



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia  
e lo sviluppo economico sostenibile



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Nuovi materiali biocompositi ottenuti mediante l'utilizzo di tessuti  
commingled a base PLA/fibre di lino e di canapa

*Claudia Massaro, Roberto Terzi*

NUOVI MATERIALI BIOCOMPOSITI OTTENUTI MEDIANTE L'UTILIZZO DI TESSUTI COMMINGLED A BASE PLA/FIBRE DI LINO E DI CANAPA

Claudia Massaro, Roberto Terzi (ENEA)

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto

Responsabile del Progetto: Giuseppe Barbieri, ENEA

## Indice

|                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Sommario.....</b>                                                      | <b>4</b>  |
| <b>Introduzione.....</b>                                                  | <b>5</b>  |
| <b>Laminati in materiale composito biodegradabile.....</b>                | <b>5</b>  |
| <b>Caratterizzazione meccanica dei laminati A, B, C .....</b>             | <b>11</b> |
| <b>Caratterizzazione microstrutturale (SEM) dei laminati A, B, C.....</b> | <b>15</b> |
| <b>Caratterizzazione meccanica dei laminati D, E, F.....</b>              | <b>19</b> |
| <b>Caratterizzazione microstrutturale SEM dei laminati D, E, F.....</b>   | <b>25</b> |
| <b>Conclusioni.....</b>                                                   | <b>26</b> |
| <b>Riferimenti bibliografici .....</b>                                    | <b>26</b> |
| <b>Abbreviazioni ed acronimi .....</b>                                    | <b>26</b> |

## Sommario

Il lavoro è inquadrato nell'ambito delle attività sul Progetto 3.5 "Risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto" dell' AdP ENEA-MSE. In particolare l'attività sperimentale riguarda la messa a punto di pannelli in materiale composito a matrice biodegradabile rinforzati con fibre naturali realizzati a partire da tessuti *commingled*. Le applicazioni sono orientate alla realizzazione di interiors per il settore automobilistico.

I tessuti *commingled* sono stati compattati mediante stampaggio a caldo in modo da ottenere laminati piani dello spessore di circa 3mm. La caratterizzazione meccanica statica dei laminati è stata effettuata mediante test di trazione condotti secondo la normativa ASTM. I risultati sperimentali sono stati utilizzati per la determinazione delle caratteristiche meccaniche dei laminati in funzione dei parametri di processo adottati. La caratterizzazione microstrutturale, condotta attraverso analisi SEM, ha permesso di studiare l'influenza dei parametri di stampaggio, come la temperatura, pressione e tempo, sulla struttura interna del laminato. La correlazione di tutti i risultati sperimentali ha consentito infine l'ottimizzazione dei parametri di processo per l'ottenimento di laminati con caratteristiche meccaniche sufficienti per essere utilizzati nella fabbricazione di parti e componenti interiors per il settore trasporti.

## Introduzione

Il problema dell'impatto ambientale delle plastiche ha generato negli ultimi anni una crescente sensibilizzazione verso il riciclo di questi materiali. A fronte di situazioni in cui é possibile il loro recupero, esistono condizioni in cui non lo é perché il materiale risulta essere inquinato o difficilmente recuperabile e quindi il riciclo non é più una operazione economicamente conveniente. In questi casi l'uso di polimeri biodegradabili rappresenta una possibile alternativa in linea con l'ambiente. Polimeri biodegradabili vengono attualmente utilizzati in molte applicazioni biomediche, ma il loro uso in applicazioni meno nobili, come ad esempio nel settore dei trasporti, nell'imballaggio e nell'agricoltura, non é diffuso a causa dei costi non ancora competitivi rispetto ai materiali tradizionali. I compositi offrono l'opportunità di modificare le proprietà dei polimeri e, attraverso l'utilizzo di fibre naturali derivanti da risorse rinnovabili e poco costose, di ridurre il costo del materiale finale. Tale approccio é stato utilizzato per modificare le caratteristiche di polimeri termoplastici di uso comune come il polietilene, polipropilene, polistirene ecc.. L'uso di queste fibre naturali disperse in matrici biodegradabili permette la realizzazione di un composito totalmente biodegradabile ed ecocompatibile. Tra le fibre naturali più utilizzate troviamo le fibre di lino, canapa, legno, alghe, juta, ginestra, sisal. Queste possono dar luogo a compositi a fibre corte o lunghe che presentano buone proprietà meccaniche, sia in termini di modulo elastico che di resistenza.

## Laminati in materiale composito biodegradabile

### Selezione di tessuti in fibre naturali

I tessuti di tipo commingled presi in considerazione sono stati: PLA/Fibre di lino e PP/ fibre di lino disponibili commercialmente come Biotex e forniti dalla Composites Evolution.

I tessuti acquisiti sono costituiti di fibra di lino al 40% e fibre di PLA e PP al 60% rispettivamente e sono disponibili con due tessiture differenti: Twill e Hopsack. I dettagli relativi ai tessuti acquistati sono riportati nelle schede tecniche seguenti.



*Biotex 40% Flax/PLA 4x4 Hopsack 530gsm*



*Biotex 40% Flax/PP 4x4 Hopsack 550gsm*



*Biotex 40% Flax/PLA 2x2 Twill 420 gsm*



*Biotex 40% Flax/PP 2x2 Twil 420 gsm*

## Biotex Flax/PLA Technical Information



### Composition

|                 |        |            |
|-----------------|--------|------------|
| Volume Fraction | 40%    | Standard   |
|                 | Others | On request |

### Yarn

|                |                                                                                                                                                                    |                        |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Linear Density | 250tex<br>125-2000tex                                                                                                                                              | Standard<br>On request |
| Processing     | The commingled yarn can be consolidated by heating to 180-200°C and applying a pressure of at least 1bar. Typical processes for the yarn include filament winding. |                        |

### Fabric

|               |                                                                                                                                                                                     |                                                   |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Weave Style   | 2x2 twill<br>4x4 hopsack<br>Other styles                                                                                                                                            | Standard<br>Standard<br>On request                |
| Fabric Weight | 420-520gsm<br>250-800gsm                                                                                                                                                            | Standard (depending on weave style)<br>On request |
| Fabric Width  | 1.25m<br>Up to 3m                                                                                                                                                                   | Standard<br>On request                            |
| Processing    | The commingled fabric can be consolidated by heating to 180-200°C and applying a pressure of 1-50bar. Typical processes include vacuum consolidation, autoclave and press moulding. |                                                   |

### Preconsolidated Sheet

|            |                                                                                                                                               |                        |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Thickness  | 0.8, 1.2, 1.6, 2.0,<br>2.4 & 2.8mm<br>Others                                                                                                  | Standard<br>On request |
| Processing | The sheets can be formed to shape by heating to 180-200°C and stamp forming with a matched tool in a press at typical pressures of 10-100bar. |                        |

### Typical Properties

|                      |                       |                                 |
|----------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Density              | 1.33g/cm <sup>3</sup> |                                 |
| Tensile Modulus      | 13.2GPa               | (ISO 527-4)                     |
| Tensile Strength     | 102MPa                | (ISO 527-4)                     |
| Tensile Elongation   | 1.6%                  | (ISO 527-4)                     |
| Flexural Modulus     | 7.8GPa                | (ISO 14125)                     |
| Flexural Strength    | 131MPa                | (ISO 14125)                     |
| Charpy Impact (flat) | 32.8kJ/m <sup>2</sup> | (ISO 179-1 unnotched, flatwise) |
| Charpy Impact (edge) | 28.4kJ/m <sup>2</sup> | (ISO 179-1 unnotched, edgewise) |

Data for laminate made from Biotex 40vol% flax-PLA 4x4 hopsack fabric by press moulding and tested at ambient temperature.

