prima

Prima di iniziare il processo produttivo, è necessario analizzare e selezionare la materia prima a disposizione perché la qualità del pellet è in relazione a quella della materia prima stessa e soprattutto è variabile anche in funzione del tipo di impianto di combustione in cui sarà utilizzato. Tra i parametri da controllare più attentamente vi sono il contenuto idrico, la granulometria del materiale e l’eventuale livello di alcuni microelementi come cloro, azoto, magnesio, potassio e silicio che possono provocare problemi durante la fase di combustione del pellet. Sicuramente il contenuto idrico della materia prima è il parametro più importante poiché, in funzione di questo, verrà regolata ed adattata la successiva fase di essiccazione (o in alcuni casi di idratazione). In generale “condizioni di umidità, come l’esposizione per breve tempo alla pioggia o un’elevata umidità dell’ambiente [dovute ad una conservazione della materia prima non ottimale], incidono negativamente sulla resistenza e durabilità del pellet di legno” (Kaliyan e Vance Morey, 2008). Una attenta analisi del contenuto idrico risulta così essere fondamentale per l’efficacia dell’intero processo produttivo e per ottenere un prodotto di qualità. Importante è anche verificare il tipo di specie legnosa utilizzata e il

contenuto di corteccia in quanto influenzano le successive fasi di lavorazione. Utilizzare per esempio materia prima derivante da legno di latifoglie piuttosto che di conifere, oppure da miscele di queste, comporta conseguenze differenti soprattutto nella fase di pressatura del materiale. Il legno di latifoglie è infatti più pesante di quello delle conifere (densità maggiore) e ciò fa sì che ci sia una maggiore resistenza offerta dal materiale durante la pressatura. Di conseguenza sarà necessario regolare la pressione (agendo sulla distanza tra rulli e trafila della pellettatrice) in modo tale da garantire un equilibrio tra produttività e consumo energetico.

Essiccazione

È una delle fasi più importanti perché un pellet di qualità può essere prodotto se le materie prime utilizzate presentano un contenuto idrico idoneo alla pellettizzazione, pari cioè ad un intervallo che va dal 10 al 14 %. L'essiccazione può avvenire in apposite strutture (essiccatoi) che liberano calore e lo trasmettono direttamente o indirettamente alla biomassa.

Raffinazione

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

Condizionamento

Questa fase viene utilizzata per preparare al meglio il materiale alla pressatura. In particolare viene effettuata una rilevazione del contenuto idrico, in maniera tale da stabilire se la materia prima deve subire nuovamente un'essiccazione (se il contenuto idrico è superiore al 15%) oppure un'umidificazione (se il contenuto idrico è inferiore al 10%). Con il condizionamento si attivano le capacità leganti della materia prima che

garantiscono un aumento della qualità del pellet, in particolare della sua durabilità. Infatti, nel periodo di tempo in cui il materiale rimane nel condizionatore si verifica un ammorbidimento della lignina con conseguente aumento delle capacità leganti.

Aggiunta di additivi

Qualora il materiale di partenza presenti delle caratteristiche qualitative non adatte alla pellettizzazione, si prevede la miscelazione di sostanze additive al materiale stesso. L'acqua è l'additivo per eccellenza, e viene aggiunta nella fase di condizionamento. Oltre a questo, vi sono altre sostanze che possono essere utilizzate per migliorare le capacità leganti della biomassa (lignina, amido, residui vegetali, corteccia, residui della lavorazione della carta). "La selezione del legante dovrebbe essere effettuata sulla base del suo costo e della sua compatibilità ambientale" (Byoung et al., 2013). Generalmente si utilizzano additivi naturali, biologici, in quantitativi non superiori al 2% in peso che comportano un aumento della durabilità del pellet. Gli additivi aggiunti alla materia prima, hanno, infatti, il compito di favorire la formazione di legami chimici e fisici tra le particelle, con conseguente miglioramento della compattazione del pellet e delle sue caratteristiche qualitative.

Pellettizzazione (pressatura)

È la fase produttiva principale, con la quale il materiale precedentemente preparato subisce una trasformazione fisica e meccanica, che porta ad un cambiamento sostanziale di forma, dimensioni, densità. La biomassa (segatura, trucioli) viene pressata da due, fino a cinque rulli contro una matrice di materiale metallico. Questa matrice, forata, permette al materiale pressato di passare oltre e di dare origine al pellet vero e proprio. In particolare i fori della matrice, in numero variabile, presentano la parte più superficiale di forma conica che favorisce l'ingresso del materiale e la compressione, e la parte finale di forma cilindrica che dà la forma al pellet. È proprio il diametro finale di questi fori che darà la dimensione definitiva al pellet. "Le dimensioni del pellet da combustibile variano tra i 3 e i 25 mm di diametro a seconda della matrice usata nella produzione. La lunghezza generalmente varia tra 5 e 40 mm" (Hansen e Jein, 2002).

Una volta che il materiale entra nella pressa, determinate condizioni di pressione (regolabili) e temperatura (da 80 a circa 130°, dovute alle frizioni tra le particelle di materiale e gli organi meccanici) favoriscono il processo di densificazione ed estrusione. È in questa fase che si verificano delle importanti modifiche a livello chimicofisico delle sostanze che compongono la materia prima. Sono proprio queste modifiche che portano a un cambiamento sostanziale delle caratteristiche della materia prima. Una di queste avviene a carico della lignina, una sostanza (polimero amorfo complesso) naturalmente presente nelle pareti cellulari della biomassa. Per effetto del calore, la lignina si scioglie ed agisce da legante tra le particelle, favorendo la compattazione del materiale e quindi la produzione del pellet. È la stessa lignina che una volta sciolta si raffredda, e conferisce il tipico aspetto vitreo, lucido alla superficie dei singoli pellet. Lo scioglimento della lignina dipende quindi dalla temperatura della trafila che di conseguenza, diventa uno dei parametri più importanti responsabili della qualità del prodotto finito. Secondo uno studio di Stelte W. et al (2010) "... le forze di compressione del pellet, sono in generale più elevate per pellet prodotti a temperature più alte." La necessità quindi di raggiungere temperature ideali nella pellettizzazione è fondamentale per ottenere un prodotto di qualità, soprattutto per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche. Oltre alla temperatura e alla pressione esercitata, anche la composizione chimica influenza il processo produttivo e la qualità del pellet, in particolare la presenza di composti chimici o di acqua che migliorano le capacità leganti. Nel complesso, le capacità leganti delle particelle sono garantite dalla presenza a livello chimico di lignina ed emicellulosa (entrambi polimeri amorfi) che con il calore subiscono delle trasformazioni termoplastiche, responsabili della formazione di legami (legami covalenti, forze di van der Waals,) tra le particelle.

Raffreddamento e vagliatura

Una volta che il pellet fuoriesce dalla trafila, è ancora morbido e a temperature molto elevate che dipendono dal calore che si sviluppa durante la pressatura e in particolare all'attrito tra le diverse componenti. Per questo motivo, per garantire l'indurimento del pellet e la perdita ulteriore di acqua, è necessario un immediato raffreddamento del prodotto. L'ideale sarebbe quello di portare il pellet ad una temperatura di circa 25° C. Il perché dell'indurimento del pellet nel momento in cui c'è una riduzione della temperatura, è da ricercare in uno specifico comportamento a livello chimico delle

particelle che compongono il materiale legnoso, in particolare lignina ed emicellulosa. Quando, infatti, la temperatura del pellet scende al di sotto della cosiddetta temperatura di transizione vetrosa (T_g), avviene questo indurimento. La T_g , rappresenta la temperatura al di sotto della quale un materiale amorfo (come lo sono lignina ed emicellulosa) si comporta da solido di natura vetrosa. Secondo Stelte (2010) quando la temperatura è più alta della T_g , si riducono i legami tra le particelle, aumenta il volume e in generale si passa da uno stato vitreo ad uno gommoso. Per questo motivo, garantire un rapido raffreddamento del pellet, o comunque il raggiungimento di una temperatura ideale è fondamentale per assicurare le caratteristiche fisicomeccaniche tipiche di questo biocombustibile.

Il raffreddamento avviene in un raffreddatore contro-corrente o comunque grazie ad un dispositivo che insuffla aria tra i pellet permettendone la perdita di calore. Dopo il raffreddamento avviene il processo di vagliatura, cioè il pellet prodotto è sottoposto ad un vaglio vibrante che permette l'allontanamento delle particelle fini residue o comunque del materiale che non è stato perfettamente pressato. Tutto quello che viene raccolto e separato dal pellet con la vagliatura viene in genere reinserito nel processo produttivo, in modo tale da limitare gli scarti di produzione.

Confezionamento, stoccaggio e trasporto del pellet

Una volta che il pellet è stato raccolto, hanno luogo le ultime fasi della filiera produttiva. Il pellet può essere confezionato (in sacchi o big bag), oppure rimanere sfuso e consegnato grazie a un'autobotte. Il trasporto del materiale avviene quindi in funzione o meno della tipologia di confezionamento utilizzata. Il pellet sfuso può subire una fase di stoccaggio intermedia in appositi magazzini. Prima della consegna finale il materiale viene tuttavia sottoposto ad un ulteriore vagliatura.

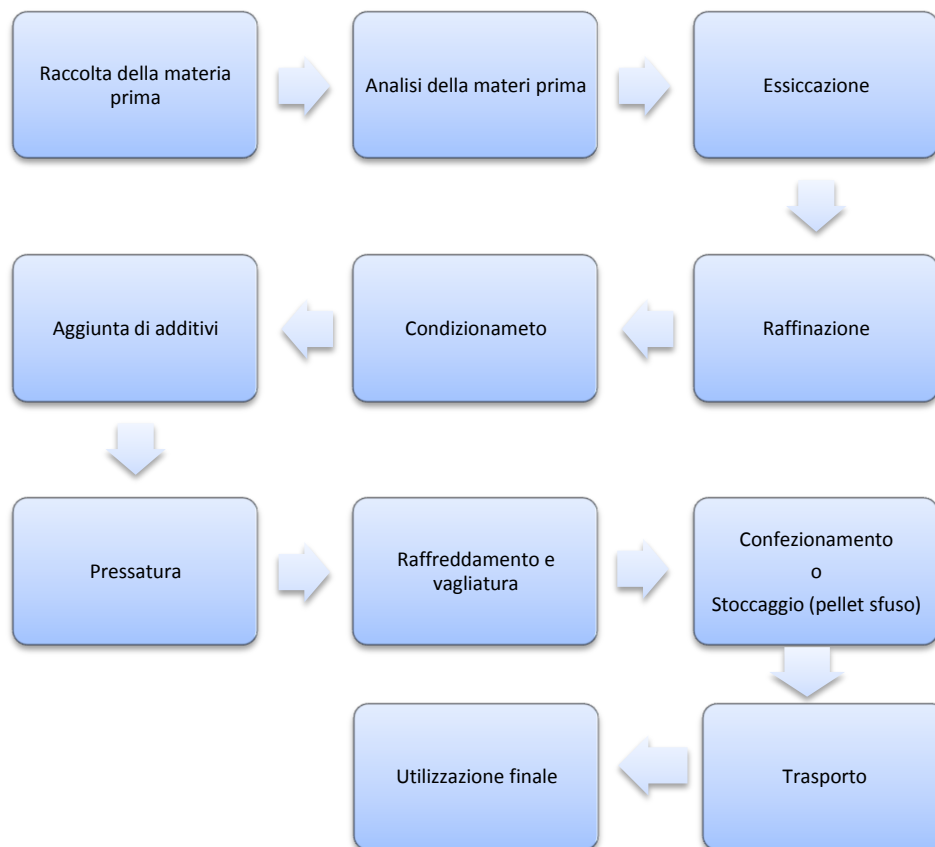


Fig.3.3.1. Processo di produzione del pellet di legno

3.4 La classificazione del pellet

Con un mercato in notevole espansione, in cui gli scambi internazionali sono diventati un importante mezzo per la commercializzazione del pellet, la necessità di ricorrere ad una certificazione e classificazione del prodotto è divenuta negli ultimi anni un elemento fondamentale per l'intera filiera produttiva. In questo contesto, la qualità del pellet rappresenta un importante elemento per garantire un ulteriore rafforzamento del mercato e al tempo stesso tutelare i consumatori. Le caratteristiche qualitative devono tuttavia essere riconosciute da un soggetto terzo, ossia da un organismo sopra le parti che è in grado di tutelare sia i produttori che i consumatori. Per questo motivo sono nate a livello europeo delle normative specifiche relative alla classificazione dei biocombustibili, e alle modalità di analisi delle loro caratteristiche. In particolare negli ultimi anni sono nate sia delle nuove certificazioni, che i cosiddetti marchi di qualità (per esempio ENplus). Quest'ultimi sono stati introdotti grazie all'emanazione e all'entrata in vigore nel 2011 di una specifica normativa, la EN 14961-2 che ha definito

dei nuovi standard, validi a livello europeo, per la definizione delle diverse caratteristiche di qualità e delle classi qualitative del pellet ad uso non industriale. Le caratteristiche qualitative del pellet, che vengono prese in considerazione poichè influenzano direttamente la risposta del materiale all'utilizzazione finale sono:

- Origine della materia prima
- Dimensioni (diametro e lunghezza)
- Contenuto idrico
- Ceneri
- Durabilità meccanica
- Particelle fini
- Potere calorifero
- Densità apparente
- Additivi
- Contenuto di microelementi

Tali parametri devono essere opportunamente valutati per stabilire la classe di qualità del pellet e permetterne quindi una classificazione. La norma EN 14961-2 garantisce che il pellet classificato sulla base di questi parametri, risponda a determinate caratteristiche. Come tutte le norme infatti, anche la norma EN 14961-2 è un documento che definisce le caratteristiche di un prodotto, processo o servizio. Secondo il Regolamento UE 1025 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 25 ottobre 2012 sulla formazione europea, una norma viene definita come “una specifica tecnica, adottata da un organismo di formazione riconosciuto, per applicazione ripetuta o continua, alla quale non è obbligatorio conformarsi”. Queste norme in sostanza diventano obbligatorie solo se a livello europeo, nazionale o regionali vi sono delle leggi che vi fanno riferimento. In Europa, l'ente che si occupa della creazione e divulgazione delle norme tecniche è il CEN (Comitato Europeo per la Normazione). Una volta che il CEN ha elaborato le diverse norme, queste vengono recepite dagli stati membri divenendo così norme tecniche nazionali. In Italia, è l'UNI (Ente Nazionale

Italiano per l'Unificazione) che adotta le diverse norme europee che diventano così valide a livello nazionale, le cosiddette UNI EN.

La norma UNI EN 14961-1:2010 è una norma generale, ed ha l'obiettivo di fornire una classificazione chiara e precisa in modo tale da arrivare a una dichiarazione finale sulla qualità del materiale che sia inequivocabile. Questa norma, definita come "Specifiche e classificazione del combustibile – Parte 1: Requisiti generali", stabilisce anche i diversi tipi di materiale che possono essere utilizzati per la produzione (Tabella 3.4.1). La norma UNI EN 14961-2:2011, "Specifiche e classificazione del combustibile – Parte 2: Pellet di legno per uso non industriale", definisce nel dettaglio le caratteristiche qualitative necessarie per la classificazione del pellet nelle diverse classi. Con questa norma vengono individuate tre classi di qualità, A1, A2 e B. La classe A1 è la migliore e differisce dalle altre soprattutto per il contenuto in ceneri che è il più basso in assoluto (Tabella 3.4.2).

Sicuramente la nascita di queste nuove norme e la loro entrata in vigore a livello nazionale, è diventata un elemento importante per la valorizzazione del prodotto e soprattutto per una sua migliore commercializzazione. Da queste normative sono nati negli ultimi anni dei nuovi marchi di qualità (ENplus) che non certificano soltanto il prodotto finale, ma anche l'intera filiera produttiva, dall'approvvigionamento della materia prima fino alla consegna all'utilizzatore finale.

Origine UNI EN 14961-1	Biomassa legnosa Biomassa da residui di frutta	Biomassa erbacea Miscele
Forma commerciale	Pellets	
Dimensioni (mm)		
Diametro (D) e lunghezza (L)		
D 06	D = 6 ± 1.0 e 3.15 ≤ L ≤ 40	
D 08	D = 8 ± 1.0 e 3.15 ≤ L ≤ 40	
D 10	D = 10 ± 1.0 e 3.15 ≤ L ≤ 40	
D 12	D = 12 ± 1.0 e 3.15 ≤ L ≤ 50	
D 25	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	≤ 10	
M 15	≤ 15	
Ceneri, A (% sul peso secco) UNI EN 14775		
A 0.5	≤ 0.5	
A 0.7	≤ 0.7	
A 1.0	≤ 1.0	
A 1.5	≤ 1.5	
A 2.0	≤ 2.0	
A 3.0	≤ 3.0	
A 5.0	≤ 5.0	
A 7.0	≤ 7.0	
A 10.0	≤ 10.0	
A 10.0+	> 10.0 (indicare valore massimo)	
Durabilità meccanica, DU (% di pellet dopo il test) UNI EN 15210-1		
DU 97.5	≥ 97.5	
DU 96.5	≥ 96.5	
DU 95.0	≥ 95.0	
DU 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	≤ 1.0	
F 2.0	≤ 2.0	
F 3.0	≤ 3.0	
F 5.0	≤ 5.0	
F 5.0+	> 5.0 (indicare il valore massimo)	
Massa volumica sterica, BD (kg/m3) UNI EN 15103		
BD 550	≥ 550	
BD 600	≥ 600	
BD 650	≥ 650	
BD 700	≥ 700	
BD 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 3.4.1 Valori di riferimento per la classificazione e definizione della qualità del pellet, come riportato nella UNI EN 14061-1.

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/m ³	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 calorifero inferiore, Q, UNI EN 14918	MJ/kg	Q16.5: 16,5≤Q≤19	Q16.3: 16,3≤Q≤19	Q16: 16≤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				
A livello informativo le specifiche indicano di riportare la temperatura di fusibilità delle ceneri				

Tabella 3.4.2 Valori di riferimento per la classificazione del pellet ad uso non industriale come definito dalla norma UNI EN 14961-2:2011.

4 Ringraziamenti

Desidero ringraziare coloro che mi hanno aiutato in questo lavoro, specie nella parte di analisi in laboratorio, come la Dott.ssa Zanetti, la Dott.ssa Santi e gli altri colleghi. Un ringraziamento anche alla società Peruzzo per aver messo a disposizione del laboratorio la macchina pellettatrice. Vorrei ringraziare gli amici di sempre Dario, Roberto, e soprattutto Andrea per la loro vicinanza e per l'appoggio ricevuto, e tutti gli altri che in qualche modo mi sono stati vicini. Vorrei infine ringraziare la mia famiglia, i miei genitori, per il sostegno ricevuto in tutto e per tutta questa esperienza universitaria, e a loro dedico questo lavoro.

