

# Compositi resistenti al fuoco per applicazioni aeronautiche sviluppate nel progetto FireMat



**I**l progetto FireMat (co-finanziato nell'ambito del Programma Operativo Regionale Fondo Europeo Sviluppo Regionale - POR FESR 2014-2020 della Regione Emilia-Romagna e dal Fondo per lo Sviluppo e la Coesione - FSC), [www.firemat.it](http://www.firemat.it) mira a superare i principali limiti tecnici dei compositi a matrice polimerica (PMC), vale a dire resistenza al fuoco e la non riciclabilità.

Il progetto, coordinato da ENEA - Laboratorio tecnologie dei materiali Faenza (ENEA-TEMAF), ha coinvolto 4 partner no-profit (ISTEC-CNR, CertiMaC, Consorzio MUSP e Romagna Tech), tutti appartenenti alla rete regionale "Rete Alta Tecnologia", e 4 aziende locali (Bucci Composites SpA, Curti Costruzioni Meccaniche SpA, Aliva Srl e Tampieri Energie Srl).

FireMat (iniziato il 05/07/2019 e finito il 04/02/2022) ha sviluppato nuovi materiali e processi per questi target, focalizzando una soluzione multi-materiale e la relativa ingegnerizzazione per applicazioni nella produzione di componenti aeronautici. Da un'altra prospettiva, gli obiettivi del progetto FireMat sono il rafforzamento del settore dei materiali compositi, superando gli attuali limiti di temperatura di esercizio dei compositi fibrorinforzati a base polimerica e la promozione di economie circolari locali attraverso lo sviluppo di materiali riciclabili e l'impiego di materie prime seconde.

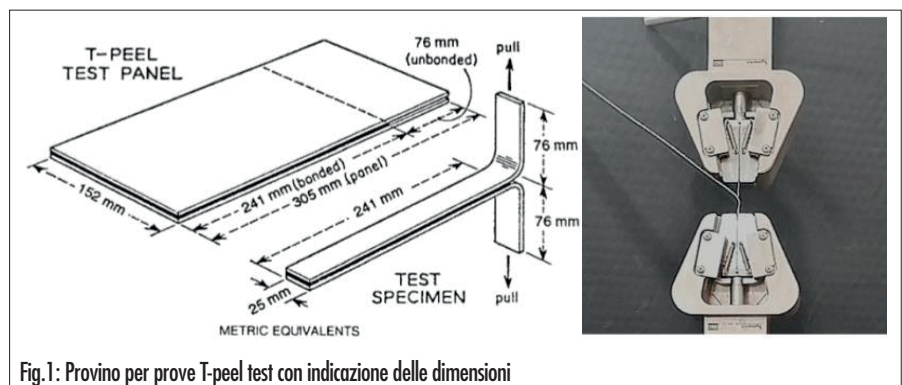


Fig.1: Provino per prove T-peel test con indicazione delle dimensioni

## SVILUPPO DI FIBRE METAL LAMINATE (FML) RICICLABILI

Questo studio riguarda l'ottimizzazione della laminazione di un materiale composito fibro-rinforzato, la sua caratterizzazione meccanica, la modellazione FEM e l'applicazione come componente aeronautico. La soluzione presentata è una FML (Fibre Metal Laminates) riciclabile. I PMC (Polymeric Matrix Composites) riciclabili e strutturali, sviluppati finora in ENEA a partire dalla fibra minerale di tipo aeronautico, dovevano essere associati a fogli di alluminio in modo da migliorare le caratteristiche al fuoco e rendere possibile l'applicazione alla produzione di un cofano per elicottero. L'obiettivo era la combinazione della riduzione del peso e della resistenza al fuoco, massimizzando l'uso di materie prime riciclate, secondarie e derivate da biomasse. Gli strati di alluminio sono

stati introdotti all'interno della laminazione, per fungere da barriera all'ossigeno e migliorare la resistenza al fuoco. Gli FML sono stati ottenuti a partire da una resina bio-based, con caratteristiche ritardanti di fiamma, associata a tessuti minerali derivati da basalto aeronautico, lavorati sotto forma di preimpregnati e poi accoppiati a fogli di alluminio. La modellazione FEM si è basata sulla caratterizzazione meccanica eseguita sui singoli strati e sulla resistenza dell'adesivo inter-strato: è stata ottimizzata una struttura a sandwich composita (compresa la struttura a nido d'ape in alluminio).

