

# Analisi di riciclabilità del composito a base di Polipropilene e Fibra di Cellulosa per componenti impiegati nel settore automotive

Il settore automobilistico è vincolato da direttive europee [1], che richiedono il riciclo o il recupero di percentuali sempre maggiori di materia prima. Al fine di abbattere le emissioni di CO<sub>2</sub>, l'UE ha fissato l'obiettivo di ridurre le emissioni di gas serra almeno del 55% al di sotto dei livelli del 1990 entro il 2030 [2].

Il progetto LIFE BIOBCOMPO mira a limitare l'impatto ambientale dei nuovi veicoli attraverso compositi termoplastici a bassa densità, derivati da risorse rinnovabili.

Gli obiettivi principali del progetto sono:

- utilizzo di materiali termoplastici a bassa densità: risparmio di peso e riduzione proporzionale delle emissioni di CO<sub>2</sub>
- sostituzione delle fibre minerali

convenzionali con fibre BIO, conseguente utilizzo di risorse più sostenibili e biodegradabili

- dimostrazione di nuove tecnologie su scala industriale.

Il biocomposito più promettente sviluppato è una matrice in polipropilene (PP) rinforzata con fibre naturali (fibre di cellulosa, CF).

L'impatto del processo di riciclo su questi materiali è attualmente in fase di studio, ma in generale risulta una significativa diminuzione della viscosità polimerica e dell'allungamento a rottura dopo 4 cicli di stampaggio [6].

In questo lavoro è stato definito e monitorato un processo di riciclo del PP ed è stata realizzata una campagna di test dopo ogni fase di riciclo, con l'obiettivo di valutare:

- proprietà termiche: DSC e TGA

- proprietà reologiche
- proprietà meccaniche:
  - prova di resistenza alla trazione
  - prova di resistenza alla flessione
  - test di valutazione dello smorzamento
  - test di resistenza all'urto Izod
  - test di valutazione della temperatura Vicat
  - indice di fluidità.

Sono state analizzate due diverse formulazioni:

- PP-23CF-HOMO: Matrice in PP e 23% di rinforzi in CF.
- PP-20CF-10T-HOMO: Matrice in PP, 20% di rinforzi in CF e 10% di rinforzo con particelle di talco (T).

In diverse fasi di riciclo:

- Step 0, materiale vergine
- Step 1, Step 2, Step 3, con il 100% di PP riciclato una, due e tre volte.

PP-23CF-HOMO	Tm [°C]	Tc [°C]	Hm [J/g]	Hr [J/g]
Step 0	165,00	128,25	67,40	65,71
Step 1	164,73	128,95	65,59	65,54
Step 2	164,95	128,78	66,76	66,37
Step 3	165,37	128,75	66,75	66,01

Tab 1: Parametri termici di analisi di DSC (PP-23CF-HOMO)

PP-20CF-10T-HOMO	Tm [°C]	Tc [°C]	Hm [J/g]	Hr [J/g]
Step 0	164,92	131,55	62,86	68,00
Step 1	164,73	132,95	64,55	67,49
Step 2	164,63	133,80	69,96	63,29
Step 3	164,12	134,58	66,64	63,56

Tab 2: Parametri termici di analisi di DSC (PP-20CF-10T-HOMO)

PP-23CF-HOMO	Tonset [°C]	Twl 10% [°C]	Twl 50%	Twmax CF	Txmax PP	Residue [%]
Step 0	303,49	306,42	352,92	351,64	381,72	2,800
Step 1	333,42	348,57	464,54	354,40	468,69	4,935
Step 2	333,42	348,57	464,54	354,40	468,69	4,935
Step 3	464,54	354,40	468,69	4,935	464,54	354,40

Tab 3: Analisi TGA Temperature critiche (PP-23CF-HOMO)

PP-20CF-10T-HOMO	Tonset [°C]	Twl 10% [°C]	Twl 50%	Twmax CF	Txmax PP	Residue [%]
Step 0	311,78	310,97	367,60	349,89	388,88	11,30
Step 1	333,61	351,14	468,92	354,44	473,41	13,70
Step 2	333,61	351,14	468,92	354,44	473,41	13,70
Step 3	333,61	351,14	468,92	354,44	473,41	13,70

Tab 4: Analisi TGA Temperature critiche (PP-20CF-10T-HOMO)

## CALORIMETRIA DIFFERENZIALE A SCANSIONE

Sui campioni è stato eseguito un ciclo di riscaldamento, raffreddamento e riscaldamento, il tutto a 10°C/min. Per ogni fase di riciclo sono stati valutati:

- Temperatura di Fusione ( $T_m$ )
- Temperatura di Cristallizzazione ( $T_c$ )
- Entalpia di Fusione ( $H_m$ )
- Entalpia di Cristallizzazione ( $H_c$ ).

Tutti i parametri analizzati non variano significativamente durante il processo di riciclo, eccetto un piccolo aumento ( $\approx 3^\circ\text{C}$ ) della temperatura di cristallizzazione di PP-20CF-10T-HOMO.

Inoltre, confrontando le due diverse formulazioni, si osserva una  $T_c$  maggiore per quella contenente percentuale di talco.

## ANALISI TERMOGRAVIMETRICA

Attraverso l'analisi TGA sono state valutate:

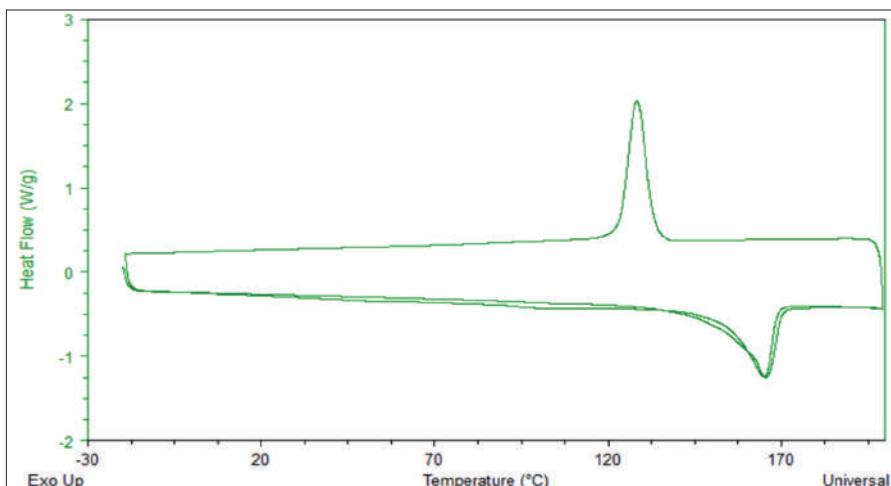
- temperatura di inizio (Tonset)
- temperatura con il 10% del degrado del materiale ( $T_{w1} 10\%$ )
- temperatura con il 50% del degrado del materiale ( $T_{w1} 50\%$ )
- temperatura di massima velocità di degradazione delle fibre cellulosiche ( $T_{vmax} CF$ )
- temperatura di massima velocità di degradazione del polipropilene ( $T_{vmax} PP$ ).

