



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE FORESTALI ED AMBIENTALI

RESIDUI DELLA PRODUZIONE DI PANNELLI DI
LEGNO: CARATTERIZZAZIONE E POTENZIALITÀ
ENERGETICHE

Residues from wood panel production: energy characterization and
future prospective

TIPO TESI: Sperimentale

Studente:
MARTINA SOCIONOVI

Relatore:
PROF. GIUSEPPE TOSCANO

Correlatore:
DOTT. ELENA LEONI

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

SOMMARIO

SOMMARIO	2
ELENCO DELLE TABELLE.....	4
ELENCO DELLE FIGURE	5
ACRONIMI E ABBREVIAZIONI	6
INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI	8
CAPITOLO 1 BIOCOMBUSTIBILI SOLIDI: ASPETTI NORMATIVI E LEGISLATIVI	10
1.1 Biomasse per biocombustibili solidi.....	10
1.1.1 Aspetti politici-ambientali	11
1.1.2 Classificazione biocombustibili in base al loro stato fisico	13
1.2 Il processo di combustione e i principali impianti	16
1.3 Caratteristiche delle biomasse solide a fini energetici	18
1.4 Emissioni di combustione dei biocombustibili solidi	20
1.5 Norme tecniche	21
CAPITOLO 2 I RESIDUI DELLA LAVORAZIONE DELL'INDUSTRIA DEL LEGNO	24
2.1 Lavorazioni del legno	24
2.1.1 Residui della lavorazione del legno	28
2.2 Principali numeri in Italia	31
CAPITOLO 3 MATERIALI E METODI	34
3.1 Analisi dei campioni	35
3.1.1 Contenuto di umidità	36
3.1.2 Macinazione.....	36
3.1.3 Contenuto di ceneri.....	37

3.1.4 Potere calorifico.....	38
3.1.5 Contenuto CHNO	39
3.1.6 Contenuto cloro e zolfo.....	40
CAPITOLO 4 RISULTATI E CONSIDERAZIONI	42
4.1 Discussione dei risultati	42
4.1.1 Reimpiego dei residui di lavorazione	43
4.1.2 Comparazione dei materiali	45
CONCLUSIONI	47
BIBLIOGRAFIA	50

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1-1: Normative e relative caratteristiche	23
Tabella 3-1: Tipologie di analisi effettuate	35
Tabella 4-1: Dati ottenuti dalle analisi (SLR: sotto limite di rilevabilità)	42
Tabella 0-1: Confronto dei valori soglia dei parametri principali che sottolineano l'incoerenza della norma, in riferimento alla classificazione del pellet domestico e industriale.....	49

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 3-1: campioni analizzati in laboratorio. Sullo sfondo da sinistra troviamo trucioli, pellet e colla. In primo piano il dettaglio dei listelli di legno vergine e a destra si osserva il finger joint.....	34
Figura 3-2: Stufa termo ventilata	36
Figura 3-3: Dettaglio interno del mulino a lame.....	37
Figura 3-4: Carosello rotante con i 20 crogioli	38
Figura 3-5: Calorimetro	39
Figura 3-6: Analizzatore elementare.....	40
Figura 3-7: Cromatografo ionico	40
Figura 3-8: Esempio di pannelli. Da sinistra verso destra abbiamo truciolare, multistrato e OSB.....	41
Figura 4-1: grafico del contenuto di azoto dei materiali di comparazione.....	46

ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

FIG.	Figura
TAB.	Tabella
SRF	Short Rotation Forestry
MRF	Medium Rotation Forestry
RU	Rifiuti Urbani
UNI	Ente nazionale di unificazione
EN	Normazione Europea
ISO	Organizzazione Internazionale per la Standardizzazione
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IEA	Agenzia Internazionale dell'Energia
WMO	World Meteorological Organization
PCS	Potere Calorifico Superiore
PCI	Potere Calorifico Inferiore
PCN	Potere Calorifico Netto
PM	Particelle di Materia
IPA	Idrocarburi Policiclici Aromatici
COV	Composti Organici Volatili
OMS	Organizzazione Mondiale della Sanità
IARC	Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro
FSC	Forest Stewardship Council
PEFC	Programme for the Endorsement of Forest Certification
AUA	Autorizzazione Unica Ambientale

AIA	Autorizzazione Integrata Ambientale
TUA	Testo Unico Ambientale
INFC	Inventario Nazionale Forestale Carabinieri
CREA-FL	Centro di Ricerca Foreste e Legno
CLT	Cross Laminated Timber
OSB	Oriented Strand Board
MDF	Medium Density Fibre-board
LDF	Low Density Fibre-board
HDF	High Density Fibre-board
XLAM	Cross Laminated Timber
TGA	Thermogravimetric Analysis
NIRS	Near Infrared Spectroscopy
CER	Catalogo Europeo dei Rifiuti

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

L'Italia è un paese che si distingue per la sua capacità di trasformare materie prime in prodotti finiti, spesso di alta qualità, grazie a una storia ed esperienza di capacità artigianale e industriale. Tra i settori considerati in questo processo troviamo quello della filiera del legno, di cui siamo grandi importatori dall'estero. La capacità di produrre prodotti finiti in legno è di fondamentale importanza, soprattutto nel contesto della lavorazione secondaria, che si avvale di tecniche di incollaggio e trattamenti con composti chimici. Tuttavia, la produzione di questi articoli genera notevoli quantità di residui, che possono essere più o meno contaminati dai trattamenti chimici, a seconda del settore di provenienza.

I trattamenti del legno più comuni, generalmente, prevedono l'impiego di sostanze adesive per la produzione di assortimenti di dimensioni maggiorate o con determinate forme e caratteristiche meccaniche. In base alle loro proprietà e dimensioni poi questi residui, ottenuti dall'industria della lavorazione del legno, possono essere impiegati per dar vita a prodotti secondari, in particolar modo a pannelli. Esistono diverse tipologie di pannelli prodotti, i quali vengono assemblati e costruiti con diverse modalità di lavorazione, comunque tutti caratterizzati dall'impiego di sostanze adesive. Nel caso di pannelli XLAM e lamellari, il contenuto di adesivo impiegato risulta minimo rispetto, per esempio, ai pannelli di multistrato e truciolare che necessitano di quantitativi maggiori di colla per la loro produzione.

In questo settore, quindi, vengono prodotti dei residui, derivanti dagli scarti dei semilavorati, contenenti colle, e da normativa non possono poi essere destinati al processo di combustione in comuni impianti. Tuttavia, la ridotta quantità di contaminante chimico rispetto alla massa di legno porta a pensare ad una loro potenziale valorizzazione. Ciò genererebbe da un lato il mancato costo di smaltimento e dall'altro la possibilità di disporre di un materiale energetico prodotto da un residuo di lavorazione.

Alcune aziende italiane mirano alla riutilizzazione di questi scarti con la produzione di pellet, destinato quindi al processo di combustione, in modo tale da ottimizzare l'intera filiera ed entrando così nell'ottica di un'economia circolare. Dove il residuo è di piccole dimensioni, o costituito da componenti facilmente macinabili, il prodotto può essere pellettizzato o densificato. Tuttavia, allo stato attuale dovrebbe poi essere impiegato in impianti caratterizzati

dalla presenza di un sistema di abbattimento delle emissioni di camino. Inoltre, questo può avvenire solo se il pellet in questione rispetta la specifica tecnica, attraverso specifici controlli con le analisi di laboratorio. Il punto in questione è chiarire, rispetto a quanto riportato nella specifica, se questa tipologia di materiali rispettano, e in che modo, la normativa tecnica. Ciò rappresenterebbe un punto di partenza per aprire una discussione sulla possibilità di creare questa tipologia di produzione e commercializzazione di biocombustibili da residui dell'industria della lavorazione secondaria del legno.

Questo aspetto è stato iniziato ad affrontare nel presente lavoro di tesi, valutando in modo particolare le proprietà di residui della lavorazione dello XLAM. Dopo una breve introduzione sul settore della lavorazione secondaria del legno e sulle tecniche di analisi di laboratorio, è stata proposta una parte sperimentale di caratterizzazione, secondo normativa tecnica, di diversi campioni residuali della lavorazione del legno. I materiali sono stati prevalentemente recuperati da un'azienda sul territorio nazionale e dal mercato. Lo scopo ultimo della tesi è di definire una prima panoramica, decisamente da migliorare, sullo stato qualitativo di tali residui, soprattutto per ciò che concerne alcuni elementi chimici, quali azoto e cloro, spesso legati alla presenza di contaminanti chimici del settore del legno.

Capitolo 1

BIOCOMBUSTIBILI SOLIDI: ASPETTI NORMATIVI E LEGISLATIVI

1.1 Biomasse per biocombustibili solidi

Per biocombustibile solido si intende un prodotto ottenuto dalla lavorazione di biomasse solide ed impiegato principalmente a fini energetici. Con il termine biomassa si intende generalmente un insieme di materiali, caratterizzati per essere dimensionalmente eterogenei tra loro, di natura organica che vengono impiegati in una serie di processi di trasformazione termochimica/biochimica, generalmente rivolti alla produzione energetica.

Il termine “biocombustibile” indica l’insieme di tutte le biomasse, o prodotti derivanti dalle biomasse, che presentano caratteristiche chimiche e fisiche standard e definiti da specifiche tecniche (norme tecniche) tali da renderli conformi all’uso in processi di combustione o in altre trasformazioni termochimiche. Generalmente i biocombustibili vengono classificati in base a differenti criteri, in funzione del loro stato fisico e della loro natura e provenienza. I biocombustibili possono infatti derivare direttamente dalle biomasse solide, come ad esempio la legna da ardere, o in alternativa essere ottenuti a seguito di un processo di trasformazione strutturale del materiale organico, come avviene per la produzione della maggior parte di biocombustibili (cippato, pellet, bricchette, biodiesel, bioetanolo, biogas e biometano).

Le tipologie di biomasse potenzialmente utilizzabili ai fini energetici vengono suddivise come di seguito riportato:

- colture energetiche dedicate, sia arboree che erbacee come, ad esempio, Short Rotation Forestry (SRF) e Medium Rotation Forestry (MRF);
- residui agricoli, agroindustriali, artigianali, industriali, civili (esempi: paglia, sansa di oliva, legna-rifiuto, vinacce, gusci di frutta secca, stocchi di mais, particolari frazioni di rifiuti urbani (RU) e di rifiuti assimilabili agli urbani, ...);
- residui forestali, legna da ardere, prodotti ligno-cellulosici, residui di segherie e industrie del legno.

La caratteristica principale della biomassa è rappresentata dalla sua componente organica, di origine biologica e non fossile, la quale viene prodotta per effetto del processo di fotosintesi

clorofilliana. Grazie a tale processo si riesce ad accumulare l'energia solare nella biomassa valorizzando un processo naturale per la produzione di materiale energetico.

Il settore forestale produce una serie molto eterogenea di biomasse solide, le quali sono caratterizzate da qualità differenti fra loro e strettamente correlate alla tipologia e all'origine del materiale. In particolare, vengono utilizzate a scopi energetici le biomasse solide residuali che vengono prodotte durante le varie attività selvicolturali. A fini energetici vengono impiegati anche gli assortimenti minori residuali delle operazioni di gestione e manutenzione del bosco, ovvero tutti i materiali che solitamente verrebbero lasciati in bosco a seguito del prelievo di assortimenti impiegati per scopi commerciali. A questa tipologia di materiale si aggiungono anche tutti gli scarti che derivano dal settore industriale del legno. Il materiale deriva generalmente dalle operazioni di taglio nelle segherie e si può effettuare una prima distinzione tra gli:

- scarti di legno vergine comprendenti polveri, truciolati, segatura, sciaveri...;
- scarti di legno trattato di cui ne fanno parte materiali trattati chimicamente con presenza di colle, vernici e altri materiali chimici. Per l'impiego di questo materiale a fine energetico occorre sottolineare che esiste una norma tecnica di riferimento, la UNI EN ISO 17225, che applica dei limiti stringenti in merito ai valori soglia affinché il materiale trattato possa entrare nel processo di combustione senza impattare con l'emissione di gas serra in atmosfera o con sostanze chimiche residuali nelle ceneri.