5 Obiettivi

L'obiettivo principale del presente lavoro, è stato quello di analizzare le principali caratteristiche meccaniche del pellet ottenuto da una pellettatrice di piccole dimensioni e come queste vengono influenzate da due parametri importanti: il contenuto idrico e l'aggiunta di additivi. L'importanza di valutare queste relazioni, nasce dalla possibilità di ottenere un miglioramento della qualità del pellet attraverso un adeguato processo di condizionamento (aggiunta di acqua e successivamente di additivi). Il processo produttivo, che ha preceduto quello di analisi in laboratorio, è stato caratterizzato dall'utilizzo di una pellettatrice di tipo non industriale, attualmente presente sul mercato. Questa nuova macchina può essere utilizzata a livello domestico per la produzione del pellet. La possibilità di produrlo in maniera autonoma, utilizzando anche materiali di scarsa qualità e facilmente reperibili, può avere un importante ruolo economico nell'attuale situazione del mercato italiano del pellet. Tuttavia in una produzione autonoma, il rischio di utilizzare materie prime di dubbia provenienza e qualità, può essere elevato, con conseguenze negative a livello energetico, ambientale ed economico. Di conseguenza la possibilità di migliorare le caratteristiche del pellet con un adeguato condizionamento della materia prima, può rappresentare un importante elemento per la valorizzazione delle risorse e dei materiali di origine forestali disponibili.

Per le analisi di laboratorio sono state applicate le procedure stabilite dalle Norme Europee vigenti e recepite in Italia dall'UNI (UNI EN).

6 Materiali e metodi

Il lavoro presentato in questo elaborato può essere suddiviso in due fasi distinte. Inizialmente è stata effettuata una fase di produzione vera e propria del pellet. Successivamente, il pellet prodotto è stato analizzato in laboratorio. Nella fase produttiva sono stati utilizzati diversi materiali legnosi di origine forestale, già disponibili, e costituiti essenzialmente da macinato di cippato di due delle specie più importanti a livello regionale: Il Faggio (*Fagus sylvatica*) e l'Abete rosso (*Picea abies*). Una volta prodotto, il pellet ottenuto da questi diversi materiali è stato analizzato in laboratorio. Per le diverse analisi qualitative si è fatto riferimento alle disposizioni previste dalle normative vigenti, in particolare alle Norme tecniche Europee UNI EN 14961.

Queste norme prevedono, infatti, che le diverse analisi sul biocombustibile siano effettuate rispettando determinate procedure tecniche. Spesso tali norme stabiliscono anche dei parametri relativi alla ripetibilità dell'esperimento. La ripetibilità rappresenta il grado di concordanza tra una serie di misurazioni che vengono effettuate nelle stesse condizioni (stesso operatore, stesso strumento, stesso metodo, stesso luogo), in un arco di tempo ridotto. Queste misurazioni devono risultare uguali tra loro o comprese in uno scarto determinato e comunque essere effettuate su delle porzioni rappresentative dello stesso campione.

6.1 Raccolta e preparazione del materiale

La materia prima utilizzata per le prove di pellettizzazione è costituita da un macinato di cippato. Questo materiale è stato ottenuto da una serie di lavorazioni che sono state necessarie per un lavoro di tesi precedente (Analisi della qualità di pellet prodotti da legname delle utilizzazioni forestali, Santi, 2013). Originariamente il cippato è stato ottenuto dallo sminuzzamento (cippatura) di alberi di Faggio e di Abete rosso provenienti dai boschi del comune di Nevegal (BL). Le piante, prelevate dai Servizi Forestali Regionali (SFR), sono state in parte cippate così com'erano e in parte sminuzzate dopo la rimozione dei rami e della corteccia. In sostanza dalle due essenze forestali sono state ottenute cinque diverse tipologie di campioni riportati di seguito:

- AB PT, Abete rosso, pianta intera;

- AB FU, Abete rosso, fusto (senza rami, con corteccia);
- AB SCO, Abete rosso, fusto scortecciato (senza rami, senza corteccia);
- FG RAM, Faggio, solo ramaglia (ramaglia con diametro < 5 cm);
- FG FU, Faggio, fusto intero.

La scomposizione del materiale in queste diverse tipologie è stata effettuata originariamente per avere e verificare l'entità della diversità (in termini qualitativi), del pellet che si andrà a produrre. Dai risultati ottenuti dal lavoro di Santi, 2013 si è visto che il materiale che ha una qualità maggiore è il fusto senza corteccia di Abete rosso e il fusto intero di Faggio. Quello con minore qualità è rappresentato dalla pianta intera di Abete rosso e dalla ramaglia di Faggio. Infine il fusto con corteccia di Abete rosso viene considerato come materiale di qualità media. Il fusto scortecciato è stato ottenuto simulando una scortecciatura parziale in seguito all'utilizzo di processore o harvester. Per il faggio, il ricorso alla scortecciatura ma anche l'utilizzo dell'harvester per il taglio non viene praticato e quindi sono stati prodotti solo due campioni.

Questi cinque materiali diversi, hanno subito un periodo di stagionatura e successivamente sono stati macinati in un molino a martelli. Nel presente lavoro, per ciascuno dei cinque diversi materiali è stato prelevato un campione di macinato necessario per la successiva analisi in laboratorio. Per avere una certa omogeneità del campione si è cercato di prelevare il macinato in più punti nel sacco. È possibile, infatti, che in superficie l'umidità sia diversa rispetto a quella che si ha in profondità o a contatto con la plastica. Sono stati effettuati così sei "microprelievi", uno in superficie, uno in profondità e quattro ai lati del sacco stesso. I campioni così ottenuti sono stati inseriti in sacchetti di plastica e portati in laboratorio.

6.2 Analisi della materia prima

L'analisi della materia prima ha previsto la determinazione del solo contenuto idrico del macinato. Per ciascuno dei cinque campioni è stata effettuata la determinazione del contenuto idrico rispettando le indicazioni previste dalla normativa di riferimento, in questo caso la UNI EN 14774-1:2009, "Determinazione dell'umidità – Metodo di essiccazione in stufa. Parte 1: Umidità totale – Metodo di riferimento".

Questo metodo prevede che per ogni campione da analizzare sia necessario riempire tre vaschette in alluminio con almeno 300 g di materiale. Le vaschette, identificate da un numero o da una lettera, vengono pesate prima del riempimento, in modo tale da determinare la tara (P0), e dopo, per avere il peso complessivo della vaschetta e del campione allo stato umido (P1). La misurazione del peso avviene con una bilancia di precisione di 0,01g . Successivamente le tre vaschette vengono inserite in una stufa a 105° C (Figura 6.2.2) che garantisce la perdita di acqua dal campione. Il tempo di permanenza in stufa deve essere tale da garantire che la massa contenuta nella vaschetta rimanga costante, cioè quando due pesate successive, intervallate di 60 min, presentano variazioni di peso inferiori allo 0,2% della perdita totale di peso. Al termine di questo periodo di tempo (in questo caso i campioni sono stati lasciati in stufa per una notte), le vaschette vengono nuovamente pesate, appena prelevate dalla stufa, in modo tale da avere il peso della vaschetta e del campione essiccato (P2). Poiché erano ancora calde, sopra il piatto della bilancia è stato posto un tondello di legno in modo tale da garantire la ripetibilità della misura e al tempo stesso evitare di danneggiare la bilancia. Una volta misurato il peso P2, per la determinazione del contenuto idrico si è applicata la seguente formula come previsto dalla normativa UNI EN 14774-1:2009:

$$M = \frac{(P1 - P2)}{(P1 - P0)} \times 100$$

dove

M è il contenuto idrico in %

P0 è la tara della vaschetta

P1 il peso della vaschetta più il materiale prima dell'essiccazione

P2 il peso della vaschetta più il materiale dopo l'essiccazione

Il contenuto idrico rappresenta la quantità di acqua contenuta nel materiale tal quale nello stato idrico in cui si trova al momento dell'analisi. Con questo procedimento è stato possibile determinare il contenuto idrico dei cinque diversi materiali e quindi della materia prima che sarà utilizzata per la produzione del pellet. Conoscere il contenuto idrico del materiale di partenza è fondamentale per il processo produttivo,

poiché in base a questo si regola il processo di condizionamento, fondamentale per preparare al meglio il materiale alla pellettizzazione.

Una volta determinato il contenuto idrico, con delle formule appositamente elaborate sono stati determinati, dopo aver pesato ciascun sacco (peso netto del materiale sottraendo la tara del sacco) i seguenti parametri:

- quantità di acqua (kg) contenuta nel materiale di partenza (Acqua1), ottenuta come percentuale sul peso netto
- quantità di sostanza secca (kg) del materiale, ottenuta come differenza tra il peso netto del sacco e la quantità di acqua nel materiale
- quantità di acqua (kg) contenuta nel materiale ad un determinato contenuto idrico (Acqua2); sono stati scelti due contenuti idrici (come previsto dal disegno sperimentale), pari al 12 % e al 17%
- quantità di sostanza secca (kg) contenuta nel materiale ad un determinato contenuto idrico; calcolata come differenza tra il peso del sacco ad un determinato contenuto idrico e la quantità di acqua contenuta nel materiale.

Per la successiva fase di produzione, sono stati scelti due contenuti idrici (12 e 17%) a cui i diversi materiali devono essere portati. Questa scelta è stata fatta per verificare come il contenuto idrico influenza le caratteristiche qualitative del pellet. I parametri precedentemente calcolati saranno necessari nella fase di condizionamento della materia prima.



Figura 6.2.2 Le vaschette con i diversi materiali poste in stufa a 105°C per l'essiccazione

6.3 Produzione del pellet

La produzione del pellet di legno avviene secondo delle fasi operative che sono state descritte nel capitolo 3.3 cui si rimanda. Anche in questo lavoro sono stati eseguiti i diversi procedimenti seppur con una minima semplificazione delle fasi produttive iniziali e nel complesso dovuta a una tecnologia produttiva non di tipo industriale. A riguardo la fase di essiccazione non è stata operata perché la materia prima presentava già un contenuto idrico inferiore a quello richiesto normalmente per la pellettizzazione. I diversi campioni, infatti, avevano subito già un processo di stagionatura a monte che li ha portati ai contenuti idrici rilevati. Anche la fase di raffinazione è stata omessa poiché anche in questo caso il materiale era già stato sottoposto a questa operazione. Di conseguenza la catena produttiva è iniziata dalla fase di condizionamento per poi proseguire a quella dell'aggiunta di additivi, pressatura, raffreddamento e vagliatura, e infine raccolta del prodotto finito.

Condizionamento

Questa importante fase del processo produttivo, è stata regolata sulla base dei dati provenienti dalla determinazione del contenuto idrico della materia prima. Poiché tutti i cinque materiali presentavano un contenuto idrico inferiore al 12%, la fase di condizionamento ha consistito in una umidificazione del materiale. In sostanza è stato necessario aggiungere acqua per arrivare ai due contenuti idrici stabiliti, del 12 e del 17%. Come stabilito dal disegno sperimentale, sono stati scelti questi due valori di contenuto idrico di partenza per la produzione di pellet essenzialmente per due motivi. Un contenuto idrico del 12% rappresenta generalmente il valore ideale per la produzione di pellet (la stessa casa produttrice della macchina stabilisce un range di M ideale per la produzione di circa il 12-13%). Il contenuto idrico del 17% è stato scelto per avere un confronto con un pellet prodotto a partire da materiale più fresco. Prima di procedere con l'umidificazione, ciascuno dei cinque materiali è stato diviso in due parti uguali in modo tale da poter aggiungere acqua separatamente. Ogni sacco di materiale è stato quindi pesato con una bilancia con la precisione di 10g (Figura 6.3.1) e il contenuto ripartito in due parti uguali. Una parte è stata portata al 12 %, l'altra al 17%. La quantità di acqua da aggiungere, calcolata in kg, è stata determinata sulla base delle seguenti formule (nell'esempio si fa riferimento ad un unico materiale):

Faggio fusto 12%:

$$\text{Acqua da aggiungere} = \text{Acqua2} - \text{Acqua1}$$

dove

Acqua1 è pari a

$$(\text{Pf1} * \text{M}) / 100$$

M è il contenuto idrico determinato con l'analisi in laboratorio

Acqua2 è pari a

$$(\text{Pf2} * 12\%) / 100$$

Pf1 è il peso di una delle parti del sacco di Faggio fusto

Pf2 è pari a

$$\text{Pf1} * (100 - \text{M}) / (100 - 12\%)$$

Lo stesso procedimento si effettua per determinare l'acqua da aggiungere per arrivare al contenuto idrico del 17%, sostituendo tale valore a 12% nelle equazioni precedenti. Una volta calcolata l'acqua da aggiungere a ciascun materiale è stata effettuata l'umidificazione degli stessi utilizzando un normale erogatore a pompa. Ogni materiale è stato riversato sopra un telo in plastica (Figura 6.3.2) per permettere la distribuzione di acqua in maniera omogenea. La quantità di acqua da aggiungere, è stata maggiorata di qualche grammo (in via approssimativa circa 20 g), per tener conto delle perdite per evaporazione che si verificano nel momento in cui avviene la distribuzione. Una volta aggiunta l'acqua in superficie con un normale erogatore a pompa (Figura 6.3.4), è stato effettuato un rimescolamento (manuale) del materiale per evitare la formazione di grumi e soprattutto per garantire che l'acqua si distribuisca omogeneamente. Dopo il rimescolamento il materiale è stato raccolto e reinserito in sacchi di plastica. Si è scelto di attendere un giorno intero prima della pellettizzazione, in modo tale che il contenuto idrico del materiale si uniformasse nel migliore dei modi.



Figura 6.3.1 Bilancia utilizzata per pesare i materiali



Figura 6.3.2 Materiale disteso sul telo in plastica



Figura 6.3.3 Aggiunta di acqua al materiale



Figura 6.3.4 Erogatore a pompa utilizzato per l'umidificazione

Aggiunta di additivi

L'aggiunta di additivi alle materie prime utilizzate per la produzione di pellet è molto importante per incrementare le capacità leganti del materiale e di conseguenza migliorare le caratteristiche del prodotto. Questa operazione viene effettuata soprattutto se i materiali di partenza sono di scarsa qualità o comunque non sono particolarmente adatti alla pellettizzazione. Per questo motivo l'aggiunta di additivi è stata effettuata solamente per l'abete scortecciato. L'assenza della corteccia rappresenta un limite significativo sulla qualità della materia prima e di conseguenza del pellet ottenibile. La corteccia, infatti, rappresenta un ottimo legante naturale per la fase di pressatura. Di conseguenza si è scelto di aggiungere degli additivi naturali solamente a questo materiale. La norma europea che stabilisce le caratteristiche del pellet a uso non industriale (UNI EN 14961-2) ammette l'impiego nella pellettizzazione, solamente di additivi naturali che possono essere aggiunti fino ad un massimo del 2% in peso. In questo caso si è scelto di utilizzare come additivi naturali (tutti somministrati in polvere):

- Amido di mais (maizena) (Figura 6.3.5): prodotto reperito nella grande distribuzione. L'amido di mais deriva dalla macinazione ad umido di chicchi di mais, utilizzando però solo l'endosperma.
- Tannino di castagno (Figura 6.3.6): prodotto da SilvaTeam, San Michele Mondovì (CN). Questo tannino è stato prodotto utilizzando solo una parte del tronco di alberi di

Castanea sativa di circa 50-75 anni o più. Per quanto riguarda la sua composizione chimica è un estere di acido gallico, digallico e ellagico con carboidrati. Questo additivo, come dichiarato dall'azienda produttrice ha un contenuto in tannino del 77%, il 6% di umidità, l'1,2% di ceneri.

- Lignina (Figura 6.3.7): prodotta da Burgo Group S.p.A., Altavilla Vicentina (VI). Prodotto di origine naturale.

Questi tre additivi sono stati aggiunti all'abete scortecciato sia al 12% che al 17% di umidità. In sostanza per questo tipo di materiale sono stati prodotti sei campioni con gli additivi (tre per ogni contenuto idrico) e due senza additivi (al 12 e al 17% di contenuto idrico). Tuttavia è stato necessario procedere con un adeguato mescolamento degli additivi alla massa da pellettizzare, in maniera tale da garantire un'applicazione uniforme degli additivi stessi. Per ogni sacco, inizialmente ne è stata riversata una metà in una vasca in plastica. A questo punto è stata aggiunta metà della quantità di additivo necessario, in modo tale da avere una distribuzione uniforme su tutta la superficie esposta (Figura 6.3.5, Figura 6.3.6 e Figura 6.3.7). Successivamente è stato effettuato un rimescolamento manuale della massa, avendo cura di evitare la formazione di grumi o comunque di aree in cui ci fosse più additivo rispetto ad altre. Dopo questo rimescolamento, è stata riversata la restante parte del sacco e distribuito l'additivo restante, procedendo in sostanza in sostanza come sopra, con un rimescolamento manuale su tutto il materiale.



Figura 6.3.5 Aggiunta di amido di mais



Figura 6.3.6 Aggiunta di tannino di castagno



Figura 6.3.7 Aggiunta di lignina

Pressatura

La pellettizzazione vera e propria è stata effettuata utilizzando la pellettatrice Minipel E 80 (Figura 6.3.8), prodotta e messa in commercio dalla ditta Peruzzo s.r.l con sede a Curtarolo (PD). Questa macchina, elettrica, si caratterizza per le sue dimensioni ridotte (4 kW di potenza, 5,5 HP, 145 kg di peso, dimensioni 80x50x100) che la rendono adatta per una produzione quasi di tipo “hobbistico-domestica” del pellet. Questa pellettatrice è stata, infatti, messa in commercio per rispondere alle esigenze dell’attuale mercato italiano del pellet. La trafila della macchina presenta dei fori con un diametro di 6 mm.