Come osservato, il materiale è soggetto a due principali perdite di peso distinte, identificate dai picchi della curva della prima derivata: la prima corrisponde alla degradazione della cellulosa, mentre la seconda si verifica quando il polipropilene volatilizza.

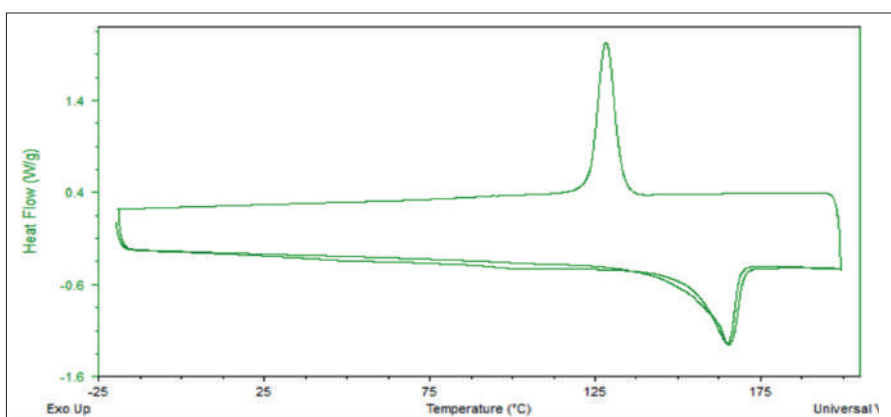
Le velocità di degradazione e le temperature sono le stesse per tutte le fasi di riciclo, ad eccezione dello step 0, dove le temperature di degradazione della cellulosa e del polipropilene sono rispettivamente di circa  $5^\circ\text{C}$  e  $85^\circ\text{C}$  inferiori alle altre.

Le formulazioni PP-20CF-10T-HOMO mostrano lo stesso andamento: la massima degradazione per la cellulosa si verifica a  $352^\circ\text{C}$  dopo lo step 0 e a  $354^\circ\text{C}$  per tutti gli step riciclati.

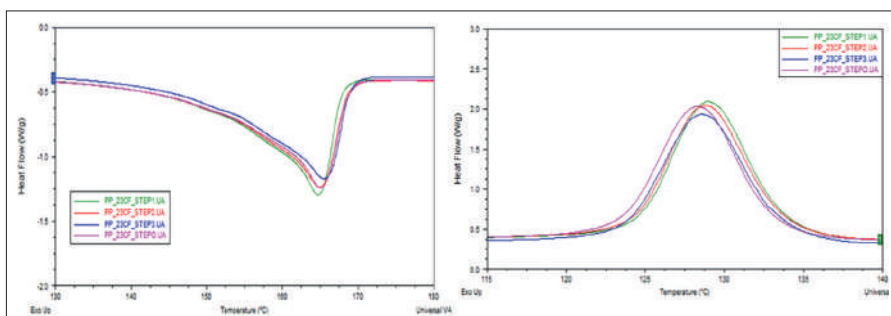
Per il PP, questa avviene a  $382^\circ\text{C}$  dopo lo step 0 e a  $469^\circ\text{C}$  per tutti gli altri step, pesi residui di tutte le formula-



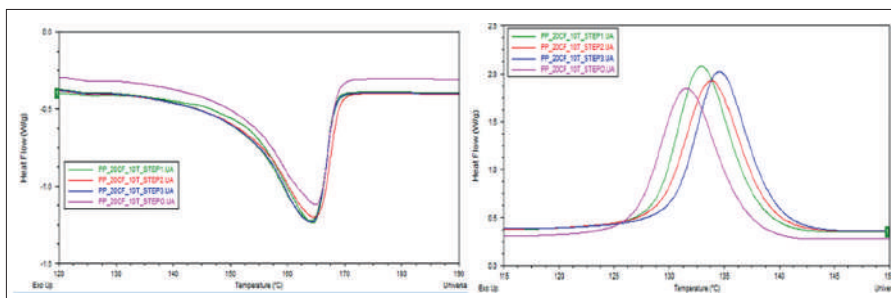
**Fig.1: Ciclo termico completo di analisi DSC eseguito sulla composizione del materiale vergine PP-23CF-HOMO (step 0)**



**Fig.2: Ciclo termico completo di analisi DSC eseguito sulla composizione del materiale vergine PP-20CF-10T-HOMO (step 0)**



**Fig.3: Confronto delle curve DSC nelle diverse fasi di riciclaggio PP-23CF-HOMO [(a) picco di fusione (b) picco di cristallizzazione]**



**Fig.4: Confronto delle curve DSC nelle diverse fasi di riciclaggio PP-20CF-10T-HOMO [(a) picco di fusione (b) picco di cristallizzazione]**