La filiera del legno è caratterizzata da una successione di operazioni che consentono di produrre i segati, impiegati nel settore commerciale, partendo dall'attività di abbattimento della pianta che rientra nelle prime operazioni selvicolturali. È importante sottolineare il fatto che, durante queste varie fasi di processo, si producono numerosi scarti di materiale legnoso, in particolar modo durante l'attività di sramatura (eliminazione rami, cimale e ramaglie dal tronco) e di segazione (taglio del tronco in definite porzioni). Questi residui vengono generalmente intesi e classificati come dei rifiuti, soprattutto a seguito di attività di trattamento del materiale in segheria o per la realizzazione di determinati assortimenti. La questione relativa ai residui di lavorazione verrà approfondita in seguito.

1.1.1 *Aspetti politici-ambientali*

Numerosi esperti, organizzazioni scientifiche e istituzioni internazionali concordano sul fatto che l'uso massiccio e improprio dei combustibili fossili, nel corso dell'ultimo secolo,

abbia incrementato significativamente le emissioni di gas serra nell'atmosfera, contribuendo al cambiamento climatico. Ecco alcuni esempi di esperti e organizzazioni che lo affermano:

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), principale organismo delle Nazioni Unite per la valutazione della scienza sul cambiamento climatico;
- Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA);
- World Meteorological Organization (WMO);
- James Hansen, ex scienziato della NASA e climatologo.

Per questo motivo e per provare quindi a porre rimedio allo stato di emergenza ambientale in cui ci ritroviamo oggi, sono state indette delle conferenze a livello internazionale con lo scopo di ridurre le emissioni di gas serra a livello globale, tra i più noti abbiamo ad esempio il Protocollo di Kyoto del 1997 e l'Accordo di Parigi del 2015. L'Unione Europea ha emanato una politica energetica basata sui principi di decarbonizzazione, competitività, sicurezza dell'approvvigionamento e sostenibilità. Tra i suoi obiettivi figurano garantire il funzionamento del mercato dell'energia e la sicurezza dell'approvvigionamento energetico all'interno dell'UE, nonché promuovere l'efficienza e il risparmio energetico, lo sviluppo delle energie rinnovabili e l'interconnessione delle reti energetiche [1].

Considerando nello specifico le principali energie rinnovabili, di cui fanno parte quelle derivanti da biomasse solide a fini energetici e biocombustibili, si è stabilito che quest'ultime riducono l'inquinamento, ampliano le opzioni energetiche e diminuiscono la dipendenza nei confronti dei combustibili fossili. Nel 2022 le energie rinnovabili hanno rappresentato il 23% del consumo di energia dell'Unione europea. Nel 2023 i legislatori hanno portato dal 32% al 42,5% l'obiettivo dell'Unione relativo alla quota di energia da fonti rinnovabili nel consumo lordo di energia entro il 2030, con l'ambizione di raggiungere il 45% [2].

È importante ricordare che utilizzare biomasse a scopo energetico comporta numerosi vantaggi e benefici a livello ambientale, occupazionale e in politica energetica. Riguardo il beneficio ambientale si deve tenere in considerazione il fatto che la biomassa, durante il suo ciclo di crescita e di sviluppo, è in grado di assorbire determinati quantitativi di CO₂ che verrà poi rilasciata nuovamente in atmosfera durante il processo di combustione, equilibrando la sua influenza ambientale. Questo fa sì che il bilancio della CO₂ presente in atmosfera risulti teoricamente nullo, ovvero che la combustione di questi materiali vegetali non contribuisce all'effetto serra con le loro emissioni. Inoltre, lo sviluppo tecnologico riguardante i sistemi impiantistici per il processo di combustione ha permesso l'abbattimento delle emissioni inquinanti tramite dei sistemi di depurazione dei fumi di scarico. L'impiego delle biomasse, sia dedicate che residuali, per produrre energia, ha effetti positivi

sia sul settore agricolo e forestale, che sul settore industriale dedicato alla conversione energetica, con potenziali benefici in termini occupazionali. Produrre energia da biomasse contribuisce a diminuire l'importazione di combustibili fossili e diversificare le fonti di approvvigionamento energetico, concentrandosi sempre di più sull'utilizzo di fonti rinnovabili. Il consolidamento di questo settore è un aspetto che consente quindi di perseguire gli obiettivi imposti nell'ambito delle conferenze internazionali sul clima. Questo nuovo impulso non solo accelera il processo di rilascio delle autorizzazioni per investire sulle centrali elettriche a energia rinnovabile, disincentivando l'uso delle fonti fossili, ma pone anche l'accento sulla necessità di ottimizzare l'uso delle biomasse.

Tuttavia, i principali fattori che limitano l'affermazione delle biomasse ad uso energetico sono di natura tecnica e relativi sia alle fasi di approvvigionamento e trasporto che alla fase di conversione. Generalmente, se si fa riferimento all'energia ricavata con sistemi efficienti nei Paesi in via di sviluppo, il costo dell'energia ottenuta da biomassa è ancora maggiore di quello derivante dalle fonti fossili, anche se vi è una tendenza verso la competitività tra le due, nonostante risulti ancora oggi più conveniente l'utilizzo delle fonti fossili. È da notare che il divario di costo tra le fonti rinnovabili e quelle fossili sarebbe invertito se venissero considerati, nella valutazione dell'analisi costi-benefici, anche gli aspetti ambientali ed i costi sociali connessi alla combustione di fonti fossili; infatti, le esternalità della generazione energetica, ed i relativi impatti ambientali, economici e sociali, non sono tenute in considerazione nei costi finali. Ciò limita sicuramente la transizione verso un maggiore uso della biomassa rinnovabile a fini energetici [3].

1.1.2 *Classificazione biocombustibili in base al loro stato fisico*

Si tratta della classificazione più ricorrente e più facilmente impiegata quando si tratta di biocombustibili. Questa prevede la divisione tra:

- biocombustibili solidi:
rappresentano il gruppo più rappresentativo e sono caratterizzati da un'elevata eterogeneità intrinseca. Il gruppo è composto da pellet, bricchette, cippato e legna da ardere, come prodotti derivanti principalmente dal settore forestale, ma troviamo anche sottoprodotti industriali e prodotti erbacei e/o legnosi derivanti da attività agricole;
- biocombustibili liquidi:

costituiti principalmente da oli estratti da semi di specie oleaginose e provenienti da colture generalmente dedicate al processo di estrazione. Il gruppo comprende quindi prodotti come il bioetanolo ed il biodiesel;

- biocombustibili gassosi:
ne fanno parte prodotti come il biogas, il biometano e il syngas, ottenuti da processi di conversione biochimica o fisica.

I biocombustibili solidi vengono principalmente utilizzati per il riscaldamento, sia a livello domestico con impianti di piccola potenza, sia a livello industriale dove le potenze sono nettamente superiori. Vengono utilizzati anche per la generazione di energia elettrica e per il teleriscaldamento urbano. La biomassa, dalla quale poi si ottengono i vari biocombustibili, rappresenta la prima fonte rinnovabile per importanza in Europa e la seconda in Italia. Potenzialmente la filiera legno-energia, che ha avuto un elevato sviluppo negli ultimi anni soprattutto in alcune realtà del Nord e del Centro Italia, potrebbe incrementare ulteriormente. Nell'ambito delle fonti energetiche rinnovabili, il legno rappresenta la seconda fonte più utilizzata in termini di produzione di energia primaria, con una quota del 30% [4].

Il consumo di biocombustibili solidi in Italia per il riscaldamento residenziale e commerciale si attesta abbastanza stabilmente tra i 10 e i 17 milioni di tonnellate, con in atto una graduale sostituzione della legna da ardere con il pellet. Tra il 2010 ed il 2022 la legna da ardere è passata dall'85% al 70% dei consumi. La riduzione che ha colpito i consumi di legna da ardere in questi 12 anni è del 41% (-7 Mtons). Il pellet è invece riuscito a raggiungere l'8% dei consumi nel 2010 fino al 21% nel 2022. L'aumento percentuale che ha interessato i consumi di pellet in questo periodo è del 99% (+1,5 Mtons). La variazione che riguarda il cippato è molto limitata e descrive un mercato, quello delle caldaie di medie e grandi dimensioni, che risulta molto più stabile e di entità molto più ridotta, in termini di consumo, rispetto a quello relativo ad apparecchi e caldaie domestiche [5].

Considerando la tipologia di biocombustibili solidi, i materiali possono essere suddivisi tra biomasse impiegate direttamente come biocombustibile senza alcun processo di trasformazione e/o lavorazione, come la legna da ardere, e biomasse che subiscono una serie di processi di trasformazione per la commercializzazione e l'impiego come biocombustibili, come avviene per i prodotti densificati, quali pellet e bricchette, e per quelli non densificati che subiscono solo un processo di trasformazione in termini strutturali e dimensionali, come avviene per il cippato. Nello specifico:

Pellet

È il prodotto densificato ottenuto tramite il processo di pellettizzazione. La biomassa di partenza è di origine legnosa, generalmente derivante da residui di lavorazione dell'industria del legno (segatura e/o macinato di legno) o, raramente, da colture dedicate nel settore forestale. Le biomasse impiegate per la produzione di pellet sono sottoposte ad un primo processo di essiccazione e successiva macinazione. L'essiccazione ha come obiettivo la rimozione dell'umidità contenuta nella biomassa fino a stabilizzazione con l'umidità esterna, e può avvenire con modalità differenti: in modo naturale o in modo artificiale. L'*essiccazione naturale* richiede tempi variabili a seconda del contenuto d'umidità stimato inizialmente, ed è più efficiente e sicura se il processo permette di raggiungere l'obiettivo senza determinare rischi per gli operatori o perdite di sostanza organica. Pertanto, l'essiccazione avviene grazie alla movimentazione continua del materiale stoccato per favorire l'aerazione delle porzioni, insieme all'utilizzo di una copertura dalle condizioni climatiche avverse (precipitazioni piovose/nevose) tramite strutture idonee. L'*essiccazione artificiale* viene invece effettuata generalmente negli essiccatori a nastro o a tamburo, dove è necessario fornire energia termica per assicurare l'essiccazione del materiale fino alla percentuale di stabilità. Negli impianti di pellettizzazione normalmente si utilizza ulteriore biomassa residuale per generare questa energia. L'essiccatore sfrutta quindi l'effetto disidratante dell'aria calda che viene forzata a passare attraverso la biomassa in modo da rendere omogenea la perdita di acqua su tutto il materiale.

La macinazione ha la funzione di ridurre omogeneamente il materiale ad una granulometria ridotta, generalmente ad 1 mm tramite un mulino a lame taglienti.

Successivamente avviene la pellettizzazione. Si tratta di un processo di estrusione esercitato da un elemento rotante (rullo pressore interno) contenuto all'interno di un elemento cilindrico (trafila di compressione), che comprime il materiale legnoso immesso gradualmente e ne determina la fuoriuscita attraverso apposite matrici forate, ricavate lungo le pareti della trafilatura. Nel corso di quest'operazione si determina una progressiva densificazione del materiale legnoso che fuoriesce sotto forma di piccoli elementi cilindrici. All'esterno della trafilatura sono posizionati dei coltelli che tagliano il pellet nella lunghezza desiderata (generalmente meno di 40 mm), che può essere regolata preventivamente. Durante la fase di estrusione si raggiungono temperature superiori ai 90°C e pressioni tali da determinare la plastificazione dei costituenti della matrice legnosa, in modo specifico della lignina, considerato un polimero termoplastico, che svolge la funzione di adesivo naturale e conferisce una forma solida e compatta al prodotto. Nella fase finale il pellet viene raffreddato, favorendo un'ulteriore essiccazione del pellet.

Bricchette

Prodotto densificato ottenuto tramite il processo di bricchettatura. Vengono realizzati con diverse tipologie di biomasse solide e in diverse forme; le matrici di partenza sono spesso residuali e possono essere caratterizzati dalla presenza di additivi. Mentre il pellet è generalmente prodotto utilizzando una sola tipologia di materiale, per le bricchette possono essere sfruttate miscele, con l'eventuale aggiunta anche di additivi. Il processo di produzione segue le stesse procedure del pellet, comprese le prime lavorazioni di essiccazione e macinazione.

Cippato

Prodotto legnoso che subisce un processo di riduzione dimensionale della matrice di partenza tramite l'impiego di macchine sminuzzatrici o cippatrici dotate di lame o coltelli che tagliano il materiale fino a ridurlo in scaglie legnose più o meno omogenee a seconda del tipo di macchina utilizzata, del tipo di materiale di partenza e delle impostazioni tecniche richieste. Le macchine cippatrici possono essere quindi di differenti tipologie, come quelle a disco e a tamburo con coltelli. Quest'ultima in particolare impiega un sistema a cilindro rotante, il tamburo, a cui sono collegati dei coltelli che sminuzzano il materiale alimentato da appositi rulli, indirizzati verso la zona di lavorazione.