Figura.6.3.8. Pellettatrice Peruzzo Minipel E 80

Inizialmente è stato necessario testare la macchina in modo tale da regolare la distanza tra i rulli e la matrice di pressatura. La distanza è stata regolata agendo (con una chiave inglese) sulle due viti presenti alla base del sistema di alimentazione. Questa distanza è, infatti, fondamentale nel condizionare la pressione esercitata alla biomassa con conseguenze sulla qualità del pellet, sul consumo energetico e sull'usura della macchina. Se è troppo elevata, la pressione esercitata tra rulli biomassa e matrice sarà limitata, con conseguente riduzione della densificazione del materiale. In queste condizioni c'è il rischio che i pellet prodotti si rompano facilmente con conseguenze negative sulla durabilità. Al contrario, se la distanza tra rulli e matrice è troppo bassa, aumentano gli sforzi e l'attrito tra le superfici. Di conseguenza ci sarà un aumento della temperatura ma soprattutto un maggior rischio che le parti metalliche vengano a

contatto con conseguenti fenomeni di usura. Una volta preparati tutti i materiali (in totale 16 materiali) si è iniziato con la produzione del pellet vera e propria. Tuttavia è stato necessario scaldare la macchina, in modo tale da portare la temperatura della trafilatura a un valore ideale (prossimo ai 100°C). Per scaldare la macchina è stato utilizzato del materiale in eccesso, cioè sempre del macinato di cippato ma che non è stato utilizzato nel processo produttivo. Per la mancanza di un termometro laser, si è stabilito che la temperatura ideale della trafilatura fosse ritenuta raggiunta quando il pellet che fuoriusciva presentava delle dimensioni accettabili. Quando si raggiungono le temperature di produzione ideale, dalla bocca di alimentazione della macchina, fuoriesce del vapore. Si è riscontrato come, con delle temperature basse, il pellet è sia caratterizzato da dimensioni ridotte, poca rigidità e al tempo stesso c'è anche una maggiore produzione di polvere.

Una volta raggiunta la temperatura ideale, uno per volta i materiali sono stati raccolti dai sacchi che li contenevano e svuotati in un recipiente in plastica in modo tale da facilitare l'operazione di alimentazione della macchina. Per la pellettatrice Peruzzo Minipel E80 l'alimentazione prevista è di tipo manuale, quindi è stata semplicemente utilizzata una paletta in plastica per raccogliere il materiale e inserirlo nella bocca di alimentazione (Figura 6.3.10). Quest'ultima è dotata di una griglia metallica (Figura 6.3.9) che ha la funzione di trattenere eventuali corpi estranei o comunque materiali di dimensioni eccessive che potrebbero danneggiare la trafilatura. Il recipiente riempito con il materiale, è stato posizionato vicino alla pellettatrice in modo tale da avere una certa continuità nella fase di alimentazione e pressatura. Uno degli aspetti fondamentali della pellettizzazione è stato proprio quello di garantire una continuità al processo produttivo del pellet, in particolare all'alimentazione della macchina con il materiale. Particolare attenzione è stata rivolta, infatti, ad alimentare, in maniera costante ed omogenea, la trafilatura. Nella situazione in cui si verifici una ridotta alimentazione oppure un'alimentazione eccessiva, si vengono a creare dei problemi soprattutto agli organi in movimento della macchina. In caso di alimentazione scarsa c'è il rischio che arrivi poco materiale nella trafilatura, e quindi i due tamburi e la trafilatura stessa vengono a contatto con dei problemi di usura anche significativi. Nell'altro caso invece, in cui l'alimentazione è troppo elevata, c'è un problema di intasamento della trafilatura. Troppo materiale, infatti, va a creare un'eccessiva resistenza al movimento

della trafilatura provocando la formazione di un tappo di materiale al di sopra della stessa. In situazioni di questo tipo si è reso necessario utilizzare un compressore ad aria compressa, indirizzando l'aria all'interno della bocca di alimentazione in modo tale da favorire la rottura del tappo e la conseguente discesa del materiale nella trafilatura. L'intensità del getto d'aria veniva regolata in base alla quantità di materiale presente per evitare che soffiando, fuoriuscisse del materiale producendo polvere.



Figura 6.3.9 Particolarità della bocca di alimentazione



Figura 6.3.10 Alimentazione manuale della pellettatrice

La pellettatrice è stata posizionata in modo tale che il pellet prodotto ricadesse direttamente nel sistema per il raffreddamento. Nel complesso sono state effettuate 16 prove di pellettizzazione corrispondenti agli altrettanti materiali preparati. Per ciascuna prova è stato annotato il tempo di inizio e fine prova, in modo tale da avere i dati necessari per determinare la produttività (riportata nella Tabella 6.3.11). Per

alcune di queste prove di pellettizzazione si sono verificate delle situazioni particolari relative alle modalità con cui il materiale si comportava durante il processo produttivo. Per esempio, nella produzione di pellet di faggio, si è riscontrata una maggiore difficoltà nel garantire un'adeguata alimentazione alla macchina. Questo materiale, infatti, avendo una densità maggiore (rispetto all' abete rosso, più leggero) ha offerto più resistenza alla pressatura, testimoniato dal fatto che la velocità di passaggio del materiale nella trafila è stata generalmente minore (rispetto a quanto si è verificato utilizzando l'abete rosso). Alimentando la macchina, infatti, si verificava frequentemente la formazione di un tappo di materiale poco al di sopra della trafila, che tendeva così a bloccarsi interrompendo la pellettizzazione. In questa situazione, in realtà più frequente per la produzione di pellet di faggio fusto, è stato necessario soffiare dell'aria all'interno della bocca di alimentazione, in modo tale da sbloccare la trafila. Per cercare di evitare la formazione del tappo, e garantire così una maggiore continuità produttiva, è stato necessario ridurre la velocità di alimentazione della macchina. Questo ha portato ad una riduzione generale della produttività. Da come si può notare dalla Tabella 6.3.11, la produttività registrata per il pellet di faggio ramaglia al 12% è stata la più alta. Mettendo a confronto però la produttività del faggio fusto (al 12 e al 17%) con quella dell'abete fusto (al 12 e al 17%) si nota come, utilizzando il primo materiale, la produttività sia inferiore (31,6 kg/h per FG FU 12 e 34,8 kg/h per FG FU 17 contro 47,7 kg/h e 41 kg/h rispettivamente di AB FU 12 e AB FU 17). La pellettizzazione del faggio ha comportato inoltre ad un maggiore aumento della temperatura della trafila rispetto a quello che si è verificato con l'abete rosso. Questa è un'altra conseguenza della maggiore densità del faggio, che offre una maggiore resistenza alla pressatura. Un'altra situazione particolare, si è verificata durante la pellettizzazione dell'abete scortecciato con l'aggiunta di tannino di castagno. In questo caso, il macinato, una volta riversato nella bocca di alimentazione, tendeva ad impastarsi e a formare un'ostruzione. La materia prima, una volta riversata rimaneva aderente alla griglia della bocca di alimentazione, che doveva quindi essere frequentemente pulita per evitare l'eccessivo accumulo di materiale. Anche per questa prova di pellettizzazione si è notato un aumento della temperatura della trafila rispetto alle altre prove effettuate. Per quanto riguarda la pellettizzazione dell'abete scortecciato al 17% di umidità con l'aggiunta di lignina, il problema che si è venuto creatosi è stato quello di dover alimentare in maniera differente la trafila. Infatti,

nonostante si trattasse di abete scortecciato (e quindi come gli altri materiali contenenti abete, c'era la possibilità di alimentare la macchina più velocemente) si è creato frequentemente il tappo di materiale al di sopra della trafila. Per questo motivo è stato necessario ridurre la velocità di alimentazione, in particolare i risultati migliori sono stati ottenuti alimentando la trafila in maniera discontinua ed a piccole dosi.

Una caratteristica particolare che è stata osservata per alcuni tipi di pellet prodotti, è stata quella della cosiddetta fioritura. I pellet cioè, non appena fuoriusciti dalla trafila, presentavano una tipica forma a mezzaluna, in sostanza una curvatura dell'asse longitudinale del singolo cilindretto. Questa particolare conformazione di alcuni pellet, è dovuta alla presenza di una maggiore quantità di acqua nel materiale di partenza. L'acqua, infatti, nel momento in cui transita nella trafila, dove ci sono temperature elevate, tende ad evaporare provocando così delle crepe in superficie che pregiudicano la forma cilindrica del pellet. Tuttavia questo fenomeno non interessa tutto il pellet prodotto ma solo una parte più o meno piccola. Nel caso però di materiale di partenza più umido, c'è una maggiore possibilità che si verifichi la fioritura dei pellet, perché c'è più acqua che è in grado di evaporare provocando quelle diverse rotture in superficie. Questa situazione è stata confermata dal fatto che una maggior quantità di pellet "fioriti" è stata osservata soprattutto per il pellet di faggio ramaglia al 17% (Figura 6.3.13) e per l'abete scortecciato al 17% (Figura 6.3.12). Tuttavia per l'abete scortecciato al 17% la fioritura è apparsa più evidente rispetto all'altro materiale, cioè con una curvatura dei pellet più accentuata dovuta alla maggiore presenza di crepe superficiali.

MATERIALE	Produttività (kg/h)
FG RAM 12%	81,9
FG RAM 17%	41,5
FG FU 12%	31,6
FG FU 17%	34,8
AB PT 12%	47,4
AB PT 17%	46,4
AB FU 12%	47,7
AB FU 17%	41
AB SCO 12%	43,9
AB SCO 17%	44
AB SCO 12% TANNINO	26,3
AB SCO 17% TANNINO	26,2
AB SCO 12% MAIZENA	66
AB SCO 17% MAIZENA	47,8
AB SCO 12 % LIGNINA	27,6
AB SCO 17% LIGINA	19

Tabella 6.3.11 Produttività delle 16 prove di pellettizzazione



Figura 6.3.12 Particolare della fioritura di pellet di abete scortecciato al 17%



Figura 6.3.13 Particolare della fioritura di pellet di faggio ramaglia al 17%

Raffreddamento

Come descritto nel capitolo 3.3, il pellet deve essere raffreddato subito dopo la fuoriuscita dalla pellettatrice per permetterne l'indurimento. In pratica il prodotto passa da una temperatura di circa 80-90°C a quella dell'ambiente o di poco inferiore (l'ideale sarebbe intorno ai 25°C). Questo sbalzo termico è fondamentale nel determinare l'indurimento dei singoli cilindretti, e quindi migliorarne le caratteristiche meccaniche. In questo processo produttivo è stato utilizzato un sistema di raffreddamento ad aria controcorrente. La struttura di raffreddamento è costituita da un telaio in legno di forma quadrangolare sul quale è posto internamente, circa a metà profondità una griglia metallica (Figura 6.3.14). Quest'ultima ha il compito di trattenere i pellet integri, favorire l'allontanamento delle polveri e ovviamente permettere il passaggio dell'aria. Collegato ad un lato del telaio con delle viti, è stato installato un ventilatore con motore elettrico (Figura 6.3.15). Questo ventilatore emette aria che in sostanza scorre verso l'alto provocando il raffreddamento dei pellet presenti sopra la griglia metallica.



Figura 6.3.14 Sistema di raffreddamento con il telaio in legno



Figura 6.3.15 Ventilatore con motore elettrico collegato al telaio

Mano a mano che il pellet veniva prodotto e ricadeva nel cassone, periodicamente lo si spostava verso la parte alta della griglia in modo tale da evitare che si accumulasse tutto nella parte bassa. In questo modo si rendeva migliore e più omogenea la fase di raffreddamento.

Raccolta del prodotto finito

Al termine di ogni prova di pellettizzazione, tutto il materiale prodotto è rimasto nel cassone per il raffreddamento fino a quando la temperatura del pellet non si fosse abbassata significativamente. Una volta raggiunta la temperatura ambiente, il pellet è

stato svuotato dal cassone, aprendo lo sportello in metallo posto su uno dei lati del telaio. Il tutto è stato raccolto in sacchi in plastica, su ognuno dei quali è stato appuntato il tipo di pellet contenuto. Ogni sacco è stato poi pesato, in modo tale da avere un dato sulla produzione necessario poi per il calcolo della produttività. Tutti i materiali prodotti sono stati poi portati in laboratorio per le successive analisi. Un esempio dei pellet ottenuti è rappresentato nelle Figure 6.3.16, 6.3.17, 6.3.18, 6.3.19, 6.3.20, 6.3.21, 6.3.22, 6.3.23.



Figura 6.3.16 Abete fusto 17%



Figura 6.3.17 Faggio fusto 17%



Figura 6.3.18 Abete pianta 17%



Figura 6.3.19 Faggio ramaglia 17%



Figura 6.3.20 Abete scortecciato 17%



Figura 6.3.21 Abete scortecciato 17% tannino



Figura 6.3.22 Abete scortecciato 17% lignina



Figura 6.3.23 Abete scortecciato 17% maizena

6.4 Analisi qualitative del pellet

Per ognuno dei campioni di pellet prodotti si è proceduto con le diverse analisi di laboratorio, rispettando il seguente ordine: massa volumica sterica (BD), durabilità (DU), contenuto idrico (M), densità (De). Queste analisi sono state effettuate nel

Laboratorio Biocombustibili del Dipartimento TESAF (Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali). Le diverse analisi sono state effettuate in questo preciso ordine in modo tale da rispettare lo schema sperimentale definito a priori (Figura 6.4.1). Il fattore, o meglio il limite principale che ha condizionato l'esecuzione delle analisi è stata la ridotta quantità del pellet prodotto (soprattutto quello da abete scortecciato puro e con additivi). Innanzitutto per ogni tipologia di pellet prodotto (16 in totale) si è stabilito, ai fini della ripetibilità statistica delle prove, di effettuare tre ripetizioni. Per questo motivo ogni sacco, corrispondente a un tipo di pellet è stato diviso in tre parti uguali, in sostanza in tre "sottocampioni". Ciascuno di questi, è stato sottoposto alla determinazione della massa volumica sterica, della durabilità, del contenuto idrico e della densità. Tuttavia per la sola massa volumica sterica la suddivisione in sottocampioni non è stata effettuata. I diversi tipi di pellet non raggiungevano infatti la quantità necessaria per effettuare su ciascuno dei sottocampioni le tre ripetizioni richieste dall'analisi della BD. Questo limite è stato superato effettuando direttamente su tutta la massa del campione, nove ripetizioni, garantendo così la ripetibilità della prova stessa. Questo è il motivo per cui la determinazione della BD è stata effettuata come prima prova.

Faggio ramaglia		Faggio fusto		Abete rosso pianta intera		Abete rosso fusto intero		Abete rosso fusto scortecciato	
M 12%	M 17%	M 12%	M 17%	M 12%	M 17%	M 12%	M 17%	M 12%	M 17%

Abete rosso fusto scortecciato		Abete rosso fusto scortecciato		Abete rosso fusto scortecciato		Abete rosso fusto scortecciato	
senza additivi		Maizena		Tannino		Lignina	
M 12%	M 17%	M 12%	M 17%	M 12%	M 17%	M 12%	M 17%

Figura 6.4.1 Schemi sperimentale adottati.

Massa volumica sterica

Per il calcolo della massa volumica sterica (BD) è necessario seguire le procedure indicate dalla normativa di riferimento, in questo caso la UNI EN 1503:2010, "Determinazione della massa volumica apparente". Questa norma stabilisce che per la determinazione della Bulk Density è necessario utilizzare un contenitore di misura normalizzato, e cioè di volume noto. Per analizzare il pellet viene scelto un contenitore metallico avente volume pari a 5 l (0,005 m³). La scelta ricade su questo contenitore poiché, come previsto dalla normativa, c'è la possibilità di scelta in funzione alle dimensioni delle particelle da analizzare. Dato che il pellet ha dimensioni inferiori a 12 mm viene utilizzato il contenitore da 5 l (dimensioni standard di 228 mm di altezza e 167 mm di diametro). Prima di iniziare la procedura di determinazione, ogni campione di pellet è stato riversato dai sacchi di plastica ad una vaschetta in modo tale da facilitare le successive operazioni.

Per determinare la BD è necessario svolgere una serie di passaggi standardizzati. Per prima cosa viene pesato il contenitore vuoto, in modo tale da stabilirne la tara (P0). Si utilizza una bilancia con precisione di 0,1 g (Figura 6.4.2 e Figura 6.4.3). Il contenitore vuoto viene inserito in un piccolo telaino metallico in grado di contenerlo (Figura 6.4.4). Il tutto all'interno di una struttura quadrangolare in legno. Successivamente, si riempie il contenitore con il pellet (Figura 6.4.5), prelevandolo con una paletta in plastica. Il pellet va versato dall'alto fino a quando il contenitore non è completamente pieno, avendo cura di formare un cono di materiale il più alto possibile nella parte sommitale (Figura 6.4.6). A questo punto il contenitore viene sollevato prendendolo per le due apposite maniglie laterali e lasciato cadere verticalmente all'interno del telaino metallico. È necessario sollevare il contenitore ad un'altezza di 150 mm dal piano in legno. La procedura di sollevamento e rilascio del contenitore viene ripetuta per tre volte. Al termine dei tre rilasci si aggiunge un pò di materiale all'interno del contenitore. Importane comunque che il rilascio avvenga il più verticalmente possibile, in modo tale da evitare un'eccessiva fuoriuscita di materiale. Questa procedura serve a simulare la tipica situazione che si verifica durante il carico, trasporto e scarico del pellet. Durante queste operazioni infatti, si verifica un continuo assestamento tra le diverse particelle (in questo caso tra i singoli pellet) che tendono ad incastrarsi le une alle altre riducendo così gli spazi vuoti presenti. Dopo il terzo rilascio si utilizza un asse

di legno di dimensioni prefissate (600 mm di lunghezza e sezione di 50 mm x 50 mm) per livellare il materiale presente sulla sommità del recipiente, in modo tale da eliminare i pellet in eccesso (Figura 6.4.7). Una volta che c'è stato questo livellamento (spostando l'asse di legno lungo i bordi del recipiente non fuoriesce più del pellet) si aggiunge ancora del materiale per occludere eventuali spazi vuoti rimasti ancora in superficie. A questo punto il recipiente pieno viene pesato (P1). Ora il recipiente viene svuotato, e il materiale riversato nella vaschetta insieme a quello che non era stato utilizzato. Si mescola il tutto e si effettuano altre otto ripetizioni della procedura. Per il motivo descritto precedentemente sono state così effettuate nove ripetizioni di BD per ogni campione. Secondo la norma, per la BD sono necessarie infatti tre ripetizioni che moltiplicate per i tre ipotetici "sottocampioni" danno luogo a nove ripetizioni complessive. Queste nove ripetizioni in sostanza sono state effettuate fin da subito. Una volta che si hanno a disposizione tutti i dati necessari si procede al calcolo della BD utilizzando la seguente formula:

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

dove:

BD è la massa volumica apparente espressa in $\text{kg/m}^3_{\text{stero}}$;

P0 è la massa in kg della tara;

P1 è la massa in kg del contenitore pieno di pellet;

V è il volume del contenitore.