La modellazione a elementi finiti (FEM) è stata utilizzata per prevedere le prestazioni di varie variabili di progettazione utilizzando la tecnica di modellazione a zone coesive [1-3]. La laminazione definisce l'ordine di impilamento, il loro orientamento e gli spessori dei vari strati [4].

Le proprietà del materiale e della laminazione del composito sono state identificate in maniera accurata, utilizzando un approccio "Design of Experiments - DOE" e specifico data matching per realizzare i modelli FEM. Infine, è stata identificata la composizione del sandwich in grado di offrire il miglior compromesso possibile tra peso, dimensioni e resistenza. Tutti i modelli FEM utilizzano il codice commerciale Abaqus/CAE® e il software di ottimizzazione Isight® di Simulia®. Gli FML sono strutture ibride basate su strati di PMC rinforzati con fibre alternate e lamiere di lega metallica. Le prestazioni meccaniche potenziali degli FML dipendono dalla natura particolare degli strati compositi e metallici e dai pretrattamenti effettuati sul metallo, che devono essere studiati e ottimizzati. La soluzione tecnica discussa in questo articolo mira a produrre "FML in forma complessa" di potenziale interesse per applicazioni aeronautiche, con gli ulteriori benefici della sostenibilità ambientale (strati compositi riciclabili bio-based e parzialmente C2C), produzione rapida di forme complesse (sfruttando strati di prepreg e alluminio a basso spessore) e resistenza al fuoco (utilizzando l'alluminio come barriera all'ossigeno). La produzione degli FML è stata effettuata a partire da preimpregnati a base di PFA, utilizzando una pressa a caldo. Il processo di produzione può essere effettuato anche in autoclave. Le prove di trazione ASTM [5] e i T-peel test [2] seguono le indicazioni delle normative standard e sono state eseguite per determinare le proprietà meccaniche degli FML.

Per permettere la modellazione FEM, sono state effettuate e simulate prove di adesione (fig.1).

Grazie all'implementazione di modelli Isight con DOE e data matching, come mostrato nello schema di figura 2, è stata eseguita la modellazione FEM in maniera iterativa fino ad ottenere una ragionevole rappresentazione delle proprietà del materiale per lo strato adesivo. Il punto di inizio della frattura e la resistenza media di adesione sono le due variabili considerate per ottenere la curva di corrispondenza migliore. Il risultato ottenuto mediante il data matching (sperimentale e simulato) è mostrato in figura 3.

#### Validazione del materiale e prove resistenza fuoco

Le proprietà meccaniche dei materiali, in termini di valori medi, usate come input per la modellazione FE, sono state ottenute applicando la normativa stan-

