



Fondo europeo agricolo per lo sviluppo rurale:
l'Europa investe nelle zone rurali



Misura 16 - Cooperazione Sottomisura 16.2 "Sostegno a progetti pilota e allo sviluppo di nuovi prodotti, pratiche, processi e tecnologie"
Misura 16 - Cooperazione Sottomisura 16.2 "Sostegno a progetti pilota e allo sviluppo di nuovi prodotti, pratiche, processi e tecnologie"



PROGETTO FORGARGANO KIT SCARICABILI: PROVE SUL CIPPATO (MONTELEONE)

Proprietà dei combustibili lignocellulosici

Le biomasse lignocellulosiche vengono utilizzate per alimentare caldaie e generatori in sostituzione dei combustibili fossili convenzionali. La **combustione**, preferibilmente in regime cogenerativo al fine di utilizzare sia l'energia termica che l'energia elettrica, è oggi la tecnologia più frequentemente impiegata. Si affacciano sul mercato anche impianti di gassificazione e di pirogassificazione, ciò che appare molto interessante in quanto la disponibilità di combustibili gassosi (*syngas*) e liquidi (*bio-olio*) può consentire l'utilizzo di sistemi impiegati per alimentare motori endotermici per la produzione elettrica e lo spillamento del calore residuo.

In relazione alla taglia ed alla tipologia del processo termochimico, le biomasse grezze possono subire dei trattamenti meccanici finalizzati a ridurne ed omogeneizzarne le dimensioni nonché diminuirne il tenore in umidità.

In particolare, i trattamenti più complessi sono riservati alle biomasse utilizzate in impianti di riscaldamento di piccola taglia (che utilizzano preferibilmente combustibili addensati come **pellet** e **bricchette**), mentre minori trattamenti sono richiesti per le biomasse utilizzate nei generatori di media e grande taglia (che utilizzano in genere il materiale **cippato**).

Lo sviluppo e la competitività della "filiera biomasse" ha nella caratterizzazione analitica dei biocombustibili da impiegare un passaggio obbligato. Solo la conoscenza delle **caratteristiche energetiche e merceologiche** può permettere di definire la qualità del prodotto, di verificarne la rispondenza rispetto a specifiche tecniche di conversione energetica, di stabilire come utilizzarlo al meglio in funzione dei diversi impieghi.

Per comodità descrittiva, finalizzata all'interpretazione delle prove di laboratorio, il "combustibile biomassa", analogamente ai combustibili solidi fossili, può essere suddiviso in due frazioni:

- ✓ una frazione combustibile, costituita dalla componente idrocarburica (C, H), nella quale sono presenti anche ossigeno (O) e altri eteroatomi (N, S, Cl, ecc.) quantitativamente meno rilevanti;
- ✓ una frazione non combustibile, costituita dall'umidità e dalle ceneri.

Questa chiave di lettura, semplificata ed empirica, consente di esprimere i risultati delle prove di laboratorio su basi diverse, in particolare:

- ✓ sul campione "tal quale", così come ricevuto ("as received");



Misura 16 - Cooperazione Sottomisura 16.2 "Sostegno a progetti pilota e allo sviluppo di nuovi prodotti, pratiche, processi e tecnologie"

Misura 16 - Cooperazione Sottomisura 16.2 "Sostegno a progetti pilota e allo sviluppo di nuovi prodotti, pratiche, processi e tecnologie"

- ✓ sul campione secco;
- ✓ sul campione secco, ma privo di ceneri.

Ai fini dell'impiego in un processo di combustione le caratteristiche chimico-fisiche delle biomasse più importanti sono l'*umidità* ed il *potere calorifico*, per quanto possano essere di non trascurabile importanza anche il tenore delle *ceneri*, *cloro*, *azoto* e *zolfo* nonché la *massa volumica apparente*. L'*umidità* ed il *potere calorifico*, oltre ad essere strettamente correlati fra loro, assumono anche un ruolo determinante ai fini dell'effettiva valorizzazione energetica ed economica delle biomasse dal momento che condizionano fortemente i costi di raccolta, trasporto e movimentazione, nel caso dell'*umidità*, come pure il rendimento del processo di combustione, nel caso delle ceneri.

