

# **MATERIALI COMPOSITI IN FIBRA DI BASALTO PER LA PROTEZIONE PASSIVA DI APPARECCHIATURE SOGGETTE A GETTI INCENDIATI**

**Landucci, G.1, Rossi F.1, Nicoletta, C.1 e Zanelli, S.1**

**1 Dipartimento di Ingegneria Chimica, Chimica Industriale e Scienza dei Materiali, Università di Pisa,  
Via Diotisalvi 2, 56126 Pisa, Italy**

## **SOMMARIO**

In questo studio sono stati sviluppati e testati materiali compositi in fibra di basalto per la protezione passiva di apparecchiature soggette ad incendi esterni, in particolare a getti incendiati. Le fibre di basalto, opportunamente lavorate e tessute, costituiscono un materiale innovativo con costi contenuti e buone caratteristiche di resistenza meccanica e termica. Sono stati effettuati test a fuoco, con fiamma premiscelata e diffusiva di idrogeno, registrando i profili termici mediante termocoppie ed una termocamera ad infrarosso.

### **1.0 INTRODUZIONE**

L'innesco di sostanze infiammabili in seguito a fenomeni di rilascio accidentali può portare alla formazione di getti incendiati, che a loro volta possono causare eventi secondari per effetto domino con conseguenze catastrofiche dovute all'urto della fiamma su attrezzature e tubazioni [1][2][3][4]. Circa il 25% dei fireball documentati nel database MIDHAS [5] sono eventi causati dal verificarsi di incendi esterni. Il controllo e la mitigazione delle conseguenze possono quindi essere critici in queste circostanze, con la necessità di utilizzare metodi di progettazione impiantistica incentrati sulla sicurezza per prevenire o comunque limitare la possibilità di effetto domino in seguito a fenomeni di rilascio accidentali. Tra i metodi impiegati, gli schermi termici sono una soluzione potenzialmente sicura e facilmente applicabile per proteggere le apparecchiature [6], a patto che i materiali siano selezionati con molta attenzione, specie quando si ha a che fare con fiamme a temperatura elevata, come nel caso dei getti incendiati di idrogeno. Questo lavoro si è incentrato sullo studio e lo sviluppo di materiali compositi innovativi costituiti da fibre di basalto in una matrice di resine polimeriche, per applicazioni di protezione passiva in sistemi soggetti a getti incendiati di idrogeno. Le fibre di basalto possono resistere a temperature molto più alte delle convenzionali fibre di vetro, e, sebbene offrano prestazioni più limitate rispetto ai costosi lavorati in silice, possono essere reperite con costi relativamente contenuti [7]. Questi materiali sono stati testati seguendo una procedura sperimentale progettata appositamente. L'apparato sperimentale è costituito da quattro componenti principali: i) un provino; ii) una struttura che sostiene il provino durante il test; iii) una sorgente di fiamma; iv) un sistema di regolazione di portata. Il profilo dinamico di temperatura del provino è registrato da una serie di termocoppie di tipo K chromel-alumel e da una videocamera a raggi infrarossi. L'apparato sperimentale è dotato di un sistema di acquisizione con porte sia analogiche che digitali per interfacciare le termocoppie al computer e un sistema di interfaccia video per acquisire le immagini fornite dalla termocamera. Un apposito software permette poi di ricavare le curve isoterme in un arco di tempo prefissato, mediando i dati istantanei ottenuti nel corso dell'esperimento. Sono state realizzati diversi tipi di prova per verificare l'influenza sul profilo termico del diverso tipo di matrice polimerica utilizzata per impregnare le fibre di basalto, lo spessore dello schermo termico protettivo, la distanza e l'inclinazione della fiamma.

### **2.0 PROTEZIONE PASSIVA**

Al fine di realizzare sistemi di protezione passiva idonei a proteggere l'impianto da getti incendiati prodotti da fuoriuscite accidentali di idrogeno, si è provveduto ad effettuare una ricerca sui principali metodi utilizzati nelle industrie.

Gli schermi termici possono essere realizzati seguendo criteri diversi:

1. Si assorbe il calore mediante una massa sufficiente di materiale, che si scalderà fino a temperature inferiori al punto di fusione. Le capacità di assorbimento di diversi materiali impiegabili come schermi termici, supponendo che si scaldino da 15°C al punto di fusione, sono: Rame 6700 kJ/kg, Alluminio 12500 kJ/kg, Magnesio 23000 kJ/kg, Tungsteno 34300 kJ/kg. Ma l'utilizzo di tali tipi di schermi per gli scopi sopra citati non risulta essere di grande praticità.