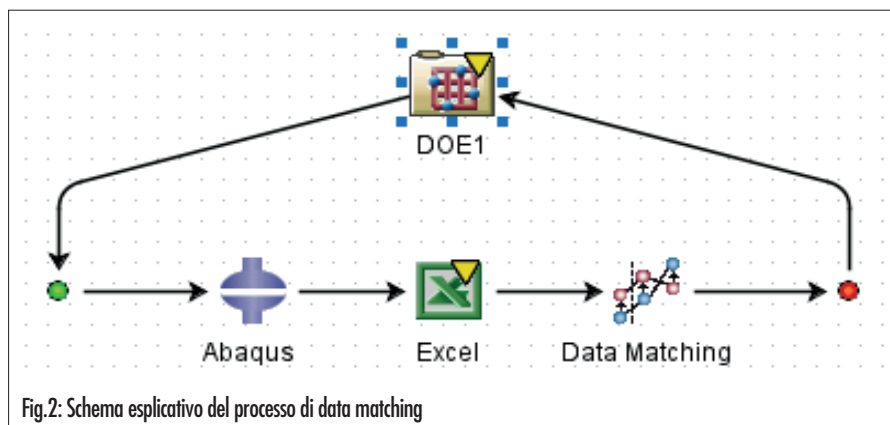


Fig.2: Schema esplicativo del processo di data matching

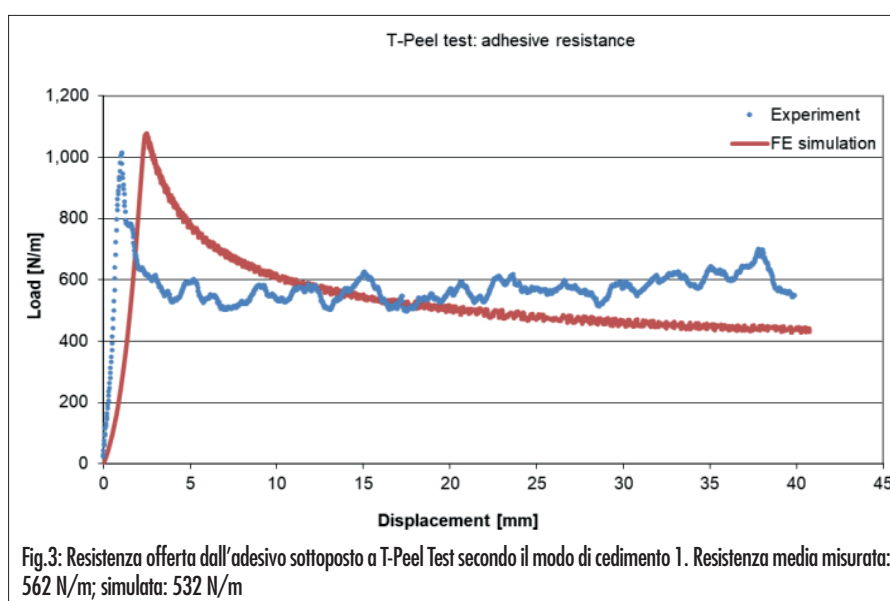


Fig.3: Resistenza offerta dall'adesivo sottoposto a T-Peel Test secondo il modo di cedimento 1. Resistenza media misurata: 562 N/m; simulata: 532 N/m

| Material                                   | Orientation | Max Stress (MPa) | Young's Modulus (GPa) | Fracture Energy (J) |
|--------------------------------------------|-------------|------------------|-----------------------|---------------------|
| C1                                         | 0°          | 650 ± 20         | 34.5 ± 0.7            | 155 ± 5             |
| FML-1, n° composite layer 5, n° Al layer 2 | 0°          | 583 ± 24         | 26.0 ± 1.7            | 210 ± 9             |

Tab.1: Caratterizzazione meccanica di PMC e FML (secondo normativa ASTM D3039)

dard ASTM D3039 e sono riassunte nella tabella 1. Una volta completata la caratterizzazione del composito e dell'FML, è stata effettuata la validazione sperimentale della modellazione sugli FML, eseguendo prove di trazione. La sequenza di laminazione scelta pone l'alluminio all'esterno, per aumentare le proprietà di resistenza al fuoco, e l'uso di alluminio T0 (non temprato), per rendere possibile l'applicazione degli FML anche per la produzione di componenti in forme complesse.

L'associazione di un preimpregnato fire retardant con l'alluminio aumenta significativamente la resistenza al fuoco. Le

prove di resistenza al fuoco sono state effettuate su campioni con dimensioni 100x100 mm², considerando che il sistema di accensione della fiamma (arco elettrico) è stato disattivato durante le prove di non combustione (30 min) e attivato durante le prove di combustione di singoli oggetti (10 min). Il peso dei campioni è stato misurato prima e dopo le prove, esponendo i campioni ad un flusso di calore di 46 kW/m², corrispondente ad una temperatura di 750 ± 5°C. In accordo con la normativa standard EN ISO 1182, diverse soluzioni FML soddisfano il requisito di classe A1 [6].