## Biotex Flax/PP Technical Information



### Composition

|                 |        |            |
|-----------------|--------|------------|
| Volume Fraction | 40%    | Standard   |
|                 | Others | On request |

### Yarn

|                |                                                                                                                                                                     |                        |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Linear Density | 250tex<br>125-2000tex                                                                                                                                               | Standard<br>On request |
| Processing     | The commingled yarn can be consolidated by heating to 180-200°C and applying a pressure of at least 1 bar. Typical processes for the yarn include filament winding. |                        |

### Fabric

|               |                                                                                                                                                                                      |                                                   |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Weave Style   | 2x2 twill<br>4x4 hopack<br>Other styles                                                                                                                                              | Standard<br>Standard<br>On request                |
| Fabric Weight | 420-520gsm<br>250-800gsm                                                                                                                                                             | Standard (depending on weave style)<br>On request |
| Fabric Width  | 1.25m<br>Up to 3m                                                                                                                                                                    | Standard<br>On request                            |
| Processing    | The commingled fabric can be consolidated by heating to 180-200°C and applying a pressure of 1-50 bar. Typical processes include vacuum consolidation, autoclave and press moulding. |                                                   |

### Preconsolidated Sheet

|            |                                                                                                                                                |                        |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Thickness  | 0.8, 1.2, 1.6, 2.0,<br>2.4 & 2.8mm<br>Others                                                                                                   | Standard<br>On request |
| Processing | The sheets can be formed to shape by heating to 180-200°C and stamp forming with a matched tool in a press at typical pressures of 10-100 bar. |                        |

### Typical Properties

|                      |           |                                 |
|----------------------|-----------|---------------------------------|
| Density              | 1.04g/cm³ |                                 |
| Tensile Modulus      | 8.1GPa    | (ISO 527-4)                     |
| Tensile Strength     | 56.0MPa   | (ISO 527-4)                     |
| Tensile Elongation   | 1.5%      | (ISO 527-4)                     |
| Flexural Modulus     | 4.5GPa    | (ISO 14125)                     |
| Flexural Strength    | 79.2MPa   | (ISO 14125)                     |
| Charpy Impact (flat) | 27.4kJ/m² | (ISO 179-1 unnotched, flatwise) |
| Charpy Impact (edge) | 23.4kJ/m² | (ISO 179-1 unnotched, edgewise) |

Data for laminate made from Biotex 40vol% flax-PP 4x4 hopack fabric by press moulding and tested at ambient temperature.

## Processo di stampaggio

Il processo di laminazione realizzato mediante stampaggio a caldo dei tessuti commingled è stato studiato in funzione dei parametri principali quali: Temperatura dei piatti, Pressione e Tempo di applicazione, al fine di massimizzare le caratteristiche meccaniche del laminato in materiale composito. A tale scopo è stata utilizzata una pressa a piatti piani, per la laminazione dei tessuti Biotex 40% Flax/PLA 4x4 Hopsack 530gsm. La compattazione dei tessuti è stata effettuata mediante una pressa a piatti piani CAMPANA tipo P7-91-PL.



*Pressa a piatti piani CAMPANA*

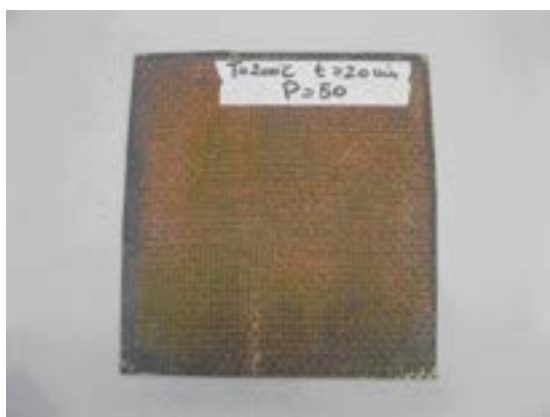
- Caratteristiche della pressa
- movimentazione mediante cilindro idraulico a doppio effetto comandato da apposita centralina alloggiata all'interno del basamento;
- pompa idraulica a doppio stadio;
- corsa utile e luce tra le piastre di mm 150;
- piastre in acciaio indurite superficialmente 340x340mm;
- termoregolatori ad azione PID con visualizzatore per il rilievo in continuo della temperatura;
- temperatura di lavoro da 50° a 240° C
- manometro per impostazione e lettura della forza di chiusura (30 T)

Per l'ottenimento di pannelli del materiale composito dai tessuti Biotex 40% Flax/PLA 4x4 Hopsack 530gsm sono stati utilizzati n.4 strati di tessuto sovrapposti stampati secondo i parametri di processo indicati nella tabella seguente:

| NOME CAMPIONE          | MATERIALE          | STRATI | PRESSIONE (bar) | TEMPERATURA (°C) | TEMPO (min) |
|------------------------|--------------------|--------|-----------------|------------------|-------------|
| FLAXPLAT200P50t20S4    | BIOTEX HOPSACK 4x4 | 4      | 50              | 200              | 20          |
| FLAXPLAT180P50t20S4 A  | BIOTEX HOPSACK 4x4 | 4      | 50              | 180              | 20          |
| FLAXPLAT180P70t20S4 B  | BIOTEX HOPSACK 4x4 | 4      | 70              | 180              | 20          |
| FLAXPLAT180P100t20S4 C | BIOTEX HOPSACK 4x4 | 4      | 100             | 180              | 20          |

Sono stati quindi quattro tipologie di laminati di tessuto stampato della dimensione di circa 300x300mm dello spessore di circa 3 mm.

Nelle immagini seguenti sono riportate le foto dei laminati realizzati



*FLAXPLAT200P50S4*



*FLAXPLAT180P50S4*



*FLAXPLAT180P70S4*



*FLAXPLAT180P100S4*

Dalle mattonelle stampate nella pressa a piatti piani sono poi stati ritagliati i campioni secondo la geometria indicata nella norma tecnica di prova ASTM D 638M per le prove meccaniche di trazione. A questo scopo è stata utilizzata una fustellatrice GIBITRE, caratterizzata da un movimento fustella assiale e da un carico massimo applicabile sulla leva manuale di 2000N.



*Fustellatrice GIBITRE*

Sono di seguito riportate immagini di alcuni campioni ritagliati con la fustellatrice, secondo i parametri della norma di riferimento per le successive prove di trazione.

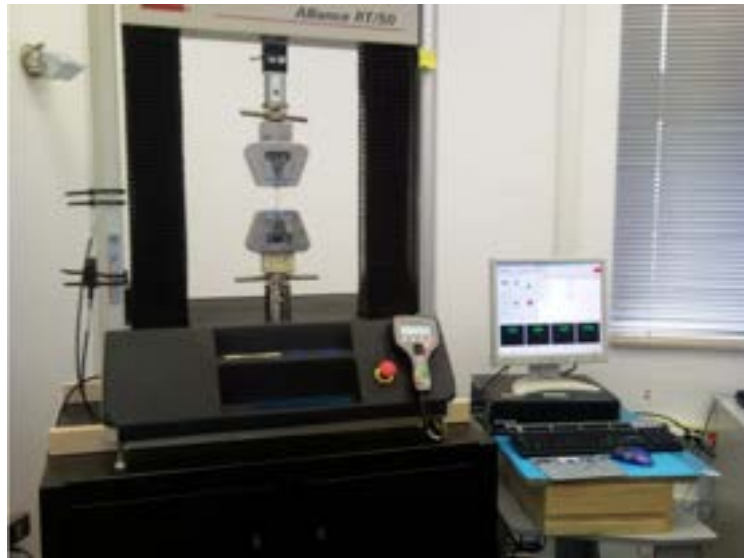


*Esempi di provini per le prove di trazione*

## Caratterizzazione meccanica dei laminati A, B, C

I campioni ritagliati con la fustellatrice, secondo i parametri della norma di riferimento, sono stati sottoposti a test meccanici di trazione. Le prove di trazione, secondo la norma tecnica ASTM D638M, sono state eseguite con una macchina per prove statiche, Tabletop MTS Alliance 50kN equipaggiata con:

- Cella di carico MTS con fondo scala da 2kN (accuratezza del trasduttore di carico 0,04%; accuratezza globale di misura del carico  $\pm 0,5\%$  del valore letto);
- Estensometro a contatto MTS (campo di lavoro  $\pm 4$  mm);
- Afferraggio dei campioni mediante morsetti MTS a cuneo autostringenti



*Tabletop MTS Alliance 50kN*



*Campione sottoposto a test di trazione con estensometro*



Immagini di campioni sottoposti al test di trazione

I risultati ottenuti dalle prove di trazione dei laminati compositi ottenuti per stampaggio sono qui di seguito riportati. Il campione FLAXPLAT200P50S4 non è stato analizzato in quanto su di esso erano visibili indicazioni di degradazione termica dovute evidentemente ad una temperatura di processo troppo elevata.