Questa formula sarà applicata per tutte e nove le ripetizioni e per ottenere la BD finale del del pellet se ne farà la media. La massa volumica apparente così calcolata, fa riferimento a campioni freschi. Affinchè la ripetibilità del calcolo della BD sia soddisfatta, è necessario che la massima differenza consentita tra le ripetizioni effettuate sullo stesso campione sia inferiore al 2% (per campioni con massa volumica apparente uguale o superiore a $300 \text{ kg/m}^3_{\text{stero}}$)



Figura 6.4.2 Display della bilancia utilizzata per la BD



Figura 6.4.3 Piatto della bilancia



Figura 6.4.4 Contenitore metallico utilizzato per la BD



Figura 6.4.5 Riempimento del contenitore



Figura 6.4.6 Formazione del cono di materiale nella parte alta del contenitore



Figura 6.4.7 Rimozione del pellet in eccesso con la tavoletta in legno

Durabilità

Per durabilità meccanica si intende la resistenza dei diversi biocombustibili legnosi densificati (pellet o briquettes) alle diverse sollecitazioni meccaniche che si verificano tipicamente durante il trasporto o comunque con la movimentazione del materiale. Questa resistenza viene espressa in % di materiale che è in grado di resistere a tali sollecitazioni. Per la determinazione della durabilità meccanica (D) si fa riferimento alla normativa vigente, la UNI EN 15210-1-2010, "Determinazione della durabilità meccanica di pellet e bricchette". Parte 1: Pellet". In questa norma viene descritta la procedura per la determinazione della durabilità meccanica del pellet e il macchinario necessario per l'esperimento. Quest'ultimo è rappresentato da un sistema di rotazione di vasche metalliche all'interno delle quali viene inserito il pellet. Queste vasche devono essere ermetiche alla fuoriuscita di polvere. Devono essere poi inserite negli appositi spazi di un telaio metallico che quando attivato inizia una rotazione continua a determinati giri al minuto. In questo caso la velocità impostata alla macchina è di 50 giri al minuto e in totale 500 rotazioni complete delle vasche. Utilizzando questo macchinario si cerca di ricreare le condizioni a cui va incontro il pellet durante il trasporto e quindi continui urti e collisioni sia tra i singoli cilindretti sia con le pareti del contenitore. In questo modo, al termine delle rotazioni una parte dei pellet rimarranno integri, altri si saranno rotti e sgretolati provocando la formazione di particelle fini.

In base allo schema sperimentale definito a priori, a partire dall'analisi della durabilità, ogni tipo di pellet prodotto (si ricorda che in totale ne sono stati prodotti 16 diversi) è stato suddiviso in tre parti uguali. Partendo cioè dal materiale contenuto nel sacco, la massa totale è stata ripartita egualmente in tre contenitori in plastica contrassegnati dalle lettere A, B, C. il contenuto di ogni vasca rappresenta così il "sottocampione" da sottoporre alle analisi. Per ogni vasca è stato prelevato inizialmente il pellet necessario all'analisi della densità, poi sono state effettuate le prove di durabilità. Ciò che rimaneva da quest'ultime è stato utilizzato per l'analisi del contenuto idrico.

La durabilità meccanica viene determinata per ogni campione di pellet che viene così suddiviso in tre parti uguali (sottocampione A, sottocampione B, sottocampione C). Per ciascuna di queste si procede con quanto descritto nella normativa. Vengono riempite tre vasche metalliche (contrassegnate con lettere diverse per facilitarne il

riconoscimento). Soltanto per una parte dei campioni (in particolare i diversi tipi di pellet di abete scortecciato) sono state riempite solo due vasche. Questo perché il materiale non era sufficiente a riempirne tre. All'interno di ogni vasca, su uno dei lati lunghi, è presente una barra trasversale che ha il compito di ricreare le condizioni di collisione e abrasione volute (Figura 6.4.9). Ogni vasca viene riempita con 500 g di pellet (m_E), precedentemente setacciato con vaglio di 3,15 mm (Figura 6.4.8) per eliminare le particelle fini presenti (che andrebbero ad alterare la determinazione della durabilità). Dopo il riempimento, le vasche vengono inserite nel telaio del macchinario (Figura 6.4.10), viene chiuso il coperchio protettivo e si avvia la rotazione (Figura 6.4.11). Vengono impostati 500 giri complessivi. Una volta terminata la rotazione, si estraggono le vasche e per ognuna si setaccia con lo stesso vaglio il materiale, e lo si pesa nuovamente (m_A). A questo punto è possibile calcolare la durabilità meccanica, in % sul peso iniziale con l'equazione seguente:

$$D_u = \frac{m_A}{m_E} * 100$$

dove

D_u è la durabilità meccanica espressa in %;

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

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

Per ogni sottocampione si ottengono così tre valori di durabilità e se ne fa la media. Di conseguenza per ogni campione avremo tre durabilità (Durabilità del sottocampione A, Durabilità del sottocampione B, Durabilità del sottocampione C) si farà ancora la media tra queste per arrivare al risultato finale e si approssimerà allo 0,1%.



Figura 6.4.8 Setaccio da 3,15 mm metalliche



Figura 6.4.9 Interno delle vaschette



Figura 6.4.10 Le vaschette metalliche vengono caricate nel telaio rotante per la prova di durabilità



Figura 6.4.11 Telaio in movimento per la prova di durabilità

Contenuto idrico

Come descritto nel 3.2, il contenuto idrico esprime la quantità di acqua contenuta nel campione tal quale cioè facendo riferimento alla massa di legno fresco. Questo importante parametro qualitativo viene determinato in laboratorio seguendo le prescrizioni previste dalla normativa UNI EN 14774-1:2009, "Determinazione dell'umidità – Metodo di essiccazione in stufa. Parte 1: Umidità totale – Metodo di riferimento". Il contenuto idrico è stato determinato sempre per ciascuno dei tre sottocampioni di ogni tipo di pellet. In particolare, il materiale utilizzato per questa prova era quello che non è stato utilizzato nella prova di durabilità precedente. Particolare attenzione è stata posta, infatti, alla quantità di pellet disponibile per il contenuto idrico, poiché come previsto dalla norma, per ogni campione è necessario analizzare almeno 300 g di materiale. Quando questo quantitativo minimo non veniva raggiunto, si è deciso di riutilizzare il pellet sottoposto alla prova di durabilità. Seppur compromesso a livello fisico e meccanico dalle sollecitazioni subite durante la prova di durabilità, il pellet mantiene comunque il contenuto idrico che aveva precedentemente. Seguendo così la procedura della norma, per ogni sottocampione sono state predisposte tre vaschette in alluminio e contrassegnate con una lettera o un numero per permetterne il riconoscimento. È stata misurata la tara della vaschetta (P0), poi è stata riempita di materiale e nuovamente pesata (P1). A questo punto le vaschette sono state inserite in stufa a 105° e lasciate al suo interno per il periodo di tempo necessario al raggiungimento dello stato anidro del materiale (cioè materiale completamente secco) (Figura 6.4.13). Dopo che il materiale si è completamente seccato, le vaschette sono state tolte dalla stufa e immediatamente pesate. Infatti la misura del peso della vaschetta piena dopo l'essiccazione (P2) deve essere effettuata non appena la si toglie dalla stufa. In questo modo si evita che l'umidità dell'aria vada ad alterare il peso reale del materiale. Allo stato anidro infatti, il materiale assorbe molto velocemente l'acqua naturalmente presente nell'ambiente, in modo tale da raggiungere uno stato di equilibrio con lo stesso. Prima di pesare P2 è stato posto uno spessore di legno sul piatto della bilancia, per evitare che la vaschetta ancora calda vada a danneggiare la bilancia (Figura 6.4.12). La bilancia utilizzata per questa prova ha una precisione di 0,01 g. Il contenuto idrico viene poi calcolato applicando la seguente formula:

$$M = \frac{(P1 - P2)}{(P1 - P0)} \times 100$$

dove

M è il contenuto idrico in %;

P0 è la tara della vaschetta;

P1 è il peso della vaschetta più il materiale prima dell'essiccazione;

P2 è il peso della vaschetta più il materiale dopo dell'essiccazione.

Una volta determinato il contenuto idrico delle tre vaschette, ne si fa la media per avere l'M del sottocampione relativo e facendo la media tra questi si ottiene l'M di tutto il materiale.

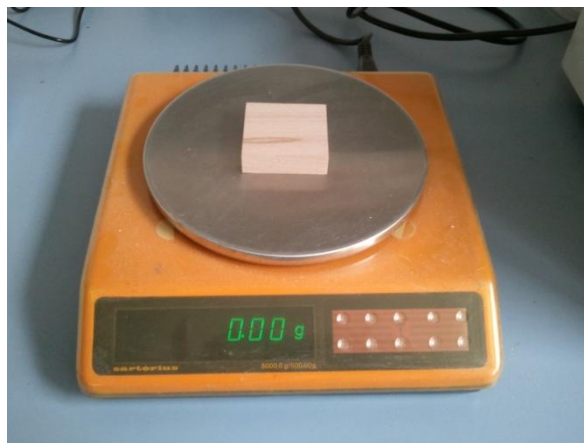


Figura 6.4.12 Bilancia di precisione utilizzata per pesare le vaschette di materiale



Figura 6.4.13 Le vaschette con il pellet inserite in stufa a 105°C per l'essiccazione

Densità

Per la determinazione della densità del pellet (chiamata anche massa volumica, da non confondere con la massa volumica sterica precedentemente descritta), si è seguita la procedura standardizzata dalla normativa di riferimento, la UNI EN 15150 – 2011, “Determinazione della massa volumica delle singole particelle”. Questa norma stabilisce i passaggi necessari per determinare la densità delle singole particelle di pellet. Questa caratteristica qualitativa risulta variabile nel tempo perché è condizionata dall’umidità del materiale e anche da eventuali abrasioni con superfici o corpi estranei (che possono avvenire per esempio durante le fasi di trasporto e stoccaggio). Poiché la densità non è altro che il rapporto tra massa e volume di un corpo, per la sua determinazione è necessario fare riferimento a queste due grandezze. Il volume viene determinato sfruttando il principio di Archimede secondo il quale la spinta di galleggiamento di un corpo immerso in un liquido è uguale al peso del volume di liquido spostato. Facendo la differenza tra la misura del peso in aria e quella in acqua è possibile determinare il galleggiamento. Di conseguenza il volume del campione è calcolato facendo riferimento ad un liquido di densità nota, in questo caso acqua potabile della rete idrica a temperatura ambiente.

La normativa prevede l’utilizzo di una attrezzatura particolare, che viene montata direttamente sulla bilancia utilizzata (bilancia con precisione fino a 0,0001 g) (Figura 6.4.14). Questa attrezzatura è rappresentata da un piccolo telaio metallico costituito da due supporti laterali che sostengono in alto un piccolo piatto cilindrico. Questo stesso piatto sostiene attraverso un filo metallico, un secondo piatto, forato che viene utilizzato per le immersioni nel beacker. Il beacker poggia su un ponte metallico evitando così che poggi direttamente sul piatto della bilancia. Il telaio che sorregge i due piattini, poggia invece sul piatto della bilancia grazie ad un altro ponte sottostante. Con questa struttura (Figura 6.4.15) è possibile misurare la massa del pellet in aria e una volta immerso, in acqua. La procedura standardizzata dalla norma prevede che il beacker venga riempito con acqua e con 1,5 g/l di un tensioattivo apposito (nello specifico Triton X-100) che ha il compito di aumentare la tensione superficiale del liquido. In questo modo si evita che il pellet, una volta immerso, assorbi velocemente acqua. Una volta preparata, la soluzione viene mescolata grazie ad un agitatore magnetico, in modo tale che venga data un omogeneità al liquido. A

questo punto si monta il telaio sul beacker, e si pone tutto sulla bilancia. Quest'ultima viene tarata quando il piattino inferiore è vuoto e completamente sommerso nel liquido fino alla massima profondità. A questo punto vengono presi 3 pellet (tra i migliori), inseriti nel piattino superiore e pesati (m_a). Subito dopo, sempre gli stessi pellet vengono posti nel piattino inferiore (dopo averlo asciugato per evitare che assorbano acqua già da subito) ed immersi nel liquido. Con l'immersione è necessario leggere velocemente il peso riportato dalla bilancia (m_l) per evitare un eccessivo assorbimento (lettura della misura entro 3-5 s). Infatti il valore m_l che è stato preso è quello che si legge nella frazione di tempo in cui il valore riportato sul display della bilancia si ferma. La principale difficoltà in questa analisi è stata proprio relativa alla lettura del peso dei pellet in acqua. In molti casi, per alcuni tipi di pellet, è necessario ripetere l'immersione. Questo è stato necessario soprattutto per quei tipi di pellet che avevano dei cilindretti con molte crepe superficiali o comunque non completamente lisci. Con la presenza di crepe infatti, l'assorbimento di acqua è più veloce e di conseguenza anche l'aumento di peso. Al contrario per i pellet migliori, con una superficie liscia e poco crepata, l'assorbimento di acqua è minore e di conseguenza la lettura del peso è facilitata. Le maggiori difficoltà nella lettura si sono avute soprattutto con i pellet di abete fusto 12%, abete fusto 17%, abete scortecciato 17%.

La normativa prevede di effettuare 10 immersioni per ogni campione. La densità viene calcolata con la seguente formula:

$$\rho = \frac{m_a}{(m_a - m_l)} * \rho_l$$

dove

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

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

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

ρ_l è la densità del liquido (acqua più detergente), normalmente uguale a $0,9958 \text{ g}/\text{cm}^3$.

In questo caso per ogni sottocampione sono state effettuate dieci immersioni, mediate poi tra loro. La densità finale del pellet deriva dalla media delle densità dei sottocampioni.

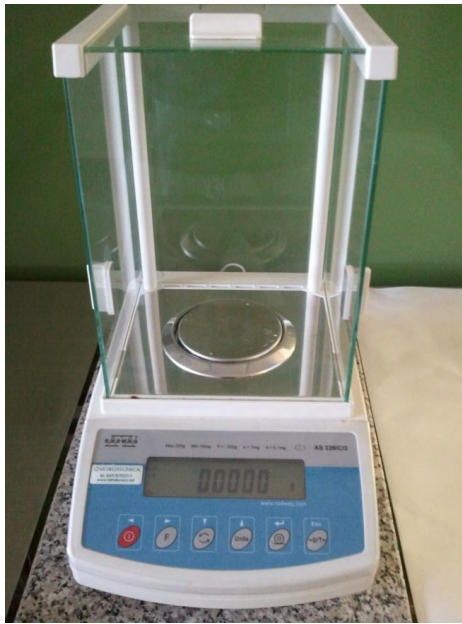


Figura 6.4.14 Bilancia di precisione utilizzata per la prova di densità del pellet

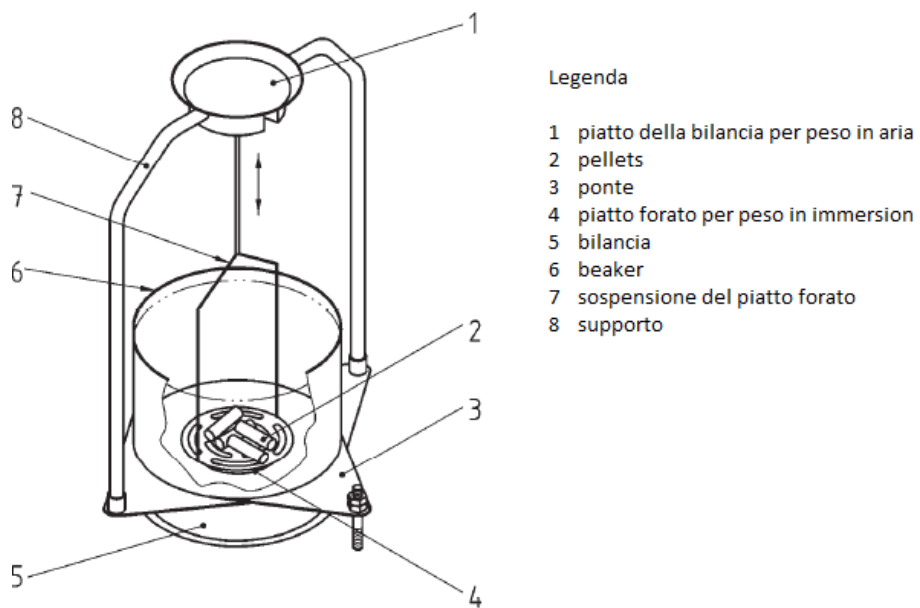


Figura 6.4.15 Struttura utilizzata per la determinazione della densità del pellet.

6.5 Analisi statistica

Una volta ottenuti tutti i dati necessari, è stata effettuata sulla base del disegno sperimentale definito precedentemente (Figura 6.4.1), un'analisi statistica della varianza a due vie di tipo ANOVA. Le variabili esaminate in questo studio sono quindi il contenuto idrico, la massa volumica apparente, la densità e la durabilità, che sono state messe in relazione con i due fattori principali cioè l'origine del materiale e il tipo di trattamento utilizzato (contenuto idrico del materiale di partenza). Dal disegno sperimentale, sono stati così individuati due disegni fattoriali, uno per i soli materiali non trattati (FG RAM, FG FU, AB PT, AB FU, AB SCO) e l'altro per l'unico materiale trattato con additivi (AB SCO, AB SCO LIG, AB SCO MAIZ, AB SCO TANN). I due disegni fattoriali risultano così essere rispettivamente $5 \times 2 \times 3$ e $4 \times 2 \times 3$ (considerando i due contenuti idrici della materia prima e le tre ripetizioni per ogni analisi). Per ciascuna delle variabili esaminate è stata effettuata un'analisi della varianza a più fattori e un'analisi dei singoli componenti della varianza. Per l'analisi statistica è stato necessario riferire i valori di BD e De determinati, alla condizione anidra, in modo tale da evitare un problema di autocorrelazione (autocorrelazione tra BD e De con il contenuto idrico di partenza). Tuttavia nei grafici riportati nel capitolo dei risultati, i valori di BD e De sono quelli effettivamente determinati dalle analisi di laboratorio, quindi riferiti allo stato umido del campione. È stata utilizzata anche la procedura LSD (Least Significant Difference) di Fisher. Con questa procedura è possibile individuare quali medie sono significativamente differenti dalle altre. In sostanza si possono individuare gruppi (intesi come materiale di origine) omogenei tra loro, che presentano cioè una differenza tra le medie (medie dei minimi quadrati) non significativa.

Nell'analisi è stato adottato un livello di confidenza del 95% ed è stato definito un effetto significativo delle variabili quando il $P\text{-value} < 0,05$.