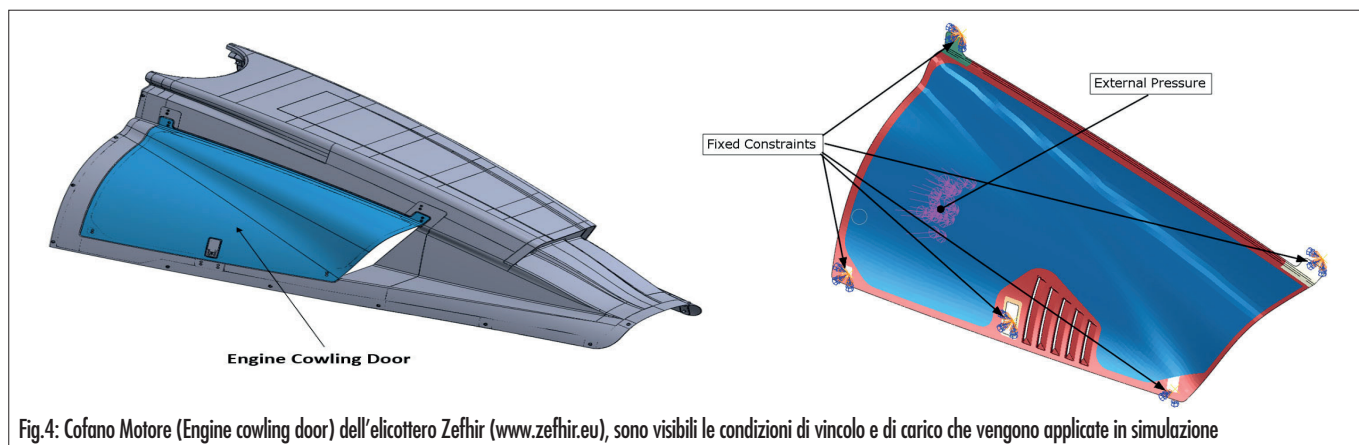


Fig.4: Cofano Motore (Engine cowling door) dell'elicottero Zefhir ([www.zefhir.eu](http://www.zefhir.eu)), sono visibili le condizioni di vincolo e di carico che vengono applicate in simulazione

### Simulazione del plybook del cofano

Il cofano motore dell'elicottero mostrato in figura 4 è stato progettato con una specifica disposizione degli strati del composito. Il plybook della sezione è stato modellato come una struttura sandwich composta da elementi shell. Le proprietà del materiale, valutate sperimentalmente e attraverso le simulazioni di caratterizzazione, sono state utilizzate come input per la laminazione. Il sandwich è costituito dal susseguirsi di strati di materiale composito in tessuto di prepreg a base basalto, strati di alluminio riciclato e da uno strato di alluminio a nido d'ape, chiamato anche "honeycomb". Diverse sequenze di laminazione, con differenti spessori, sono state testate, utilizzando la tecnica DOE, per identificare il miglior compromesso tra resistenza e peso.

### Dimostratore del cofano motore dell'elicottero

Il cofano motore dell'elicottero è stato prodotto in Bucci Composites, laminato e poi curato in autoclave, un'ora a 180°C, dopo essere stato messo sottovuoto. L'alluminio sottile in stato T0 (non temprato) è stato utilizzato, nella soluzione multi-materiale, come ritardante fisico alla propagazione della fiamma e di fenomeni ossidativi. La produzione del dimostratore è avvenuta in due fasi successive: una prima fase, con pressione di esercizio pari a 6 bar, per ottenere la superficie estetica richiesta, seguita da una fase di indurimento ad 1 bar, necessaria per consolidare i vari strati. Questa procedura a doppio passaggio è necessaria per non eccedere il livello di resistenza a compressione dell'honeycomb. Il prepreg è stato realizzato, nell'ambito del progetto, da ENEA associando la matrice PFA (polifurfuril alcol), derivante da biomassa e

fire-retardant, con la fibra minerale di grado aeronautico Filava® (Isomatex SA, Belgio). Il prepreg ottenuto risulta sostenibile e rispettoso dell'ambiente, in quanto la resina è bio-based (possiede un C-footprint quasi nullo, anche se viene bruciata nel trattamento di fine vita) e la fibra minerale risulta riciclabile secondo il principio Cradle-to-Cradle (C2C), il che significa che può essere riformata a fibra vergine senza subire alcuna perdita delle proprietà meccaniche (come dimostrato dal progetto Cradle-to-Cradle Composites, [www.c2cc-project.eu](http://www.c2cc-project.eu)). In figura 5, il componente viene mostrato durante la fase di insacco sottovuoto e dopo la polimerizzazione.