## Campione FLAXPLAT180P50t20s4 (A)

### Sample Information:

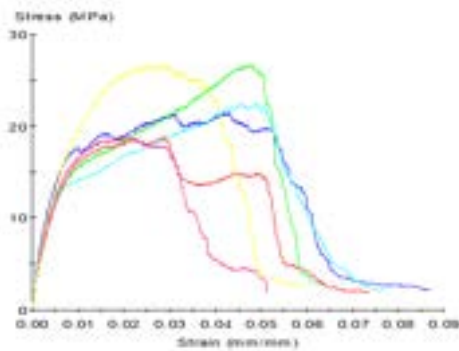
| Name     | Value                   |
|----------|-------------------------|
| SampleID | FLAXPLAT180P50t20s4 (A) |

### Specimen Results:

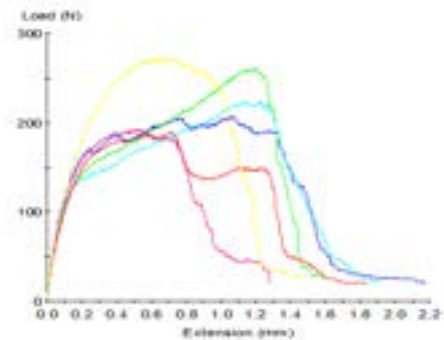
| Specimen  | Thickness<br>mm | Width<br>mm | Peak Load<br>N | Peak Stress<br>MPa | Modulus<br>MPa | Strain_max<br>mm/mm |
|-----------|-----------------|-------------|----------------|--------------------|----------------|---------------------|
| 1         | 1.707           | 5.660       | 207.159        | 21.4               | 4174.856       | 0.087               |
| 2         | 1.746           | 5.610       | 261.275        | 26.7               | 3375.664       | 0.064               |
| 3         | 1.786           | 5.590       | 224.209        | 22.5               | 3615.943       | 0.077               |
| 4         | 1.769           | 5.690       | 189.352        | 18.8               | 3345.756       | 0.073               |
| 5         | 1.806           | 5.660       | 192.427        | 18.8               | 3617.244       | 0.051               |
| 6         | 1.815           | 5.660       | 273.105        | 26.6               | 3460.417       | 0.059               |
| MeaMedia  | 1.772           | 5.645       | 224.588        | 22.5               | 3598.313       | 0.069               |
| Std. Dev. | 0.040           | 0.037       | 35.439         | 3.5                | 305.105        | 0.013               |

### Test Inputs:

| Name                | Value  | Units  |
|---------------------|--------|--------|
| Humidity            | 50     | %      |
| Temperature         | 25     | °C     |
| Speed               | 0.5    | mm/min |
| Nominal Gage Length | 25.000 | Mm     |



1  
2  
3  
4  
5  
[6]



1  
2  
3  
4  
5  
[6]

Campione FLAXPLAT180P70t20s4 (B)

Sample Information:

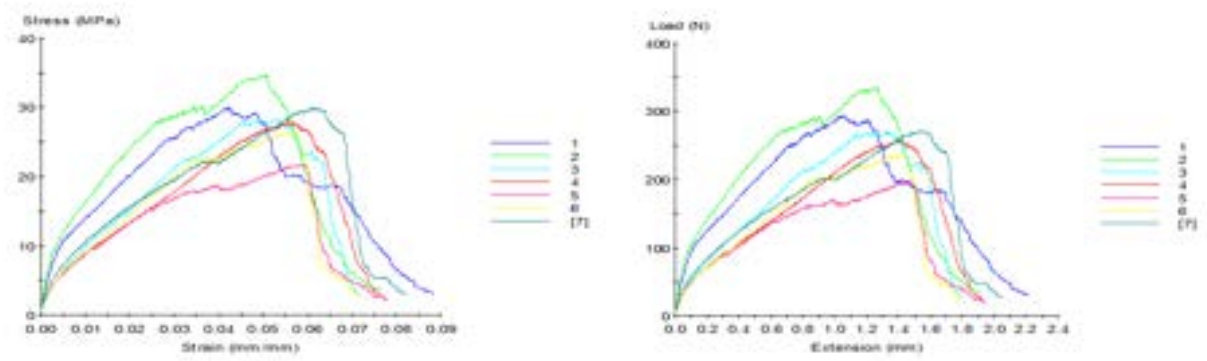
| Name     | Value                   |
|----------|-------------------------|
| SampleID | FLAXPLAT180P70t20s4 (B) |

Specimen Results:

| Specimen  | Thickness mm | Width mm | Peak Load N | Peak Stress MPa | Modulus MPa | Strain_max mm/mm |
|-----------|--------------|----------|-------------|-----------------|-------------|------------------|
| 1         | 1.710        | 5.760    | 295.744     | 30.0            | 2878.839    | 0.088            |
| 2         | 1.686        | 5.740    | 335.666     | 34.7            | 3625.804    | 0.076            |
| 3         | 1.611        | 5.930    | 270.709     | 28.3            | 1266.887    | 0.072            |
| 4         | 1.569        | 5.880    | 257.131     | 27.9            | 1232.278    | 0.077            |
| 5         | 1.541        | 5.860    | 196.503     | 21.8            | 1476.030    | 0.078            |
| 6         | 1.518        | 5.880    | 237.947     | 26.7            | 1286.030    | 0.072            |
| 7         | 1.561        | 5.817    | 271.945     | 29.9            | 1570.786    | 0.082            |
| MeaMedia  | 1.599        | 5.838    | 266.521     | 28.5            | 1905.236    | 0.078            |
| Std. Dev. | 0.073        | 0.069    | 43.759      | 3.9             | 952.900     | 0.006            |

Test Inputs:

| Name                | Value  | Units  |
|---------------------|--------|--------|
| Humidity            | 50     | %      |
| Temperature         | 25     | °C     |
| Speed               | 0.5    | mm/min |
| Nominal Gage Length | 25.000 | Mm     |