- L'*umidità* di una biomassa esprime il suo tenore di acqua (sia libera che legata) e può essere riportata sul tal quale oppure sul secco. Se si indica con MA la massa di acqua e con MS la massa di sostanza secca, il tenore di umidità U, espresso in percento sul tal quale, è definito come:

$$U (\%) = 100 * MA / (MA + MS)$$

ed assume valori teoricamente compresi fra zero e cento.

Poiché in una biomassa la frazione utile dal punto di vista energetico è costituita dalla sostanza secca mentre l'acqua, pur non essendo affatto un componente desiderato, deve comunque essere trasportata, può essere interessante definire il rapporto RM fra la massa del materiale tal quale e la massa della sua sostanza secca:

$$RM (-) = (MA + MS) / MS = 1 / (1 - U/100)$$

Il rapporto RM è rappresentativo dell'incremento dei quantitativi di biomassa tal quale da raccogliere, trasportare e stoccare per unità di sostanza secca, essendo quest'ultima la frazione utile dal punto di vista energetico. Tale informazione è di fondamentale importanza in quanto i costi di raccolta, trasporto e stoccaggio delle biomasse sono una frazione molto importante dei costi totali di approvvigionamento. Come evidenziato dalle relazioni precedenti, in riferimento ad un'umidità del 30 – 40 % (tipico range di umidità alla raccolta della legna) il rapporto RM è compreso fra 1,4 – 1,7, ovvero il 40 o 70% in più del peso da trasportare in rapporto al peso secco della biomassa raccolta.

L'*umidità* della biomassa è una proprietà dinamica, essa tende a portarsi in equilibrio con l'ambiente e varia in maniera consistente in funzione del tipo di biomassa, delle condizioni ambientali del luogo di raccolta, delle modalità e dei tempi di trasporto e stoccaggio.

- il *potere calorifico* indica la quantità di calore che si sviluppa dall'unità di massa di un materiale nel corso della sua combustione completa, in presenza di ossigeno (comburente), in un calorimetro normalizzato. Viene generalmente espresso in *kcal/kg* o in *MJ/kg*. Se ne distinguono due tipologie, rispettivamente:

- ✓ *potere calorifico superiore* (PCS); comprende anche il calore di condensazione dell'acqua contenuta nel combustibile o formatasi durante la combustione (ovvero si considera l'acqua ottenuta dal processo di combustione allo stato liquido);



Misura 16 - Cooperazione Sottomisura 16.2 "Sostegno a progetti pilota e allo sviluppo di nuovi prodotti, pratiche, processi e tecnologie"

Misura 16 - Cooperazione Sottomisura 16.2 "Sostegno a progetti pilota e allo sviluppo di nuovi prodotti, pratiche, processi e tecnologie"

- ✓ *potere calorifico inferiore* (PCI); non comprende il calore di condensazione dell'acqua (ovvero si considera l'acqua ottenuta dal processo di combustione allo stato vapore).

La prova di laboratorio, comunemente effettuata con un calorimetro adiabatico (bomba di Mahler), serve a determinare il PCS. La determinazione sperimentale del potere calorifico superiore (a volume costante) è la sola prova di laboratorio in grado di fornire la misura del valore energetico intrinseco di un materiale. Assieme alla determinazione del contenuto di idrogeno, il PCS serve per calcolare il potere calorifico inferiore. Il PCI viene calcolato al netto del contributo dell'umidità del combustibile e dell'acqua che si forma nella reazione di combustione; si considera cioè che tutta l'acqua, presente nel combustibile e quella formata nella combustione, rimanga allo stato vapore. Per questo calcolo si sottrae dal PCS il calore di condensazione dell'acqua prodotta nella combustione mediante la seguente formula:

$$PCI_0 = PCS_0 - 9 H \lambda$$

Per un dato valore del PCS, il potere calorifico inferiore PCI si calcola a partire dal calore di condensazione dell'acqua λ e dal contenuto di idrogeno H della biomassa, essendo il quantitativo di acqua prodotto dalla combustione pari a 9 volte il quantitativo di idrogeno presente nel combustibile. I valori tipici del potere calorifico superiore della maggior parte delle biomasse secche sono compresi fra 19 e 22 MJ/kg. Poiché il tenore di idrogeno nelle biomasse legnose è dell'ordine del 5-7 % e il calore di condensazione (λ) è pari a circa 2,4 MJ/kg, la differenza tra potere calorifico superiore e potere calorifico inferiore è dell'ordine di 1-1,5 MJ/kg. I valori tipici del potere calorifico inferiore su base secca, quindi, sono generalmente dell'ordine di 18-20 MJ/kg.

In alternativa alla determinazione sperimentale, il *potere calorifico* può essere calcolato mediante equazioni empiriche, gran parte delle quali si basano sulla composizione elementare del combustibile. Il potere calorifico, infatti, è strettamente legato al contenuto di Carbonio e di Idrogeno e rispecchia le proporzioni dei diversi macro-costituenti presenti nella biomassa: cellulosa, emicellulosa e lignina - assieme a terpeni, sesquiterpeni e resine - aventi caratteristiche chimiche e poteri calorifici diversi.

Bisogna tuttavia tener presente che il calore reale prodotto in un impianto, per quanto sia legato al PCI, dipende da numerosi altri fattori, quali: mezzo di combustione (aria od altro gas), sistema di combustione e disegno costruttivo dell'impianto, condizioni di esercizio dell'impianto, altre caratteristiche chimiche e fisiche del combustibile. Tra i fattori che influenzano maggiormente il potere calorifico delle biomasse particolare importanza rivestono l'umidità e le ceneri.

Ancora sull'umidità delle biomasse legnose. Dal punto di vista pratico, infatti, l'energia effettivamente utilizzabile non è data dal *potere calorifico inferiore su base secca* ma da quello *sul tal quale*, ossia in relazione all'effettivo tenore in acqua al momento dell'impiego energetico della biomassa stessa. Questa energia effettiva è facilmente calcolabile tenendo conto che l'energia generata dalla combustione della massa di sostanza tal quale (secco + acqua) è data dall'energia corrispondente alla sostanza secca diminuita del calore di vaporizzazione dell'acqua, che non può essere recuperato; per cui:

$$(MA + MS) * PCI_u = MS PCI_s - MA \lambda ;$$



Misura 16 - Cooperazione Sottomisura 16.2 "Sostegno a progetti pilota e allo sviluppo di nuovi prodotti, pratiche, processi e tecnologie"

Misura 16 - Cooperazione Sottomisura 16.2 "Sostegno a progetti pilota e allo sviluppo di nuovi prodotti, pratiche, processi e tecnologie"

ovvero:

$$PCI_u = (1 - U) * PCI_s - U * \lambda ;$$

ossia:

$$PCI_u = PCI_s - U * (PCI_s + \lambda) ;$$

in cui PCI_s è il PCI allo stato secco della biomassa e PCI_u quello allo stato umido.

La precedente relazione mostra come il potere calorifico inferiore di una biomassa, ovvero l'energia termica effettivamente recuperabile a seguito di un processo di combustione, diminuisca linearmente con l'aumento della sua umidità, fino ad annullarsi del tutto per valori dell'umidità dell'ordine dell'88-90 %. In pratica, la combustione di biomasse con valori di umidità superiori al 65-70 % non è in grado di sostenersi. L'umidità presenta dunque un effetto molto rilevante nei confronti del potere calorifico. Con riferimento ad un potere calorifico sul secco di circa 18-19 MJ/kg, una umidità del 10-15% (tipica di legno stagionato od essiccato) comporta un potere calorifico sul tal quale di circa 15-16 MJ/kg, mentre una umidità del 50-55% (tipica del legno fresco di taglio) comporta un potere calorifico inferiore di circa 9-10 MJ/kg.