### MATRICI POLIMERICHE INORGANICHE NANOSTRUTTURATE PER COMPOSITI FIBRORINFORZATI RESISTENTI ALLE ALTE TEMPERATURE

Lo sviluppo di nuovi materiali che combinano leggerezza, resistenza meccanica e protezione antincendio insieme a un processo di produzione sostenibile è diventato strategico nell'ultimo periodo, soprattutto nell'industria automobilistica e aerospaziale. L'attuale ricerca sugli FRP (Fibre Reinforced Polymer) si occupa della riduzione delle emissioni di VOC delle resine organiche, per diminuire l'impatto ambientale, e dell'aumento della temperatura di servizio. In questo



Fig.5: Processo di laminazione e risultato finale del dimostratore del cofano motore per l'elicottero Zefhir



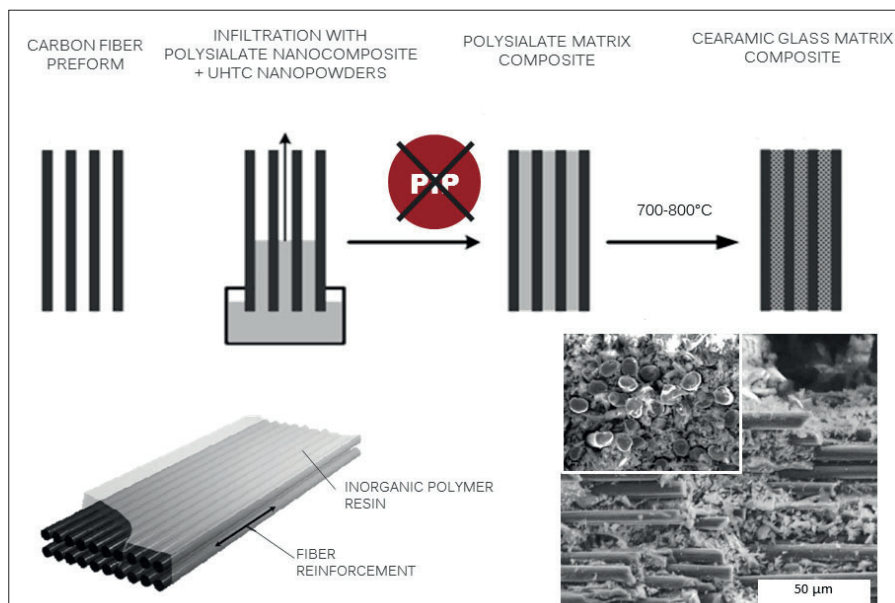


Fig.6: Diagramma di flusso del processo produttivo e microstruttura finale del composito resistente al fuoco



Fig.7: Dimostratore in scala reale di un tubo di scarico di un elicottero e sua produzione

Il polimero inorganico è un nanocomposito poli-sialato, ovvero un alcalino-alluminosilicato sintetico ad alto rapporto  $\text{SiO}_2$ : $\text{Al}_2\text{O}_3$  con il 5% in peso di cariche ceramiche, ottenuto da un precursore che è una miscela a base acquosa priva di rischi che garantisce il rispetto delle più rigorose legislazioni ambientali e la possibilità di lavorare con le stesse apparecchiature dei tradizionali FRP. La microstruttura finale del composito, riportata in figura 6, mostra le fibre di carbonio circondate dalla matrice vetroceramica formata durante il trattamento termico. La matrice vetroceramica potenzia le proprietà termo-strutturali del composito, proteggendo le fibre anche in ambienti altamente ossidanti grazie all'introduzione di specifici filler refrattari e UHTC. Inoltre, il composito mostra una bassa espansione termica e una resistenza alla trazione fino a 200 MPa [7]. Poiché il composito è ovviamente progettato con l'obiettivo di uno scale-up industriale, il CNR-ISTEC ha prodotto in laboratorio il dimostratore in scala reale di un tubo di scarico di un elicottero, come riportato in figura 7. Il prepreg è stato laminato su un'anima sacrificale sviluppata da ENEA.

## CONCLUSIONI

Lo studio e l'ottimizzazione degli FML sono stati effettuati con lo scopo di sviluppare una nuova soluzione multi-materiale resistente al fuoco per l'applicazione nel settore aeronautico, insieme all'applicazione di materiali e processi più rispettosi dell'ambiente. L'utilizzo di una fibra minerale riciclabile C2C, in associazione ad una resina bio-based e ad alluminio derivante da fonti secondarie, rendono la soluzione presentata molto interessante in termini di LCA, soprattutto considerando che i materiali resistenti al fuoco sono, generalmente, molto più pesanti e non riciclabili. La combinazione di molteplici innovazioni, per ottenere un unico prodotto, richiede un'attenta analisi e previsione delle prestazioni attese, supportata da una affidabile modellazione virtuale.