Legna da ardere

Viene considerato il biocombustibile solido più diffuso in termini commerciali, perché non subisce processi di trasformazione aggiuntivi oltre all'insieme di operazioni successive all'abbattimento in bosco. Sostanzialmente la legna da ardere si ottiene da tronchi di dimensioni non elevate o grosse branche spaccate, in modo diverso, lungo la direzione delle fibre. Anche in questo caso, il processo di essiccazione della legna a seguito della spaccatura del tronco risulta fondamentale per abbassare il contenuto d'umidità naturalmente presente nel legno.

1.2 Il processo di combustione e i principali impianti

La filiera legno-energia comprende il processo termochimico di conversione energetica partendo dalla sostanza organica fino alla produzione di energia elettrica e/o termica, attraverso il processo di combustione diretta del materiale. La filiera parte dalla raccolta e stoccaggio della biomassa legnosa derivante da colture dedicate, da manutenzioni forestali ma

anche da residui dell'industria del legno, così come quella agroindustriale. Dopo le prime lavorazioni che si svolgono nel luogo di intervento, insieme all'esbosco e al trasporto verso l'impianto di riferimento, il materiale viene poi opportunamente stoccato e preparato, previa essiccazione, alla fase finale di combustione.

Combustione diretta

Consiste in una sequenza di reazioni chimiche esotermiche (che quindi rilasciano energia) che si sviluppano tra un combustibile (materiale legnoso) e un agente ossidante da cui si genera calore e specie chimiche di conversione. Si realizza in una serie di fasi:

- **Riscaldamento:** fase ridotta in cui le temperature non raggiungono ancora i 100°C (partendo da una temperatura di circa 25°C) e che comporta la parziale evaporazione di acqua, insieme ad una conseguente parziale perdita di energia (processo endotermico);
- **Essiccazione:** in questa fase si conclude la totale evaporazione di acqua, con ulteriore perdita di energia (processo endotermico), raggiungendo temperature fino a 150°C;
- **Pirolisi:** fase in cui avviene la scissione di componenti chimiche a catena lunga, con produzione di Tar e Char insieme ad altri composti gassosi non ossidati e idrocarburi volatili. Le temperature possono raggiungere i 230°C, senza però favorire una perdita di energia;
- **Prima gassificazione** (230°C<T<500°C), **seconda gassificazione** (500°C<T<700°C): in queste due fasi avviene la parziale ossidazione della biomassa grazie all'immissione di aria primaria;
- **Ossidazione:** (700°C<T<1400°C) rappresenta la fase finale in cui si completa l'ossidazione del materiale, grazie all'immissione di aria secondaria, rendendo il processo esotermico, raggiungendo circa il 70% di calore totale prodotto.

Questo processo viene utilizzato in diversi contesti:

- *Centrali termoelettriche*

Il prodotto finale di queste centrali è la produzione di energia elettrica e in seconda battuta il calore. In alcuni casi il calore prodotto viene utilizzato per uso civile ed industriale dando luogo alla cogenerazione. La potenza delle centrali può anche superare i 100 MWt e sono quindi in grado di soddisfare il fabbisogno energetico di intere città. Per far questo necessitano di quantitativi di biomassa dell'ordine delle

centinaia di migliaia di tonnellate all'anno. La biomassa generalmente utilizzata è il cippato legnoso industriale, di diversa origine, sia dedicata che di tipo residuale.

- *Centrali a biomasse per il teleriscaldamento*

Sono grandi impianti specializzati per la produzione dedicata di energia termica e, specificatamente per determinate realtà, anche per la produzione di energia elettrica. Il calore generato viene poi distribuito tramite una rete di teleriscaldamento a diverse utenze, sia domestiche che industriali, a distanze specifiche, in funzione delle potenze installate e del tipo di territorio interessato. La potenza di questi impianti è variabile ma in genere, almeno in Italia, non superano le decine di MWt. L'aspetto interessante di questi impianti è che possono anche essere di qualche centinaio di kWt, interessanti come soluzione per il nostro contesto nazionale.

- *Impianti domestici*

Generalmente vengono utilizzati per generare aria e/o acqua calda, per riscaldamento civile o come fluido in determinati processi industriali. A livello domestico le potenze impiegate sono generalmente di alcune decine di kW che possono superare i 300 kW se servono una piccola utenza.

1.3 Caratteristiche delle biomasse solide a fini energetici

Le performance qualitative del processo di combustione delle biomasse solide a fini energetici possono essere strettamente influenzate dalle proprietà fisiche e chimiche del materiale di partenza, oltre che dalle varie caratteristiche dell'impianto di conversione. Durante tale processo è quindi essenziale conoscere le proprietà chimiche, fisiche, dimensionali ed energetiche del biocombustibile. Queste permettono di determinare non solo quali sono le migliori soluzioni impiantistiche ma anche il potenziale impatto ambientale dell'intera filiera, in termini di emissioni di inquinanti in atmosfera che derivano direttamente dal materiale utilizzato.

La biomassa solida impiegata nel processo di combustione, quindi generalmente di natura ligno-cellulosica, è composta da tre elementi principali: acqua, sostanza organica e sostanza inorganica.

L'acqua, espressa in termini di umidità %, è una componente fondamentale presente naturalmente nella biomassa, in percentuali variabili in base al tipo di prodotto e alle condizioni in cui si sviluppa. La presenza di elevati quantitativi di acqua all'interno della biomassa influisce negativamente sulle qualità energetiche, a causa della perdita di calore durante il processo di evaporazione. Ciò influisce in modo sfavorevole sul valore economico

della biomassa e nella gestione logistica del materiale, comprendendo la fase di stoccaggio prima della fase di combustione. La sostanza organica, costituita prevalentemente da olocellulose (emicellulosa e cellulosa), lignina ed estrattivi (cere, resine, terpeni, gomme...), rappresenta la componente principale che influenza la produzione energetica durante la combustione. Le cellulose hanno un contenuto energetico intorno ai 16-17 MJ/kg s.s., le lignine raggiungono 23-25 MJ/kg s.s. mentre gli estrattivi intorno ai 28-32 MJ/kg s.s...

La sostanza inorganica invece è la componente costituita da carbonati, solfati, silicati e fosfati che influenzano la formazione delle ceneri durante il processo di combustione, le cui concentrazioni variano a seconda del tipo e dell'origine della biomassa. Una eccessiva presenza di cenere all'interno delle caldaie al termine della combustione di biomassa potrebbe favorire numerosi effetti negativi, non solo a livello ambientale, ma anche a livello tecnico (corrosione).

Le principali proprietà delle biomasse da considerare per il loro impiego nel processo termochimico sono: proprietà dimensionali, chimiche, fisiche ed energetiche. Oltre alle proprietà, è importante conoscere la tracciabilità della biomassa in modo tale da poter effettuare una valutazione in merito all'origine del materiale stesso.

Tracciabilità

Si tratta di un sistema di identificazione e determinazione di origine della biomassa utilizzata. La norma ISO 17225-1, oltre a stabilire i valori soglia qualitativi dei parametri dei biocombustibili, fornisce indicazioni in merito alle modalità con cui viene assicurata la tracciabilità del materiale, la quale associa quindi un codice numerico (fino a 4 cifre) alla biomassa in base alla tipologia e origine. Rappresenta un fondamentale supporto per valutare la sostenibilità del prodotto energetico lungo tutta la filiera produttiva.

Proprietà dimensionali

- Lunghezza, diametro: riferiti a biocombustibili densificati
- Volume: in riferimento alla legna da ardere
- Granulometria: indicata per il cippato
- Forma: tipologia di formato con cui viene commercializzata la biomassa
- Massa volumica: utile per trasporto, stoccaggio e movimentazione

Proprietà chimiche

- Contenuto in carbonio, idrogeno e ossigeno

- Contenuto in azoto
- Contenuto in cloro e zolfo
- Contenuto in metalli pesanti

Proprietà fisiche

- Contenuto di umidità
- Contenuto di ceneri e relativa fusibilità
- Contenuto di sostanza volatile
- Temperatura di ignizione
- Carbonio fisso
- Polveri
- Durabilità

Proprietà energetiche

- Potere calorifico: espresso in superiore (PCS), inferiore (PCI), netto (PCN)
- Densità energetica

1.4 Emissioni di combustione dei biocombustibili solidi

Durante il processo di combustione vengono emesse differenti tipologie di inquinanti. La quantità e tipologia di questi composti, emessi tramite fumi di scarico, dipende dalla tecnologia dell'impianto, dal tipo di combustibile utilizzato e dalla sua qualità.

Fin dagli anni '80, la letteratura scientifica ha sottolineato la tossicità del fumo derivante dalla combustione incontrollata di legno, indicandolo come principale responsabile delle emissioni di due tra gli inquinanti più pericolosi: le Particelle di Materia (PM) "sottili" e gli Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA). Oltre a questi, possiamo trovare nelle emissioni altre tipologie di inquinanti, in particolare: due tipologie di incombusti (CO e COV) e due prodotti di reazione, ossia ossidi di azoto e biossido di zolfo (SO₂).

Riferendoci al *particolato*, si considera l'insieme di quelle particelle abbastanza sottili da rimanere in sospensione nell'atmosfera. Vengono classificate, a seconda delle loro dimensioni, come: PM10 o "grossolane" e PM2.5 o "fini", dove il numero indica la dimensione massima dell'insieme espressa in millesimi di millimetro. L'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), l'Unione Europea e l'Italia hanno fissato dei limiti di concentrazione in atmosfera per le particelle PM10 e PM2.5, a causa della loro capacità di influire sull'insorgenza di malattie

respiratorie e cardiovascolari. Quando invece parliamo degli *IPA*, si considera la categoria dei microinquinanti che possono avere effetti tossici già a concentrazioni molto più modeste di quelle normalmente osservate per gli inquinanti classici. Il più importante degli IPA è il benzo-a-pirene che la IARC (Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro) classifica come “cancerogeno per l’uomo”. Gli IPA possono formarsi in tutte le combustioni incomplete di sostanze organiche a base di carbonio e idrogeno, così come nei generatori di calore a legna a causa della combustione incompleta della cellulosa. Il *monossido di carbonio* (CO) si forma quando vi è insufficiente apporto d’aria (un solo atomo di ossigeno si lega al carbonio) durante il processo di combustione ed è per questo considerato come incombusto. Il monossido di carbonio è considerato altamente tossico e può provocare gravissimi danni immediati se emesso all’interno di locali abitati. Gli *ossidi di azoto* (NO_x) si formano durante le fasi di combustione ad alta temperatura, quando l’ossigeno dell’aria comburente reagisce con l’azoto dell’aria anziché con il combustibile. Nella combustione di biomasse, tuttavia, il meccanismo prevalente che influenza la formazione degli NO_x è l’ossidazione dell’azoto contenuto nelle piante. Gli *ossidi di zolfo* (SO_x) si trovano nei fumi solo se il combustibile di partenza contiene un’elevata percentuale di zolfo, ma generalmente le concentrazioni di questo elemento possono essere elevate nelle biomasse erbacee, mentre sono abbastanza basse nelle biomasse legnose. I composti organici volatili, invece, provengono dalle sostanze aromatiche contenute nel legno fresco. Dopo il taglio degli alberi queste sostanze tendono a volatilizzarsi, riducendosi fortemente, in termini percentuali, durante la fase di stagionatura [7].

Di conseguenza, con il Decreto 7 novembre 2017 n. 186, il Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare ha emanato il regolamento riguardante il rilascio di una certificazione per i generatori di calore alimentati a biocombustibili solidi, entrato in vigore nel 2018. Esso stabilisce i requisiti, le procedure e le competenze per il rilascio della certificazione ambientale, ed inoltre individua le prestazioni emissive di riferimento per le diverse classi di qualità, i relativi metodi di prova e le verifiche da eseguire ai fini del rilascio della certificazione ambientale, nonché le indicazioni da fornire sulle corrette modalità di installazione e gestione dei generatori di calore [8].