## Campione FLAXPLAT180P100t20s4 (C)

### Sample Information:

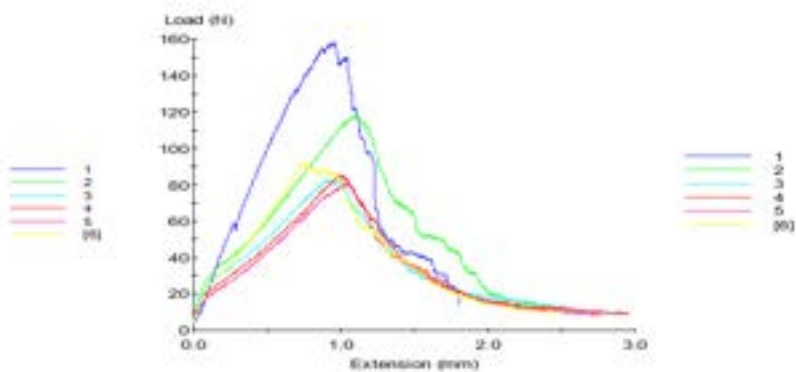
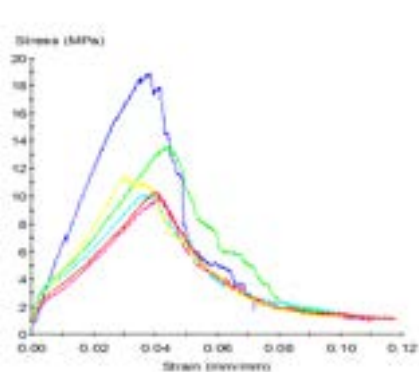
| Name     | Value                    |
|----------|--------------------------|
| SampleID | FLAXPLAT180P100t20s4 (C) |

### Specimen Results:

| Specimen  | Thickness mm | Width mm | Peak Load N | Peak Stress MPa | Modulus MPa | Strain_max mm/mm |
|-----------|--------------|----------|-------------|-----------------|-------------|------------------|
| 1         | 1.508        | 5.557    | 158.493     | 18.9            | 704.337     | 0.072            |
| 2         | 1.464        | 5.930    | 117.900     | 13.6            | 1024.237    | 0.098            |
| 3         | 1.391        | 5.890    | 82.994      | 10.1            | 1137.095    | 0.116            |
| 4         | 1.402        | 5.910    | 85.474      | 10.3            | 834.984     | 0.118            |
| 5         | 1.397        | 5.870    | 80.742      | 9.8             | 587.111     | 0.111            |
| 6         | 1.361        | 5.920    | 92.469      | 11.5            | 834.795     | 0.100            |
| MeaMedia  | 1.420        | 5.846    | 103.012     | 12.4            | 853.760     | 0.103            |
| Std. Dev. | 0.055        | 0.143    | 30.382      | 3.5             | 201.734     | 0.017            |

### Test Inputs:

| Name                | Value  | Units  |
|---------------------|--------|--------|
| Humidity            | 50     | %      |
| Temperature         | 25     | *C     |
| Speed               | 0.5    | mm/min |
| Nominal Gage Length | 25.000 | Mm     |

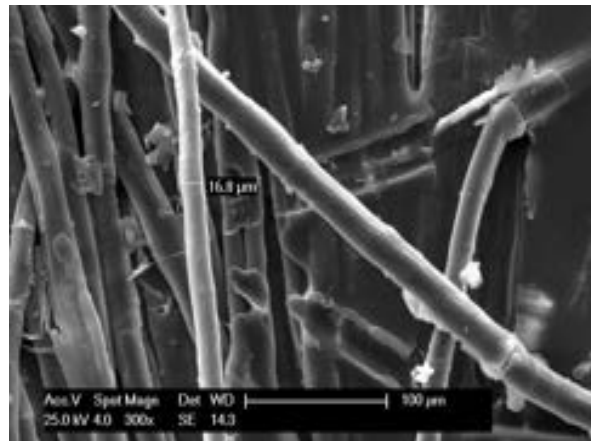
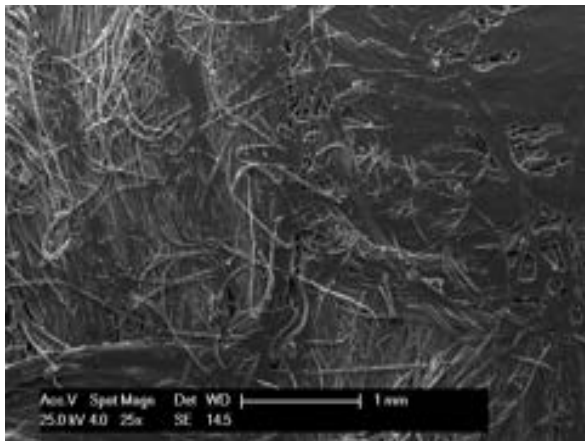


In tutti i campioni analizzati è stato evidenziato un basso valore del modulo (MPa) così come del Peak Stress (MPa) ad indicare una scarsa adesione tra la fibra e la matrice costituitasi durante il processo di stampaggio. Il lino non produce un rinforzo nella matrice di PLA in queste condizioni di processo. Anche le osservazioni SEM riportate di seguito sulla sezione del laminato di questi campioni confermano la scarsa adesione fibra-matrice.

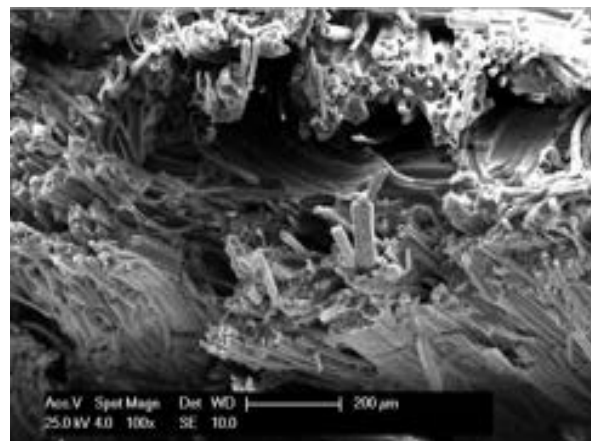
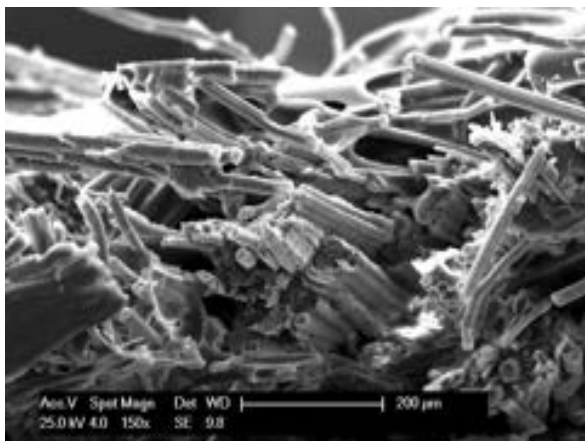
## Caratterizzazione microstrutturale (SEM) dei laminati A, B, C

Le osservazioni sono state effettuate con un Microscopio elettronico a Scansione (SEM) Philips XL 40 ad emissione termoionica con filamento in esaboruro di lantanio (LaB6), avente una risoluzione spaziale di 3 nm a 30 kV (10 nm a 3 kV) e tensione di accelerazione compresa fra 0.2 kV e 30 kV.