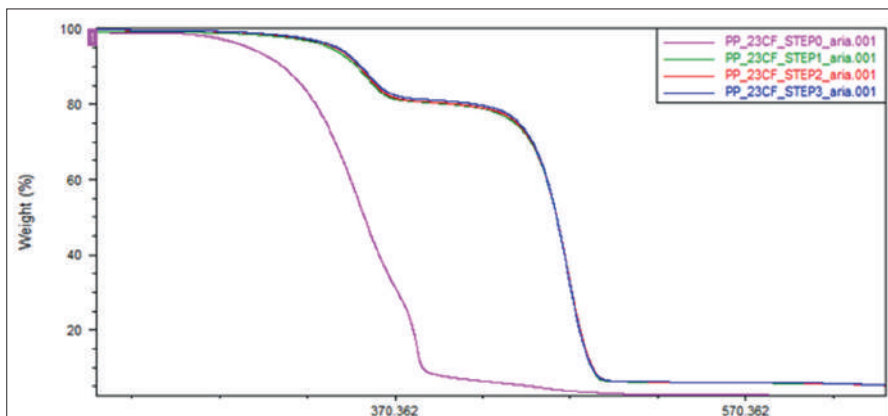


Fig.5: Confronto delle curve TGA di diverse fasi di riciclaggio PP-23CF-HOMO

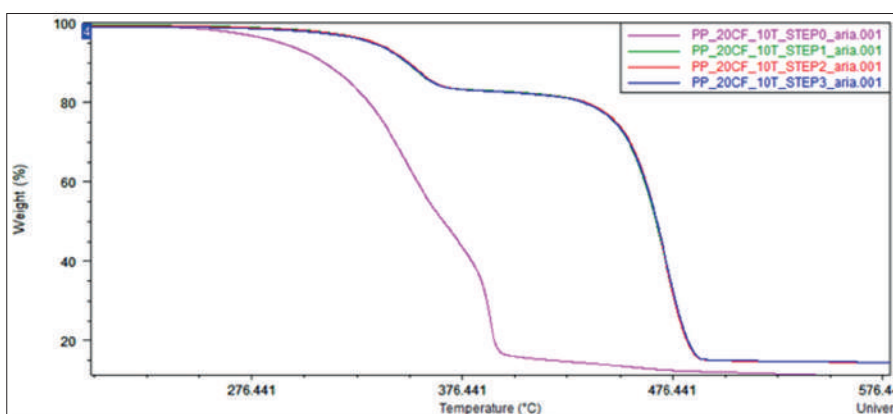


Fig.6: Confronto delle curve TGA di diverse fasi di riciclaggio PP-20CF-10T-HOMO

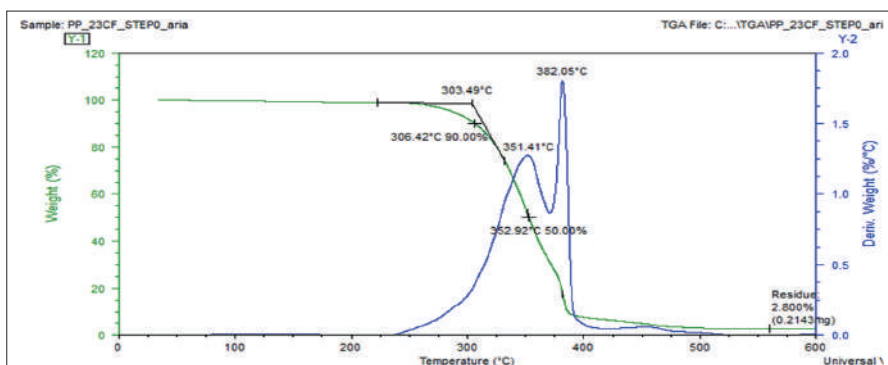


Fig.7: Curve TGA (in verde) e loro prima derivata (in blu) per PP-23CF-HOMO fasi di riciclaggio 0 e 1

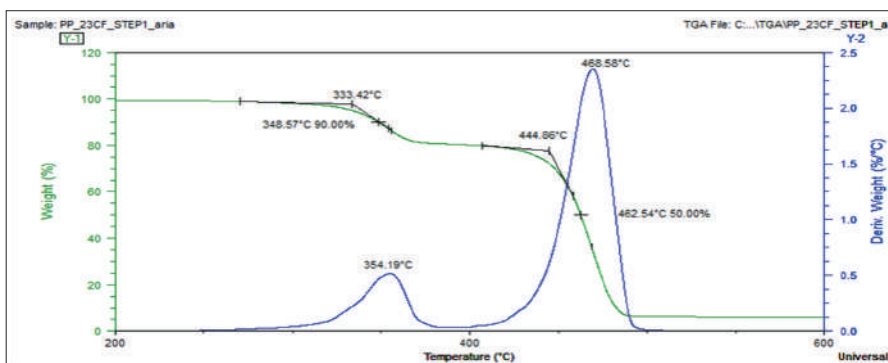


Fig.8: Curve TGA (in verde) e loro prima derivata (in blu) per PP-23CF-HOMO fasi di riciclaggio 0 e 1

zioni corrispondono alla percentuale di talco, che volatilizza a temperature superiori a 600°C.

Si nota, inoltre, che il talco non modifica le proprietà termiche: il degrado delle due formulazioni ha lo stesso andamento a diverse fasi di riciclo.

### PROVA DI RESISTENZA ALLA TRAZIONE

Attraverso le prove di trazione, in accordo alla ISO 527-2-1A, sono stati valutati:

- modulo di Young, E
- rapporto di Poisson,  $\nu$
- tensione di snervamento,  $\sigma_y$
- tensione di rottura,  $\sigma_r$
- deformazione a snervamento,  $\epsilon_y$
- allungamento a rottura,  $\epsilon_r$ .

Si può osservare un aumento ( $\approx 7,5\%$ ) del valore di rigidità di PP-20CF-10T-HOMO (modulo di Young) e una riduzione della tensione di rottura del 2,9% (e della deformazione, 28,7%) tra la prima e l'ultima fase di riciclo. Anche per PP-23CF-HOMO si può rilevare una diminuzione della tensione di rottura ( $\approx 10,2\%$ ) e della deformazione corrispondente ( $\approx 22,3\%$ ) ma, a differenza dell'altra formulazione analizzata, il modulo di Young diminuisce ( $\approx 3,7\%$ ).

La differenza sostanziale nel comportamento meccanico delle due formulazioni messe a confronto è data dalla presenza del talco: PP-20CF-10T-HOMO ha una resistenza a trazione maggiore rispetto a PP-23CF-HOMO, ma è meno deformabile. Le prove di flessione mostrano risultati completamente allineati con quelli appena osservati:

- PP-23CF-HOMO: diminuzione della resistenza alla flessione ( $\approx 10\%$ ), della deformazione massima ( $\approx 5,8\%$ ) e del modulo di flessione ( $\approx 8,5\%$ )
- PP-20CF-10T-HOMO: diminuzione della resistenza a flessione ( $\approx 3,2\%$ ) e della deformazione massima ( $\approx 9,4\%$ ); aumento del modulo di flessione ( $\approx 3\%$ , step 2).

### TEST DI VALUTAZIONE DELLO SMORZAMENTO

I test di valutazione dello smorzamento sono stati eseguiti secondo ASTM E756.

Per ciascuna formulazione e per ciascuno dei quattro intervalli di frequenza analizzati, sono stati misurati cinque diversi valori di Loss Factor ( $\eta$ ) e Damping Ratio ( $\zeta$ ). In entrambi i casi il processo di riciclo non influisce sulle proprietà di smorzamento: nello spettro di frequenza analizzato i valori massimi di Loss Factor e Damping Ratio sono intorno ai 1000 Hz, ad eccezione della fase di riciclo 1, dove tali valori massimi si verificano a 2000 Hz.