1.5 Norme tecniche

Per norma tecnica si intende un documento, generalmente sviluppato da enti di normazione, che stabilisce linee guida, specifiche, requisiti e metodi di analisi per consentire la corretta valutazione analitica del prodotto di riferimento. L’attuazione di queste norme consente di standardizzare il prodotto tramite la definizione di requisiti uniformi, riducendo quindi la

variabilità del risultato e conformando il metodo di analisi per tutti i laboratori. Permette anche di garantire la sicurezza di tracciabilità, la qualità, la sostenibilità ed anche la compatibilità del prodotto ai limiti soglia definiti dalle norme, per favorire la giusta collaborazione tra i vari operatori del settore, compreso quindi il consumatore, produttore, analizzatore e venditore.

Nell'ambito dei biocombustibili solidi, le norme tecniche stabiliscono requisiti specifici per la produzione, la verifica della qualità, il corretto utilizzo e la gestione di quest'ultimi. Queste norme sono essenziali per sostenere il loro mercato e garantire che soddisfino gli standard richiesti, sia a livello nazionale che internazionale.

Tra il numeroso gruppo di normative tecniche, la UNI EN ISO 17225, rappresenta una norma fondamentale per garantire che i biocombustibili solidi utilizzati per la produzione di energia soddisfino restrittivi standard di qualità e sicurezza, promuovendo così la fiducia nel mercato delle energie rinnovabili. Nello specifico:

- La **UNI EN ISO 17225-1** illustra il metodo di classificazione dei biocombustibili solidi sulla base dell'origine della biomassa e sulle caratteristiche qualitative essenziali per ogni specifica tipologia di prodotto. Questa norma consente di catalogare e differenziare i prodotti impiegati a fini energetici basandosi sulla definizione della forma commerciale del prodotto, della dimensione e della modalità di produzione. Oltre a queste informazioni è possibile determinare la natura e l'origine della biomassa, lo stato originario in cui si trova la materia prima e di specificare la provenienza. Vengono prese in considerazione anche materie prime sottoposte a trattamenti chimici che la legislazione italiana, con il decreto legislativo n. 152 del 3 aprile 2006, non ammette come biomasse combustibili.

- La **UNI EN ISO 17225-2** definisce le classi di qualità del pellet di legno. La classificazione del materiale nelle classi A1, A2, B si basa sulle specifiche proprietà chimico-fisiche del biocombustibile. In particolare, la classe A differisce dalla B in quanto nella prima si utilizza materiale derivante da legno vergine o residui non trattati chimicamente mentre per seconda si possono impiegare anche materiali trattati. Oltre a questa classificazione, per il pellet industriale si utilizza una suddivisione specifica, dettata dalle classi I1, I2 e I3 a seconda delle soglie qualitative imposte.

- La **UNI EN ISO 17225-3** fa riferimento alla classificazione delle bricchette di legno per uso non industriale in tre classi di qualità: A1, A2, B.

- La **UNI EN ISO 17225-4** provvede alla determinazione delle quattro classi di qualità (A1, A2, B1, B2) del cippato di legno per uso non industriale, basandosi sulle proprietà chimico-fisiche.

- La **UNI EN ISO 17225-5** stabilisce le classi di qualità della legna da ardere in ciocchi per uso non industriale, divise in A1, A2, B.

- La **UNI EN ISO 17225-6** include specifiche per la produzione e commercializzazione di pellet non legnoso, prodotto da residui erbacei derivanti da agricoltura e orticoltura. La classificazione si basa sulla suddivisione del biocombustibile tra classe C e classe D.

- La **UNI EN ISO 17225-7** comprende la classificazione di bricchette non legnose, e quindi prodotte con residui di materiale vegetale di diversa natura, nelle classi C2 e D.

- La **UNI EN ISO 17225-8** definisce la classificazione e le specifiche dei biocombustibili solidi densificati prodotti da biomassa trattata termicamente per utilizzo commerciale e industriale. La norma si riferisce al pellet e a bricchette ottenuti dalle seguenti materie prime: biomassa legnosa, biomassa erbacea, biomassa derivante da frutti, biomassa acquatica e loro miscele e/o miscugli comprese le loro sottocategorie.

- La **UNI EN ISO 17225-9** stabilisce le caratteristiche del cippato ad uso industriale.

Tabella 1-1: Normative e relative caratteristiche

Normativa UNI EN ISO	Titolo norma
ISO 17225-1:2021	Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 1: general requirements
ISO 17225-2:2021	Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 2: graded wood pellets
ISO 17225-3:2021	Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 3: graded wood briquettes
ISO 17225-4:2021	Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 4: graded wood chips
ISO 17225-5:2021	Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 5: graded firewood
ISO 17225-6:2021	Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 6: graded non-woody pellets
ISO 17225-7:2021	Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 7: graded non-woody briquettes
ISO 17225-8:2023	Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 8: graded of classes of thermally treated and densified biomass fuels
ISO 17225-9:2021	Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 9: graded hog fuel and wood chips for industrial use

Capitolo 2

I RESIDUI DELLA LAVORAZIONE DELL'INDUSTRIA DEL LEGNO

2.1 Lavorazioni del legno

Il legno è un materiale ampiamente disponibile nel nostro territorio e versatile dal punto di vista tecnico, tale da essere utilizzato per una vasta gamma di applicazione e prodotti. Nel corso dei secoli è sempre stato considerato un materiale fondamentale, impiegato nell'edilizia e nella produzione di strumenti ed oggetti di uso quotidiano, trovando però anche largo spazio come combustibile per riscaldamento e cottura.

Anche se alcuni usi tradizionali del legno hanno attualmente perso interesse, molti dei suoi impieghi sono ancora fondamentali, tanto da trovare impiego anche in relazione a tecnologie moderne che siano utili in un contesto dove si vuole dare una maggiore rilevanza alla sostenibilità ambientale.

Nell'edilizia moderna il legno continua ad essere ampiamente usato come elemento costruttivo, soprattutto in paesi dove la componente forestale e l'interesse verso le operazioni selvicolturali hanno maggiore rilevanza. Anche come arredamento da interno, il legno viene particolarmente apprezzato per le sue caratteristiche di resistenza e bellezza estetica. Inoltre, il legno rimane indispensabile per la produzione di carta e derivati, grazie alla lavorazione della componente naturale della cellulosa che permette la realizzazione di vari prodotti cartacei, oggi sempre più richiesti [9].

Con la crescente ed indispensabile transizione verso l'impiego di fonti rinnovabili, il legno ha trovato un ruolo, sempre più fondamentale, come fonte energetica per la produzione sia di calore che di elettricità, con l'obiettivo di ridurre la dipendenza dai combustibili fossili e ad abbattere così le emissioni di CO₂.

Rispetto al passato, oggi c'è una maggiore consapevolezza dell'impatto ambientale causato dall'uso massiccio ed improprio del legno, che ha portato all'adozione di politiche volte a garantire una gestione più sostenibile delle foreste. Questo cambiamento è stato determinato principalmente dalle ripercussioni devastanti della deforestazione incontrollata. Nel corso della storia, la deforestazione ha portato al cambio d'uso del suolo, con il risultato che le

foreste si trasformassero in terreni agricoli, in pascoli, o in aree urbane, favorendo desertificazione ed eccessiva cementificazione. Questo fenomeno ha raggiunto livelli critici soprattutto tra il XIX e il XX secolo, a causa dell'espansione delle industrie (industrializzazione) e del massiccio incremento della popolazione globale in aree ristrette. Alcuni degli effetti più gravi della deforestazione sono:

- Perdita di biodiversità: le foreste ospitano una parte significativa della biodiversità terrestre, perché popolate da migliaia di specie vegetali e animali, la cui sopravvivenza dipende da habitat specifici. La distruzione delle foreste ha quindi portato all'estinzione (effettiva e potenziale) di molte specie, in quanto costrette ad un cambiamento drastico delle condizioni ambientali rispetto al loro habitat naturale;
- Impatto sul clima: le foreste svolgono un ruolo fondamentale nel ciclo del carbonio, agendo come "pozzi" di assorbimento di CO₂. Quando gli alberi vengono abbattuti o utilizzati nei processi di combustione, rilasciano nell'atmosfera il carbonio immagazzinato, contribuendo al rilascio dei gas serra e al riscaldamento globale. Questo ciclo può essere ristabilito e portato ad un effetto neutro solo se ad ogni abbattimento (rilascio di CO₂) equivale una conseguente rigenerazione (immagazzinamento di CO₂);
- Erosione del suolo: le radici degli alberi aiutano a mantenere il suolo compatto, in termini strutturali, di resistenza e di fertilità. La deforestazione favorisce quindi il fenomeno dell'erosione, riducendo drasticamente la capacità del terreno di sostenere le forme di vita vegetale, comportando quindi problematiche importanti per la popolazione boschiva, posta nelle strette vicinanze della zona deforestata, per una questione di stabilità e resistenza delle piante in piedi. Ci sono ripercussioni anche per la società che si trova in queste zone soggette ad erosione per tutti i problemi correlati al fenomeno di frane e quindi di perdita di suolo.

Di conseguenza, una maggiore e più razionale presa di coscienza sulle numerose problematiche ambientali che insorgono a seguito di una non corretta utilizzazione delle foreste e sull'improprio approvvigionamento del legname, ha portato allo sviluppo di una serie di approcci più sostenibili per la gestione delle foreste, con l'obiettivo di mantenere un equilibrio reale tra le esigenze economiche dei paesi, le aspettative sociali e le necessità ambientali.

Un'attività per contrastare queste problematiche è sicuramente il rimboschimento; piantare nuovi alberi nelle aree deforestate consente infatti di ripristinare le funzioni ecologiche svolte dalle foreste, e quindi dai singoli individui, e contribuisce all'assorbimento di CO₂. Affinché

il processo di ripristino forestale comporti un vero miglioramento ambientale, è però necessario attuare una serie di operazioni che influiscano sull'attività di gestione e monitoraggio, per uno sviluppo controllato ed efficiente delle nuove risorse ambientali messe a dimora.

Dunque, la gestione forestale responsabile, la quale si basa su una serie di operazioni che garantiscono l'abbattimento di individui arborei in modo controllato e la successiva rigenerazione naturale, così come artificiale (sostituzione degli individui abbattuti), può ridurre notevolmente l'impatto ambientale per preservare l'ecosistema attuale e futuro.

Uno degli strumenti più efficaci nel garantire la gestione sostenibile del legno è il sistema di certificazioni, create con lo scopo di garantire che il legno, la carta ed altri prodotti forestali provengano da foreste gestite in maniera responsabile, rispettando dei principi fondamentali di sostenibilità. I principali sistemi di certificazione forestale a livello globale sono: FSC (Forest Stewardship Council) e PEFC (Programme for the Endorsement of Forest Certification). Entrambe garantiscono che le operazioni selvicolturali rispettino i principi di sostenibilità economica, sociale ed ambientale, assicurando i diritti delle popolazioni locali [10].

Il legno, generalmente, può essere sottoposto a diverse fasi di lavorazione: una lavorazione primaria, che riguarda le prime fasi di trasformazione del materiale, e una lavorazione secondaria, dove si ottengono i prodotti finiti.

Le lavorazioni primarie comprendono una serie di operazioni volte ad ottenere diverse tipologie di assortimento legnoso. I cascami di questa operazione e tutte le materie prime non adatte all'industria vengono destinati alla produzione di biomassa ad uso energetico. La filiera del legno prevede quindi il passaggio del materiale dal bosco alla segheria, seguendo le operazioni di abbattimento, sramatura, depezzatura, scortecciatura, esbosco e trasporto. Arrivato in segheria, il tronco può essere sottoposto ad una serie di pretrattamenti, come la vaporizzazione, con lo scopo di evitare la degradazione del legno a causa dei microrganismi, riducendo quindi la percentuale di umidità presente nel materiale che rappresenta una condizione fisica molto favorevole all'insorgenza di muffe, funghi, ed altri microrganismi xilofagi. I tronchi entrano quindi nella fase di segagione dove, a seconda della tipologia di semilavorato che si vuole ottenere, viene effettuato il taglio basandosi su un determinato schema di taglio, in modo tale da ottenere le forme commerciali richieste e al tempo stesso ridurre al minimo lo sfrido, ovvero il calo quantitativo che il legno ed i suoi sottoprodotti possono subire, portando al raggiungimento di dimensioni irregolari che limitano l'utilizzo e la conseguente vendita del prodotto. I segati ottenuti vengono poi essiccati in appositi impianti,

raggiungendo il valore d'umidità finale che dipende dal tipo di utilizzo a cui il prodotto è destinato. Durante questa fase il legno potrebbe subire modifiche dimensionali, per la drastica diminuzione di umidità a cui viene sottoposto, e dar luogo quindi a deformazioni, crepe o collassi, determinando quindi un declassamento del valore del materiale a livelli di qualità inferiori. Perciò, a seconda della destinazione d'uso, il legno può essere trattato anche con sostanze protettive contro funghi, muffe e insetti, per migliorare la resistenza strutturale, ai cambi dimensionali dovuti alla stabilizzazione con l'umidità esterna, così come favorire una maggiore resistenza al fuoco. L'ultima fase consiste nella trasformazione finale del legno in prodotti semilavorati come travi, travetti, sfogliati listelli, poi spesso destinati ad ulteriori lavorazioni per produrre i prodotti finali, nel processo di lavorazione secondaria.