2. Si proteggono le superfici investite da fiamme ricoprendole con materiali autoestinguenti e capaci di reirradiare il calore ed in parte di assorbirlo mediante un meccanismo ablativo. Le resine autoestinguenti sono capaci di resistere alle fiamme dirette per un intervallo di tempo, la cui lunghezza varia con il flusso termico, la temperatura e naturalmente con lo spessore della resina stessa. Durante il tempo che sono investite dalla fiamma esse diventano incandescenti, riflettendo quindi parte del calore, e si distruggono senza bruciare.

3. Si rimuove il calore dalle superfici ricoprendole con un materiale che decomponga, fonda o vaporizzi sotto l'azione del riscaldamento a cui è sottoposto. Il materiale decomposto, fuso o vaporizzato è asportato dalla corrente di gas o di aria. Un tale meccanismo ablativo può assorbire grandissime quantità di calore, come si può vedere dalle capacità di assorbimento di calore per unità di peso riferita a vari materiali alla temperatura di 5000°C: polimero di struttura (CH<sub>2</sub>)<sub>n</sub> 100400 kJ/kg, polimero di struttura (CH)<sub>n</sub> 86000 kJ/kg e politetrafluoroetilene 27000 kJ/kg. Chiaramente, in questo caso, è necessario individuare un materiale di riempimento che permetta di realizzare una struttura solida, che si autosostenga anche dopo aver subito il "trattamento" del getto incendiato.

Avendo considerato più conveniente e pratico applicare, per la tipologia di installazione da proteggere, il terzo criterio di progettazione di schermi termici, l'attenzione si è concentrata sulla possibilità di ideare pannelli di materiali compositi idonei a sostenere le severe condizioni di esercizio imposte dallo scenario incidentale sopra citato. Per poter quindi verificare le caratteristiche di resistenza al fuoco e al calore di tali pannelli, si è pensato di sottoporli a prove e test che sono stati codificati e riportati nelle norme UNI e ASTM. Nei paragrafi che seguiranno, verranno presentati i tipi di materiale che si è ipotizzato di utilizzare per realizzare i pannelli compositi ed i metodi di prova suggeriti dalla normativa per testare questi schermi protettivi al fine di valutarne le prestazioni.

### 3.0 MATERIALI PER SCHERMI TERMICI

I compositi moderni sono formati di solito da due componenti, una fibra ed una matrice. La fibra è quasi sempre vetro, ma qualche volta può essere Kevlar, fibra di carbonio, o polietilene. La matrice è di solito un termoindurente come la resina epossidica, il polidiciclopentadiene o la polimide. La fibra è inserita nella matrice per rendere la stessa più resistente. I compositi rinforzati da fibre hanno due punti a loro favore. Sono resistenti, spesso anche più dell'acciaio ma presentano densità molto minore.

#### 3.1 Fibre per schermi termici

Le fibre utilizzate per la fabbricazione degli schermi termici consistono in un tessuti ottenuti da filamenti di basalto (figura 1); come si può osservare dalla tabella 2 questi presentano, a parità di costo, proprietà termiche superiori a quelle delle classiche fibre di vetro, mentre offre prestazioni inferiori rispetto ai filamenti di silice, ma il costo di quest'ultime è estremamente elevato.

Questo tipo di fibre viene prodotto direttamente utilizzando rocce di basalto o che comunque contengono questo tipo di minerale; in generale, il basalto è una roccia di origine vulcanica, magmatico effusiva, di colore scuro o nero con un contenuto di silice (SiO<sub>2</sub>) relativamente basso (minore del 50% solitamente), inoltre il magma da cui si origina è di tipo basico, per questo motivo ha spiccate proprietà alcaline; una composizione tipica della roccia per la produzione di questi filamenti è riportata in tabella 1.

Tabella 1. Composizione tipica delle rocce per la produzione di fibre di basalto.

SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	CaO	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
50.2 - 47.5	2.0 - 0.7	18.6 - 15.1	14.8 - 11.7		7.5 - 2.6	3.3 - 2.3	6.7 - 4.8	12 - 6	—	—

Le rocce contenenti basalto vengono quindi lavorate in modo da ottenere fibre da cui è possibile ricavare anche veri e propri tessuti (Figura 1), che impregnati da opportune resine e, al limite, ricoperti da idonei

stucchi o intonaci, possono resistere alle alte temperature prodotte da un fiamma di idrogeno (temperatura adiabatica di fiamma: 2050°C) e assorbire un grande quantità di calore.