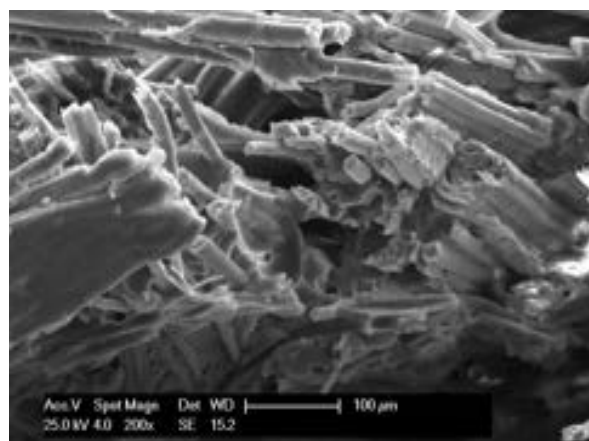
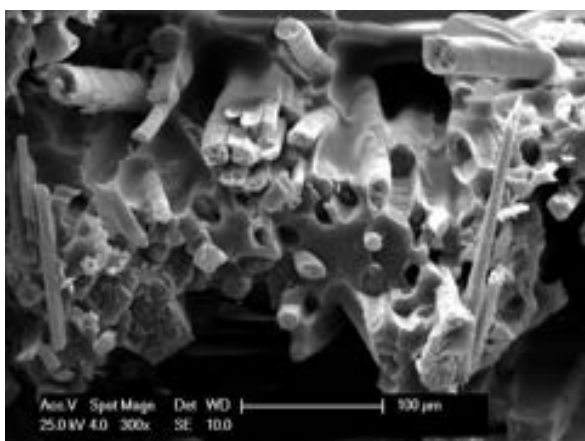
Considerata la tipologia dei campioni, i campioni prima di essere osservati sono stati ricoperti con un coating di oro della spessore di 20 nm tramite sputtering. Le osservazioni sono state condotte sia sulla superficie del campione (plan), sia su una sezione di frattura (effettuata in azoto liquido) per studiare l'impregnazione e l'adesione della fibra nella matrice. Le immagini SEM effettuate evidenziano di fatto la scarsa adesione tra la matrice di PLA e le fibre di lino.



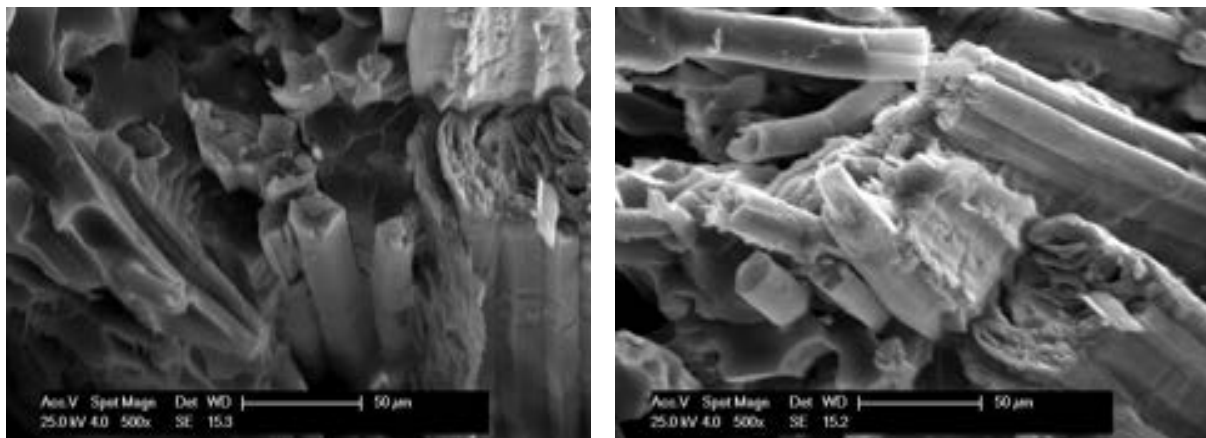
*Immagini SEM del campione A (FLAXPLAT180P50t20S4) planare*



*Immagini SEM del campione A (FLAXPLAT180P50t20S4) in sezione*



*Immagini SEM del campione B (FLAXPLAT180P50t20S4) in sezione*



*Immagini SEM del campione C FLAXPLAT180P50t20S4 in sezione*

I risultati delle caratterizzazioni meccaniche e delle osservazioni al SEM sui laminati prodotti, suggeriscono quindi una scarsa adesione tra la fibra e la matrice. I bassi valori del modulo elastico e della resistenza massima sono imputabili probabilmente alla degradazione termica della matrice conseguente alle elevate temperature di processo adottate. Inoltre si è osservato in fase di laminazione, a causa delle elevate pressioni impiegate, la fuoriuscita della matrice polimerica fusa verso la parte esterna dello stampo. Questo ha causato un impoverimento della componente polimerica legante nel composito. Quindi al fine di migliorare le caratteristiche meccaniche del laminato si è scelto di variare i parametri di processo di laminazione sperimentando temperature e pressioni più basse. Il set dei parametri utilizzati insieme alla nomenclatura dei laminati realizzati è riportato nella tabella seguente.

| NOME CAMPIONE                | MATERIALE          | STRATI | PRESSIONE (bar) | TEMPERATURA (°C) | TEMPO (min) |
|------------------------------|--------------------|--------|-----------------|------------------|-------------|
| FLAXPLAT140P30t20S4          | BIOTEX HOPSACK 4x4 | 4      | 30              | 140              | 20          |
| FLAXPLAT160P50t20S4          | BIOTEX HOPSACK 4x4 | 4      | 50              | 160              | 20          |
| FLAXPLAT180P50t10S4 <b>D</b> | BIOTEX HOPSACK 4x4 | 4      | 50              | 180              | 10          |
| FLAXPLAT160P50t10S4          | BIOTEX HOPSACK 4x4 | 4      | 50              | 160              | 10          |
| FLAXPLAT160P70t10S4 <b>E</b> | BIOTEX HOPSACK 4x4 | 4      | 70              | 160              | 10          |
| FLAXPLAT180P30t20S4 <b>F</b> | BIOTEX HOPSACK 4x4 | 4      | 30              | 180              | 20          |

I campioni D, E, F sono stati sottoposti alle prove di trazione mentre i restanti laminati non stati testati meccanicamente perché, per le condizioni di processo utilizzate, gli strati di tessuto non si sono compattati come è evidente nella foto riportata sotto.



*esempio di campione non compattato*

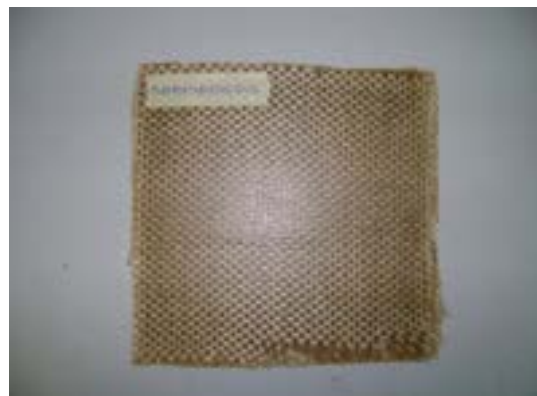
Inoltre, per approfondire e rilevare eventuali differenze delle caratteristiche meccaniche del laminato (trama ed ordito) si è scelto di effettuare la campionatura dei provini ritagliando i campioni nelle due direzioni longitudinale e trasversale ( $0^\circ$ - $90^\circ$ ) del laminato.



*Campione FLAXPLAT180P50t10S4 (D)*



*Campione FLAXPLAT160P70t10S4 (E)*



*Campione FLAXPLAT180P30t20S4 (F)*

## Caratterizzazione meccanica dei laminati D, E, F

### FLAXPLAT180P50t10s4\_0 (D)

Method: ENEA ASTM D 638 M two speed Extens-Crossh SI.msm

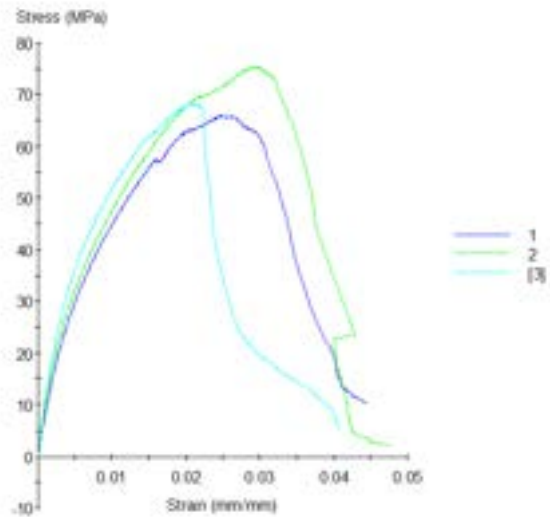
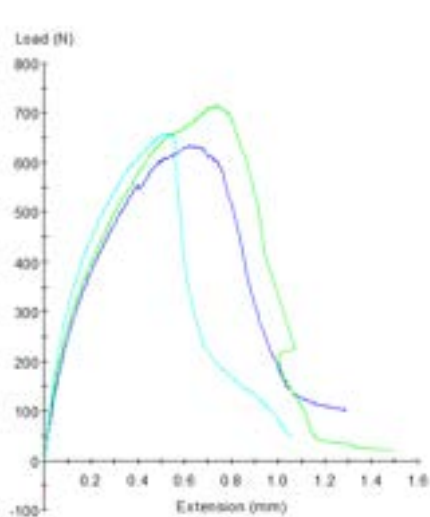
#### Sample Results:

##### Specimen Results:

| Specimen # | Larghezza<br>mm | Spessore<br>mm | Carico<br>massimo<br>N | Stress (max)<br>MPa | Modulo<br>elastico<br>MPa | Chord Modulus<br>Strain 1 - 2<br>MPa |
|------------|-----------------|----------------|------------------------|---------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| D1_0 (1)   | 5.7200          | 1.6840         | 635.11                 | 65.9                | 7932.4                    | 6993.6                               |
| D2_0 (2)   | 5.7990          | 1.6340         | 714.96                 | 75.5                | 9266.9                    | 7833.8                               |
| D3_0 (3)   | 5.7800          | 1.6700         | 660.38                 | 68.4                | 10776.8                   | 8766.9                               |
| MeaMedia   | 5.7663          | 1.6627         | 670.15                 | 69.9                | 9325.3                    | 7864.8                               |
| Std. Dev.  | 0.0412          | 0.0258         | 40.81                  | 4.9                 | 1423.1                    | 887.1                                |

#### Test Inputs:

| Name          | Value | Units  |
|---------------|-------|--------|
| v             | 0.5   | mm/min |
| Grip distance | 65    | mm     |
| Gage length   | 25    | mm     |



FLAXPLAT180P50t10s4\_90 (D)

Method: ENEA ASTM D 638 M two speed Extens-Crossh SI.msm

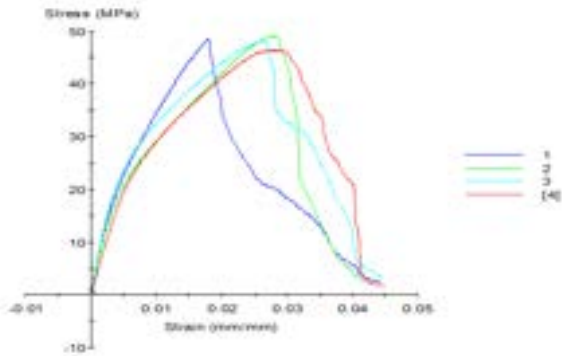
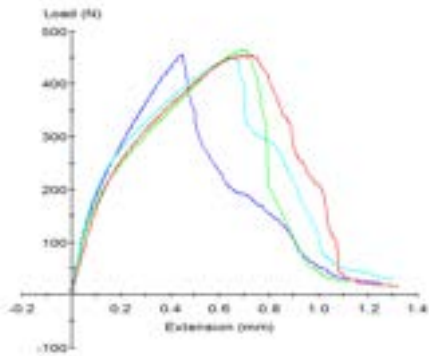
Sample Results:

Specimen Results:

| Specimen # | Larghezza<br>mm | Spessore<br>mm | Carico<br>massimo<br>N | Stress (max)<br>MPa | Modulo<br>elastico<br>MPa | Chord<br>Modulus Strain<br>1 - 2<br>MPa |
|------------|-----------------|----------------|------------------------|---------------------|---------------------------|-----------------------------------------|
| D4_90 (1)  | 5.6220          | 1.6740         | 456.04                 | 48.5                | 6919.6                    | 7030.8                                  |
| 2D5_90 (2) | 5.6520          | 1.6730         | 465.15                 | 49.2                | 5965.7                    | 5128.1                                  |
| D6_90 (3)  | 5.6330          | 1.6560         | 449.27                 | 48.2                | 7142.6                    | 5855.1                                  |
| D7_90 (4)  | 5.6880          | 1.7180         | 454.45                 | 46.5                | 4490.8                    | 4299.3                                  |
| MeaMedia   | 5.6488          | 1.6802         | 456.23                 | 48.1                | 6129.7                    | 5578.3                                  |
| Std. Dev.  | 0.0290          | 0.0265         | 6.61                   | 1.1                 | 1205.9                    | 1158.3                                  |

Test Inputs:

| Name          | Value | Units  |
|---------------|-------|--------|
| v             | 0.5   | mm/min |
| Grip distance | 65    | mm     |
| Gage length   | 25    | mm     |



## FLAPLATT160P70t10s4\_0 (E)

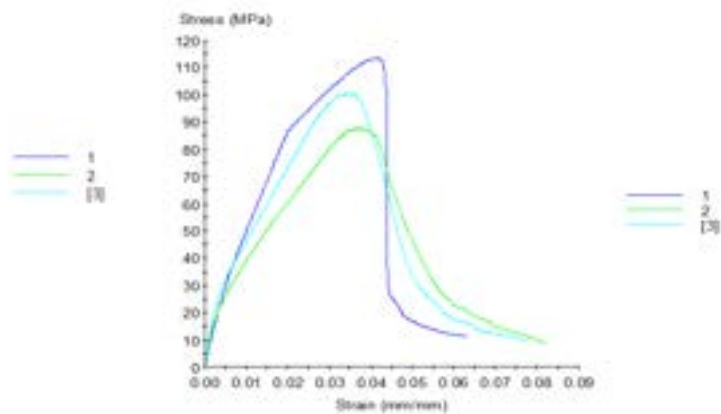
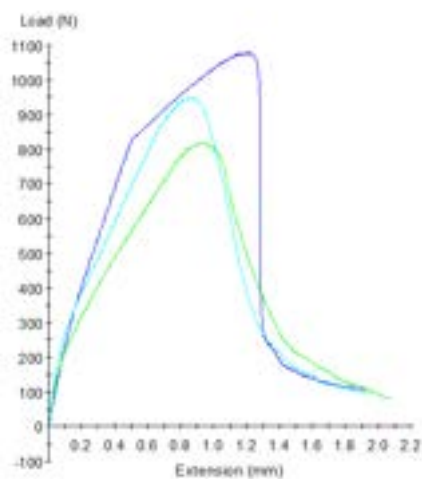
Method: ENEA ASTM D 638 M two speed Extens-Crossh SI.msm

### Specimen Results:

| Specimen # | Larghezza<br>mm | Spessore<br>mm | Carico massimo<br>N | Stress (max)<br>MPa | Modulo (Young)<br>MPa | Chord Modulus<br>Strain 1 - 2<br>MPa |
|------------|-----------------|----------------|---------------------|---------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| E1_0 (1)   | 5.8490          | 1.6250         | 1079.60             | 113.6               | 6278.2                | 6559.4                               |
| E2_0 (2)   | 5.7940          | 1.6070         | 819.29              | 88.0                | 7322.2                | 6851.1                               |
| E3_0 (3)   | 5.8560          | 1.6110         | 949.37              | 100.6               | 9013.0                | 8306.7                               |
| MeaMedia   | 5.8330          | 1.6143         | 949.42              | 100.7               | 7537.8                | 7239.1                               |
| Std. Dev.  | 0.0340          | 0.0095         | 130.15              | 12.8                | 1380.1                | 936.0                                |

### Test Inputs:

| Name          | Value | Units  |
|---------------|-------|--------|
| V             | 0.5   | mm/min |
| Grip distance | 65    | mm     |
| Gage length   | 25    | mm     |