Nello specifico, questa consiste nel trasformare i semilavorati ottenuti dalla lavorazione primaria in prodotti finiti, quali pannelli e ripiani per mobili d'arredamento, strutture per infissi, pavimentazione e rivestimenti, imballaggi, e componenti per la costruzione anche di edifici, strutture civili e simili. Nell'ambito della lavorazione secondaria si ricorre spesso all'utilizzo di componenti chimiche, quali le colle e i prodotti di preservazione del legno, aggiungendo quindi un carattere funzionale e, talvolta, estetico al materiale.

Le colle utilizzate nell'industria del legno sono di vario genere e vanno da quelle viniliche alle poliuretaniche, epossidiche e talvolta colle basate su resine naturali. Ognuna di queste presenta prestazioni e caratteristiche specifiche per rispondere a determinate esigenze, quali legni per ambienti esterni ed ambienti interni o prodotti per resistere all'umidità. La colla permette la realizzazione di giunzioni molto particolari tra elementi in legno, creando strutture di varia forma e dimensione difficilmente ottenibile con legno massiccio. Inoltre, può conferire particolare resistenza strutturale consentendone l'uso anche in strutture fortemente sollecitate. Oltre alle colle, possono essere utilizzate sostanze preservanti che consentono di aumentare la durabilità naturale del legno, necessaria in modo particolare per elementi posti in situazioni a livello meteorologico sfavorevoli. Queste sostanze possono essere diluite in solventi organici a base d'acqua o a base di olio. Il prodotto penetra nel legno creando uno strato protettivo contro i funghi, gli insetti xilofagi, quali ad esempio le termiti e i tarli. Inoltre, c'è tutta una gamma di altri prodotti che possono essere aggiunti ai prodotti della lavorazione secondaria del legno. In particolare, per pannelli di fibre di truciolare e di compensato, aggiungendo, ad esempio, sostanze che rendono il legno ignifugo. In generale l'aggiunta di qualsiasi composto chimico, come vedremo nel seguito, rende il prodotto non più incontaminato o vergine e, pertanto, a fine vita il materiale di fatto è considerato un rifiuto.

2.1.1 *Residui della lavorazione del legno*

Durante i vari processi di lavorazione del legno si producono dei residui legnosi, indicati come scarti e/o sottoprodotti che possono essere sia riutilizzati che smaltiti a seconda della lavorazione a cui sono stati sottoposti, e di conseguenza, variano anche le modalità con cui il materiale deve essere smaltito o eventualmente valorizzato. Tra questi possiamo considerare le cortecce, considerate non utili per la lavorazione e quindi destinate all'uso agronomico o di lettiera o alla produzione di energia nei sistemi termici che, tecnicamente, sono adibite al suo impiego [11].

La segatura, invece, viene prodotta in grandi quantità sia durante le attività di lavorazione in bosco che in segheria durante l'attività di taglio e piallatura, dove la raccolta e lo stoccaggio del materiale è molto più semplificato. Questo scarto, caratterizzato da dimensioni molto contenute, quando prodotto in segheria, dove è facile raccoglierlo, può essere facilmente riutilizzato come lettiera per animali, per la realizzazione di pellet e bricchette per il riscaldamento termico, o come componente nei pannelli, come truciolari e MDF (pannelli di fibra a media densità). Un'altra tipologia di sottoprodotto da lavorazione è la polvere di legno, considerato come materiale volatile e per questo potenzialmente pericoloso per la salute. Può essere però rivalorizzato tramite compressione meccanica per creare blocchi di biomassa, più facilmente gestibile, o utilizzato in piccole quantità come additivo per il compost. Per quanto riguarda i residui come trucioli e schegge, considerati scarti con dimensioni maggiori rispetto ai precedenti, sono maggiormente impiegati come compost, come biomassa per la produzione energetica (pellet) o per la produzione di pannelli (OSB). Infine, lo scarto considerato più grossolano, come il residuo da refili, viene sottoposto ad un'ulteriore riduzione in chips per il successivo uso per la produzione energetica, oppure si impiegano nella produzione di pannelli, se considerati di qualità sufficiente.

Il riciclo dei residui di legno rappresenta una pratica fondamentale per garantire la sostenibilità dell'intera filiera, riducendo l'impatto ambientale e preservando le risorse naturali, con l'obiettivo, mai secondario, di ridurre le emissioni di carbonio. Questo processo supporta lo sviluppo e l'attuazione dell'economia circolare, in cui le risorse vengono sfruttate al meglio del loro potenziale per garantire che non ci siano perdite rilevanti, favorendo l'efficacia del sistema di produzione.

Anche dal punto di vista economico, il riciclo permette alle aziende di generare valore da materiali che altrimenti sarebbero considerati rifiuti e che, come da normativa (D. Lgs. 152/2006 testo unico ambientale), per essere smaltiti correttamente, avrebbero dei costi che le imprese dovrebbero sostenere.

Bisogna però sottolineare che non tutti i residui di lavorazione del legno possono essere riciclati perché considerati correttamente come sottoprodotto. Il legno derivante da lavorazioni industriali può infatti essere classificato come rifiuto speciale e, a seconda della presenza o meno di trattamenti chimici, può essere considerato rifiuto non pericoloso (se naturale o non trattato) o rifiuto pericoloso (se trattato con sostanze chimiche come vernici, colle o impregnanti). I rifiuti di legno non trattati possono essere utilizzati in processi di produzione di biomassa ad uso energetico o compost. Le aziende che intendono recuperare o smaltire residui legnosi devono ottenere le autorizzazioni previste per gli impianti di trattamento, come l’Autorizzazione Unica Ambientale (AUA) o l’Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA), in base alla capacità e alla tipologia dell’impianto. Oltre alla normativa nazionale, l’Italia applica anche le normative europee che regolano la gestione dei rifiuti di legno (direttiva europea 2008/98/CE sui rifiuti), che hanno lo scopo di promuovere il riciclo e il recupero dei residui legnosi. La direttiva 2008/98/CE, recepita in Italia tramite il decreto legislativo 152/2006 (Testo Unico Ambientale), stabilisce le linee guida specifiche per la gestione dei rifiuti legnosi, la loro corretta classificazione, il trattamento più adeguato ed il recupero di queste risorse nel rispetto della gerarchia di gestione, considerata come priorità produttiva in base alla qualità del materiale.

Per favorire quindi il riciclo degli scarti di legno ed abbattere i costi relativi allo smaltimento in discarica, le aziende mirano al riutilizzo del materiale di scarto per la produzione di biomassa ad uso energetico, da impiegare sia nella propria filiera, che a livello commerciale attraverso la vendita. Affinché il materiale risulti adeguato alla combustione, esistono degli standard normativi che veicolano il corretto utilizzo dei residui delle filiere legnose. Di seguito vengono riportati i principali parametri che influenzano maggiormente la caratterizzazione della biomassa solida.

Umidità: la presenza di un elevato contenuto d’umidità della biomassa causa la riduzione della performance di combustione, con la conseguente perdita di resa energetica ed il rischio di un processo di combustione incompleto, che favoriscono lo sviluppo di inquinanti. L’umidità è quindi presa in considerazione come parametro fondamentale per valutare la biomassa a livello economico, perché il contenuto energetico della biomassa, e quindi l’efficienza di produzione, è inversamente proporzionale al contenuto d’acqua del materiale legnoso.

Ceneri: un elevato contenuto di ceneri comporta problematiche relative al loro smaltimento e alla loro rimozione dalla camera di combustione, con conseguenze negative a livello tecnico. Inoltre, se allontanate, soprattutto assieme ai fumi di scarico, a seguito del processo di

combustione, viene esportato anche parte del calore utile prodotto, riducendo l'efficienza della combustione. È dunque importante conoscere anche il comportamento termico delle ceneri negli impianti termici, considerando anche il parametro di fusibilità delle ceneri, per evitare depositi massicci che possono causare incrostazioni ed ostruzioni che obbligherebbero ad una continua manutenzione dell'impianto, anche a causa del rischio di corrosione correlato alla componente chimica delle ceneri. Valori troppo elevati di cenere possono essere correlati ad una contaminazione da suolo o sabbia, alla presenza di corteccia o di additivi inorganici vari. Possono indicare anche trattamenti con vernici o sostanze preservanti.

Potere calorifico: è il parametro fondamentale per la determinazione del valore energetico e dipende dalla composizione chimica della biomassa. Può essere espresso e calcolato in tre modalità:

- Potere calorifico superiore (PCS): energia contenuta dal biocombustibile e liberata dall'ossidazione completa di 1 kg di biomassa anidra (secca);
 - Potere calorifico inferiore (PCI): energia potenzialmente utilizzabile dal sistema (utente) dall'ossidazione di 1 kg di biomassa anidra (secca);
 - Potere calorifico netto (PCN): energia complessiva potenzialmente utilizzabile dal sistema termico o dall'utente dall'ossidazione di 1 kg di biomassa umida.
- La determinazione di valori troppo bassi indicano una bassa qualità del biocombustibile, dovuta, ad esempio, ad un alto contenuto di ceneri. Se il valore, invece, risultasse troppo elevato rispetto agli standard, potrebbe indicare la presenza di colle nella biomassa.

Analisi elementare: permette di distinguere le diverse tipologie di biomasse (legnosa, erbacea, altro) a seconda della loro composizione elementare. Normalmente, le biomasse con elevato contenuto energetico possono avere un rapporto tra ossigeno e carbonio basso (O/C basso = poco ossigeno e molto carbonio), mentre l'idrogeno rimane generalmente costante nei materiali legnosi. Fondamentale è la determinazione del contenuto in azoto, che non deve superare delle soglie massime, in quanto in combustione si ossida e produce NO_x che viene considerato un prodotto gassoso altamente tossico e pericoloso. Il legno in genere presenta basse concentrazioni di azoto, e quindi la presenza di alte concentrazioni nella biomassa legnosa potrebbe derivare da vari trattamenti chimici, come la presenza di colle.

Cloro e Zolfo: in loro presenza, durante la combustione favoriscono la produzione di inquinanti, principalmente gassosi, e composti corrosivi per gli impianti. Valori elevati di questi elementi, all'interno della biomassa, indicano la presenza di corteccia, trattamenti a base di composti solforati, o un'origine della biomassa da zone salmastre.

2.2 Principali numeri in Italia

Secondo i dati riportati nel terzo inventario forestale nazionale (INFC2015), prodotto dall'Arma dei Carabinieri (settore CUFA- comando unità forestali ambientali e agroalimentari) assieme all'ente CREA-FL (Centro di ricerca Foreste e Legno), la superficie boschiva rappresenta il 36,7% del territorio nazionale italiano, con una stima di circa 11 milioni di ettari [12].

Tuttavia, l'impiego annuale della biomassa prodotta dai boschi italiani, per fini energetici o per produzioni in segheria è stimato, all'anno 2014, in misura non superiore al 30% (pari a circa 7,7 milioni di metri cubi, rispetto ai 30 milioni annualmente disponibili). La media europea, invece, registra un utilizzo di circa il 60% di quanto ogni anno i boschi riescono a produrre, senza comunque tenere in considerazione le quantità di biomassa che, per diverse ragioni, non vengono registrate nel calcolo (mancata comunicazione per tagli inferiori a determinate dimensioni, legname prelevato per autoconsumo su proprietà private, legname utilizzato dalle popolazioni locali) [13].