Il tenore di ceneri, ovvero la frazione sul tal quale di materiale inorganico (non combustibile) che si ritrova come residuo alla fine del processo di combustione. Elevati valori del tenore di ceneri determinano una diminuzione del potere calorifico, un aumento dei costi di smaltimento delle ceneri e maggiori problemi legati alla possibile formazione di incrostazioni, corrosioni ed erosioni in caldaia. Il tenore di ceneri si misura subito dopo la misura dell'umidità, ovvero a partire dalla sostanza secca. Il campione di biomassa secca viene macinato finemente (fino a dimensioni tali da attraversare un setaccio con maglie aventi 1,5 mm di lato) e introdotto in un forno a muffola termostato a 750 °C (con una tolleranza di 25 °C) al fine di ottenerne la completa combustione. La massa misurata alla fine del processo di combustione rappresenta il contenuto di ceneri presente nel campione analizzato. Il contenuto di ceneri su base secca è solitamente compreso fra lo 0,5 % e l'1,5 %, nel caso del legno forestale, anche se talvolta, come nel caso delle potature, può arrivare a valori superiori, del 5-7 % o, nel caso delle paglie cerealicole a valori anche del 10, perfino 15 %.

L'influenza delle ceneri sul comportamento della biomassa nella combustione e sull'esercizio dell'impianto è legata, oltre che alla quantità, anche alla qualità delle ceneri, cioè alla loro composizione che, a sua volta, influenza in maniera significativa il loro comportamento alla fusione. Composizione e comportamento alla fusione possono fornire importanti indicazioni sulla propensione delle ceneri a formare scorie e depositi in impianto.

La **temperatura di fusione delle ceneri**, infatti, di solito risulta inferiore a quella delle ceneri da carbone (1200-1250 °C contro 1350-1450 °C).

Elevati contenuti in cenere implicano un tendenziale aumento del numero medio degli interventi di gestione della caldaia e in particolare di quello relativo allo svuotamento del box di raccolta delle ceneri, un contestuale aumento del pericolo di formazione di scorie e depositi (con la conseguente possibile formazione di incrostazioni negli scambiatori di calore e l'inevitabile riduzione del rendimento finale della caldaia), ed un aumento delle emissioni di particolato.



Fondo europeo agricolo per lo sviluppo rurale:
l'Europa investe nelle zone rurali



Misura 16 - Cooperazione Sottomisura 16.2 "Sostegno a progetti pilota e allo sviluppo di nuovi prodotti, pratiche, processi e tecnologie"

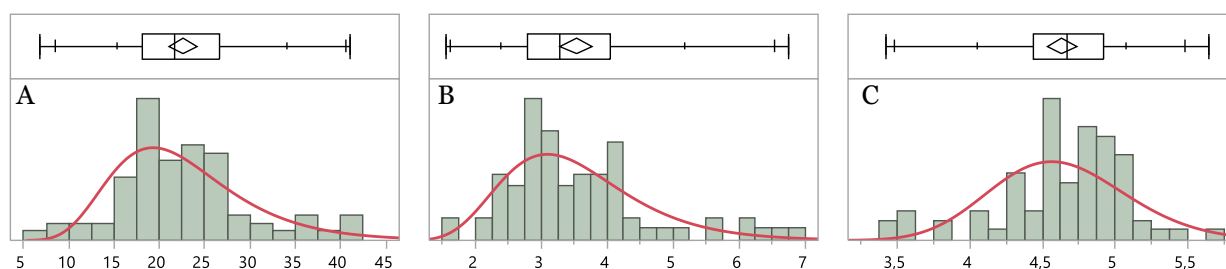
Misura 16 - Cooperazione Sottomisura 16.2 "Sostegno a progetti pilota e allo sviluppo di nuovi prodotti, pratiche, processi e tecnologie"