Per quanto riguarda il composito rinforzato con fibra di carbonio, essendo resistente alle alte temperature, potrebbe essere utilizzato come barriera termica sicura e leggera con caratteristiche modulabili, a seconda della composizione e degli specifici trattamenti post-indurimento. In generale garantisce una completa protezione dal fuoco, assenza di fumo ed elevate temperature di servizio (fino a 800°C).

Il progetto FireMat si è classificato terzo al concorso "L'Europa è qui" 2021.

quadro, CNR-ISTEC ha sviluppato un composito innovativo rinforzato con fibra di carbonio utilizzando un polimero inorganico nanostrutturato con cariche ceramiche refrattarie e ultra-refrattarie (UHTC). Questo materiale composito si pone a metà tra gli FRP e i CMC (Ceramic Matrix Composite) tradizionali, ed è particolarmente adatto per realizzare strutture

resistenti al fuoco attraverso un semplice processo di impregnazione delle fibre, sacco a vuoto e trattamento termico post-polimerizzazione in atmosfera inerte, per trasformare il polimero inorganico in una matrice vetroceramica (fig.6), evitando così la ripetizione delle fasi di infiltrazione polimerica e pirolisi (PIP) tipiche dei processi CMC.

# Fire Resistant composites for aeronautical application developed within FireMat project

**F**ireMat project (Regional Operational Programme of the European Regional Development Fund - ERDF ROP 2014-2020 and Development and Cohesion Fund of Emilia-Romagna Region; [www.fire-mat.it](http://www.fire-mat.it)) aims to overcome the main technical limits of polymeric matrix composites (PMCs), namely fire resistance and non-recyclability.

The project was coordinated by ENEA - Laboratory Materials Technologies Faenza (ENEA-TEMAF) and involved no-profit partners (ISTEC-CNR, CertiMaC, Consorzio MUSP and Romagna Tech) all belonging to the regional "Rete Alta Tecnologia" and 4 local companies (Bucci Composites SpA, Curti Costruzioni Meccaniche SpA, Aliva Srl and Tampieri Energie Srl). FireMat (started on 5/07/2019 and finished on 4/02/2022) has been developing new materials and processes for these targets, focusing on a multi-material solution, and the related engineering to apply it to the production of aeronautical components.

From another point of view, FireMat project's goals are the reinforcement of the composite materials sector, overcoming the current working temperature limits of polymer-based fibre-reinforced composites and the promotion of circular local economies by developing recyclable materials and employing secondary raw materials.

## DEVELOPMENT OF RECYCLABLE FIBRE METAL LAMINATES (FML)

This study concerned with the optimisation of a fibre-reinforced composite material ply book, its mechanical characterization and FE modelling and application to an aeronautical component. The presented material solution is a recyclable FML (Fibre Metal Laminates). Recyclable and structural PMCs (Polymeric Matrix Composites) developed up-to now in ENEA starting from aeronautical grade mineral fibre had to be associated to aluminium foils to improve fire characteristics, for the possible application to the production of an

engine cowling door of a helicopter. The objective was the combination of weight reduction and fire resistance, maximizing the use of C2C recyclable, secondary and biomass derived raw materials. Aluminium layers were introduced inside the lamination, to act as oxygen barriers and improve fire-retardancy. FML were obtained starting from a fire-retardant biobased resin, which was associated with aeronautical grade basalt-derived mineral fabric, processed in the form of a prepreg and then coupled with aluminium foils. FE modelling was based on performed mechanical characterization of the single layers and inter-layer adhesive strength of the ply stack: a composite sandwich structure (including aluminium honeycomb) was optimised. The Finite Element (FE) modelling was used to predict the performance of various design variants utilising cohesive zone modelling technique [1-3]. The ply book contains the stacking order, their orientation and the thicknesses of the various ply layers [4]. Precise material properties and composite ply book stack has been identified following a Design of Experiments - DOE and data matching approach on all FE models. Finally, the composite sandwich with the best possible trade-off between weight, dimensions and strength has been identified. All FE models use the commercial code Abaqus/CAE® and optimisation software Isight® from Simulia®. FML are hybrid structures based on alternating fibre-reinforced PMC plies and metal alloy sheets. The potential mechanical performance of FML depends on the particular nature of both composite and metal layers, metal nature and its pre-treatments, which need to be investigated and optimised. The technical solution which is discussed in this article aims to produce "FML complex shapes" of potential interest for aeronautical applications, with the additional benefits of environmental sustainability (bio-based and partially C2C recyclable composite layers), fast production of complex shapes (exploiting