Infatti, quando si fa riferimento alla crescita della filiera italiana del legno degli ultimi anni, come riportato dallo studio pubblicato nel 2022 da Intesa San Paolo - "L'industria italiana del mobile: sfide e opportunità di crescita" - bisogna tenere in considerazione anche il fattore di importo di legna nel nostro territorio, il quale conta al 2023 un fatturato di circa 5,915 miliardi di euro. Le importazioni restano, dunque, il principale canale per rifornire di legname il mercato italiano con un'incidenza pari al 67% nel 2023 [14].

In Italia, il settore della lavorazione del legno è ben sviluppato e comprende un'ampia gamma di imprese, come ad esempio: imprese di mobili ed arredamento, di serramenti e infissi, di pavimentazioni, di lavorazione e trattamento del legno per l'edilizia, laboratori artigianali e falegnamerie tradizionali, produzione di strumenti musicali in legno. Sono imprese che producono prodotti finiti tramite la lavorazione di materiali come il compensato, il legno lamellare e il cross-laminated timber (CLT – legno lamellare incrociato), oggi sempre più utilizzati nelle moderne costruzioni.

In particolare, il nostro Paese è conosciuto per l'alta qualità di pannelli, utilizzati in vari settori. Il settore si distingue per la sua attenzione alla sostenibilità, con molte imprese che impiegano materiali riciclati e adottano processi produttivi a basso impatto ambientale. L'industria italiana si concentra principalmente sulla produzione di:

- Pannelli OSB (Oriented Strand Board): si tratta di un pannello costituito da scaglie incollate insieme con una resina sintetica (colla fenolica, ureica o poliuretanic), le quali vengono successivamente pressate in diversi strati. Le scaglie degli strati esterni sono di norma

orientate longitudinalmente rispetto alla lunghezza del pannello, mentre le scaglie degli strati intermedi sono di solito ripartite trasversalmente. L'impiego di minime quantità di colle ha il vantaggio di ridurre i cicli alla pressa, impartendo al tempo stesso un aspetto lucido alla superficie del pannello, nonostante la resistenza del materiale sia minima;

- Pannelli in compensato e multistrato: sono entrambi caratterizzati da un'alternanza di fogli di legno incollati uno sull'altro, ottenuti dalla sfogliatura del tronco, con un orientamento alterno delle fibre, in modo tale da rendere resistenti tutte le direzioni del pannello finale. La differenza sostanziale tra compensato e multistrato è che, nel primo caso abbiamo tre strati ed uno spessore totale che misura fino ai 6 mm, nel secondo caso invece si hanno più di tre strati e quindi uno spessore totale superiore ai 6 mm;

- Pannelli truciolare: si intende un pannello costituito dagli scarti della lavorazione del legno (trucioli o segatura), comunemente chiamati chips, i quali vengono impastati con del materiale legante (colle) e pressati;

- Pannelli in MDF (Medium Density Fibre-board): questa tipologia di pannelli deriva dall'impiego di un insieme di fibre finissime di legno (scarti di legname), legate tra loro grazie a collanti che le rendono molto compatte. Tra i pannelli in fibra, quello in MDF è sicuramente il più diffuso ed impiegato. Ne fanno parte però anche i pannelli LDF e HDF. Queste tipologie si differenziano principalmente in base alla densità delle fibre che lo compongono: bassa (LDF), media (MDF) e alta (HDF). A differenza del truciolato o del compensato, il legno MDF si presta ad essere lavorato come il legno massello, evitando quindi le classiche sbriciolature degli altri materiali.

Il sistema pannelli chiude però il 2023 con un forte rallentamento del fatturato alla produzione (-14%) arrivando a poco più di 2,5 miliardi di euro. La flessione è dovuta ad una riduzione della produzione in volume, ma anche ad una flessione dei prezzi. La produzione per il mercato nazionale, pari al 60% del totale, scende del -16,6%. In flessione anche le esportazioni (- 9,8%) [14].

In particolare, la produzione di pannelli MDF/HDF in Italia registra una diminuzione significativa dal 2018 al 2022, in cui si passa da una produzione di 1005,82 mille metri cubi a 809 mille metri cubi. Stesso risultato per la produzione di pannelli OSB, i quali vengono prodotti in quantità di circa 100 mille metri cubi riferendosi all'anno 2022. Infine, i pannelli di compensato si confermano quest'anno con una produzione di 288 mille metri cubi, stesso valore registrato anche nel 2022 [15].

Per quanto riguarda il settore delle biomasse ad uso energetico, dopo la crescita sostenuta del 2022, si è registrato in tutta Europa un calo progressivo dei prezzi dei principali

biocombustibili destinati al riscaldamento. I prezzi della legna da ardere e del cippato risultano essere influenzati da diversi fattori, tra cui: approvvigionamento locale, andamento stagionale e variabilità geografica. Si stima inoltre che, oltre l'80% del fabbisogno italiano di pellet dipenda dalle importazioni (circa 2 milioni di tonnellate nel 2021) [16].

Capitolo 3

MATERIALI E METODI

I campioni di residui legnosi analizzati sono stati forniti da un'azienda italiana produttrice di pannelli XLAM. I pannelli XLAM vengono realizzati mediante la giunzione di listelli di abete vergine, tramite applicazione di colla che viene addizionata nelle specifiche giunzioni a pettine (finger-joint).

I campioni che sono stati analizzati presso il Laboratorio Biomasse dell'Università Politecnica delle Marche (BiomassLab) includono:

- listelli di legno di abete vergine;
- listelli nei punti di finger joint (con presenza di colla);
- trucioli ottenuti dalla piallatura di tali pannelli;
- pellet prodotti dalla pellettizzazione dei trucioli;
- colla addizionata nei punti di giunzione a pettine.



Figura 3-1: campioni analizzati in laboratorio. Sullo sfondo da sinistra troviamo trucioli, pellet e colla. In primo piano il dettaglio dei listelli di legno vergine, mentre a destra si osserva il dettaglio del finger joint.

Per ogni tipologia di materiale, ad eccezione dei pellet, sono stati raccolti ed inviati al BiomassLab circa 5 kg di campione. I materiali sono stati successivamente omogeneizzati

seguendo la metodologia specificata dalla norma ISO 18135, al fine di garantire la rappresentatività per le analisi di laboratorio.

3.1 Analisi dei campioni

Una volta arrivati in laboratorio, viene effettuata l'accettazione, che prevede la compilazione di una scheda descrittiva e identificativa per ogni tipologia di campione a cui poi verrà assegnato uno specifico codice interno. La caratterizzazione del materiale segue una serie di analisi, di seguito descritte, basate sulle specifiche normative. Nella Tabella 3-1 vengono riassunte tipologia di analisi, riferimento normativo e strumentazione utilizzata per ognuna mentre, a seguire, viene riportata una breve descrizione delle metodologie applicate.

Tabella 3-1: Tipologie di analisi effettuate

Analisi	Strumentazione	Normativa
Contenuto di umidità	Stufa termo ventilata	ISO 18134-2:2017 – Determination of moisture content – Oven dry method
Macinazione	Mulino macinatore	ISO/DIS 14780:2019 – Sample preparation
Contenuto in ceneri	Analizzatore termogravimetrico (TGA)	ISO 18122:2022 – Determination of ash content
Potere calorifico	Calorimetro	ISO 18125:2017 – Determination of calorific value
CHNO	Analizzatore elementare	ISO 16948:2015 – Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen
Contenuto in Cloro e Zolfo	Cromatografo ionico	ISO 16994:2016 – Determination of total content of sulfur and chlorine

3.1.1 *Contenuto di umidità*

Successivamente all'accettazione, si svolge l'analisi della misura dell'umidità, per la quale i campioni vengono posizionati all'interno di vassoi di alluminio (raggiungendo un peso di almeno 300 g superiore al peso della tara del vassoio) e poi lasciati in stufa ad una temperatura di $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ fino al raggiungimento del peso costante, per un periodo di tempo di massimo 24 ore dal momento di immissione in stufa. La costanza di peso, e quindi la garanzia che il campione sia effettivamente essiccato e stabilizzato, si verifica quando la differenza di peso del campione in un range di 60 minuti non supera il valore di 0.2%. Con la misurazione del peso del materiale, sia pre che post l'essiccazione in stufa, si determina, in termini percentuali, il contenuto di acqua presente nel campione. Per lo svolgimento di quest'analisi sono state impiegate stufe termoventilate PID System (MPM Instruments s.r.l.). Il contenuto di umidità è un parametro fondamentale che consente di valutare il contenuto energetico della biomassa perché inversamente correlato al potere calorifico; una rilevante presenza di acqua nel campione, infatti, determina un'elevata perdita di vapore acqueo in fase di essiccazione, che si traduce in una notevole perdita di calore. Di conseguenza, più un campione è umido, minore risulterà la capacità di generare energia e produrre calore in fase di combustione.



Figura 3-2: Stufa termo ventilata

3.1.2 *Macinazione*

Sul campione essiccato e stabilizzato è necessario poi effettuare una riduzione omogenea della granulometria del campione. Per questo processo viene impiegato un mulino a lame taglienti SM300 (Retsch), dove sono previste due fasi di macinazione. La prima fase impiega una griglia da 5 mm, utile a sminuzzare il campione grossolano, mentre la seconda fase

prevede un'ulteriore diminuzione delle dimensioni tramite una griglia da 1 mm. La biomassa iniziale viene ridotta in termini dimensionali per permettere non solo il proseguimento delle successive analisi chimiche, ma anche per assicurare omogeneità e rappresentatività delle caratteristiche del campione.



Figura 3-3: Dettaglio interno del mulino a lame.

3.1.3 *Contenuto di ceneri*

Il campione macinato ed omogeneizzato prosegue nell'iter di caratterizzazione con la determinazione delle ceneri. Questo valore viene espresso in percentuale su sostanza secca e la determinazione si basa sull'analisi termogravimetrica. Perciò, lo strumento utilizzato (TGA701 della LECO) è in grado di rilevare il contenuto di umidità residua (definita convenzionalmente umidità di correzione), ceneri ed eventuali sostanze volatili presenti nei campioni di biomassa. Questi parametri si calcolano in funzione del tempo e di un gradiente di temperatura crescente in ambiente chiuso e controllato. La TGA è costituita da un forno, in grado di raggiungere una temperatura massima di 1000°C, un carosello rotante su cui vengono posti 20 crogioli in ceramica nei quali viene inserito il campione macinato, ed una bilancia interna che misura il peso iniziale e le variazioni di peso in seguito all'incenerimento del materiale. Queste informazioni sono raccolte dal software collegato, che permette l'avvio delle analisi e fornisce il grafico relativo alla perdita di peso in funzione del gradiente di temperatura. Nello specifico, pur con la presenza di 20 crogioli, vengono considerati 18, perché il 1° viene considerato vuoto come standard di tara, mentre il 20° viene riempito con un campione standard, di cui si conoscono i valori di ceneri, che assume il ruolo di riferimento per eventuali anomalie nei risultati dovute a problematiche tecniche/analitiche. Prima dello svolgimento dell'analisi lo strumento registra il peso di tutti i crogioli presenti, determinando

quindi la tara di ognuno fino a stabilizzazione. In seguito, viene inserito il campione all'interno dei crogioli (circa 1 g), il cui peso esatto viene rilevato dalla bilancia interna. Durante l'intero procedimento, il carosello ruota e misura la perdita di peso in funzione dell'aumento della temperatura per ogni campione, eseguendo i "salti" di temperatura quando il peso di ogni campione rimane costante; 105°, 250° ed il finale 550°, quando avviene l'effettivo incenerimento. Il quantitativo di ceneri presenti al termine dell'ossidazione consente di determinare dunque il contenuto di residuo inorganico del campione, ossia quella parte che non partecipa attivamente alla combustione e alla produzione energetica.



Figura 3-4: Carosello rotante con i 20 crogioli

3.1.4 *Potere calorifico*

Il potere calorifico è il parametro fondamentale per la determinazione del valore energetico. Il potere calorifico superiore (PCS) viene misurato utilizzando il calorimetro AC600 (LECO) che prevede la combustione completa, in un sistema chiuso, di una pasticca di poco meno di 1 g di campione, che viene formata con specifico strumento. La pasticca viene posta all'interno di un crogiolo a contatto con un filo di cotone, a sua volta agganciato ad un filo di tungsteno, dove avverrà il passaggio di corrente. Infatti, la bomba calorimetrica (o di Mahler), che viene riempita di circa 1 ml di acqua e di ossigeno fino a specifica pressione, viene agganciata al calorimetro che si chiude per assicurare il sistema chiuso dell'analisi. È a questo punto che, innescandosi la combustione, la corrente arriva fino al tungsteno, che brucia il filo di cotone fino ad incendiare il campione. Il sistema calcola quindi l'aumento di temperatura dell'acqua in cui è immersa questa bomba. Il potere calorifico inferiore (PCI) è invece calcolato dal PCS e considera il campione completamente anidro. Invece il potere calorifico netto (PCN) è

considerato il valore inferiore su un campione umido, quindi considera il potere negativo dell'acqua, sottoforma di vapore acqueo, che si perde durante la combustione.