Mentre umidità e ceneri, costituiscono la parte non combustibile, le sostanze volatili ed il carbonio fisso rappresentano, in modo empirico, la frazione combustibile presente nel materiale. Secondo i metodi di prova comunemente utilizzati, il contenuto di **sostanze volatili** si determina riscaldando a 950 °C, in condizioni normalizzate, un campione di biomassa. Le sostanze volatili sono costituite dalla porzione di biomassa, esclusa l'umidità, che si sviluppa sotto forma gassosa. Il materiale rimanente, escluse le ceneri, è considerato **carbonio fisso**. La prova di laboratorio consente di differenziare la frazione di combustibile che brucia sotto forma gassosa (sostanze volatili) da quella che brucia sotto forma solida (carbonio fisso). In termini quantitativi, i contenuti di sostanze volatili e di carbonio fisso sono fortemente influenzati dalla temperatura e dalle condizioni di prova adottate.

Presso il laboratorio dello **STAR*Facility Centre** dell'Università di Foggia si è proceduto alla valutazione delle proprietà combustibili di campioni di legna forestale e di potature, preventivamente cippate. Sulla base di un largo numero di campioni è stato possibile determinare i parametri più influenti che ne condizionano l'impiego come combustibile, con particolare riferimento al tenore in umidità (espresso come valore percentuale sul tal quale) ed al potere calorifico inferiore, ossia quello sprigionato in fase di combustione ed espresso in termini di energia per tonnellata ($MWh t^{-1}$) di materiale tal quale, unitamente al contenuto in ceneri, anch'esso indicato in termini percentuali sul tal quale. Di seguito si riportano i grafici relativi alla distribuzione dei dati ("box plot") ed un riepilogo delle stime statistiche ottenute.

Misura 16 - Cooperazione Sottomisura 16.2 "Sostegno a progetti pilota e allo sviluppo di nuovi prodotti, pratiche, processi e tecnologie"
Misura 16 - Cooperazione Sottomisura 16.2 "Sostegno a progetti pilota e allo sviluppo di nuovi prodotti, pratiche, processi e tecnologie"

CIPPATO DI POTATURE DI OLIVO



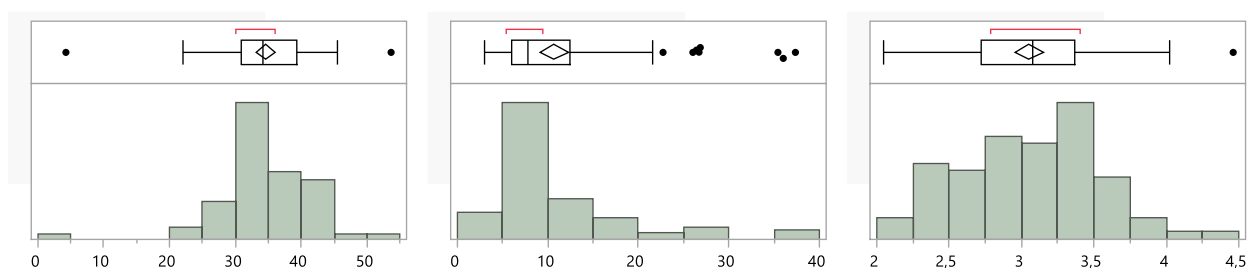
"Box plot" e distribuzione di frequenza dei dati relativi alle seguenti proprietà combustibili delle potature d'olivo: A - umidità (% sul tal quale); B - ceneri (% sul tal quale) e C - potere calorifico inferiore ($MWh t^{-1}$). Rilevazioni eseguite a carico di 80 campioni di cippato analizzati presso il laboratorio dello STAR*Facility Centre (UniFG).