## PROVA DI RESISTENZA ALL'URTO IZOD

I test di resistenza all'impatto Izod sono stati eseguiti secondo la norma ISO 180 B. Il processo di riciclo influisce sulla resilienza di entrambi i materiali in modo simile:

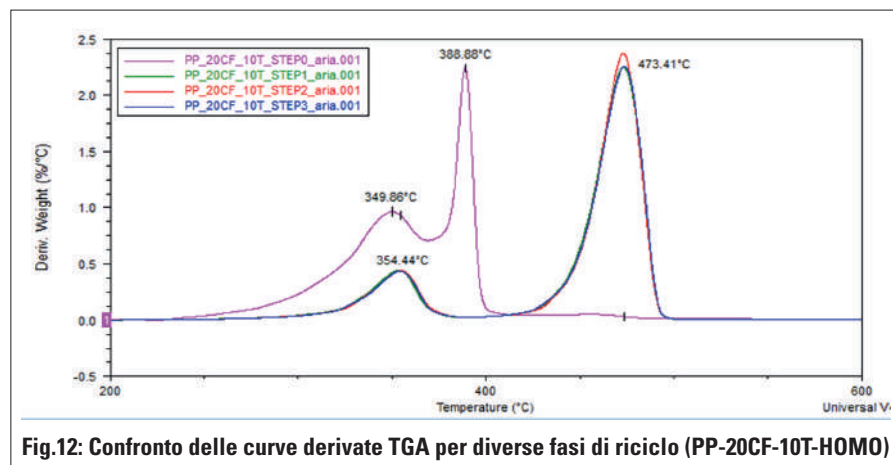
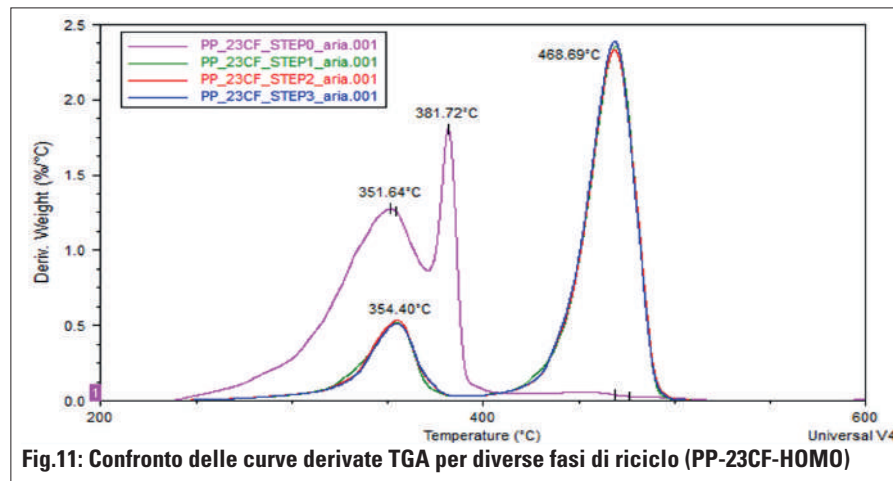
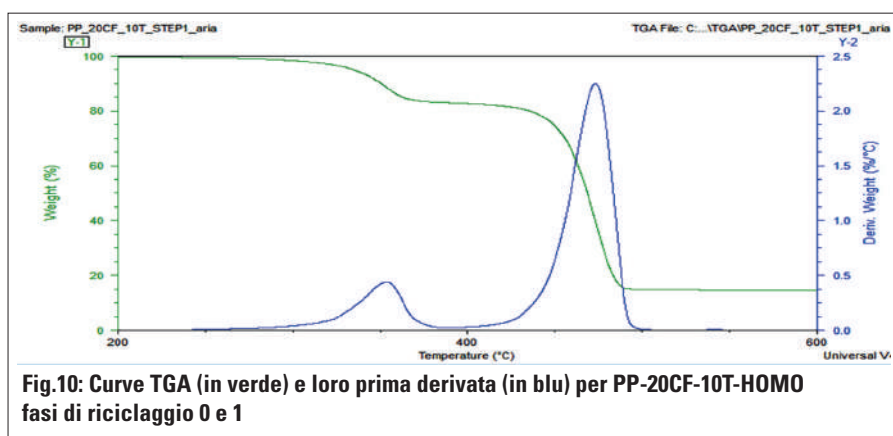
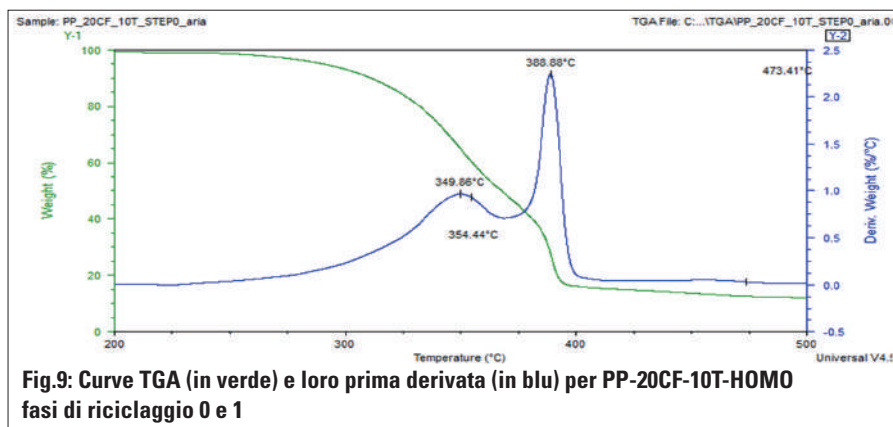
- PP-23CF-HOMO Izod Impact Strength va da un massimo di 4,14 kJ/m<sup>2</sup> (step 0) ad un minimo di 3,79 kJ/m<sup>2</sup> (step 2), con una diminuzione di  $\approx 9,5\%$
- PP-20CF-10T-HOMO Izod Impact Strength va da un massimo di 3,78 kJ/m<sup>2</sup> (step 0) ad un minimo di 3,53 kJ/m<sup>2</sup> (step 3), con una diminuzione di  $\approx 10,5\%$ .

## TEST DI VALUTAZIONE DELLA TEMPERATURA VICAT

Le temperature di rammollimento Vicat sono state determinate secondo ISO 306, applicando un carico di 5 daN. I risultati mostrano che PP-20CF-10T-HOMO ha una temperatura di rammollimento molto più alta rispetto a PP-23CF-HOMO. Inoltre, la presenza di talco mitiga il calo della temperatura di rammollimento (circa 1,7% per PP-20CF-10T-HOMO e 2,9% per PP-23CF-HOMO), causato dalle fasi di riciclo.