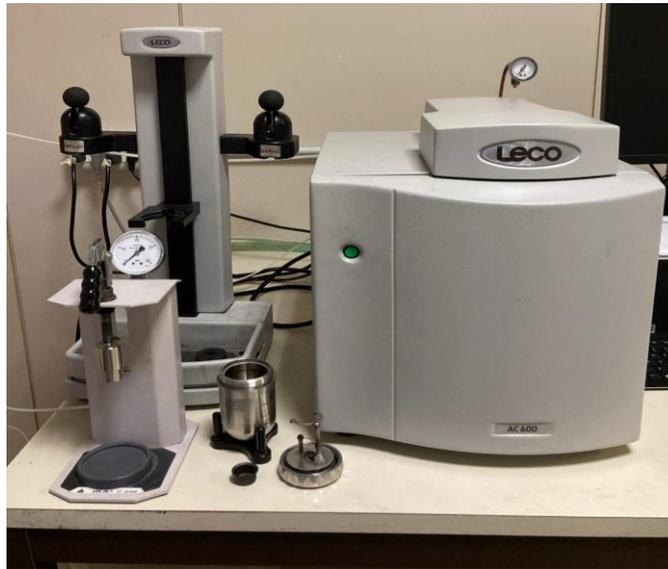


Figura 3-5: Calorimetro

3.1.5 *Contenuto CHNO*

Questo tipo di analisi consente di determinare il contenuto di carbonio, idrogeno ed azoto presente nelle biomasse, mentre si può determinare il contenuto di ossigeno per differenza degli altri elementi. La determinazione di questi elementi si basa sulla quantificazione dei prodotti gassosi derivanti dalla combustione totale della biomassa, utilizzando un analizzatore TruSpec CHNS/O (LECO), dove all'interno di una camera di combustione viene fatto cadere il campione di quantità nota (circa 70 mg). La biomassa viene combusta ad una temperatura che raggiunge i 950 °C. Questo tipo di analisi fornisce una valida indicazione per quanto riguarda la qualità energetica del materiale. Ogni biomassa può presentare infatti valori differenti di questi elementi e in base al rapporto tra di essi si ottengono risposte qualitative diverse. Un elevato rapporto carbonio/azoto ($C/N > 30$) indica infatti una elevata attitudine alla combustione, mentre il valore di H viene utilizzato per calcolare il potere calorifico inferiore (PCI) a partire da quello superiore. Il parametro dell'azoto, invece, è importante anche ai fini della valutazione delle emissioni inquinanti (per esempio, a causa della produzione di NO_x).



Figura 3-6: Analizzatore elementare

3.1.6 Contenuto cloro e zolfo

L'analisi e la determinazione di questi elementi, potenzialmente presenti nelle biomasse, è importante per valutare le emissioni di inquinanti e gli effetti negativi sugli impianti tecnici durante la fase di combustione. Il cloro e lo zolfo sono i principali elementi che, infatti, causano corrosione degli impianti di combustione. Questi parametri vengono misurati tramite l'analisi dell'acqua di recupero della bomba calorimetrica, a seguito della determinazione del potere calorifico. Si rileva la percentuale di questi elementi su sostanza secca tramite il cromatografo ionico 761 CompactIC (Metrohm). Biomasse con alti valori di cloro e zolfo possono indicare un'origine del materiale non compatibile con l'utilizzo energetico, così come potrebbero identificare l'uso di trattamenti chimici, non idonei alla combustione (presenza di colle, impregnanti o altro).



Figura 3-7: Cromatografo ionico

Oltre ai campioni di residui legnosi, precedentemente elencati, forniti da un'azienda italiana, sono stati utilizzati altre tipologie di materiali, ovvero pannello di OSB, di truciolare e di multistrato; tutti accumulati dall'impiego di colle per la loro realizzazione. Questi materiali, già precedentemente analizzati dal BiomassLab, sono stati impiegati con lo scopo di confrontare i parametri di riferimento, quali contenuto di azoto, cloro e zolfo, con quelli ottenuti dalle analisi di laboratorio. I dati raccolti in ciascuna analisi sono stati elaborati e interpretati attraverso l'impiego di tecniche di statistica descrittiva.



Figura 3-8: Esempio di pannelli. Da sinistra verso destra abbiamo truciolare, multistrato e OSB.

Capitolo 4

RISULTATI E CONSIDERAZIONI

4.1 Discussione dei risultati

Tabella 4-1: Dati ottenuti dalle analisi (SLR: sotto limite di rilevabilità)

Campione	Umidità	Ceneri	PCS	Cl	S	N	Deviazione standard
	%	%	J/g	%	%	%	
Legno vergine	10,2	0,2	18383	SLR	SLR	0,08	0,05
Finger Joint	9,0	0,2	19266	SLR	SLR	0,32	0,04
Trucioli	9,2	0,1	18865	SLR	SLR	0,03	0,02
Colla	/	2,1	30691	0,017	SLR	8,27	0,06
Pellet 1	2,8	0,2	20349	SLR	SLR	0,34	0,06
Pellet 2	2,9	0,2	19983	SLR	SLR	0,63	0,59
Truciolare				SLR	SLR	2,66	0,71
Multistrato				SLR	0,1	1,31	0,24
OSB				SLR	0,1	0,42	0,37

In seguito alle analisi effettuate in laboratorio, svolte secondo la metodologia descritta nel capitolo precedente, sono stati raccolti i valori medi riportati nella Tabella 4-1. Questa mostra sia i dati ottenuti, per ogni parametro indagato, per i campioni forniti dall'azienda italiana, sia i dati di alcuni parametri (nello specifico Cl, S ed N) per i campioni forniti dal BiomassLab, con il solo scopo di confrontare i risultati ottenuti utilizzando materiali con diverso grado di trattamento.

La prima considerazione che possiamo effettuare è in riferimento alla colla impiegata dall'azienda per la produzione dei Finger Joint. È importante sottolineare il fatto che la colla che ci è stata fornita è per noi di origine ignota, non abbiamo avuto, cioè, alcuna informazione in merito alla tipologia e quindi alla sua composizione. Dalle analisi è emersa però un'elevata percentuale di azoto su tal quale (8,27%), per questo si presuppone possa essere a base di urea

e formaldeide. Le percentuali riferite al contenuto di cloro e zolfo sono invece trascurabili, mentre il valore del PCS, in linea con le aspettative, risulta essere molto elevato.

Per quanto riguarda i materiali legnosi invece, in particolare riferendoci al legno vergine di abete, i valori riscontrati in merito al contenuto di azoto, cloro e zolfo risultano in linea con gli standard tipici di un materiale legnoso e non si hanno quindi valori anomali. L'umidità risulta in questo caso bassa in quanto si tratta di un materiale che, per le lavorazioni a cui è sottoposto, necessita di trattamenti che riducono e stabilizzano in modo efficiente il suo contenuto d'acqua. Il PCS in questo caso è abbastanza alto, segno che si tratta di una biomassa che può favorire una buona produzione di energia durante la fase di combustione, e quindi classificabile come un materiale di alta qualità.

L'analisi dei Finger Joint presenta dei valori pressoché simili al legno vergine. La presenza di colla nel materiale è evidenziata da un valore del PSC più elevato, così come la percentuale di azoto rilevata, confermati dai rilevanti valori di entrambi i parametri ottenuti durante l'analisi della colla.

In riferimento ai trucioli ottenuti dalla piallatura dei Finger Joint, possiamo constatare che i valori di PCS, umidità, ceneri e contenuto di cloro e zolfo sono molto simili a quelli del legno vergine. Si tratta infatti di un materiale misto, con presenza sia di legno vergine, ma anche potenzialmente di colla, a causa dell'attività di piallatura che, durante il passaggio sui punti di giunzione, potrebbe prelevare anche residui con colla. Questi trucioli presentano però dei valori anomali per quanto riguarda il contenuto di azoto che è infatti inaspettatamente più basso rispetto al legno vergine. Una possibile ipotesi per spiegare questo risultato potrebbe essere attribuibile all'elevata eterogeneità del materiale legnoso considerato, che potrebbe "mescolare" i trucioli con presenza di colla tra quelli vergine. È quindi indispensabile avere informazioni, che non è stato possibile ricevere, in merito alla modalità con cui è stato svolto il campionamento del materiale presso l'azienda, proprio perché l'eterogeneità del materiale potrebbe influenzare anche la variabilità del risultato, senza risultare efficacemente rappresentativo. Infatti, anche le caratteristiche del legno vergine utilizzato potrebbero aver influenzato l'aumento di concentrazione di azoto a causa di difetti (nodi) o di sacche di resina, tipiche di un legno di conifera.

4.1.1 Reimpiego dei residui di lavorazione

Molte aziende si impongono come obiettivo il riutilizzo dei residui prodotti durante le lavorazioni. Si tratta di una tematica diffusa in quanto si ottimizzerebbero gli scarti, riducendo così i costi di smaltimento e favorendo il concetto di economia circolare. Il principale impiego

di questi scarti potrebbe essere destinato alla produzione di pellet, il quale verrà poi impiegato a solo scopo energetico; per questo risulta fondamentale effettuare analisi di caratterizzazione chimico-fisica per determinare se l'eventuale presenza di colle nel materiale sia tale da comportare effetti negativi durante il processo di combustione (emissione di inquinanti e formazione di agenti corrosivi). Le analisi sul pellet, ottenuto dai residui legnosi attraverso il processo di pellettizzazione in azienda, sono state codificate presso il BiomassLab.

- Pellet 1 (H9107): sono state effettuate 30 repliche per la determinazione del contenuto di azoto, che indicano mediamente una percentuale di presenza nettamente maggiore rispetto al legno vergine, ma comunque simile al Finger Joint. Queste repliche possono essere rappresentate da una curva di distribuzione normale (curva gaussiana), evidenziata grazie ai valori di media e mediana (Q2) che risultano molto simili tra loro (media 0,34 e mediana 0,32). Il 75% delle repliche, indicato da Q3, indicano un risultato uguale o inferiore allo 0,39 (N% s.s.). Per entrare nello specifico, il picco massimo di azoto ha registrato un valore di 0,53, mentre il minimo di 0,27. Di conseguenza, la presenza di azoto potrebbe far presumere che il materiale utilizzato per la pellettizzazione non sia completamente vergine ma caratterizzato anche dalla presenza di colla. Il valore medio, utilizzato come dato di riferimento, è comunque superiore alla soglia definita dalla norma 17225-2 per la classe A1 ($\leq 0,3$), declassandolo alla classe A2 ($\leq 0,5$). Il valore di umidità del campione risulta basso, come ci si attende da un materiale densificato e a fini energetici. Il valore delle ceneri risulta allo stesso modo abbastanza basso, probabilmente grazie all'attività di scortecciatura effettuata prima delle lavorazioni principali. Il valore del PCS è elevato e maggiore rispetto al materiale vergine, potenzialmente a causa della presenza di colla.

- Pellet 2 (H9108): anche in questo caso sono state effettuate 30 repliche per la determinazione del contenuto di azoto, ma il valore medio risulta sensibilmente più elevato rispetto al risultato ottenuto sul pellet analizzato precedentemente (H9107). La motivazione per cui il valore medio è quasi il doppio rispetto all'altro campione, potrebbe essere legata ad una diversa origine del materiale, ovvero sono stati campionati da lotti differenti e con caratteristiche, quindi, altrettanto diverse. In questo caso, però, le repliche hanno portato alla rappresentazione di una curva di distribuzione asimmetrica, in quanto il valore medio (0,63) e la mediana, indicata dal Q2 (0,40) non coincidono. Da queste analisi è emerso che il 75% delle repliche, rappresentate dal valore del Q3, presentano un contenuto di azoto inferiore o uguale a 0,5 % s.s... Il valore di deviazione standard è molto elevato in quanto la percentuale massima

di azoto riscontrata nelle repliche arriva al 2,51 mentre il minimo a 0,22, sottolineando anche l'eterogeneità del materiale che potrebbe aver sensibilmente influenzato la variabilità ogni singola replica. Prendendo come riferimento il valore medio, possiamo classificare il pellet come appartenente alla classe B ($\leq 1,0$). Come il campione precedente, il pellet riscontra un basso contenuto di umidità e di ceneri, mentre il valore del PSC è elevato, come ci si aspetterebbe da un prodotto densificato ma che, considerando anche il menzionato alto valore di azoto, potrebbe essere influenzato dall'effetto della colla.