| A - UMIDITA' (% sul tal quale) | | | B - CENERI (% sul tal quale) | | | C - POTERE CAL. INF. ($MWh t^{-1}$) | | |
|-----------------------------------|----------------|--------------|---------------------------------|----------------|-------------|--|----------------|-------------|
| 100.0% | massimo | 41,06 | 100.0% | massimo | 6,75 | 100.0% | massimo | 5,65 |
| 99.5% | | 41,06 | 99.5% | | 6,75 | 99.5% | | 5,65 |
| 97.5% | | 40,63 | 97.5% | | 6,55 | 97.5% | | 5,48 |
| 90.0% | | 34,02 | 90.0% | | 5,17 | 90.0% | | 5,08 |
| 75.0% | quartile | 26,62 | 75.0% | quartile | 4,05 | 75.0% | quartile | 4,92 |
| 50.0% | mediana | 21,66 | 50.0% | mediana | 3,28 | 50.0% | mediana | 4,67 |
| 25.0% | quartile | 18,11 | 25.0% | quartile | 2,79 | 25.0% | quartile | 4,44 |
| 10.0% | | 15,31 | 10.0% | | 2,39 | 10.0% | | 4,05 |
| 2.5% | | 8,56 | 2.5% | | 1,62 | 2.5% | | 3,48 |
| 0.5% | | 6,85 | 0.5% | | 1,56 | 0.5% | | 3,42 |
| 0.0% | minimo | 6,85 | 0.0% | minimo | 1,56 | 0.0% | minimo | 3,42 |

Quantili relativi alla distribuzione di frequenza dei dati di umidità (A), ceneri (B) e potere calorifico inferiore (C). Osservazioni rilevate a carico di 80 campioni di potature cippate analizzati presso il laboratorio dello STAR*Facility Centre (UniFG).

Misura 16 - Cooperazione Sottomisura 16.2 "Sostegno a progetti pilota e allo sviluppo di nuovi prodotti, pratiche, processi e tecnologie"
Misura 16 - Cooperazione Sottomisura 16.2 "Sostegno a progetti pilota e allo sviluppo di nuovi prodotti, pratiche, processi e tecnologie"

CIPPATO DI RESIDUI E SCARTI LEGNOSI NON SELEZIONATI (SRAMATURA DI LEGNO ESBOSCATO)



"Box plot" e distribuzione di frequenza dei dati relativi alle seguenti proprietà combustibili di cippato ottenuto da scarti legnosi non selezionati: A - umidità (% sul tal quale); B - ceneri (% sul tal quale) e C - potere calorifico inferiore (MWh t^{-1}). Rilevazioni eseguite a carico di 80 campioni di cippato analizzati presso il laboratorio dello STAR*Facility Centre (UniFG).

| A - UMIDITA' (% sul tal quale) | | | B - CENERI (% sul tal quale) | | | C - POTERE CAL. INF. (MWh t^{-1}) | | |
|-----------------------------------|----------------|--------------|---------------------------------|----------------|-------------|---|----------------|-------------|
| 100.0% | massimo | 53,65 | 100.0% | massimo | 37,33 | 100.0% | massimo | 4,46 |
| 99.5% | | 53,65 | 99.5% | | 37,33 | 99.5% | | 4,46 |
| 97.5% | | 45,47 | 97.5% | | 35,87 | 97.5% | | 3,99 |
| 90.0% | | 42,69 | 90.0% | | 21,84 | 90.0% | | 3,59 |
| 75.0% | quartile | 39,42 | 75.0% | quartile | 12,44 | 75.0% | quartile | 3,37 |
| 50.0% | mediana | 34,22 | 50.0% | mediana | 7,75 | 50.0% | mediana | 3,08 |
| 25.0% | quartile | 30,85 | 25.0% | quartile | 5,99 | 25.0% | quartile | 2,72 |
| 10.0% | | 27,37 | 10.0% | | 4,86 | 10.0% | | 2,44 |
| 2.5% | | 22,08 | 2.5% | | 3,52 | 2.5% | | 2,11 |
| 0.5% | | 4,27 | 0.5% | | 2,97 | 0.5% | | 2,05 |
| 0.0% | minimo | 4,27 | 0.0% | minimo | 2,97 | 0.0% | minimo | 2,05 |

Quantili relativi alla distribuzione di frequenza dei dati di umidità (A), ceneri (B) e potere calorifico inferiore (C). Osservazioni rilevate a carico di 80 campioni ottenuti da scarti legnosi non selezionati analizzati presso il laboratorio dello STAR*Facility Centre (UniFG).