FLAXPLAT160P70t10s4\_90 (E)

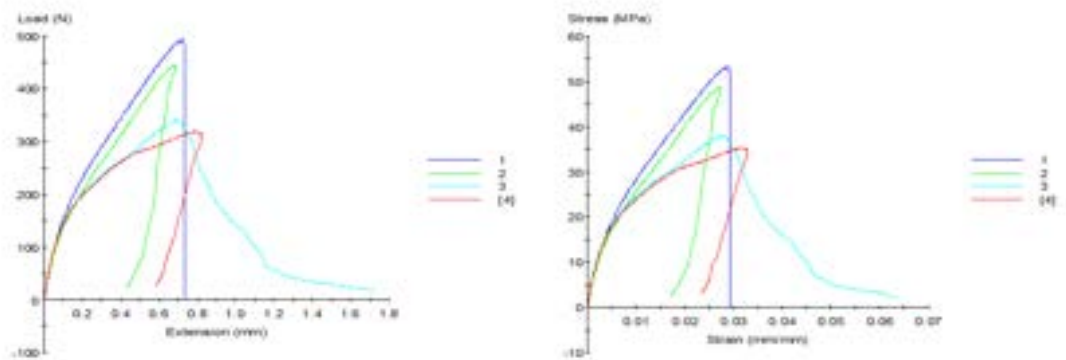
Method: ENEA ASTM D 638 M two speed Extens-Crossh SI.msm

Specimen Results:

| Specimen # | Comment o | Larghezza Mm | Spessore mm | Carico massimo N | Stress (max) MPa | Modulo (Young) MPa | Chord Modulus Strain 1 - 2 MPa |
|------------|-----------|--------------|-------------|------------------|------------------|--------------------|--------------------------------|
| E4_90 (1)  |           | 5.7040       | 1.6230      | 493.21           | 53.3             | 5129.1             | 4641.4                         |
| E5_90 (2)  | FTU       | 5.7330       | 1.5940      | 445.69           | 48.8             | 4957.5             | 4220.1                         |
| E6_90 (3)  |           | 5.6560       | 1.5840      | 341.24           | 38.1             | 6009.5             | 4469.5                         |
| E7_90 (4)  | FTU       | 5.6400       | 1.6040      | 320.07           | 35.4             | 5954.4             | 4422.3                         |
| MeaMedia   |           | 5.6832       | 1.6012      | 400.05           | 43.9             | 5512.6             | 4438.3                         |
| Std. Dev.  |           | 0.0429       | 0.0166      | 82.90            | 8.5              | 546.9              | 173.3                          |

Test Inputs:

| Name          | Value | Units  |
|---------------|-------|--------|
| V             | 0.5   | mm/min |
| Grip distance | 65    | mm     |
| Gage length   | 25    | mm     |



## FLAXPLAT180P30t20s4\_0 (F)

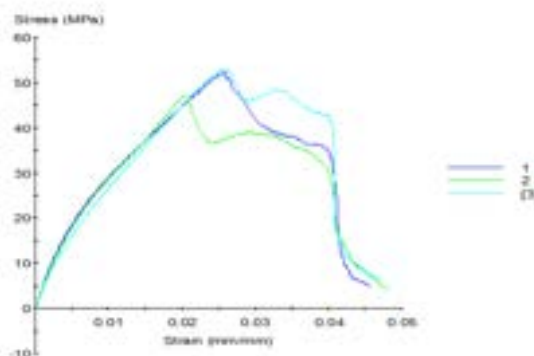
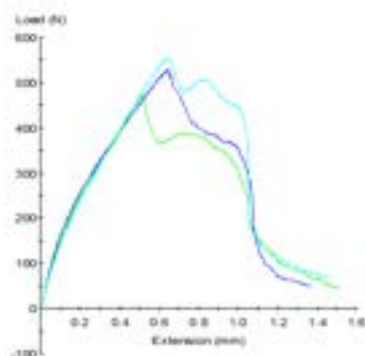
Method: ENEA ASTM D 638 M two speed Extens-Crossh Sl.msm

### Specimen Results:

| Specimen # | Larghezza<br>mm | Spessore<br>mm | Carico massimo<br>N | Stress (max)<br>MPa | Modulo elastico<br>MPa | Chord Modulus<br>Strain 1 - 2<br>MPa |
|------------|-----------------|----------------|---------------------|---------------------|------------------------|--------------------------------------|
| F1_0 (1)   | 5.7340          | 1.7630         | 527.14              | 52.1                | 4630.4                 | 4342.9                               |
| F2_0 (2)   | 5.7330          | 1.7380         | 471.06              | 47.3                | 4418.3                 | 4077.0                               |
| F3_0 (3)   | 5.7300          | 1.8260         | 553.82              | 52.9                | 3865.3                 | 3772.9                               |
| MeaMedia   | 5.7323          | 1.7757         | 517.34              | 50.8                | 4304.7                 | 4064.3                               |
| Std. Dev.  | 0.0021          | 0.0453         | 42.24               | 3.1                 | 395.0                  | 285.2                                |

### Test Inputs:

| Name          | Value | Units  |
|---------------|-------|--------|
| V             | 0.5   | mm/min |
| Grip distance | 65    | mm     |
| Gage length   | 25    | mm     |



# FLAXPLAT180P30t20s4\_90 (F)

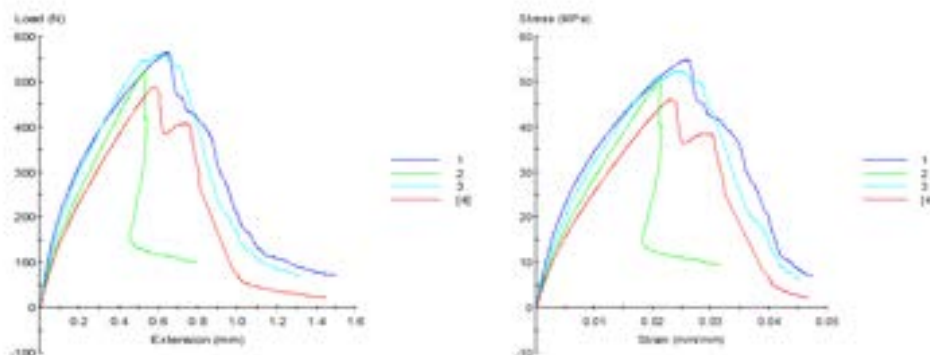
Method: ENEA ASTM D 638 M two speed Extens-Crossh Sl.msm

## Specimen Results:

| Specimen # | Larghezza<br>mm | Spessore<br>Mm | Commento                | Carico<br>massimo<br>N | Stress (max)<br>MPa | Modulo<br>elastico<br>MPa | Chord<br>Modulus<br>Strain 1 - 2<br>MPa |
|------------|-----------------|----------------|-------------------------|------------------------|---------------------|---------------------------|-----------------------------------------|
| F4_90 (1)  | 5.7770          | 1.7800         |                         | 563.89                 | 54.8                | 6336.2                    | 5437.9                                  |
| F5_90 (2)  | 5.7610          | 1.8170         | sul bordo<br>della g.l. | 524.98                 | 50.2                | 4347.0                    | 4132.9                                  |
| F6_90 (3)  | 5.8030          | 1.8500         |                         | 561.40                 | 52.3                | 5122.4                    | 4707.6                                  |
| F7_90 (4)  | 5.7690          | 1.8360         |                         | 488.95                 | 46.2                | 3800.4                    | 3657.6                                  |
| MeaMedia   | 5.7775          | 1.8208         |                         | 534.80                 | 50.9                | 4901.5                    | 4484.0                                  |
| Std. Dev.  | 0.0182          | 0.0303         |                         | 35.36                  | 3.7                 | 1099.6                    | 767.3                                   |