Tabella 2 Proprietà termiche di alcuni tipi di fibre.

Proprietà termiche	Unità SI	Basalt Filaments	Fiberglass	Silica Filaments
Maximum application temperature	(°C)	982°	650°	1100°
Sustained operating temperature	(°C)	820°	480°	1000°
Minimum operating temperature	(°C)	-260°	-60	-170°
Thermal conductivity	(W/m K)	0.031-0.038	0.034-0.04	0.035-0.04
Melting temperature	(°C)	1450°	1120°	1550°
Virtification conductivity	(°C)	1050°	600°	1300°-1670°
Glow loss	(%)	1.91	0.32	1.75
Thermal expansion coefficient	(ppm/°C)	8.0°	5.4°	0.05°
Price Comparison	-	\$	\$	\$\$\$\$

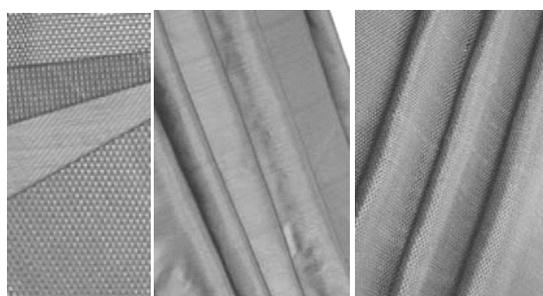


Figura 1. Esempi di tessuti in fibra di basalto.

### 3.2 Resine utilizzate per l'impregnazione

Anche se le fibre di basalto hanno proprietà termiche significative, la fabbricazione di un pannello termico non può prescindere dalla scelta di un materiale idoneo per realizzare l'impregnazione e quindi la matrice di supporto. Questo perché la matrice deve garantire l'integrità del pannello anche alle elevate temperature, conservando quindi proprietà meccaniche ed elasticità.

Esistono alcune matrici economiche con proprietà accettabili. Un esempio sono i sistemi insaturi di poliestere/stirene. Sono validi per applicazioni comuni ma presentano qualche inconveniente nella fase di reticolazione: si restringono molto, possono assorbire acqua facilmente, la loro resistenza all'urto è bassa e non sono molto resistenti chimicamente. Un altro sistema a basso costo è la cosiddetta resina vinilestere, ottenuta facendo reagire un diepossido con un acido acrilico, o acido metacrilico. Poi si polimerizzano i gruppi vinilici, e si ottiene una resina reticolata.

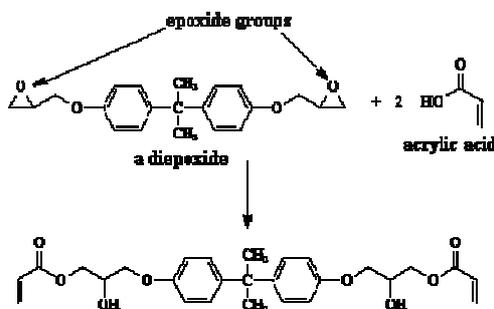


Figura 2. Reazione tra diepossidi ed acido acrilico.

A volte si utilizzano oligomeri più grandi come quello riportato qui sotto:

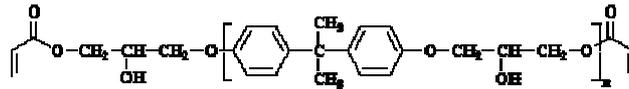


Figura 3. Esempio di oligomero di dimensioni maggiori.

Anch'essi sono reticolati nello stesso modo, con la polimerizzazione dei gruppi vinilici. Le resine vinilestere hanno qualche vantaggio rispetto ai poliesteri insaturi. Non assorbono molta acqua, e non si restringono quasi per niente quando vengono vulcanizzate. Inoltre hanno una buona resistenza chimica e grazie ai gruppi idrossilici si legano bene con il vetro.

Né il vinilestere né i poliesteri insaturi sono però molto validi per le applicazioni ad alta temperatura, come nel nostro caso. Per le alte temperature è necessario utilizzare matrici come le resine epossidiche. Per ottenerle si utilizza un diepossido come per ottenere le resine vinilestere. Questa volta non deve però reagire con l'acido acrilico, ma dovrà reticolare con una diammina. I gruppi epossidici reagiranno con la diammina, e l'intero sistema diventa reticolato:

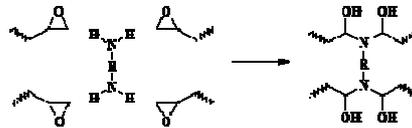


Figura 4. Reazione tra gruppi epossidici e diammine.