## INDICE DI FLUIDITÀ MFI

Le misurazioni del Melt Flow Index (MFI) sono state effettuate secondo la norma ISO 1133, applicando un carico di 5 kg a 190 °C. I risultati mostrano che per PP-20CF-10T-HOMO il MFI aumenta del 71%, passando da un valore di 7 (step 0) a 12 g/10min (step 3). Per PP-23CF-HOMO il MFI aumenta



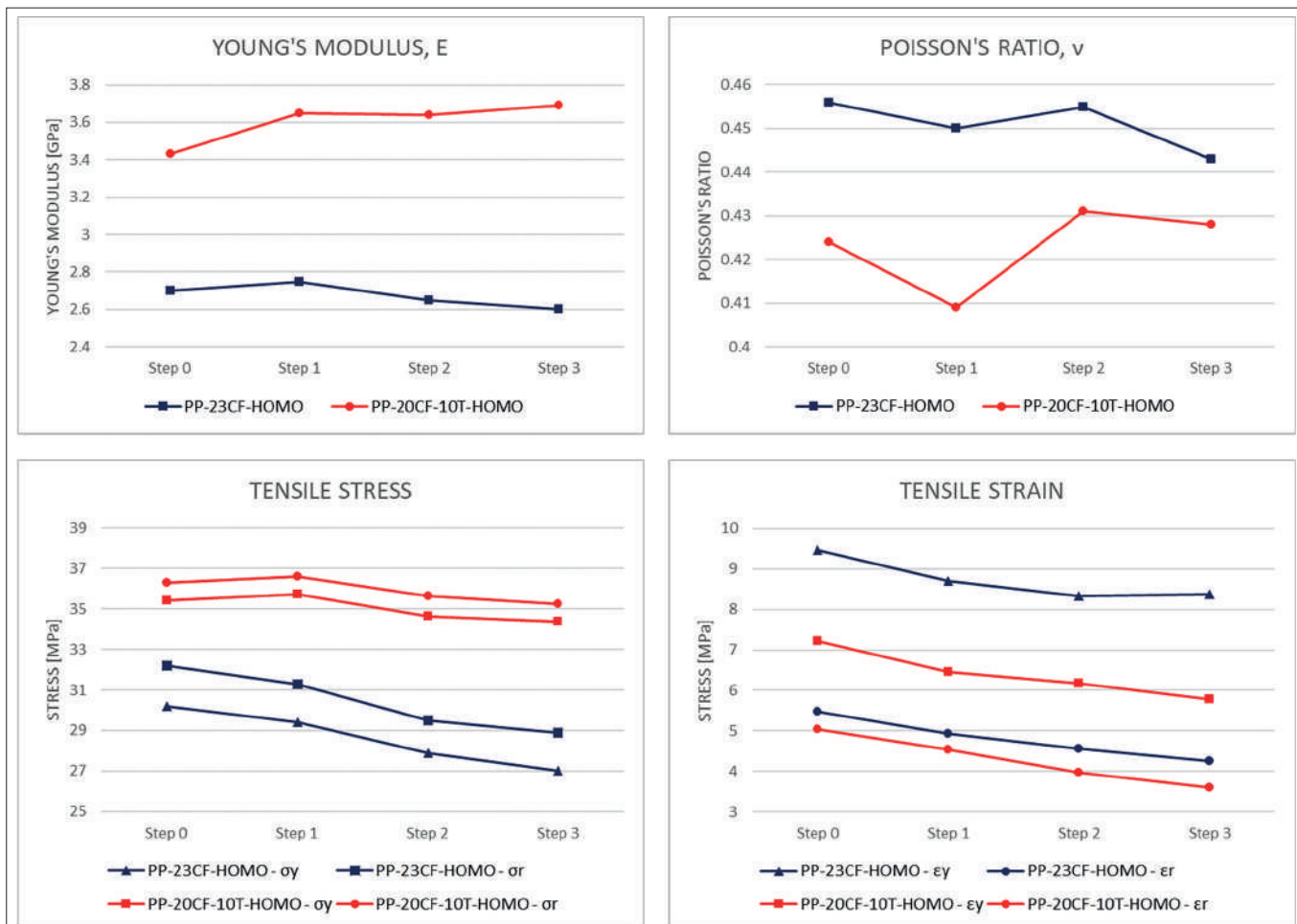


Fig.13: Confronto delle proprietà di trazione tra PP-23CF-HOMO (blu) e PP-20CF-10T-HOMO (rosso)

del 33%, passando da un valore di 6 (step 0) a 8 g/10min (step 2).

### CONCLUSIONI

Per entrambe le formulazioni, il materiale non mostra un degrado significativo delle sue proprietà a seguito di tre fasi di riciclo. Nell'analisi DSC le temperature caratteristiche ( $T_g$ ,  $T_c$ ,  $T_m$ ) non cambiano significativamente. Dopo il riciclo le fibre di cellulosa mo-

strano una peggiore adesione alla matrice rispetto al materiale vergine, a causa dell'evaporazione degli additivi utilizzati per l'interfaccia fibra-matrice. Dai test a trazione:

- PP-23CF-HOMO ha una diminuzione della deformazione a rottura del 22% e della resistenza a trazione del 10% per l'ultima fase di riciclo rispetto al materiale vergine. Il modulo di Young diminuisce del 4%.

- PP-20CF-10T-HOMO ha una diminuzione della deformazione a rottura ( $\approx 29\%$ ) e della resistenza a trazione ( $\approx 3\%$ ) all'aumentare delle fasi di riciclo. Il modulo di Young aumenta del 7%.
- La presenza di talco, sia nei materiali vergini che riciclati, determina migliori proprietà meccaniche. Le Prove di Flessione confermano quanto già osservato con le Prove di