prepreg and aluminium layers at low thickness) and fire resistance (using the aluminium as oxygen barrier). The production of the FML was carried out starting from PFA-based prepreps, using a warm press. The production process might also be done by autoclave processing. Tensile tests ASTM [5] and T-peel tests [2] were performed, according to ASTM standards, in order to determine FML mechanical properties.

To perform FE Modelling, T-Peel tests (fig.1) were performed and simulated. With the use of Isight's DOE component and data matching tool, as shown in figure 2 - in a scheme, the FE model was run multiple times to identify reasonable material properties for the adhesive layer. Fracture initiation point and average peel resistance were the two variables considered to obtain the best matching curve. The result of data matching (experimental and simulated) are shown in figure 3.

## Material validation and fire tests

The tensile properties of the materials, in terms of average values, used as input for FE modelling, were obtained applying ASTM D3039 standard and are summarised in table 1. Once composite and FML characterization were completed, experimental validation of modelling on FML was carried out, by performing tensile tests. The chosen lamination sequence places aluminium on the outer part of the lamination to increase the fire resistance properties and to use T0 (not tempered) aluminium, in order to make it possible applying these FML also for the production of complex shapes components.

Associating a fire-retardant prepreg with aluminium significantly enhances fire resistance. The fire-resistance tests were executed on 100x100 mm<sup>2</sup> samples by considering the flame ignition system (electric arc) deactivated during the non-combustibility tests (30 min) and activated during the Single Burning Item tests (10 min). The weight of the samples was measured before and after the

test and the samples were exposed to a heat flow of 46 kW/m<sup>2</sup>, corresponding to a temperature of 750 ± 5°C. According to the European standards, several FML solutions meet the class A1 range, according to EN ISO 1182 [6].

#### Modelling of the composite plybook

The helicopter engine cowling door shown in figure 4 has been designed with the use of composite arrangements. The composite plybook was modelled as a sandwich structure composed of continuum shell membranes. The material properties found experimentally and through material characterization simulations were input in the lamina. The sandwich is composed of a basalt-based prepreg layer, recycled aluminium layer and aluminium honeycomb layer. Different plybook arrangements with realisable thicknesses have been tried using the DOE technique to identify the best trade-off between strength and weight.

#### Helicopter engine cowling door demonstrator

The helicopter engine cowling door was produced in Bucci Composites, by hand-layup and then cured in autoclave, one hour at 180°C, after vacuum bagging. Thin Aluminium in T0 state (not tempered) is used in the multi-material solution to act as a physical fire and oxidation-retardant. The processing pressure was 6 bar for the outer aesthetical surface, followed by a second curing step, including the honeycomb, at 1 bar. This double step procedure is necessary in order not to go beyond the compressive strength of the aluminium honeycomb. The prepreg was produced within the project by ENEA associating biomass-derived PFA (poly-furfuryl alcohol) fire retardant resin matrix with Filava® (Isomatem SA, Belgium) aeronautical grade mineral fibre. This prepreg is sustainable and environmentally friendly since the resin is biobased (and so nearly C-neutral, even if burned as end-of-life treatment), and Filava® mineral fibre is cradle-to-cradle recyclable, meaning it can be remelted as virgin without mechanical degradation, as project Cradle-to-Cradle Composites, [www.c2cc-project.eu](http://www.c2cc-project.eu), demonstrated. In figure 5, the component is shown during vacuum bagging phase and after curing.

#### NANOSTRUCTURED INORGANIC POLYMER MATRICES FOR HIGH TEMPERATURE RESISTANT FIBRE REINFORCED COMPOSITES

Nowadays the development of new materials combining lightweight, mechanical strength and fire protection together with a sustainable production process, has become an issue, especially in the automotive and aerospace industry. The current research on FRPs (Fibre Reinforced Polymers) is dealing with reducing the emissions of VOCs from organic

resins to decrease environmental impact and with increasing service temperature. In this framework, an innovative carbon fibre reinforced composite has been developed by CNR-ISTEC using a nanostructured inorganic polymer with refractory and ultra-high temperature ceramic (UHTC) fillers.