Grazie a tutti questi gruppi idrossilici, le resine epossidiche possono legarsi alle fibre di vetro. Hanno alcune proprietà che non si possono avere con matrici più economiche: non assorbono acqua, non si restringono molto quando vengono reticolate e possono essere utilizzate a temperature elevate.

Sempre per applicazioni a temperature elevate, ci sono inoltre altre possibilità. Le poliimidi resistono alle temperature elevate ma assorbono molta acqua, questo provoca la loro rottura. I polibenzoxazoli resistono alle temperature elevate ma sono impossibili da processare. Alcune ricerche sono interessate allo sviluppo di matrici idrocarboniche.

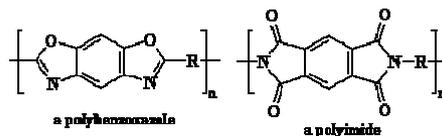


Figura 5. Altri esempi di resine.

Altri tipi di resine particolarmente resistenti alle alte temperature sono quelle a base fenolica o a base epossifenolica. Un aspetto particolarmente interessante è il comportamento di tipo ablativo che le resine fenoliche ed epossidiche, opportunamente additivate, possono presentare. Infatti tali matrici non fondono alle temperature a cui sono sottoposte, ma generano prodotti gassosi di decomposizione che, diffondendo attraverso lo strato superficiale di carbone, formatosi nei primi istanti di funzionamento, lo raffreddano, asportando così grandi quantità di calore.

#### 4.0 DESCRIZIONE DELL'APPARATO SPERIMENTALE

Una volta trovate una o più resine ritenute compatibili con la fibra di basalto e idonee a resistere alle condizioni di esercizio in gioco durante un getto incendiato di idrogeno, è importante poter testare e valutare le effettive prestazioni del materiale composito, in modo da poter definire le sue caratteristiche di resistenza alla fiamma e al calore.

#### **4.1 Normativa e standard di riferimento**

Al fine di effettuare queste prove, alcuni centri di ricerca e le normative in atto ci suggeriscono vari metodi idonei a valutare le proprietà termiche e meccaniche dei materiali sottoposti all'azione del fuoco. In particolare, volendo valutare la reazione di questi materiali sottoposti all'azione di una fiamma d'innesco in presenza di calore radiante, il decreto ministeriale del 26/09/84, aggiornato tramite il decreto del ministero degli interni del 3/09/2001, suggerisce di seguire le indicazioni fornite dalla norma UNI 9174-9174/A1.

Un riscontro alla metodologia di prova proposto da questa normativa ci è fornito dalle norme ASTM, infatti in quella identificata dal codice E 1321-93 viene presentato un test analogo, utile per definire, anche in questo caso, le caratteristiche di ignizione e di diffusione del fronte del fuoco di un materiale sottoposto all'azione di una fiamma in presenza di calore radiante. Indubbiamente questi tipi di test non simulano esattamente tutti gli effetti di un getto incendiato, ma permettono di valutare la reazione che il pannello può avere una volta sottoposto all'azione di una fiamma che impatta sulla sua superficie, in presenza di calore radiante. In particolare, per mezzo di questo tipo di prova è possibile valutare il minimo flusso termico e il minimo tempo necessari per l'ignizione del materiale, la velocità di propagazione della fiamma lungo la superficie ed i profili termici sullo schermo termico.

In sintesi, secondo quanto riportato negli standard di riferimento, l'apparato sperimentale è costituito da due elementi principali: il primo è l'intelaiatura che sostiene il portaprovino, su cui andrà fissato il campione da testare; il secondo è l'insieme delle apparecchiature che costituiscono il pannello radiante. Il pannello radiante a monte del quale avviene la combustione in condizioni controllate, in modo da determinare il flusso termico effettivamente ricevuto dal pannello, è costituito in materiale refrattario poroso e da una linea di alimentazione combustibile. In aggiunta a questo dispositivo, è previsto dalla normativa l'utilizzo di una bruciatore per realizzare una fiamma di lunghezza massima di 180 mm, posizionata ad un angolo di 20° rispetto alla superficie del pannello campione (angolo che può essere variato per simulare una fiamma proveniente da direzione diversa), quindi l'apparato sperimentale sarà munito di una seconda linea di alimentazione del gas combustibile. La metodologia di prova secondo norma ASTM E 1321-93, considerata più completa dal punto di vista della spiegazione della procedura e dei metodi di trattamento dei dati ottenuti, prevede due fasi di sperimentazione: nella prima fase si valutano le proprietà relative all'ignizione del materiale testato, cioè tempo e flusso minimo di calore per l'ignizione, mentre nella seconda fase prevede la possibilità di misurare la velocità di propagazione del fronte di fiamma lungo la superficie del campione.