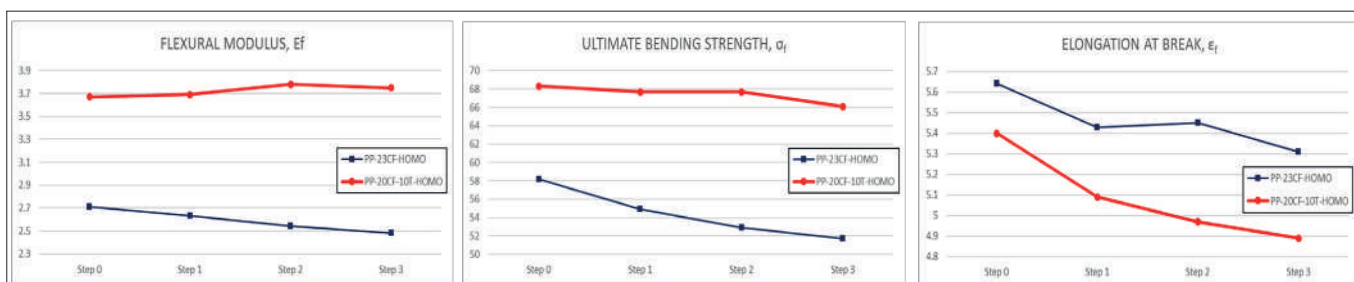
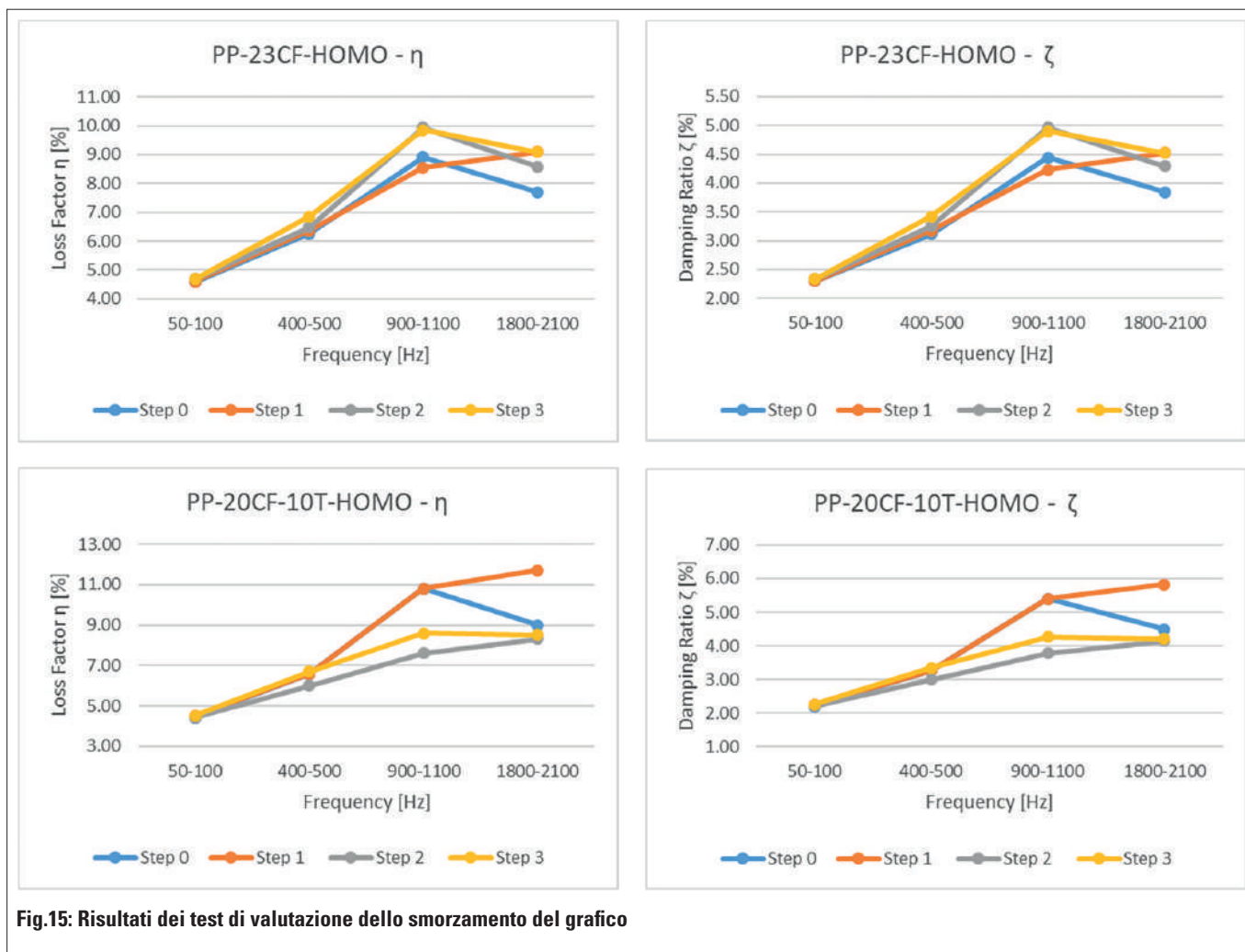


Fig.14: Confronto delle proprietà di piegatura tra PP-23CF-HOMO (blu) e PP-20CF-10T-HOMO (rosso)

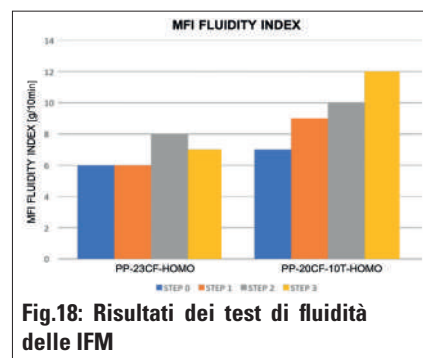
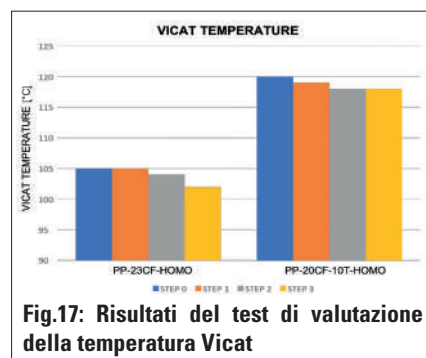
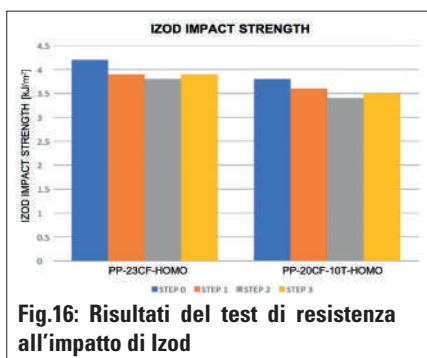


Trazione, mentre dal punto di vista dinamico i materiali presentano le stesse proprietà di smorzamento. Entrambi i materiali diventano più fragili con il riciclo: i test di impatto Izod mostrano una diminuzione del 10% della resilienza tra il materiale vergine e l'ultima fase di riciclo. La formulazione PP-23CF-HOMO ha una tenacità leggermente superiore. PP-20CF-10T-HOMO ha una tempera-

tura di rammollimento più alta rispetto a PP-23CF-HOMO. Questa temperatura diminuisce con le fasi di riciclo fino a un massimo del 3% per entrambi i materiali. Il riciclo ha la maggiore influenza su PP-20CF-10T-HOMO in termini di MFI: c'è un aumento del 70% di questo parametro per il riciclo dello step 3 rispetto al materiale vergine, e del 30% per PP-23CF-HOMO.