7 Risultati

Dai risultati ottenuti in laboratorio e dall'analisi statistica effettuata, è possibile determinare in che misura le caratteristiche qualitative del pellet, siano influenzate dall'origine del materiale (compresa l'aggiunta di additivi) e dal trattamento subito dalla materia prima, inteso come contenuto idrico modificato nella fase di condizionamento. Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti per ciascuna delle variabili analizzate (massa volumica, durabilità, contenuto idrico, densità) prendendo in considerazione prima i materiali puri e poi anche l'unico materiale trattato con gli additivi (abete scortecciato). In quest'ultimo caso le tre diverse tipologie di pellet ottenute con l'aggiunta di additivi sono state messe a confronto con l'AB SCO puro in modo tale da poter verificare come i diversi parametri determinati sono cambiati dal materiale puro a quello trattato.

7.1 Risultati materiali non trattati

Massa volumica

Per le diverse tipologie di pellet, sono stati determinati valori di massa volumica piuttosto eterogenei (Grafico 7.1.2). Confrontando i valori di BD ottenuti da un materiale non trattato, il valore più alto di BD viene raggiunto dall'abete scortecciato 12% con $674,3 \text{ Kg/m}^3_{\text{stero}}$ mentre la BD più bassa è quella del faggio ramaglia 17% con $579,5 \text{ Kg/m}^3_{\text{stero}}$. Dai risultati ottenuti si osserva come per tutti e cinque i materiali, con l'incremento del contenuto idrico dal 12 al 17% c'è una riduzione della BD. La riduzione di BD maggiore si ha per il pellet di abete pianta che con un decremento di $74,2 \text{ Kg/m}^3_{\text{stero}}$ (si passa infatti da $667,2 \text{ Kg/m}^3_{\text{stero}}$ a $593 \text{ Kg/m}^3_{\text{stero}}$ ad un contenuto idrico rispettivamente del 12 e del 17%).

Dall'analisi statistica effettuata risulta che sia l'origine del materiale che il tipo di trattamento hanno un effetto statisticamente significativo sulla BD del pellet ottenuto. In particolare i *P-value* risultanti dall'ANOVA a più fattori sono inferiori a 0,05 sia per l'origine che per il trattamento come riportato dalla Tabella 7.1.1, sempre con un intervallo di confidenza del 95%. Dall'analisi dei singoli componenti della varianza, è stata valutata l'entità della variabilità connessa a ciascun fattore (origine e trattamento) detti appunto componenti della varianza. In questo caso, il fattore che più contribuisce alla varianza è il trattamento del materiale, con un contributo percentuale pari a 99,33 % della variazione totale. In sostanza il contenuto idrico del materiale di partenza è il fattore principale che condiziona la massa volumica apparente del pellet.

Dal test LSD è risultato che i gruppi omogenei sono quello dell'AB PT e AB FU. In sostanza la differenza tra le medie di questi due gruppi non è significativa dal punto di vista statistico e quindi possono essere considerati gruppi omogenei (differenza 9,08279).

Fattori	P-value	Contributo alla varianza (%)
Origine	0,0000	0,00
Trattamento	0,0000	99,33

Tabella 7.1.1 P-value e contributo alla varianza dei due fattori considerati per la BD

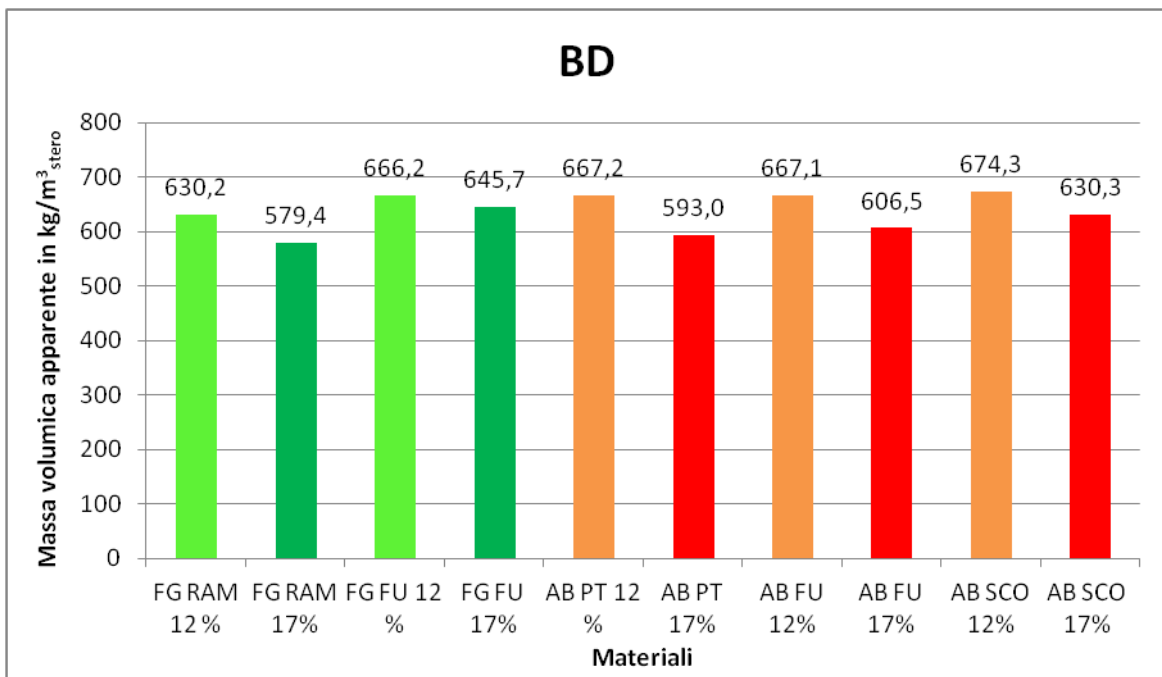


Grafico 7.1.2 Massa volumica apparente in kg/m³_{stero} dei cinque diversi materiali non trattati (a due contenuti idrici di partenza)

Durabilità

Per quanto riguarda la durabilità del pellet, i risultati ottenuti (Grafico 7.1.4) mostrano dei valori di DU piuttosto bassi (considerando che per la classe di qualità del pellet più bassa, la classe B, il limite minimo di DU deve essere $\geq 96,5\%$). Tra i cinque materiali non trattati, la DU più alta viene raggiunta dal pellet FAG RAM 17% e AB FU 17% rispettivamente con il 98,6 % e 98,5%. La durabilità più bassa è invece quella del pellet di FAG FU 12% con l'87,5%. Per tutte le tipologie di pellet ottenute si osserva come all'aumentare del contenuto idrico, dal 12 al 17%, c'è un incremento della durabilità. L'incremento maggiore di durabilità si ha per il pellet di FAG FU (+8,2%) che passa da un valore di 87,5% al 12% di contenuto idrico, ad uno del 95,7% al 17% di contenuto idrico.

Dall'analisi statistica si può concludere che i due fattori considerati, origine del materiale e trattamento, hanno un effetto statisticamente significativo sulla DU del pellet ottenuto. Per entrambi i fattori infatti il *P-value* è inferiore a 0,05 come viene riportato dalla Tabella 7.1.3. Dall'analisi dei componenti della varianza risulta che il fattore che incide in maniera esclusiva sulla varianza è il trattamento, con un contributo pari al 98,98%.

Dal test LSD è risultato che i gruppi omogenei sono: AB SCO, AB PT, AB FU (con differenze di 0,4; 0,15; 0,25 rispettivamente tra AB FU e AB SCO, tra AB FU e AB PT, e tra AB PT e AB SCO), mentre il gruppo AB FU è omogeneo con FG RAM (differenza - 1,13333).

Fattori	P-value	Contributo alla varianza (%)
Origine	0,0000	0,00
Trattamento	0,0000	98,98

Tabella 7.1.3 *P-value* e contributo alla varianza dei due fattori considerati per la DU

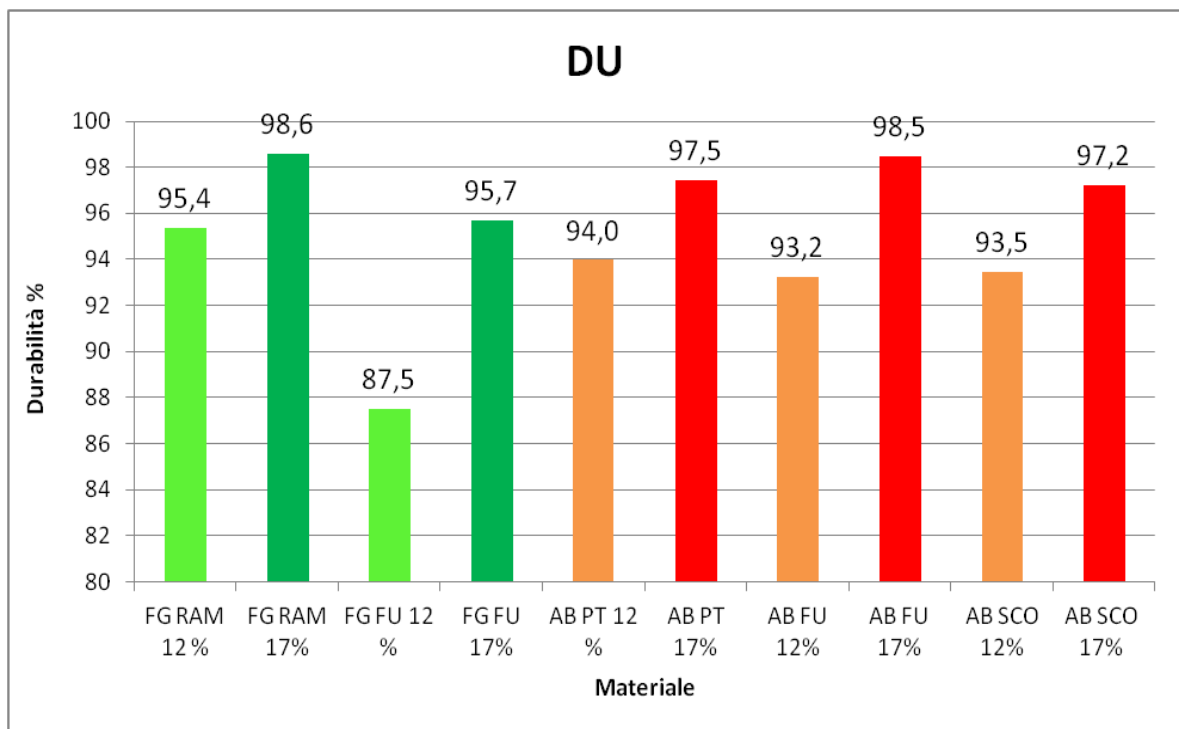


Grafico 7.1.4 Durabilità espressa in % dei cinque diversi materiali non trattati (a due contenuti idrici di partenza)

Contenuto idrico

Il contenuto idrico del pellet ottenuto dai cinque diversi materiali non trattati è riportato nel Grafico 7.1.6. Si osserva come il contenuto idrico più alto viene ovviamente raggiunto dai pellet ottenuti da un materiale di partenza con il 17% di M. Il valore più alto è quello dell'AB PT 17% con un M di 11,9%. Il pellet di AB PT è anche quello che ha subito un incremento maggiore (+3,58%) del contenuto idrico passando da un materiale di partenza al 12% a quello al 17% di M. Il pellet con il contenuto idrico più basso è quello di FG FU 12% con un valore di 4,76%.

Dall'analisi statistica risulta che entrambi i fattori considerati, origine e trattamento hanno un effetto statisticamente significativo sulla varianza del contenuto idrico (Tabella 7.1.5). Per entrambi i fattori infatti la *P-value* è inferiore a 0,05. Per quanto riguarda l'analisi dei singoli componenti della varianza, il fattore che più influenza la

varianza del M è il trattamento, con un contributo dell'80,37%. Tuttavia rispetto agli altri parametri l'origine del materiale risulta avere un contributo alla varianza discreto, pari a 19,13%.

Dall'analisi LSD risulta che tutti i gruppi non sono omogenei tra loro.

Fattori	P-value	Contributo alla varianza (%)
Origine	0,0000	19,13
Trattamento	0,0000	80,37

Tabella 7.1.5 P-value e contributo alla varianza dei due fattori considerati per il M

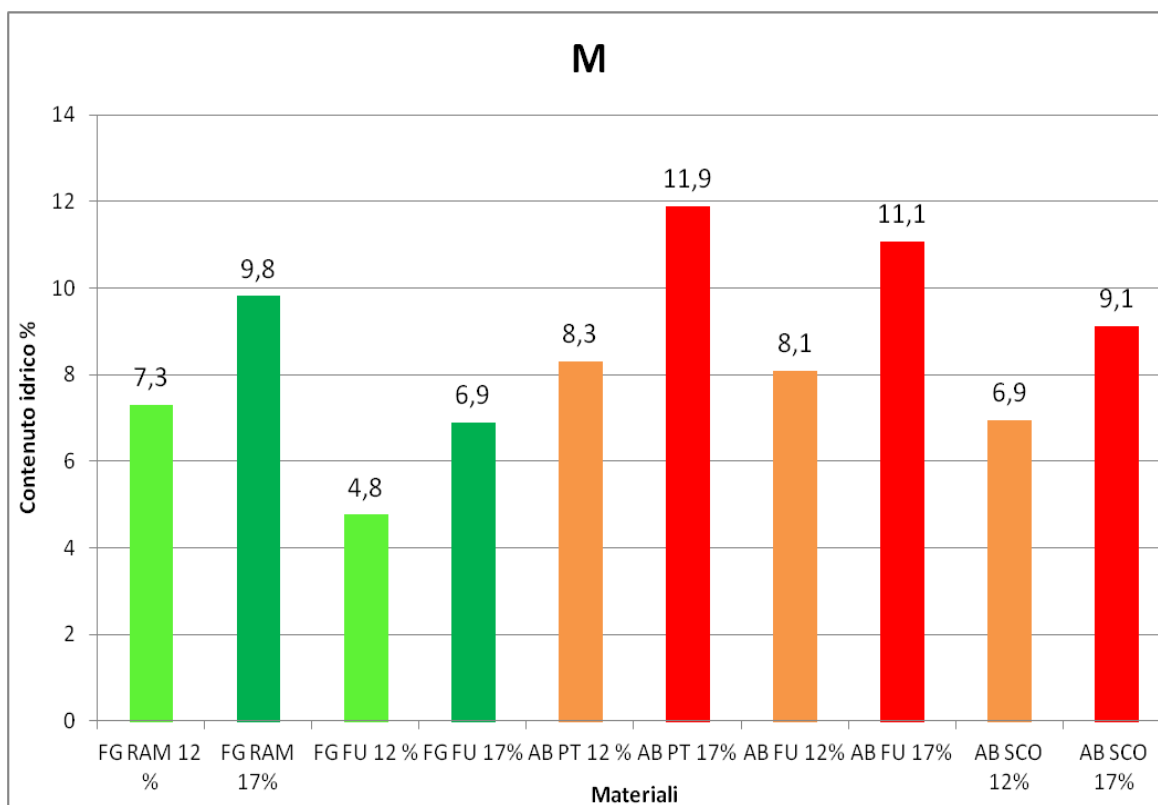


Grafico 7.1.6 Contenuto idrico espresso in % dei cinque diversi materiali non trattati (a due contenuti idrici di partenza)

Densità

La densità dei pellet ottenuti dai cinque materiali non trattati è riportata nel Grafico 7.1.8. La densità più alta è quella del FG FU 12% e dell'AB SCO 12% con un valore per entrambi di $1,33 \text{ kg/m}^3$. Il pellet con la densità più bassa è quello di FG RAM 17%, con un valore di $1,24 \text{ kg/m}^3$. Per questo parametro si osserva come all'aumentare del contenuto idrico della materia prima, dal 12 al 17%, ci sia una riduzione della densità del pellet. In particolare la riduzione più forte si ha per il pellet di AB PT ($-0,04 \text{ kg/m}^3$) che passa infatti da $1,29$ a $1,25 \text{ kg/m}^3$.

Dall'analisi della varianza risulta che entrambi i fattori considerati, origine e trattamento, hanno un effetto statisticamente significativo sulla varianza della De. Infatti come riportato dalla Tabella 7.1.7, il *P-value* determinato per entrambi i fattori è inferiore a 0,05. Dall'analisi dei singoli componenti della varianza risulta che il fattore che condiziona maggiormente la varianza della De è il tipo di trattamento adottato con un contributo pari a 57,17%. Il contributo alla varianza dell'altro fattore, l'origine del materiale è invece pari a 41,21%.

Dall'analisi LSD risulta che ci sono due gruppi omogenei, l'AB PT e il FG RAM (con una differenza di $-0,00388251$).