#### **4.2 Aspetti progettuali riguardanti schermi a fuoco**

Riportiamo quindi di seguito solo alcune indicazioni e commenti sui metodi di progettazione che possono essere utilizzati per la realizzazione di schermi termici; è comunque da considerare che, anche una volta definito un valore limite superiore per la quantità di calore che il pannello deve assorbire, in realtà si devono considerare [6][7][8][9]:

1. la dispersione del getto per irraggiamento prima che questo colpisca lo schermo,
2. il contenuto termico dei gas caldi che si allontanano dallo schermo dopo averlo colpito,
3. la dispersione di calore in quella parte del getto che può miscelarsi liberamente all'atmosfera non incontrando alcuna parete o schermo.

Le quantità di calore disperse secondo le modalità sopra riportate dipendono dalla disposizione dello schermo, dalla fisionomia del getto e più in generale da quella che assumerà l'impianto di produzione dell'idrogeno e quindi, vista la condizione ancora prematura per poter definire esattamente questi fattori, la loro valutazione risulta di difficile determinazione, anche se il loro ammontare sarà probabilmente rilevante. I principali metodi di valutazione del flusso termico in gioco, che quindi definirà le dimensioni del pannello, sono:

1. l'assorbimento totale: si effettua una scelta conservativa considerando di trascurare le perdite di calore sopra citate e quindi imponendo che il materiale costitutivo del pannello debba assorbire tutto il calore prodotto da un'ipotizzata quantità di idrogeno fuoriuscito.

2. lo scambio termico per convezione: in questo caso viene calcolata la quantità di calore scambiata tra lo schermo protettivo e la corrente di gas incendiati che investe il pannello stesso. Alcuni studi sono stati svolti per dimostrare che la maggior parte del calore è trasmessa per convezione nell'area di impatto del getto, mentre il contributo del calore irraggiato è modesto.

3. lo scambio termico per convezione e irraggiamento: utilizzando questo metodo si tiene di conto anche dell'aliquota di calore scambiato per irraggiamento.

### 4.3 Progettazione della prova sperimentale

Al fine di effettuare queste prove, alcuni centri di ricerca e le normative in atto ci suggeriscono vari metodi. Per realizzare una tipologia di prova più idonea ad ottenere dati utili per poter analizzare il comportamento dei pannelli sottoposti all'azione di un getto incendiato, si è pensato quindi di modificare opportunamente i test e gli apparati sperimentali suggeriti dalle normative. In particolare, si è deciso di mantenere inalterata la struttura portante che deve sostenere il campione da testare e quindi si mantengono le dimensioni standard della provetta da sottoporre al test (dimensioni: 130 x 770 mm). Un'altra modifica importante consiste nel non utilizzare più il pannello radiante come fonte di calore, quindi non è più necessario realizzare la sua struttura portante e il suo sistema di alimentazione; al suo posto, infatti l'unica fonte di calore utilizzata è la fiamma prodotta da un bruciatore per idrogeno. In Figura 6 si riporta lo schema di marcia dell'apparato sperimentale, mentre in figura 7 si riporta una visione di insieme. L'apparato sperimentale è posizionato presso i laboratori del polo tecnologico Magona a Cecina (LI).

L'apparato sperimentale è costituito da quattro componenti principali: i) un provino; ii) una struttura che sostiene il provino durante il test; iii) una sorgente di fiamma; iv) un sistema di regolazione di portata. Il profilo dinamico di temperatura del provino è registrato da una serie di termocoppie di tipo chromel-alumel e da una videocamera a raggi infrarossi. L'apparato sperimentale è dotato di un sistema di acquisizione con porte sia analogiche che digitali per interfacciare le termocoppie al computer e un sistema di interfaccia video per acquisire le immagini fornite dalla termocamera. Un apposito software permette poi di ricavare le curve isoterme in un arco di tempo prefissato, mediando i dati istantanei ottenuti nel corso dell'esperimento.