This composite material is halfway between traditional FRPs and CMCs (Ceramics Matrix Composites), and is particularly suitable to produce fire-proof structures through a simple process of fibre impregnation, vacuum bagging and post-curing thermal treatment under inert atmosphere to transform the inorganic polymer into a glass ceramic matrix (fig.6), thus avoiding the repetition of polymer infiltration and pyrolysis (PIP) steps typical of CMCs processes.

The inorganic polymer is a polysialate nano composite, namely a synthetic alkali-aluminosilicates with a high SiO<sub>2</sub>: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with 5 wt% of ceramic fillers, obtained from a precursor which is a hazard-free water based mixture that ensures the compliance with the most strict environmental legislations and the possibility of working with the same equipments of traditional FRPs.

The final microstructure of the composite is reported in figure 6, showing carbon fibres surrounded by the glass ceramic matrix formed during the thermal treatment. Thus, the glass ceramic matrix further boosts the thermo-structural properties of the composite, protecting the fibres even in highly oxidising environments thanks to the introduction of the specific refractory and UHTCs fillers. Furthermore, the composite shows low thermal expansion and a tensile strength up to 200 MPa [7].

Since the composite is obviously designed with the aim of an industrial scale-up, CNR-ISTEC produced with lab facilities a full scale demonstrator of a helicopter exhaust pipe, as reported in figure 7. The component was produced by laminating the prepreg on a sacrificial core developed by ENEA.

#### CONCLUSIONS

FML study and optimisations was carried out to develop a new multi-material fire-resistant solution for application in the aeronautical sector, along with applying more environmentally friendly materials and processes. The adoption of a C2C recyclable mineral fibre, in association with a bio-based resin and aluminium from secondary sources make the solution very interesting in terms of LCA, especially considering that fire resistant materials are generally much heavier and non-recyclable. Combining multiple innovations to achieve a single product requires a careful analysis and prediction of expected performance, aided by reliable virtual modelling. Regarding the high

temperature resistant carbon fibre reinforced composite, it might be used as a safe and lightweight thermal barrier with almost completely tunable properties, depending on the composition and the specific post-curing treatments. In general, it grants complete fire-proofness, no-smoke emissions and high service temperatures (up to 800°C).

FireMat project is among the winners of "L'Europa è QUI" 2021 competition.

#### REFERENCES

- [1] ABAQUS / Standard User's Manual, Version 2019. s.l.: Dassault Systemes Simulia Corp (2019).
- [2] Standard Test Method for Peel Resistance of Adhesives (T-Peel Test). ASTM D1876 (2015).
- [3] Finite Element Analyses of Several T-peel Specimen configurations using Cohesive Zone Models. Qian Li, Romesh Batra, David A. Dillard, and Ian Graham.
- [4] Finite element analysis of composite materials using Abaqus. Barbero, Ever. s.l.: CRC Press (2013).
- [5] Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, ASTM D3039 (2017).
- [6] Characterization in expected working environments of recyclable fire-resistant materials. Giulia De Aloysio, Mattia Morganti, Luca Laghi, Matteo Scafè, Enrico Leoni, Claudio Mingazzini, Stefano Bassi. ICEAF VI (2021), oral communication.
- [7] Nanostructured inorganic polymer matrices for high temperature resistant fiber reinforced composites. A. Natali Murri, V. Medri, E. Landi, E. Apollo, C. Bordignon, C. Mingazzini, M. Scafè. ICEAF VI (2021), oral communication.

All the mentioned figures refer to the Italian version

Fig.1: T-peel test specimen showing the dimensions of the adherends

Fig.2: Scheme showing the data matching process

Fig.3: Adhesive resistance under Mode-I failure.

Average peel resistance measured 562 N/m and simulated 532 N/mm

Tab.1: Mechanical characterization of PMC and FML (ASTM D3039)

Fig.4: Engine cowling door of the Zeffhir helicopter ([www.zeffhir.eu](http://www.zeffhir.eu)), with boundary conditions and loads

Fig.5: Lamination process and final result of the helicopter engine cowling door demonstrator

Fig.6: Schematic representation of the production process and final microstructure of the fire-proof composite

Fig.7: Full scale demonstrator of a helicopter exhaust pipe and its production