Fattori	P-value	Contributo alla varianza (%)
Origine	0,0000	41,21
Trattamento	0,0000	57,17

Tabella 7.1.7 *P-value* e contributo alla varianza dei due fattori considerati per la De

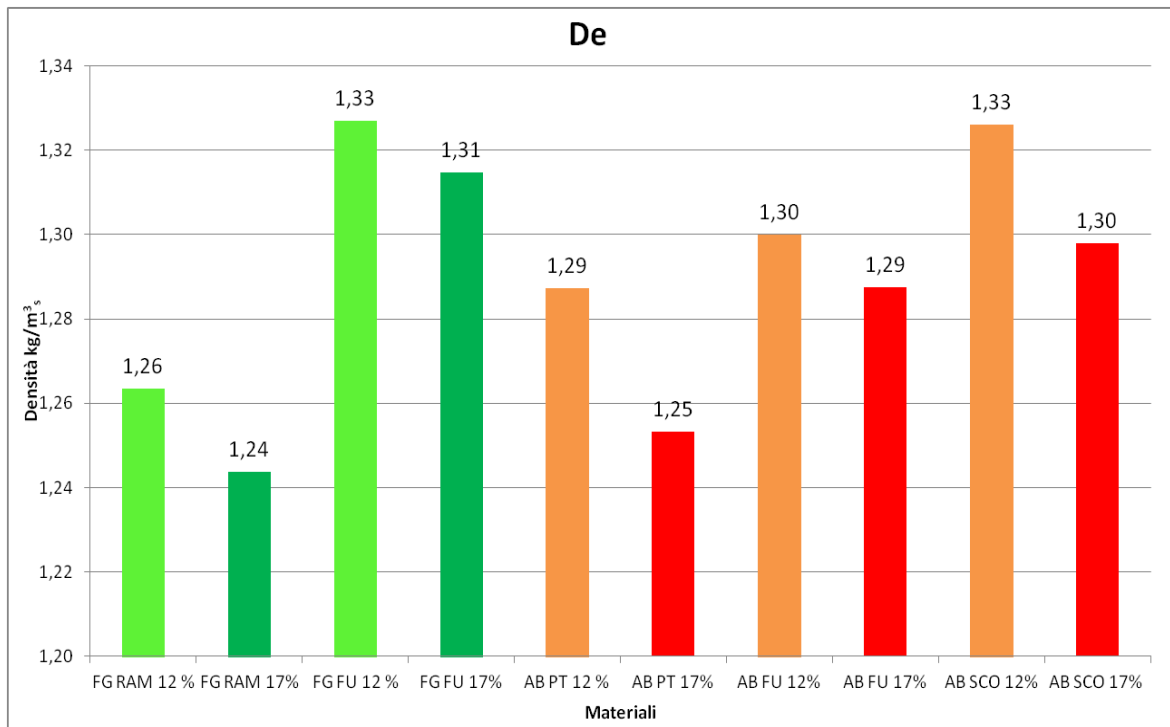


Grafico 7.1.8 Densità espressa in kg/m³ dei cinque diversi materiali non trattati (a due contenuti idrici di partenza)

7.2 Risultati materiali trattati

Massa volumica

Per i pellet ottenuti dall'abete scortecciato, sono stati determinati i valori di BD riportati nel Grafico 7.2.2. Si osserva come il valore di BD più alto viene raggiunto dall'AB SCO 17% con l'aggiunta di lignina che arriva a 711,8 Kg/m³_{stero}. La BD più bassa è invece quella dell'AB SCO 17% con l'aggiunta di maizena. Per questo materiale si osserva come incrementando il contenuto idrico della materia prima, ci sia una riduzione della BD tranne che per l'AB SCO con lignina. In questo caso infatti, in controtendenza con tutti gli altri materiali, si osserva un aumento della BD passando da un contenuto idrico del materiale di partenza dal 12 al 17% (+ 10,7 kg/m³_{stero}). Per gli altri materiali comunque la riduzione più forte della BD si ha nell'AB SCO con maizena (- 55,6 kg/m³_{stero}) passando dal contenuto idrico del 12 a quello del 17%.

Dall'analisi statistica, entrambi i fattori considerati, origine e trattamento sono risultati avere un effetto statisticamente significativo sulla varianza della BD. Infatti per entrambi, il *P-value* risulta inferiore a 0,05, come riportato dalla Tabella 7.2.1. Analizzando i singoli componenti della varianza, il fattore che incide maggiormente sulla varianza della BD è l'origine del materiale con un contributo pari a 73,62%.

Con il test LSD sono stati individuati due gruppi omogenei, l'AB SCO tannino e l'AB SCO lignina (differenza 21.0153).

Fattori	P-value	Contributo alla varianza (%)
Origine	0,0000	73,62
Trattamento	0,0007	25,90

Tabella 7.2.1 *P-value* e contributo alla varianza dei due fattori considerati per la BD

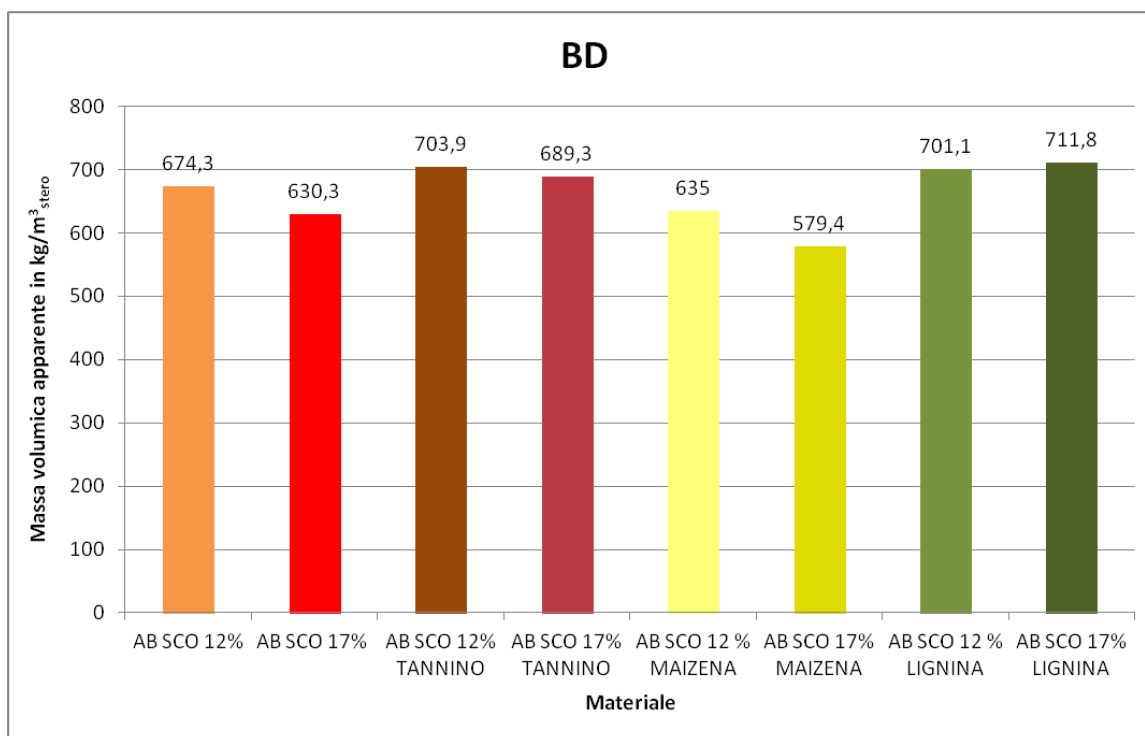


Grafico 7.2.2 Massa volumica apparente in kg/m³_{sterio} dei tre diversi materiali e dell'abete scortecciato non trattato (a due contenuti idrici di partenza)

Durabilità

La durabilità più alta del pellet ottenuto da abete scortecciato viene raggiunta da quello AB SCO 17% con maizena, con un valore pari a 98,8% (Grafico 7.2.4). Il valore più basso invece è quello dell'AB SCO 12% con tannino. Per tutti i materiali, ad eccezione dell'abete scortecciato con lignina, c'è un incremento della durabilità all'aumentare del contenuto idrico della materia prima. L'incremento maggiore si ha per l'AB SCO con tannino. Per il pellet ottenuto da abete scortecciato con l'aggiunta di lignina, aumentando il contenuto idrico del materiale di partenza c'è una diminuzione della durabilità del pellet, che infatti passa dal 92,6 al 91% con un decremento dell' 1,6%.

Dall'analisi della varianza risulta che tutti e due i fattori considerati, origine e trattamento del materiale, hanno un effetto statisticamente significativo sulla varianza della DU. Per entrambi infatti il *P-value* è inferiore a 0,05% (Tabella 7.2.3). Dall'analisi dei singoli componenti della varianza, il fattore che contribuisce maggiormente alla varianza della DU è l'origine del materiale, con un contributo del 59,61%.

Dal test LSD sono stati individuati due gruppi omogenei, l'AB SCO lignina e l'AB SCO tannino (differenza -0,283333).

Fattori	P-value	Contributo alla varianza (%)
Origine	0,0000	59,61
Trattamento	0,0032	37,13

Tabella 7.2.3 *P-value* e contributo alla varianza dei due fattori considerati per la DU

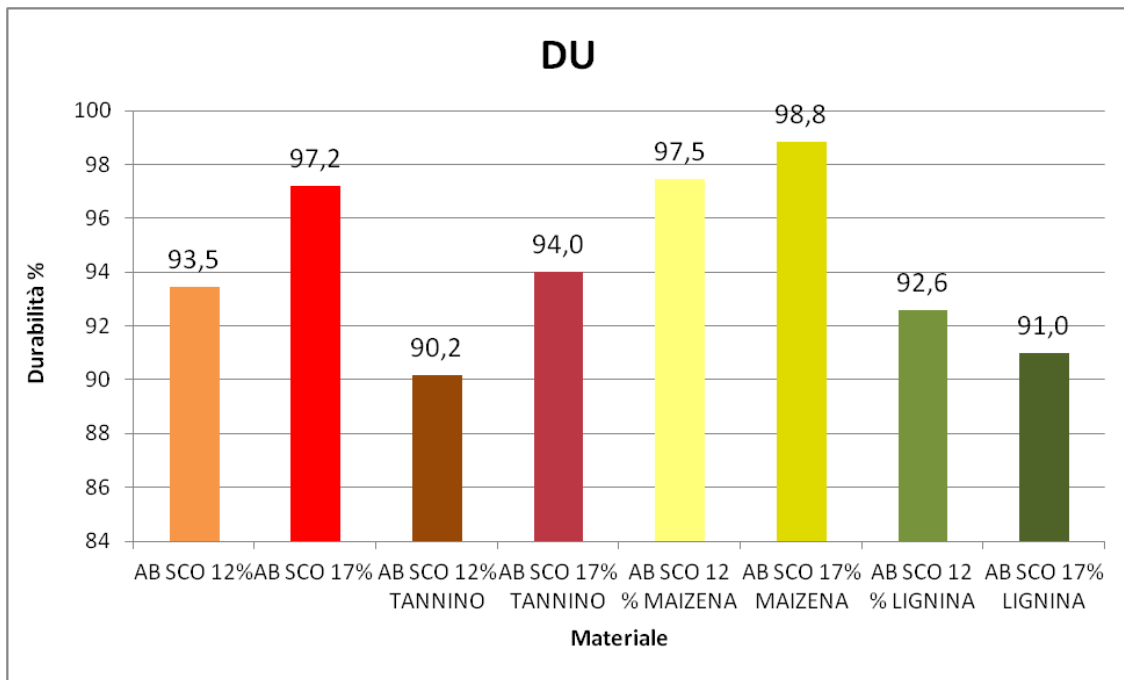


Grafico 7.2.4 Durabilità espressa in % dei tre diversi materiali e dell'abete scortecciato non trattato (a due contenuti idrici di partenza)

Contenuto idrico

Il contenuto idrico del pellet ottenuto dall'abete scortecciato puro e da quello con l'aggiunta di additivi è riportato nel Grafico 7.2.6. Il contenuto idrico più alto è quello del pellet di AB SCO 17% con maizena, con un valore pari a 11,4%. L'M più basso è invece quello dell'AB SCO 17% che è pari a 3,2%. Solo per il pellet ottenuto da abete scortecciato con l'aggiunta di lignina si osserva un decremento del contenuto idrico, all'aumentare del contenuto idrico del materiale di partenza (-1,08%). Per tutti gli altri pellet infatti c'è un aumento del M passando dal 12 al 17% di contenuto idrico della materia prima. L'incremento maggiore si ha per il pellet di AB SCO con maizena (+ 3,14%).

Dall'analisi della varianza risulta che entrambi i fattori considerati, origine e trattamento, hanno un effetto statisticamente significativo sulla varianza del contenuto idrico. In tutti i due casi infatti il *P-value* è inferiore a 0,05 (Tabella 7.2.5). Con l'analisi dei singoli componenti della varianza, si osserva come il fattore che ha un

effetto maggiore sulla varianza del contenuto idrico sia l'origine del materiale (74,37%).

Dal test LSD non sono stati individuati gruppi omogenei.

Fattori	P-value	Contributo alla varianza (%)
Origine	0,0000	74,37
Trattamento	0,0017	25,25

Tabella 7.2.5 P-value e contributo alla varianza dei due fattori considerati per il M

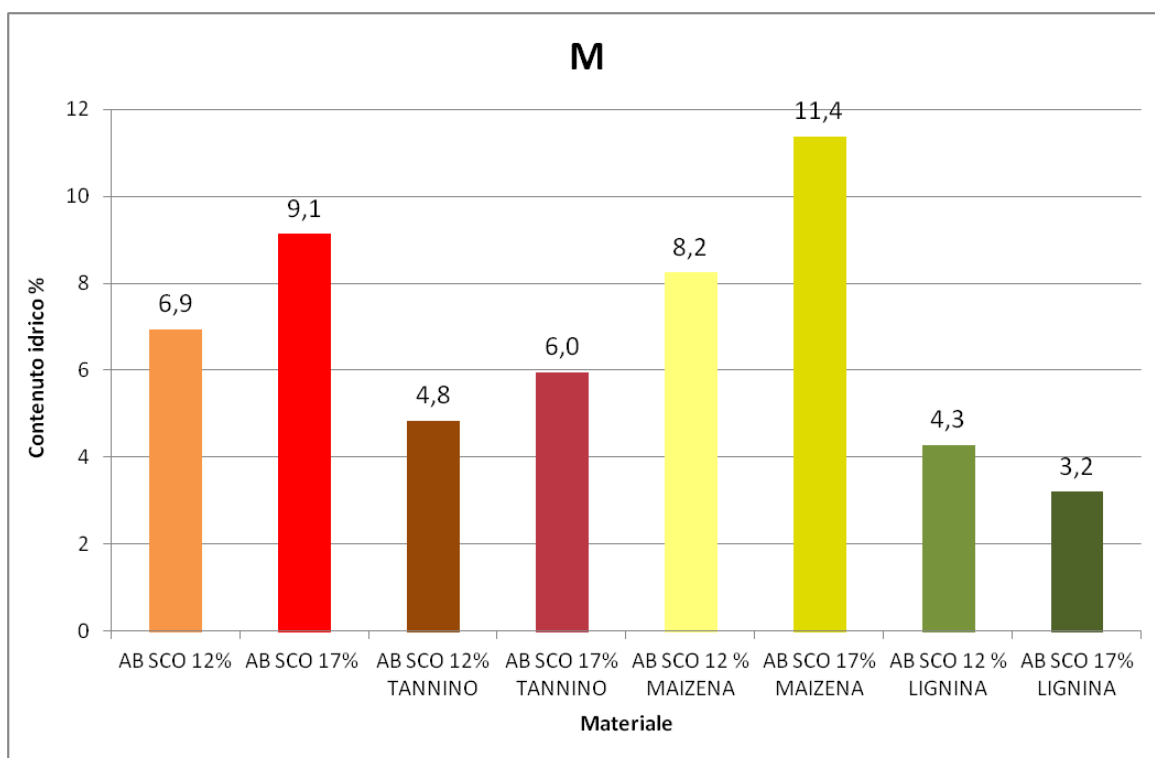


Grafico 7.2.6 Contenuto idrico espresso in % dei tre diversi materiali e dell'abete scortecciato non trattato (a due contenuti idrici di partenza)

Densità

La densità delle tre tipologie di pellet ottenute con l'aggiunta di additivi e del pellet di AB SCO puro sono riportate nel Grafico 7.2.8. Il valore di densità più alto viene raggiunto dal pellet ottenuto da AB SCO 17% con lignina, pari a 1,38 kg/m³ mentre il

più basso è quello del pellet di AB SCO 17% con maizena con $1,28 \text{ kg/m}^3$. Solo per il pellet di AB SCO con lignina c'è un aumento della densità con l'incremento del contenuto idrico del materiale di partenza ($+0,03 \text{ kg/m}^3$). In tutti gli altri casi, con il passaggio del contenuto idrico dal 12 al 17%, c'è una riduzione della densità (la riduzione maggiore si ha per il pellet di AB SCO con maizena, pari a $-0,03 \text{ kg/m}^3$).

Dall'analisi della varianza risulta che tutti i fattori considerati, origine e trattamento del materiale, hanno un effetto statisticamente significativo sulla varianza della De (Tabella 7.2.7). Con l'analisi dei singoli componenti della varianza si osserva come il fattore che contribuisce maggiormente alla varianza della De è l'origine del materiale, con un contributo del 74,47%.

Dal test LSD non sono stati individuati gruppi omogenei.

Fattori	P-value	Contributo alla varianza (%)
Origine	0,0000	74,47
Trattamento	0,0114	23,91

Tabella 7.2.7 *P-value* e contributo alla varianza dei due fattori considerati per la De

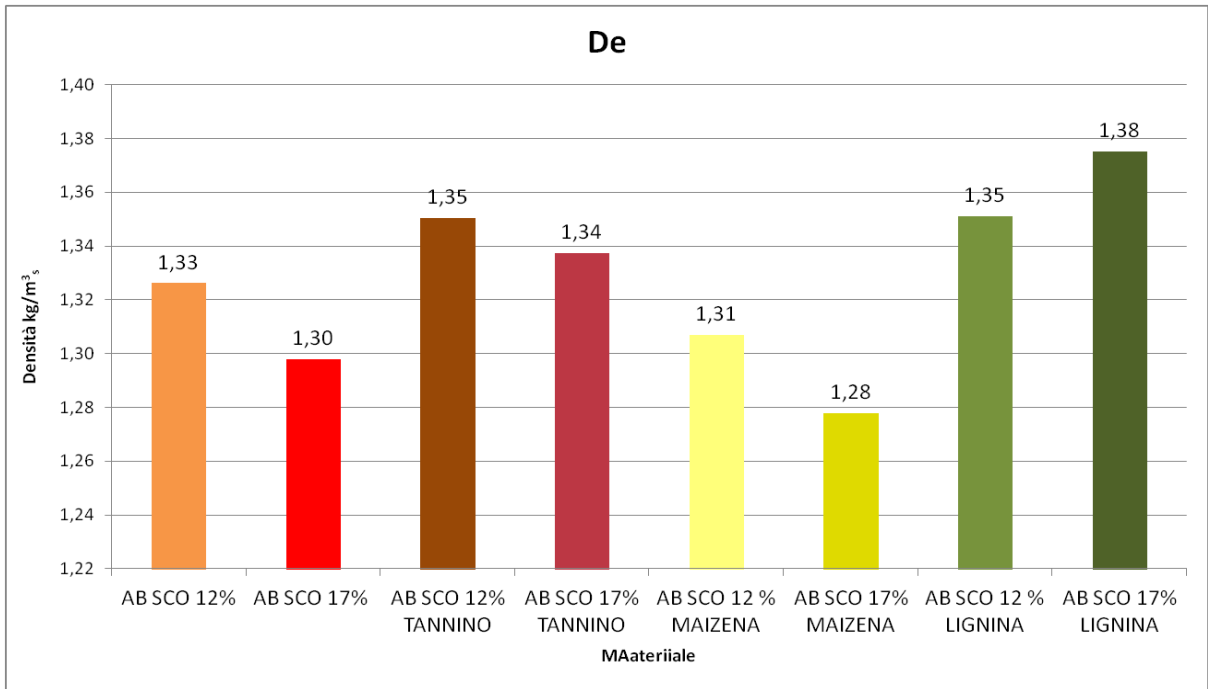


Grafico 7.2.8 Densità espressa in kg/m^3 dei tre diversi materiali e dell'abete scortecciato non trattato (a due contenuti idrici di partenza)

8 Discussione dei risultati

Sulla base dei risultati ottenuti e dall'analisi statistica effettuata, si può concludere che sia il contenuto idrico (trattamento) che l'aggiunta di additivi (origine) alla materia prima, hanno un effetto significativo sulle principali caratteristiche meccaniche del pellet prodotto. Per tutte le variabili considerate, infatti, il *P-value* determinato è risultato inferiore a 0.05 con un livello di confidenza del 95%. Tuttavia dall'analisi dei singoli componenti della varianza si nota come questi due fattori, origine e trattamento (inteso come condizionamento), contribuiscono in maniera differente alla varianza totale. In particolare, per i materiali non trattati, il fattore che contribuisce maggiormente alla varianza totale è il trattamento della materia prima. Tale condizione si ritrova per tutte le variabili considerate (BD, DU, M e De con un contributo alla varianza rispettivamente del 99,3%, 98,98%, 80,37% e 57,17%). Per l'unico materiale trattato con l'aggiunta di additivi, questa situazione si rovescia. Infatti, il fattore che contribuisce maggiormente alla varianza totale è l'origine della materia prima. Il contributo alla varianza dell'origine del materiale è, infatti, sempre il più alto (73,62%, 59,61%, 74,37%, 74,47% rispettivamente per BD, DU, M e De). Da questi risultati si può affermare che nel caso dei materiali non trattati, il contributo alla varianza totale da parte del trattamento (in sostanza del contenuto idrico della materia prima) ha un effetto pressoché esclusivo soprattutto sulla BD, DU e in misura minore sul M. Il contributo del trattamento alla varianza della De è sempre predominante ma non come per le altre variabili. Per il materiale trattato invece, l'origine della materia prima (quindi la presenza di additivi), ha un effetto importante sulla varianza delle diverse variabili soprattutto per De, M e BD. Nel caso della DU il contributo alla varianza dell'origine si attesta ad un valore complessivamente più basso rispetto agli altri.