Si segnala la scarsa qualità del materiale in termini di proprietà combustibili in relazione alla tipologia di materiale legnoso (sramature di cimali e di fasciame di legno esboscato) ed alle condizioni di acquisizione (possibili inquinamenti da parte di terreno forestale). Questo materiale rappresenta un combustibile al limite della idoneità di impiego ai fini della destinazione alla conversione energetica.

Misura 16 - Cooperazione Sottomisura 16.2 "Sostegno a progetti pilota e allo sviluppo di nuovi prodotti, pratiche, processi e tecnologie"
Misura 16 - Cooperazione Sottomisura 16.2 "Sostegno a progetti pilota e allo sviluppo di nuovi prodotti, pratiche, processi e tecnologie"

CIPPATO DI LEGNO FORESTALE SELEZIONATO

| Descrizione Campione | Unità Misura | Cippato Pino | Cippato Castagno; | Cippato, Leccio |
|--------------------------------|-----------------|-----------------|----------------------|--------------------|
| Parametro | | | | |
| Umidità | % | 13.90 | 10.97 | 10.74 |
| Ceneri | %ss | 2.62 | 0.64 | 2.39 |
| Solidi Volatili | %ss | 77.29 | 73.80 | 77.21 |
| Carbonio Fisso | %ss | 20.10 | 25.57 | 20.40 |
| Carbonio | % ss | 51.22 | 49.34 | 48.23 |
| Idrogeno | % ss | 7.00 | 6.25 | 6.50 |
| Azoto | % ss | 0.28 | 0.09 | 0.19 |
| Zolfo | % ss | 0.051 | 0.051 | 0.066 |
| Ossigeno | % ss | 38.83 | 43.64 | 42.63 |
| Cloro | % ss | 0.008 | 0.006 | 0.030 |
| POTERE CALORIFICO | | | | |
| Potere Calorifico Superiore | KJ/Kg ss | 21.451,32 | 19.607,16 | 19.676,70 |
| Potere Calorifico Inferiore | KJ/ Kg ss | 16.824,85 | 15.976,69 | 16.038,69 |
| Fusibilità delle Ceneri | | | | |
| ST (Shrinkage) | °C | 870 | 980 | 940 |
| DT (Deformation) | °C | 1380 | 1370 | >1500 |
| HT (Hemisphere) | °C | 1400 | 1410 | >1500 |
| FT (Flow) | °C | 1440 | 1450 | >1500 |
| MACROELEMENTI | | | | |
| Al (Alluminio) | mg/Kg s.s. | 600.94 | 45.54 | 1.30 |
| Ca (Calcio) | mg/Kg s.s. | 6415.15 | 836.29 | 7162.78 |
| Fe (Ferro) | mg/Kg s.s. | 250.59 | 43.17 | 37.57 |
| K (Potassio) | mg/Kg s.s. | 1169.65 | 698.47 | 4991.01 |
| Mg (Magnesio) | mg/Kg s.s. | 359.90 | 78.23 | 649.76 |
| Na (sodio) | mg/Kg s.s. | 105.06 | 214.17 | 193.27 |
| P (Fosforo) | mg/Kg s.s. | 78.58 | 2.34 | 238.00 |
| Si (Silice) | mg/Kg s.s. | 1583.79 | 545.89 | 545.38 |
| Ti (Titanio) | mg/Kg s.s. | 30.62 | 0.47 | 0.11 |

*Determinazioni analitiche eseguite presso il laboratorio dello STAR*Facility Centre (UniFG).*

E' possibile evidenziare il netto miglioramento della qualità combustibile del materiale ottenuto dall'impiego di legno selezionato (ossia non residuale) e riferibile a specifiche essenze legnose.