4.1.2 *Comparazione dei materiali*

Per confrontare i risultati delle analisi dei prodotti provenienti dall'azienda, sono stati considerate diverse tipologie di pannelli, tra cui OSB, truciolari e multistrato, caratterizzati da % di azoto variabili in funzione dei processi di trasformazione a cui sono sottoposti, che prevedono l'impiego di colle in quantità differenti. Per questi materiali di comparazione sono state quindi effettuate analisi solo in merito al contenuto di azoto, cloro e zolfo, appunto perché i principali indicatori di una possibile presenza di colla nel materiale. Dalle analisi è emerso che il truciolare è il pannello con un contenuto di azoto maggiore, seguito dal multistrato e infine dall'OSB. Il contenuto di cloro risulta trascurabile per tutti i campioni, mentre lo zolfo solo per il truciolare. Il valore del contenuto di zolfo, nel multistrato e OSB, è superiore alla soglia limite, imposta da normativa, per le biomasse impiegate a scopi energetici, confermando l'impossibilità di utilizzare materiale trattato per la produzione di energia elettrica/termica. Ovviamente, il primo parametro da considerare se si parla di biomassa ad uso energetico è l'azoto, in quanto con il processo di combustione porta alla formazione di composti inquinanti (NO_x). Questo sottolinea la necessità quindi di determinare questi parametri, soprattutto in contesti in cui non si conosce l'origine del materiale di partenza, per poter stabilire se la biomassa legnosa è costituita dai suoi componenti di origine naturale (cellulose, emicellulose e lignina), e quindi si tratta di legno vergine, o se è stata sottoposta a particolari trattamenti con uso di colle.

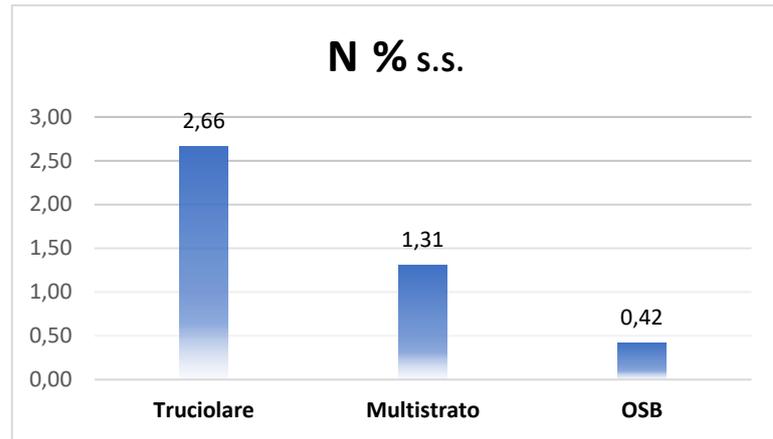


Figura 4-1: grafico del contenuto di azoto dei materiali di comparazione

CONCLUSIONI

I risultati della tesi evidenziano che la sostanza adesiva impiegata nella produzione di pannelli XLAM è caratterizzata da un elevato contenuto di azoto, così come da livelli di cloro significativi. Questo comporta che anche i prodotti di legno che subiscono il trattamento con determinati adesivi possono mostrare rilevanti concentrazioni di tali parametri chimici, che si differenziano dal legno vergine sottoposto al trattamento di incollaggio.

Questa osservazione è resa particolarmente evidente dal contenuto di azoto riscontrato nei vari campioni. Per il finger joint ed il pellet 1 (H9107) i valori sono comparabili, indicando potenzialmente che l'accumulo di colla nella zona di giunzione tra le due estremità del legno, per la formazione del finger joint, abbia poi contribuito alla contaminazione delle porzioni di legno adiacente ad esso, fenomeno plausibile tenendo in considerazione il valore molto contenuto di azoto presente invece nel legno vergine.

Diverso è invece il giudizio per ciò che concerne il contenuto di azoto riscontrato nel pellet 2 (H9108), che raggiunge concentrazioni di circa il doppio rispetto all'altro materiale analizzato. L'ipotesi, tutta da verificare, è che ci possa essere stata una contaminazione da prelavaggio dell'impianto di pellettizzazione, considerando che lo stesso impianto è stato in funzione in poche ore di lavoro. Pertanto, potrebbe essere un evento occasionale, ma comunque da approfondire. Una seconda ipotesi, invece, fa riferimento alla possibile eterogeneità che non si è riuscita adeguatamente a rappresentare durante il campionamento del materiale, anche a causa dei valori di deviazione standard molto alti, nonostante le numerose repliche effettuate in laboratorio.

Bisogna tenere conto che i valori di analisi ottenuti dai residui dei pannelli XLAM sono comunque significativamente più bassi rispetto ad altri prodotti semilavorati, quali truciolare e multistrato. La comparazione con prodotti simili, sempre contenenti matrici adesive sintetiche, ha permesso di indicare quindi una certa somiglianza tra i valori ottenuti dallo XLAM rispetto a quelli ottenuti per l'OSB.

Prendendo a riferimento la norma tecnica di classificazione del pellet, la UNI EN ISO 17225-2, in particolar modo per i valori di azoto, si osservano delle incongruenze. L'aspetto particolare è dato dal fatto che il valore ottenuto, in riferimento al contenuto di azoto, coincide

con il limite massimo imposto dalla normativa per la classe B, che permette ancora di classificare il pellet per l'utilizzo domestico, e quindi per impianti presumibilmente privi di sistemi di abbattimento delle emissioni a camino. Questo significa che, dato il valore massimo di $N \leq 1,0$, dalla produzione del pellet si esclude l'impiego di residui derivanti dalla produzione di truciolare e multistrato, in quanto i valori di azoto ottenuti dalle analisi sono nettamente superiori. Al contrario, secondo la normativa, i residui derivanti da XLAM e OSB potrebbero essere presi in considerazione per la produzione di pellet in classe B, quindi ad uso domestico. L'anomalia della normativa sorge prendendo invece in considerazione i valori massimi di contenuto di azoto ammessi per la classificazione del pellet a livello industriale: classi I1, I2 e I3. Infatti, come riportato in Tabella 0-1, per gli impianti industriali, nonostante essi siano dotati di sistema di abbattimento e trattamento delle emissioni, il limite massimo risulta comunque inferiore rispetto alla classe B. Questo implica quindi che, se volessimo classificare il pellet 2 sulla base del contenuto di azoto, a livello domestico rientrerebbe nella classe B mentre a livello industriale non sarebbe classificabile (fuori specifica) perché superiore al limite massimo. Da segnalare che invece il contenuto di ceneri indicato per la classe I3 sia molto elevato rispetto alla B.

Sarebbe di interesse per il settore richiedere un adeguamento della normativa vigente in modo tale da renderla più coerente, chiara e lineare rispetto ai parametri considerati. La modifica in merito all'innalzamento del valore massimo del contenuto di azoto ammesso, per la classificazione del pellet a livello industriale, consentirebbe una maggiore ottimizzazione della risorsa residuale e favorirebbe l'autoconsumo negli stessi impianti o in impianti industriali, a patto che questi siano dotati di sistemi di trattamento del residuo e abbattimento delle emissioni, potenziando quindi gli aspetti sostenibili di produzione.

È importante ricordare che per la legge italiana, in particolare considerando il decreto 152/06 e s.m.i., i residui legnosi derivanti dal processo produttivo di semilavorati vengono comunque considerati come rifiuto, in quanto soggetti a processi di trattamento, e quindi indicati tramite codice CER (Catalogo Europeo dei Rifiuti).

In conclusione, si può stabilire quindi che è comunque necessaria un'indagine più approfondita su un numero maggiore e soprattutto più rappresentativo di campioni, provenienti da più aziende presenti nel territorio italiano che si occupino delle stesse tipologie di lavorazioni del legno e che quindi producano residui pressoché simili. Svolgendo un'analisi quindi più ampia è possibile confrontare più campioni e determinare quindi, in seguito ad una rivisitazione della norma vigente, l'impiego di pellet, a livello domestico e industriale, prodotto da materiali residuali.

Tabella 0-1: confronto dei valori soglia dei parametri principali che sottolineano l'incoerenza della norma, in riferimento alla classificazione del pellet domestico e industriale.

Classificazione pellet norma UNI EN ISO 17225-2						
Pellet ad uso domestico				Pellet ad uso industriale		
Classe	A1	A2	B	I1	I2	I3
Origine	Tronchi. Residui legnosi non trattati chimicamente.	Tronchi. Alberi interi senza radici. Residui legnosi non trattati chimicamente.	Foreste, piantagioni e altro legno vergine. Sottoprodotti e residui dell'industria della lavorazione del legno. Legno usato chimicamente non trattato.	Foreste, piantagioni e altro legno vergine. Residui legnosi non trattati chimicamente.	Foreste, piantagioni e altro legno vergine. Residui legnosi non trattati chimicamente.	Foreste, piantagioni e altro legno vergine. Residui legnosi non trattati chimicamente. Sottoprodotti e residui dell'industria della lavorazione del legno.
Azoto (% su s.s.)	≤ 0,3	≤ 0,5	≤ 1,0	≤ 0,3	≤ 0,3	≤ 0,6
Ceneri (% su s.s.)	≤ 0,7	≤ 1,2	≤ 2,0	≤ 4,0	≤ 5,0	≤ 6,0
Cloro (% su s.s.)	≤ 0,02	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,03	≤ 0,05	≤ 0,1
Zolfo (% su s.s.)	≤ 0,04	≤ 0,04	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ciucci Matteo, “POLITICA ENERGETICA: PRINCIPI GENERALI,” Mar. 2024.
- [2] Ciucci Matteo, “ENERGIE RINNOVABILI,” Mar. 2024.
- [3] P. Caputo and A. Romer, “RECUPERO DI ENERGIA DA BIOMASSA.”
- [4] Progetto biomasse ENAMA, “BIOMASSE ED ENERGIA: CARATTERISTICHE TECNICHE DELLE BIOMASSE E DEI BIOCOMBUSTIBILI,” 2011.
- [5] Rossi Diego, Francescato Valter, Rudello Giulia, and Paniz Annalisa, “Il legno nel riscaldamento residenziale e commerciale,” Sep. 2023. [Online]. Available: www.aielenergia.it
- [6] “Filiera e sostenibilità: sostenibilità, tracciabilità e certificazione,” 2011.
- [7] G. Comini, “FUMO DI LEGNA: NATURALE MA TOSSICO,” Mar. 2023.
- [8] Gazzetta Ufficiale della Repubblica italiana, “MINISTERO DELL’AMBIENTE E DELLA TUTELA DEL TERRITORIO E DEL MARE: DECRETO 7 novembre 2017, n. 186.”
- [9] Chiozzotto F., Pecchi M., Mazza E., and Riviuccio R., “2022 ANNUARIO DELL’AGRICOLTURA ITALIANA,” 2023.
- [10] Meloni Emanuele, “FSC e PEFC: le certificazioni ambientali dei prodotti in legno.”
- [11] ARPAV - Agenzia regionale per la prevenzione e protezione ambientale del Veneto, “Rifiuti speciali - La produzione - i rifiuti del settore della lavorazione del legno.”
- [12] De Laurentis Davide, Papitto Giancarlo, Gasparini Patrizia, Di Cosmo Lucio, and Floris Antonio, *LE FORESTE ITALIANE: Sintesi dei risultati del terzo Inventario Forestale Nazionale INFC2015*. 2021.
- [13] Romano Raoul and Pupo D’Andrea Maria Rosaria, “ANNUARIO DELL’AGRICOLTURA ITALIANA,” 2014. [Online]. Available: www.crea.gov.it
- [14] “Consuntivi 2023 Filiera Legno-Arredo,” Mar. 2023.
- [15] EUROSTAT, “Banca dati.”
- [16] “ENERGIA E CLIMA IN ITALIA RAPPORTO PERIODICO PRIMO SEMESTRE 2023,” 2023.