Prendendo in considerazione la BD, la motivazione principale per cui questa viene condizionata dal trattamento della materia prima e quindi dal contenuto idrico di partenza, risiede nel fatto che l'acqua contenuta nel materiale agisce come lubrificante durante la fase di pressatura. Infatti, come dimostrato da studi in merito "il contenuto idrico nel biomateriale grezzo è il parametro più importante ... soprattutto per la massa volumica e il consumo energetico" (Samuelsson et al.,2009). L'acqua in sostanza

riduce le frizioni che si vengono a creare durante la fase di pressatura, tra la trafila e il materiale, con conseguente riduzione della pressione generale. Per questo motivo, se il materiale di partenza ha un contenuto idrico più alto, ci saranno meno pressioni e frizioni durante la pellettizzazione. Di conseguenza la BD del pellet sarà più bassa rispetto a quella di un pellet ottenuto da materia prima più secca. Nei risultati riportati è possibile osservare questa tendenza, infatti, all'aumentare del contenuto idrico del materiale di partenza, dal 12 al 17%, c'è una riduzione della BD. Tuttavia, questa tendenza viene sovvertita dal pellet di AB SCO con lignina. Solo in questo caso, all'aumentare del contenuto idrico c'è un aumento anche della BD. Questa è una dimostrazione che nel caso del pellet ottenuto da materiale con l'aggiunta di additivi, è l'origine del materiale che condiziona maggiormente la BD (come dimostrato dall'analisi dei componenti della varianza). In particolare, la lignina sembra avere un effetto completamente opposto a quello degli altri additivi, cioè porta ad un aumento della BD se c'è una maggiore quantità di acqua nella materia prima. Tale situazione può essere spiegata dal fatto che la lignina, che è un polimero amorfo naturalmente presente nel legno, ha bisogno di acqua per essere attivata come legante. "Alte temperature, un alto contenuto idrico, e l'uso di plastificanti o una combinazione di questi sono necessari per la lignina per fluire sulla superficie [delle particelle legnose] incrementando la forza adesiva nel caso di pellet di legno (Stelte et al., 2011). Un maggior contenuto di acqua nella materia prima può così favorire il rammollimento della lignina stessa che, durante la pressatura, in condizioni ideali di temperatura, si scioglie ed esplica le sue funzioni leganti. Questo scioglimento della lignina, che si distribuisce così tra le particelle legnose, può far aumentare la resistenza del materiale stesso alla pressatura, con conseguente aumento delle frizioni e della pressione. Il risultato sarà così una BD più alta se l'aggiunta della lignina avviene ad un materiale di partenza più fresco. Prendendo in considerazione l'aggiunta di additivi, questa soluzione si è dimostrata valida (per un aumento della massa volumica apparente), in due casi su tre. Sia con l'aggiunta di lignina che con l'aggiunta di tannino all'abete scortecciato, c'è stato un aumento della BD rispetto al materiale puro ad entrambi i contenuti idrici (+29,6 kg/m³_{stero} e +26,8 kg/m³_{stero} rispettivamente con l'aggiunta di tannino e lignina all'AB SCO 12% e +59 kg/m³_{stero} e +81,5 kg/m³_{stero} per l'aggiunta degli stessi additivi all'AB SCO 17%). Anche il tannino così come la lignina sembra far

augmentare le pressioni interne al materiale durante la pressatura contribuendo così ad un aumento della BD. A differenza degli altri due additivi, l'amido di mais (maizena) ha invece un effetto opposto sulla BD del pellet. Infatti rispetto al pellet puro di AB SCO, quello con l'aggiunta di maizena ha una BD più bassa (riduzione di $39,3 \text{ kg/m}^3_{\text{stero}}$ e $50,9 \text{ kg/m}^3_{\text{stero}}$ con l'aggiunta di maizena ad AB SCO 12% e AB SCO 17%). Questo comportamento può essere dovuto alle caratteristiche chimiche dell'amido. Questa sostanza, infatti, può portare a delle modifiche alle caratteristiche del materiale legnoso a cui viene aggiunto. L'amido è composto da granuli di diverse dimensioni ed è generalmente insolubile se non in acqua calda. L'amido comunque porta a delle modifiche alle caratteristiche qualitative del pellet. In uno studio specifico, Ståhl et al. (2012) affermano che "il contenuto idrico aumenta con l'aumento del contenuto di amido ... il contenuto idrico del pellet contenente amido è leggermente superiore di quello del pellet puro". Questo viene spiegato dal fatto che il consumo energetico durante la produzione di pellet con amido è inferiore rispetto a quello che si ha producendo pellet puro e di conseguenza c'è anche una minore evaporazione di acqua. Il minor consumo energetico è dovuto al fatto che l'amido porta ad una minima lubrificazione della massa all'interno della pressa, di conseguenza le frizioni interne saranno inferiori e quindi il consumo energetico sarà più basso. Anche nel presente lavoro si osserva come il pellet ottenuto con l'aggiunta di amido ha un contenuto idrico più alto rispetto a quello di abete scortecciato puro e anche di quello con l'aggiunta degli altri due additivi. In particolare, il contenuto idrico di AB SCO con maizena è dell'8,2% e 11,4% contro il 6,9% e il 9,1% di AB SCO puro (rispettivamente al 12 e al 17% di M di partenza). Anche il contenuto idrico del pellet di AB SCO con tannino e lignina è più basso di questi valori. Un contenuto idrico più alto, può spiegare il perché la BD del pellet di AB SCO con maizena risulta essere più bassa di quella di AB SCO puro, avendo spiegato precedentemente come un maggior contenuto di acqua comporta ad una riduzione della BD. Tuttavia nel lavoro di Ståhl et al. (2012) viene dimostrato che "la bulk density cresce con l'aumento dell'amido aggiunto" il che va in opposizione con i risultati di questo lavoro. La spiegazione di questi risultati discordanti può essere così ricercata sia nella situazione descritta precedentemente, relativa ad un maggior contenuto idrico del pellet, ma anche ad un'altra motivazione. L'aggiunta di amido come additivo, infatti, porta ad un incremento delle dimensioni del pellet. Di

conseguenza, la BD sarà più bassa in confronto a quella di un pellet di dimensioni inferiori, in cui i singoli elementi tendono a disporsi meglio, ad occupare più spazi vuoti e quindi a determinare una BD più alta. Dal punto di vista qualitativo si può concludere che la maggior parte delle tipologie di pellet ottenute, rispettano i limiti previsti dalla normativa UNI EN 14961-2:2011 in riferimento alla BD. Secondo questa classificazione di qualità, per rientrare nelle tre classi previste (A1, A2 e B) è necessaria una BD minima di $600 \text{ kg/m}^3_{\text{stero}}$. Soltanto il pellet di FG RAM 17%, AB PT 17% e AB SCO 17% con maizena, non rispettano questo requisito.

Per quanto riguarda la durabilità meccanica del pellet, anche in questo caso il fattore che ne condiziona maggiormente la varianza è il trattamento per i pellet ottenuti da materie prime pure, ed è invece l'origine del materiale per i pellet ottenuti con l'aggiunta di additivi. In linea generale la "durabilità è la variabile che è influenzata dal maggior numero di fattori" (Torbjörn et al., 2011). Sicuramente il contenuto idrico della materia prima gioca un ruolo fondamentale nel condizionare la durabilità del pellet che si andrà ad ottenere. Dai risultati ottenuti si osserva come all'aumentare del contenuto idrico del materiale di partenza, ci sia un incremento della durabilità del pellet. La motivazione principale risiede nel fatto che l'acqua agisce da legante naturale tra le particelle legnose, garantendo in particolare la formazione di legami che hanno un effetto positivo sulla resistenza meccanica del pellet. Infatti, "la forza e la durabilità dei prodotti densificati dipende dalle forze fisiche che legano insieme le particelle" (Kaliyan e Vance Morey, 2008). L'acqua gioca un ruolo fondamentale nel favorire la formazioni di questi legami interni, soprattutto quando è presente nel giusto quantitativo e insieme ad una adeguata temperatura nella fase di pressatura. In particolare "l'acqua aiuta a sviluppare le forze di van der Waals con l'incremento dell'area di contatto tra le particelle" (Kaliyan e Vance Morey, 2008). Molti studi tra cui quello di Kaliyan e Vance Morey, 2008, hanno dimostrato come l'aumento del contenuto idrico comporta proprio ad un miglioramento della DU, dovuto alle forze leganti delle molecole di acqua che riescono a rafforzare i legami tra le particelle legnose. Questo fenomeno spiega perché nei risultati ci sia un aumento della DU passando dal pellet ottenuto da materiale al 12% a quello ottenuto da materiale al 17% di M. L'acqua contenuta nella materia prima, oltre a creare dei legami veri e

propri, riesce in combinazione con la temperatura, ad attivare tutte le altre sostanze contenute nel legno che possono agire da leganti naturali. In particolare, in presenza di un giusto contenuto idrico e di una temperatura sufficientemente alta, vengono attivate le proteine, l'amido, ed esplicano funzioni leganti anche le fibre legnose e la lignina. Le proteine, infatti, in presenza di calore ed acqua, vengono denaturate e creano un effetto plasticizzante che contribuisce a migliorare i legami interni tra le particelle legnose e la resistenza del pellet. Anche le fibre presenti nel legno (in particolare quelle solubili) in presenza di acqua possono esercitare una, seppur minima, azione legante. "Le fibre idrosolubili aumentano la viscosità ... e influenzano positivamente l'integrità strutturale del pellet"(Kaliyan e Vance Morey, 2008). Anche l'amido, che in questo studio è stato utilizzato come additivo, in presenza di acqua e calore subisce delle modifiche termiche della sua struttura (gelatinizzazione), comportandosi così da legante. Tuttavia solo l'aggiunta di maizena all'AB SCO ha portato ad un aumento della durabilità del pellet (+4% e +1,6% con l'aggiunta di maizena rispettivamente ad AB SCO 12% e AB SCO 17%) . Al contrario, sia per il pellet di AB SCO con lignina che quello con tannino, la DU è diminuita rispetto a quella del pellet di AB SCO puro. Utilizzando lignina c'è stata una riduzione della DU dello 0,9% e 6,2% rispetto al materiale puro al 12 e al 17% di M. Con il tannino invece la riduzione è stata del 3,3% e 3,2%. Questi risultati sembrano quindi non giustificare l'aggiunta della lignina e del tannino, come additivi potenzialmente utili per migliorare la durabilità del pellet di AB SCO puro. La scelta di miscelare all'AB SCO questi additivi, infatti, è stata presa perché questo materiale, privo di corteccia, non si presta alla produzione di pellet di qualità, soprattutto in riferimento alle caratteristiche meccaniche tra le quali la stessa durabilità. Questo è stato confermato da un lavoro di tesi precedente (Santi S. 2013) in cui, infatti, i risultati mostravano una DU del pellet di AB SCO puro (95,88%) più bassa rispetto a quella del pellet di AB PT (98,51%) e AB FU (98,05%). La minore durabilità che si ottiene utilizzando materiale privo di corteccia, è dovuta al fatto che questo componente della pianta, grazie alla sua composizione chimica, agisce da legante naturale. "La corteccia ha un considerevole contenuto di lignina e di estrattivi in confronto al legno puro. La più alta concentrazione di lignina ed estrattivi ha un effetto positivo sui meccanismi leganti durante la produzione di pellet"(Tore et al., 2010). Per questo motivo nel presente studio si è deciso di addizionare i tre additivi

all'AB SCO, ma i risultati ottenuti hanno giustificato questa scelta soltanto per l'aggiunta della maizena. La minore DU del pellet di AB SCO con tannino e AB SCO con lignina può risiedere nel fatto che entrambi hanno un contenuto idrico inferiore rispetto al pellet di AB SCO. Il pellet di AB SCO 12% e AB SCO 17% ha un M rispettivamente di 6,9 e 9,1%. Il pellet di AB SCO con lignina e AB SCO con tannino ha invece un M di 4,3 e 3,2% e 4,8 e 6% che si attesta quindi più basso rispetto a quello del pellet di AB SCO puro. Come descritto in precedenza, l'acqua ha un effetto positivo nella resistenza meccanica del pellet, in quanto contribuisce alla formazione di legami tra le particelle legnose. Un minor contenuto idrico, quindi minor acqua a disposizione, fa sì che la DU del pellet sia più bassa. Sicuramente, la minor durabilità del pellet di AB SCO con lignina rispetto a quello ottenuto da materiale puro è un risultato importante, perché la lignina stessa, è uno degli additivi più utilizzati per migliorare la qualità meccanica del pellet. In questo lavoro non c'è stato questo effetto positivo, il che va in contrasto con alcuni studi effettuati in merito (Byoung et al.,2013) nei quali l'aggiunta di lignina alla materia prima ha portato ad un miglioramento della qualità del pellet. Questa situazione può essere dovuta al fatto che la lignina agisce meglio se presente naturalmente all'interno delle fibre e delle particelle legnose, mentre se viene aggiunta successivamente alla materia prima, si rende necessaria una miscelazione il più possibile efficace. Sicuramente miscelare l'additivo alla materia prima è più difficoltoso in una attività produttiva su piccola scala, come lo è stata quella utilizzata in questo lavoro (aggiunta e mescolamento manuale dell'additivo al materiale). In una produzione industriale del pellet invece, la possibilità di ricorrere a delle strumentazioni e a delle tecniche specifiche per la miscelazione degli additivi è sicuramente un elemento in più per far espletare al meglio le funzioni leganti della lignina. Complessivamente i pellet ottenuti da un materiale di partenza al 12% di contenuto idrico hanno un valore di DU piuttosto basso, che non rientra, infatti, in nessuna delle tre classi di qualità del pellet previste dalla normativa UNI EN 14961-1. La DU minima è del 96,5% della classe di qualità B, mentre per la classe A1 e A2 è del 97,5%. Dei materiali trattati solo il pellet di AB SCO 12% con maizena soddisfa questo requisito, con una durabilità del 97,5%. Diversamente, quasi tutti i pellet ottenuti da materiale al 17% di contenuto idrico, riescono a superare il limite previsto dalla normativa. Solo tre tipologie di pellet, quello ottenuto da FG FU 17%, AB SCO 17% con

tannino e AB SCO 17% con lignina, hanno una DU inferiore a 96,5%. Da questi dati si può concludere che utilizzando una pellettatrice di questo tipo, per migliorare la durabilità meccanica del pellet, è necessario un contenuto idrico maggiore del materiale di partenza. Per quanto riguarda gli additivi, il solo amido di mais porta ad un reale aumento della durabilità del pellet il che può giustificare l'uso. Al contrario, sia il tannino che la lignina comportano addirittura una riduzione della DU.

Mettendo a confronto i pellet ottenuti da materiale al 12% e al 17% di M, la tendenza generale mostrata dai risultati è che un contenuto idrico di partenza più basso si riflette ovviamente anche sul minor contenuto idrico del pellet. Tuttavia solo per il pellet di AB SCO con lignina, il contenuto idrico finale è più alto se si parte da un materiale più secco. Sicuramente è un risultato diverso da tutti gli altri ed è dovuto al comportamento chimico e fisico della lignina durante la pellettizzazione. Facendo riferimento al M del pellet ottenuto da materiale puro si osserva come il contributo alla varianza da parte del trattamento è il più alto, ma anche l'origine del materiale ha una discreta influenza (contributo del 19,13%). Questo risente ovviamente della densità caratteristica di ogni materiale, che è, infatti, differente tra le due specie forestali considerate (il faggio con 750 kg/m^3 ha una densità maggiore dell'abete rosso che ha un valore di densità di 450 kg/m^3). La densità è inoltre differente tra le diverse porzioni di pianta utilizzate per la produzione della materia prima (es. ramaglia piuttosto che fusto intero).

In linea generale l'aggiunta di due additivi su tre porta ad una maggior perdita di acqua del pellet, rispetto a quello che si ottiene utilizzando materiale puro. Infatti il contenuto idrico del pellet di AB SCO con lignina e tannino è più basso di quello ottenuto da AB SCO. Questo è dovuto al fatto che la lignina e il tannino fanno aumentare la resistenza offerta dalle particelle di legno durante la pressatura. Di conseguenza le frizioni interne saranno maggiori, ci sarà un aumento della temperatura e quindi una maggiore perdita di acqua per evaporazione. Al contrario, la maizena aggiunta al materiale, determina un contenuto idrico del pellet più alto poiché come descritto in precedenza, l'amido porta ad un aumento del contenuto di acqua nel prodotto finale. Dal punto di vista qualitativo, quasi tutti i pellet ottenuti rispettano i limiti previsti dalla normativa UNI EN 14961-1 per il contenuto idrico. Infatti, secondo

questa normativa, per rientrare nelle tre classi di qualità è necessario un contenuto idrico pari o inferiore al 10%. Soltanto il pellet di AB PT 17%, AB FU 17%, AB SCO 17% con maizena hanno un contenuto idrico superiore al 10%.