### RINGRAZIAMENTI

Con il contributo di LIFE Programme e European Union LIFE 17 CCm/PL/000049 - LIFE BIOBCOMPO.



# Recyclability Analysis of Bio-Based FRP Composite for components employed in automotive field

The automotive sector is bound by directives issued by the European Union [1], requiring the recycling or recovery of ever-increasing percentages of material. As part of efforts to reduce CO<sub>2</sub> emissions, the EU has set a goal of reducing greenhouse gas emissions to at least 55% below 1990 levels by 2030 [2].

The LIFE BIOBCOMPO project, aims to reduce the environmental impact of new vehicles through innovative low-density thermoplastic composites, derived from renewable resources. Main project goals are:

- use of low-density thermoplastic materials: weight saving → proportional reduction in CO<sub>2</sub> emissions
- replacement of conventional mineral fibers with bio-based fibers → use of more sustainable, biodegradable resources
- demonstration of new technologies on an industrial scale.

The most promising bio-composite developed is a Polypropylene (PP) matrix reinforced with natural fibers (Cellulose Fibers, CF).

The impact of recycling process on these materials is currently under investigation, but a general trend is difficult to detect. Studies show significant decrease in polymeric viscosity and a decrease in breaking elongation after 4-injection molding cycles [6].

In this work a recycling process for PP is defined and monitored, in order to control all the variabilities and a testing campaign were realized after each recycling step, with the aim of evaluate:

- Thermal Properties: DSC & TGA
- Rheological Properties
- Mechanical Properties:
  - Tensile Strength Test
  - Bending Resistance Test
  - Damping Evaluation Test
  - Izod Impact Strength Test
  - Vicat Temperature Evaluation Test
  - MFI Fluidity Index.

Two different formulations were analyzed:  
• PP-23CF-HOMO: Polypropylene (PP)

matrix and 23% of natural cellulose fiber reinforcements (CF).

- PP-20CF-10T-HOMO: Polypropylene (PP) matrix, 20% of natural cellulose fiber reinforcements (CF) and 10% of talc particle reinforcement (T).

Following the set of specimens:

- step 0, virgin material.
- step 1, step 2, step 3, with 100% PP-recycled once, twice and three times.

## DIFFERENTIAL SCANNING CALORIMETRY

A cycle of heating, cooling, and re-heating, all at 10°C/min, was performed on the samples. For each recycling step were evaluated:

- Melting Temperature ( $T_m$ )
- Crystallization Temperature ( $T_c$ )
- Melting Enthalpy ( $H_m$ )
- Crystallization Enthalpy ( $H_c$ ).

All the analyzed parameters don't vary significantly during the recycling process. Only a small increase ( $\approx 3^\circ\text{C}$ ) of PP-20CF-10T-HOMO Crystallization Temperature can be highlighted after several recycling steps. Moreover, comparing the two different formulations, a higher  $T_c$  is observed for the one containing percentage of talc.

## THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS

Through TGA analysis were evaluated

- onset temperature ( $T_{\text{onset}}$ )
- temperature with 10% of the material degradation ( $T_{\text{wt}} 10\%$ )
- temperature with 50% of the material degradation ( $T_{\text{wt}} 50\%$ )
- temperature of maximum degradation rate of cellulose fibers ( $T_{\text{vmax}} \text{CF}$ )
- temperature of maximum degradation rate of polypropylene ( $T_{\text{vmax}} \text{PP}$ ).

As observed, the material is subjected to two main distinguished weight losses, identified by the peaks of the first derivative curve: the first corresponds to cellulose degradation, while the second one occurs when polypropylene volatilizes.

The degradation rates and temperatures are the same for all the recycling steps,

except the step 0 (virgin material), where cellulose and polypropylene degradation temperatures are respectively about 5°C and 85°C lower than the other ones.

PP-20CF-10T-HOMO formulations exhibit the same trend: the maximum degradation for cellulose occurs at 352°C after the step 0 and at 354°C for all the recycled steps. For polypropylene occurs at 382°C after the step 0 and at 469°C for all the other steps. The residual weights of all the formulations correspond to the percentage of talc, which volatilizes at higher temperature than 600°C.

In comparison the talc does not change the thermal properties: the degradation for the two formulation has the same trend at different recycling steps.

## TENSILE STRENGTH TEST

Tensile tests were carried out according to ISO 527-2-1A, in order to determine:

- Young's Modulus, E
- Poisson's Ratio,  $\nu$
- Tensile Yield Stress,  $\sigma_y$
- Ultimate Tensile Strength,  $\sigma_r$
- Strain at Yield,  $\epsilon_y$
- Elongation at Break,  $\epsilon_r$

It can be observed a small increase ( $\approx 7.5\%$ ) of PP-20CF-10T-HOMO stiffness value (Young's Modulus) with recycling steps, while the ultimate tensile stress drops by 2.9% in reference to a strain reduction of 28.7%. Also for PP-23CF-HOMO, it can be detected a decrease of the ultimate tensile stress ( $\approx 10.2\%$ ) and the corresponding strain ( $\approx 22.3\%$ ) but, unlike the other analyzed formulation, the Young's modulus has a slight decrease ( $\approx 3.7\%$ ).

The substantial difference in the mechanical behavior of the two compared formulations is given by the presence of talc: PP-20CF-10T-HOMO has a higher tensile strength than PP-23CF-HOMO, but it is less deformable (lower tensile strain values). Bending Tests show results that are fully aligned with the ones observed after Tensile Tests:

- PP-23CF-HOMO shows a 10% decrease in ultimate bending strength,

5.8% decrease in elongation at break and 8.5% decrease in flexural modulus

- PP-20CF-10T-HOMO shows a small decrease in ultimate bending strength ( $\approx 3.2\%$ ) and a more considerable decrease in maximum deformation ( $\approx 9.4\%$ ) between the first and the last recycling step; flexural modulus has a small increase, which is maximized in recycling step 2 ( $\approx 3\%$ ).

### DAMPING EVALUATION TEST

Damping Evaluation Tests were carried out according to ASTM E756. For each formulation and for each of the four analyzed frequency ranges, five different Loss Factor ( $\eta$ ) and Damping Ratio ( $\zeta$ ) values were measured. In both cases the recycling process does not affect the damping properties: in the analyzed frequency spectrum Loss Factor and Damping Ratio maximum values are around 1000 Hz, except for the recycling step 1, where those maximum values occur at 2000 Hz.