## Test Inputs:

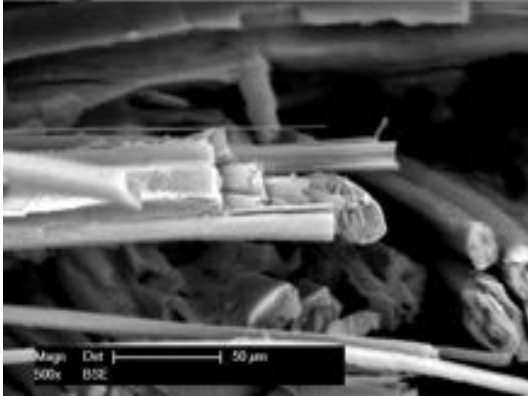
| Name          | Value | Units  |
|---------------|-------|--------|
| V             | 0.5   | mm/min |
| Grip distance | 65    | mm     |
| Gage length   | 25    | mm     |



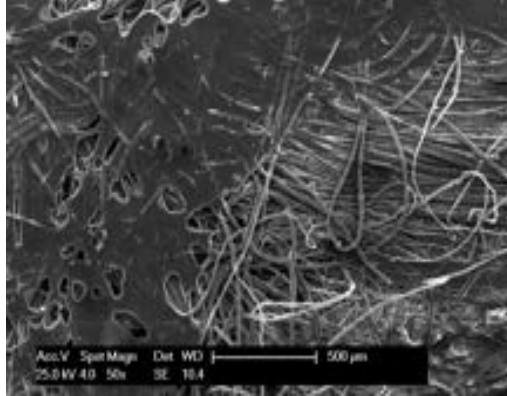
I risultati dei test meccanici di questi campioni evidenziano un valore molto più alto dei moduli , così come anche dei valori di Stress max. rispetto al primo lotto di campioni analizzati.

Questo indica una migliore adesione fibra matrice ottenuta secondo questi parametri di processo di stampaggio. Per lo stesso campione si evidenzia una dipendenza del valore del modulo dalla direzione di campionatura (0°, 90°). Ulteriori approfondimenti saranno effettuati in questo senso.

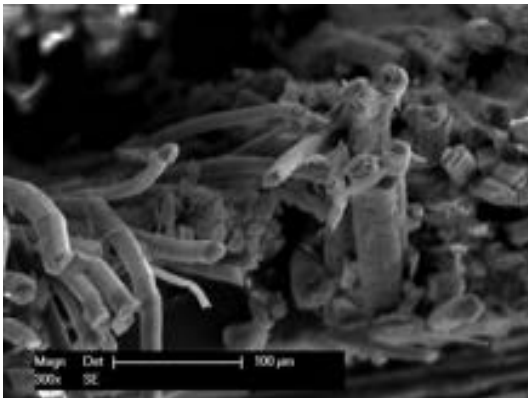
## Caratterizzazione microstrutturale (SEM) dei laminati D, E, F



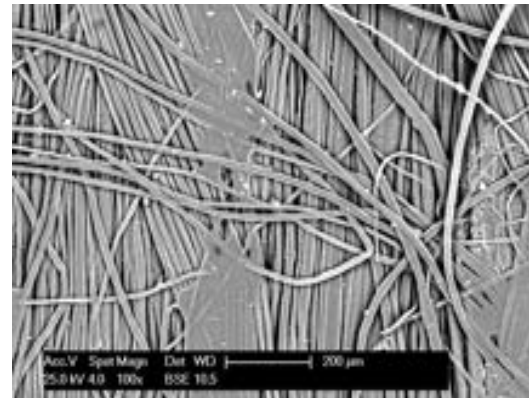
Immagini SEM del campione D in sezione



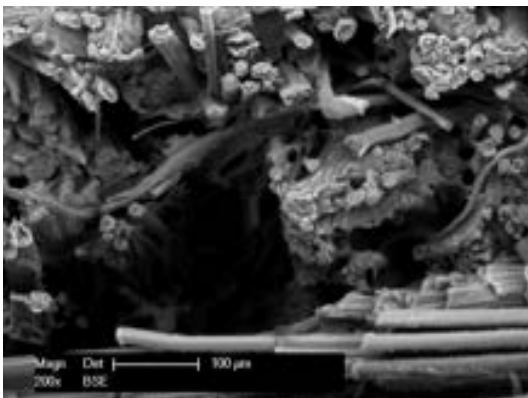
Immagini SEM del campione D in piano



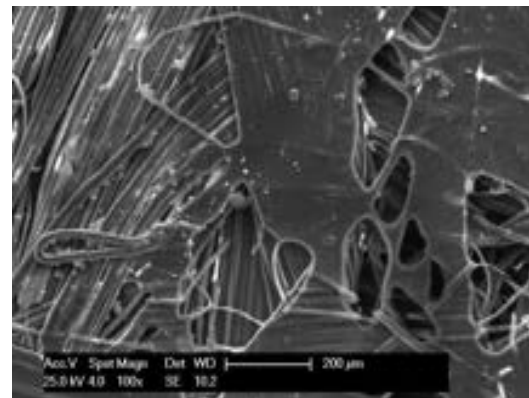
Immagini SEM del campione E in sezione



Immagini SEM del campione E in piano



Immagini SEM del campione F in sezione



Immagini SEM del campione F in piano

## Conclusioni

La tabella seguente riporta i valori medi della resistenza massima e del modulo elastico calcolato per tutti i laminati realizzati. E' evidente una significativa dipendenza dalle condizioni di processo adottate. In particolare il campione D (0) esibisce un modulo quasi triplo rispetto a quello del PLA assunto come riferimento e costituente la matrice. Il valore del carico massimo è invece massimizzato per il campione E (0). Sono in corso ulteriori approfondimenti per spiegare la dipendenza delle caratteristiche dalla direzione di campionamento. A conclusione del lavoro svolto fin ora si può dire che i laminati identificati con D, E, ed F possiedono caratteristiche meccaniche tali da renderli idonei ad essere utilizzati per la fabbricazione ,eventualmente anche mediante termoformatura, di componenti strutturali e di rivestimento nel settore dei trasporti completamente biodegradabili.

| NOME CAMPIONE                   | Peak Stress<br>MPa (Media) | Modulus<br>MPa (Media) |
|---------------------------------|----------------------------|------------------------|
| PLA                             | ~ 48-53                    | ~ 3400-400             |
| FLAXPLAT180P50t20S4 <b>A</b>    | 22.5                       | 3598.313               |
| FLAXPLAT180P70t20S4 <b>B</b>    | 28.5                       | 1905.236               |
| FLAXPLAT180P100t20S4 <b>C</b>   | 12.4                       | 853.760                |
| FLAXPLAT180P50t10S4 <b>D_0</b>  | 69.9                       | 9325.3                 |
| FLAXPLAT180P50t10S4 <b>D_90</b> | 48.1                       | 6129.7                 |
| FLAXPLAT160P70t10S4 <b>E_0</b>  | 100.7                      | 7537.8                 |
| FLAXPLAT160P70t10S4 <b>E_90</b> | 43.9                       | 5512.6                 |
| FLAXPLAT180P30t20S4 <b>F_0</b>  | 50.8                       | 4304.7                 |
| FLAXPLAT180P30t20S4 <b>F_90</b> | 50.9                       | 4901.5                 |

## Riferimenti bibliografici

I riferimenti bibliografici devono essere richiamati nel testo con numeri progressivi tra parentesi quadre e riportati a fine testo con il seguente formato:

1. [www.Compositesevolution.com](http://www.Compositesevolution.com) Biotex Datasheet PLA e PP

## Abbreviazioni ed acronimi

PLA - Acido polilattico polimero