Dai risultati ottenuti, la densità dei pellet è condizionata soprattutto dall'origine della materia prima per quanto riguarda i materiali trattati, e dal trattamento per quanto riguarda i materiali puri. Tuttavia anche per i materiali puri si osserva come l'origine del materiale abbia un contributo alla varianza sensibilmente più alto rispetto a quanto si verifica per gli altri parametri (contributo del 41,21%) e ciò dipende dalla diversa densità dei materiali di partenza. I valori di densità più alti vengono raggiunti dal pellet di AB SCO 12% e FG FU 12%. La densità più bassa è invece quella del pellet di FG RAM 17%. La tendenza generale (ad eccezione del pellet di AB SCO con lignina) è che all'aumentare del contenuto idrico c'è una riduzione della densità del pellet, confermando i risultati ottenuti da studi scientifici in merito. Infatti, come dimostrato da Mani et al., (2005) "se il contenuto idrico della biomassa aumenta, la densità del pellet diminuisce". Anche Rhén et al., (2005), hanno dimostrato che "un alta temperatura e un basso contenuto idrico sono le variabili più importanti per aumentare la forza di compressione e la densità del pellet". Un minor contenuto di acqua nella materia prima fa sì che durante la fase di pressatura, le frizioni interne e gli attriti tra le particelle legnose e gli organi meccanici siano maggiori e quindi ci sia anche un aumento della temperatura. Di conseguenza ci sarà una maggiore compressione delle particelle legnose che attraversano i fori della trafilatura e il pellet che si andrà ad ottenere sarà più denso. Infatti, se il contenuto idrico del materiale di partenza è più basso, durante la pressatura, sarà disponibile una maggiore quantità di calore, fondamentale per attivare le capacità leganti del materiale e quindi rendere il pellet più compatto e denso. In sostanza "più è basso il contenuto di acqua, minore sarà la quantità di calore necessaria per far evaporare l'acqua e quindi sarà disponibile più calore per la compattazione del materiale" (Carone et al., 2009). Un minor contenuto idrico garantisce così che la densificazione del materiale avvenga in maniera più efficace rispetto a quello che si verifica con un materiale più umido, in cui l'acqua agisce da lubrificante, riduce le frizioni e gli attriti interni durante la pressatura e sottrae calore. L'aggiunta di additivi all'abete scortecciato porta ad un aumento della

densità del pellet sia se viene utilizzato il tannino che la lignina. La maizena invece ha un effetto opposto. Sostanzialmente utilizzando tannino e lignina, la densità finale del pellet aumenta perché questi due materiali possono far aumentare le frizioni interne alle particelle, con conseguente aumento della temperatura. Come spiegato in precedenza più calore è disponibile, migliore sarà la compattazione del materiale e quindi anche la densificazione. Inoltre, con una maggiore temperatura durante la fase di pressatura, si ottiene anche un pellet con un minor contenuto idrico, come dimostrato dai valori di M ottenuti per il pellet di AB SCO con lignina e tannino rispetto a quello puro di AB SCO. A differenza degli altri due additivi, la maizena porta ad una diminuzione della densità del pellet. Come descritto in precedenza, l'amido aggiunto al materiale fa aumentare il contenuto idrico e quindi ci sarà più acqua che riduce l'entità della densificazione.

Per il solo pellet di AB SCO con lignina si osserva che la densità aumenta se il materiale di partenza ha più acqua. Questo va in controtendenza con quanto avviene per tutti gli altri materiali, per i quali, infatti, un maggior contenuto di acqua corrisponde ad una minore densità del pellet. Questa situazione può essere dovuta al particolare comportamento della lignina durante la pellettizzazione. Questa sostanza, infatti, ha bisogno di acqua per essere attivata e per espletare le sue funzioni leganti. Più acqua è disponibile e più la lignina è in grado di fluire sulle particelle legnose e aumentare l'adesività, costituendo così una copertura omogenea che garantisce rigidità al pellet. È la lignina che forma quello strato vitreo sulla superficie dei singoli pellet, riducendo così la presenza di crepe e fessurazioni che potrebbero ridurre la densità. Infatti, come dimostrato da studi in merito, "una costante copertura della lignina in tutta la superficie è probabilmente la chiave per un pellet di buona qualità"(Stelte et al., 2011).

Dal punto di vista strettamente produttivo, i valori di produttività riportati nella Tabella 6.3.11 mostrano dei livelli di produzione accettabili o quantomeno in linea con quelli dichiarati dalla casa produttrice per la pellettatrice Minipel E 80 (produttività dichiarata 35-75 kg/ora). Soltanto per alcuni materiali la produttività reale è stata piuttosto bassa. In particolare per il pellet di FG FU 12 e 17%, AB SCO con tannino al 12 e al 17% e AB SCO con lignina 12 e 17%, la produttività è stata rispettivamente di 31,6,

34,8, 26,3 26,2, 27,6 e 19 kg/ora. La produttività è sicuramente condizionata dalla densità del materiale, infatti, confrontando i valori di produttività con quelli della De dei pellet si può vedere come i materiali con la densità più alta sono anche quelli con le produttività più basse. Al contrario la produttività aumenta per i materiali con una minore densità. Per esempio il FG RAM che, tra tutti i materiali al 12% di M, ha prodotto il pellet con la minore densità è quello con la produttività più alta, pari a 81,9 kg/ora. Sicuramente anche la continuità dell'alimentazione della macchina è stata fondamentale nel condizionare la produzione del pellet, in quanto per alcuni materiali ci sono state difficoltà nel giusto dosaggio di materia prima da immettere nella bocca di alimentazione. Questa problematica ovviamente condiziona i valori di produttività finali, soprattutto in un processo produttivo su piccola scala e con macchinari di piccole dimensioni come lo sono stati quelli utilizzati nel presente lavoro. La possibilità di automatizzare tutta la fase di produzione, evitando in particolar modo l'alimentazione manuale della macchina è sicuramente un elemento che va a vantaggio della produttività negli impianti di pellettizzazione industriale. L'utilizzo invece di una pellettatrice particolare per dimensioni e potenza come lo è la Minipele E 80, fa sì che sia necessaria una particolare attenzione durante la fase di alimentazione e non solo. Anche le fasi preparatorie alla densificazione vera e propria (preparazione del materiale), e quelle successive (raffreddamento omogeneo, raccolta) sono fondamentali nel condizionare la durata dell'intero processo produttivo, della fase di pellettizzazione vera e propria ma anche di tutte le altre. Infatti, i dati di produttività riportati sono relativi esclusivamente alla sola fase di pressatura. Tuttavia, con uno sguardo più ampio sull'intero processo produttivo, si è notato come tutte le operazioni di contorno alla vera pressatura (compreso il condizionamento, l'aggiunta di additivi, la preparazione ecc.) sono forse quelle che condizionano maggiormente l'efficienza della catena produttiva stessa. Questa situazione è dovuta sicuramente alle caratteristiche di un processo produttivo su piccola scala come questo, dove la velocità di esecuzione delle singole fasi, le dimensioni e l'automazione della macchina sono limitate e non paragonabili ad una pellettizzazione a livello industriale.

9 Conclusioni

Il condizionamento e l'aggiunta di additivi alla materia prima si sono dimostrate due fasi produttive molto importanti nell'influenzare la qualità del pellet ottenibile, anche in una produzione a livello domestico. Entrambe queste fasi, infatti, hanno avuto un effetto più o meno marcato sulle principali caratteristiche fisichemeccaniche del pellet quali la massa volumica apparente, la durabilità meccanica, la densità e il contenuto idrico. In particolare, per i cinque materiali non trattati, è stata la fase di condizionamento, intesa come regolazione del contenuto idrico, ad avere il maggior effetto sulle caratteristiche finali del pellet. Al contrario, per l'unico materiale trattato (abete scortecciato) l'origine della materia prima è stato il fattore che ha avuto l'effetto più importante sulla qualità del pellet. Tutto questo dimostra che, mentre da un lato è soprattutto il contenuto idrico del materiale di partenza a condizionare le caratteristiche del pellet puro, dall'altro è l'aggiunta di additivi ad avere il maggior effetto sulle qualità del pellet prodotto da materiale trattato. Nel complesso quindi, la possibilità di agire regolando queste due importanti fasi preparatorie alla pressatura può rappresentare un valido strumento per migliorare la qualità del pellet. In particolare, dai risultati ottenuti, si può concludere che l'aumento del contenuto idrico della materia prima ha un effetto positivo solo sulla durabilità meccanica del pellet, che, infatti, viene incrementata. Al contrario, un contenuto idrico di partenza più basso, ha degli effetti positivi sul contenuto idrico finale del pellet (che sarà più basso), ma anche sulla massa volumica apparente e sulla densità. Queste tendenze vengono sovvertite qualora venga addizionata la lignina all'abete scortecciato. Se si parte da una materia prima più fresca, questo additivo determina una maggiore diminuzione del contenuto idrico del pellet, una BD e De maggiori e diversamente una DU minore. In sostanza, la regolazione della fase di condizionamento e la scelta del tipo di additivo da utilizzare va fatta in funzione dei reali obiettivi produttivi e ovviamente anche dei materiali che si hanno a disposizione per la produzione. Se l'obiettivo è quello di aumentare la durabilità meccanica del pellet, è preferibile partire da una materia prima più fresca, quindi ridurre per esempio l'essiccazione a monte oppure prevedere l'aggiunta di acqua al materiale. Sicuramente, la possibilità di utilizzare materiale più fresco può rappresentare un elemento a favore soprattutto per una produzione

domestica del pellet, sia livello economico che logistico. Infatti, in una piccola attività produttiva si possono evitare i problemi connessi alla necessità di essiccare efficacemente il materiale, che oltre ad aver significativi costi energetici, richiede anche dei macchinari o comunque delle strutture appositamente dedicate. Utilizzare materia prima con un maggior contenuto idrico (mai comunque eccessivo) può essere così una strategia per ridurre i costi di essiccazione e eventualmente quelli di approvvigionamento (se si acquista la materia prima, più è secca maggiore sarà il suo costo). Con questa strategia vi è quindi la possibilità di aumentare la durabilità meccanica del pellet che è una delle qualità fisicomeccaniche più ricercate in quanto condiziona fortemente la fase di stoccaggio e conservazione del pellet. Se la materia prima utilizzata è priva di corteccia, la possibilità di utilizzare degli additivi per aumentare la durabilità del pellet, può essere una strategia efficace. Tuttavia, dai risultati di questo studio risulta valido solo l'utilizzo della maizena. Questo additivo risulta però peggiorare le altre caratteristiche qualitative del pellet. Il tannino, è un additivo poco utilizzato (addirittura viene rimosso con particolari tecniche nelle filiere produttive di pellet di castagno), tuttavia da questi risultati si è dimostrato efficace per migliorare caratteristiche del pellet quali il contenuto idrico, la massa volumica apparente e la densità. Al contrario non ha portato ad un miglioramento della durabilità che è invece diminuita. Anche la lignina ha avuto gli stessi effetti del tannino, e i risultati negativi sulla durabilità del pellet sono sicuramente importanti e testimoniano che questa sostanza, per poter migliorare la DU deve essere miscelata con la materia prima in modo più efficace. In una produzione domestica questa necessità è difficilmente raggiungibile per la mancanza di sistemi di miscelazione e controllo dei dosaggi efficienti. Un'interessante possibilità per cercare di migliorare tutte le caratteristiche qualitative del pellet, limitando così i punti deboli di ciascun additivo, potrebbe essere quella di aggiungere alla materia prima una miscela di questi additivi, rimanendo sempre nel limite massimo del 2% in peso.

Se l'obiettivo è quello di ottenere un pellet più secco (con relativi vantaggi energetici), con una maggiore massa volumica apparente e una maggiore densità, è preferibile partire da una materia prima più secca, quindi ridurre l'umidificazione durante il condizionamento o sorvolare del tutto questa fase. Questo obiettivo può essere

raggiunto aggiungendo tannino e lignina se si utilizza un materiale privo di corteccia. Sicuramente partire da un materiale molto secco crea problemi sia durante la produzione vera e propria (polvere e maggiori consumi) che all'integrità strutturale del pellet e cioè alla sua durabilità. Le tipologie di pellet con il minor contenuto idrico sono, infatti, anche quelle con la durabilità minore. Per questi motivi, il giusto contenuto idrico della materia prima è fondamentale per la qualità finale del pellet e per tutto il processo produttivo. Di conseguenza, la necessità di conoscere anche in via approssimativa (per la mancanza di strumenti specifici), il contenuto idrico della materia prima da utilizzare nella pellettizzazione domestica, è una prerogativa essenziale per la buona riuscita di tutto il processo produttivo e quindi del pellet ottenibile. Nel complesso la produttività della pellettatrice Minipel E 80 si è dimostrata accettabile soprattutto per alcuni materiali o comunque in linea con i valori riportati dalla casa produttrice.

In linea generale si può concludere che sfruttando due fasi produttive come il condizionamento e l'aggiunta di additivi adeguati per migliorare le qualità del prodotto, la possibilità di utilizzare materie prime anche di scarsa qualità può essere un importante elemento per la valorizzazione delle risorse e dei materiali di origine forestale disponibili. Tutto questo può sicuramente portare dei benefici nell'attuale situazione del mercato italiano del pellet, dove domanda e offerta del prodotto sono fortemente squilibrate. Nel contesto italiano, in cui la maggior parte del consumo del pellet avviene a livello domestico, riuscire ad ottenere un prodotto di qualità in maniera autonoma e frutto delle risorse forestali interne, può diventare un obiettivo potenzialmente raggiungibile ed efficace per ridurre le importazioni di questo biocombustibile. La pellettatrice utilizzata si è dimostrata comunque un macchinario che, dal punto di vista produttivo, può raggiungere dei risultati importanti (considerando i volumi richiesti da una produzione domestica di pellet). Al tempo stesso, dal punto di vista tecnico la macchina non si è dimostrata complicata da utilizzare e non ha richiesto particolari conoscenze, se non un breve periodo di prova e di adattamento (specie per la regolazione della distanza tra rulli e matrice). Sicuramente un'organizzazione seppur minima, di tutta la catena produttiva, dalle fasi preparatorie a quelle finali, è uno strumento imprescindibile per migliorare l'efficienza

della produzione. Infatti, anche se il macchinario utilizzato, è essenzialmente rivolto ad un'utenza domestica, con finalità e volumi produttivi più o meno limitati, una minima pianificazione di tutta l'attività produttiva può diventare un elemento importante per garantire una sufficiente qualità del processo e di conseguenza anche del prodotto finito.

10 Bibliografia

2006. Decreto legislativo 3.04.2006 n.152. Norme in materia ambientale. Gazzetta ufficiale n.88, supplemento ordinario n.96, 14 aprile 2006.

AIEL, Associazione Italiana Energie Agroforestali.2014. Mercato e prezzi. <http://www.aiel.cia.it/>

Baù L. 2013. Il mercato italiano: produzione e importazione. In atti Tavolo di filiera sul pellet, 12, Verona, AIEL, 5 Dicembre 2013

Byoung J. et al., 2013, Effect of binders on the durability of wood pellets fabricated from *Larix kaemferi* C. and *Liriodendron tulipifera* L. sawdust, *Renewable Energy*, 62 (2014), 18-23)

Calderón C., Jossart J.M. e Goodwin N. 2013. AEBIOM European Bioenergy Outlook 2013. Statistical report. Brussels, December 2013.

Carone M.T. et al., 2009. Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the pruning residues of *Olea europaea* L. *Biomass & Bioenergy* 35 (2011) 402-410

Francescato et al.2014. Biocombustibili Agroforestali. Padova: AIEL – Associazione italiana Energie Agroforestali)

García-Maraver A. et al., 2011, A review of European standards for pellet quality, *Renewable Energy*, 36 (2011) 3537-3540

Hansen M., Jein A. 2002. Manuale italiano per la combustione di pellet da legno. Firenze. ETA – Florence Renewable Energies

Kaliyan N., Vance Morey R. 2008. Factors affecting strenght and durability of densified biomass products. *Biomass & Bioenergy*. 33 (2009) 337-359

Kong L. et al., 2012. Effect of waste wrapping paper fiber as a “solid bridge” on physical characteristics of biomass pellets made from wood sawdust. *Applied Energy* 98 (2012) 33-39

Li Y. et al., 2000. High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. *Biomass & Bioenergy* 19 (2000) 177-186

Lee S. et al., 2012. Effects of densification variables on the durability of wood pellets fabricated with *Larix kaempferi* C. and *Liriodendron tulipifera* L. sawdust. *Biomass & Bioenergy* 48 (2013) 1-9

Mani S. et al., 2006. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. *Biomass & Bioenergy* 30 (2006) 648–654

Mobini M. et al., 2013. A simulation model for the design and analysis of wood pellet supply chains. *Applied Energy* 111 (2013) 1239-1249

Peruzzo. 2014. Prodotti. Bio-mass. Pellettatrici PERUZZO mod. MINIPEL. <http://www.peruzzo.it/>

Rhén C. et al., 2005. Effects of raw material moisture content, densification pressure and temperature on some properties of Norway spruce pellets. *Fuel Processing Technology* 87 (2005) 11–16

Samuelsson R. et al., 2009. Effect of biomaterial characteristics on pelletizing properties and biofuel pellet quality. *Fuel Processing Technology* 90 (2009) 1129–1134

Santi S. 2013. Analisi della qualità di pellet prodotti da legname delle utilizzazioni forestali. Relatore Cavalli R. Dipartimento Territorio e sistemi agro-forestali, Facoltà di Agraria, Università degli Studi di Padova, Legnaro

Ståhl M. et al., 2012. Effects on Pellet Properties and Energy Use When Starch Is Added in the Wood-Fuel Pelletizing Process. *Energy & Fuels* 26 (2012) 1937–1945

Tore F. et al., 2010. The effect of bark content on quality parameters of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) pellets. *Biomass & Bioenergy* 35(2011) 3342-3349

Stelte W. et al. 2010. A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources. *Biomass & Bioenergy*. 35 (2011) 910-918

Torbjörn A. et al., 2011. Industrial scale biofuel pellet production from blends of unbarked softwood and hardwood stems—the effects of raw material composition and moisture content on pellet quality. *Fuel Processing Technology* 95 (2012) 73–77

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

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

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

UNI EN 15210-1. 2010. Biocombustibili solidi. Determinazione della durabilità meccanica di pellet e di bricchette. Parte 1: Pellet