### IZOD IMPACT STRENGTH TEST

The Izod Impact Strength Tests were carried out according to ISO 180 B. The recycling process affects the resilience of both materials in a similar way:

- PP-23CF-HOMO Izod Impact Strength goes from a maximum value of 4.14 kJ/m<sup>2</sup> (step 0) to a minimum value of 3.79 kJ/m<sup>2</sup> (step 2), with a decrease of  $\approx 9.5\%$
- PP-20CF-10T-HOMO Izod Impact Strength goes from a maximum value of 3.78 kJ/m<sup>2</sup> (step 0) to a minimum value of 3.53 kJ/m<sup>2</sup> (step 3), with a decrease of  $\approx 10.5\%$ .

### VICAT TEMPERATURE EVALUATION TEST

Vicat Softening Temperatures were determined according to ISO 306, applying a load of 5 daN. The results show that PP-20CF-10T-HOMO has a much higher softening temperature than PP-23CF-HOMO. Moreover, the presence of talc mitigates the drop in softening temperature (about 1.7% for PP-20CF-10T-HOMO and 2.9% for PP-23CF-HOMO), caused by the recycling steps.

### MFI FLUIDITY INDEX

Measurements of the Melt Flow Index (MFI) were carried out in accordance with ISO 1133, applying a load of 5 kg at a temperature of 190 °C. The results show that PP-20CF-10T-HOMO MFI increases sharply ( $\approx 71\%$ ) to the advance of the number of recycling steps, going from a value of 7 g/10min (step 0) to 12 g/10min (step 3). On the other hand, PP-23CF-HOMO MFI less marked increase ( $\approx 33\%$ ), ranging from a minimum value of 6 (step 0) to a maximum value of 8 (step 2).

### CONCLUSIONS

After thermo-mechanical characterization of both formulations with three different recycling steps, the material does not show a significant degradation of its properties. In the DSC Analyses the characteristic temperatures ( $T_g$ ,  $T_c$ ,  $T_m$ ) do not change significantly.

After recycling the cellulose fibers show a worst adhesion to the matrix than the virgin material, due to the evaporation of additives used for fiber-matrix interface.

No Tensile performances:

- PP-23CF-HOMO has a decrease in strain at break of 22% and in tensile strength of 10% for the last recycling step compared to virgin material. Young's modulus decreases by 4%.
- PP-20CF-10T-HOMO has a considerable decrease in strain at break ( $\approx 29\%$ ) and a small decrease in tensile stress ( $\approx 3\%$ ) as recycling steps increase. Young's modulus increases by 7%.
- The presence of talc, both in the virgin and recycled materials, determines better mechanical properties.

Bending Tests confirm what already observed with the Tensile Tests, and from a dynamic point of view the materials show the same damping properties. Both materials become more brittle with recycling: Izod Impact Tests show a 10% decrease in resilience between the virgin material and the last recycling step. PP-23CF-HOMO formulation has slightly higher toughness. PP-20CF-10T-HOMO has a much higher softening temperature than PP-23CF-HOMO. This temperature decreases with the recycling steps to a maximum of 3% for both materials. Recycling has the greatest influence on PP-20CF-10T-HOMO in terms of MFI: there is a 70% increase in this parameter for step 3 recycling compared to virgin material, a value that rises by only 30% for PP-23CF-HOMO.

### BIBLIOGRAFIA/REFERENCES

- [1] C. o. t. E. U. European Parliament, *Directive 2000/53/EC on the end-of-life vehicles*. Commission Statements., 2000.
- [2] D.-G. f. C. A. European Commission, *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions*, 2020.
- [3] C. D. J. R. Sanadi AR, "Agro-fiber thermoplastic composites," *Paper and composites from agro-based resources*. Boca Raton, pp. 377-401, 1997.
- [4] B. M. R. J. K. N. Heidi P, "The influence of biocomposite processing and composition on natural fiber length, dispersion and orientation," *J Mater Sci Eng A*, pp. 190-198, 2011.
- [5] F. L. Mantia and M. Morreale, "Green composites: A brief review," *Composites Part A: Applied Science and Manufactur-*

ing, vol. 42, pp. 579-588, 2011.

[6] E. J. N. J. Guerrica Echevarría G., "Effects of reprocessing conditions on the properties of unfilled and talc-filled polypropylene," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 53, pp. 1-8, 1996.

[7] K. Pickering, M. Aruan Efendy and T. Le, "A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 83, pp. 98-112, 2016.

[8] ISO 527-2:2012, *Plastics — Determination of tensile properties — Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics*.

[9] ISO 178:2019, *Plastics — Determination of flexural properties*.

All the mentioned figures refer to the Italian version

Fig. 1: Complete DSC Analysis Thermal Cycle performed on PP-23CF-HOMO virgin material composition (step 0)

Fig. 2: Complete DSC Analysis Thermal Cycle performed on PP-20CF-10T-HOMO virgin material composition (step 0)

Fig. 3: Comparison of DSC Curves of different PP-23CF-HOMO recycling steps [(a) melting peak (b) crystallization peak]

Fig. 4: Comparison of DSC Curves of different PP-20CF-10T-HOMO recycling steps [(a) melting peak (b) crystallization peak]

Fig. 5: Comparison of TGA Curves of different PP-23CF-HOMO recycling steps

Fig. 6: Comparison of TGA Curves of different PP-20CF-10T-HOMO recycling steps

Fig. 7 / 8: TGA Curves (in green) and their first derivative (in blue) for PP-23CF-HOMO recycling step 0 and step 1

Fig. 9 / 10: TGA Curves (in green) and their first derivative (in blue) for PP-20CF-10T-HOMO recycling step 0 and step 1

Fig. 11: Comparison of TGA first derivative curves for different recycling steps (PP-23CF-HOMO)

Fig. 12: Comparison of TGA first derivative curves for different recycling steps (PP-20CF-10T-HOMO)

Fig. 13: Comparison of the Tensile Properties between PP-23CF-HOMO (blue) and PP-20CF-10T-HOMO (red)

Fig. 14: Comparison of the Bending Properties between PP-23CF-HOMO (blue) and PP-20CF-10T-HOMO (red)

Fig. 15: Plot of Damping Evaluation Test Results

Fig. 16: Izod Impact Strength Test Results

Fig. 17: Vicat Temperature Evaluation Test Results

Fig. 18: MFI Fluidity Test Results

Tab 1: DSC Analysis Thermal Parameters (PP-23CF-HOMO)

Tab 2: DSC Analysis Thermal Parameters (PP-20CF-10T-HOMO)

Tab 3: TGA Analysis Critical Temperatures (PP-23CF-HOMO)

Tab 4: TGA Analysis Critical Temperatures (PP-20CF-10T-HOMO)