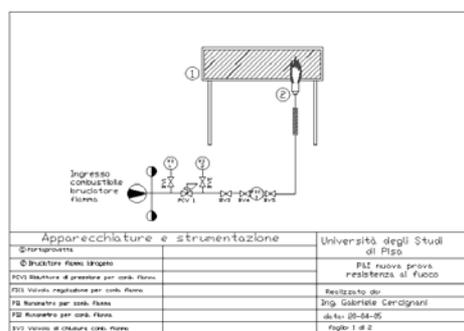


Figura 6 Schema della prova realizzata per valutare le prestazioni dei campioni di materiale composito.



Figura 7 Visione di insieme dell'apparato sperimentale situato presso il Polo Tecnologico Magona.

### 4.3.1 Provini per test a fuoco

Attualmente, per effettuare le prove, sono stati utilizzati pannelli in fibra di basalto tipo BT 11/1 della ditta Kamenny Vek (Tabella 3) impregnati con resina epossidica, di tipo *Araldite LY 5052*© (LY5052) con catalizzatore *Aradur 5052*© (HY5052) della Huntsman, utilizzata come impregnante manuale, lavorati per pressatura a caldo. I pannelli ottenuti dalla lastra hanno uno spessore di 3.8 mm con larghezza pari a 770 mm e altezza pari a 130 mm.

Tabella 3 Caratteristiche della fibra di basalto utilizzata per le prove sperimentali.

Reference	Price, \$/m <sup>2</sup>	Weaving type	Surface density, g/ m <sup>2</sup>	Width, cm	Number of yarns/10cm		Tex of yarns (balanced)	
					warp	weft	warp	weft
BT-11/1	3.60	Satin 5/3	445	100	210	130	125	145

### 4.3.2 Struttura porta-provino

La struttura portante è realizzata in acciaio inossidabile, rivestito di vernici intumescenti per esser protetto da eventuale diffondere della fiamma. Il portaprovino ad essa fissato è realizzato con lo stesso materiale con dimensioni idonee a sostenere provette di dimensioni 130 x 770 mm e di spessore variabile a seconda delle necessità; il sistema di fissaggio è stato quindi realizzato a mezzo di viti capaci di spingere il campione contro un bordo ad “L” realizzato davanti al portaprovino.

### 4.3.3 Linea di alimentazione dei gas

La linea di alimentazione del gas combustibile è opportunamente rivestita di materiale isolante per proteggerla dal calore ed è costituita da: bombola di stoccaggio del gas combustibile (idrogeno), riduttore di pressione munito di due manometri per il controllo della pressione a monte e a valle del riduttore, valvola di chiusura della linea, regolatore di portata e tubazione. L'aria di combustione viene fornita direttamente dalla linea di aria compressa ricavata dall'attacco al compressore principale a disposizione al Polo Tecnologico Magona ed è dotata anch'essa dei controlli e delle protezioni posti sulla linea di alimentazione del combustibile.

### 4.3.4 Dispositivo per la formazione della fiamma

La fiamma è generata a mezzo di un cannello ossiacetilenico per saldatura, adattato per l'utilizzo di idrogeno. Tale dispositivo consente di lavorare in condizioni di fiamma a diffusione o premiscelata a seconda delle esigenze. Infatti è dotato di linee separate per combustibile ed aria, con rispettive valvole manuali di regolazione. Per le prove in regime diffusivo, viene chiusa l'aria di combustione ed innescato il getto di idrogeno, alimentato dall'aria ambiente aspirata per effetto venturi. Per modificare il regime di combustione è sufficiente aprire la valvola della linea dell'aria compressa, regolando opportunamente la portata in modo da generare una fiamma stabile. La fiamma premiscelata di idrogeno ha una lunghezza di circa 20 cm ed un diametro massimo di circa 2 cm. Per evitare problemi di polveri e diffusione di sostanze pericolose, è stato posizionato un aspiratore dotato di cappa subito al di sopra.

## 4.4 Sistemi di acquisizione

### 4.4.1 Termocamera ad infrarosso

Il sistema sperimentale è munito della strumentazione necessaria per definire i profili termici, spaziali e temporali, del campione di materiale sottoposto all'azione della fiamma. In particolare, è ritenuto importante conoscere l'andamento temporale e spaziale della superficie anteriore del pannello campione, quella

sottoposta direttamente al getto incendiato, e per poter ottenere questi dati, si è ritenuto che una termocamera ad infrarosso fosse lo strumento più idoneo. Questo tipo di apparecchiatura ha la possibilità di fornire sia immagini snapshot sia video dei fenomeni termici a cui sono sottoposti gli oggetti inquadrati. Effettuando una ricerca bibliografica per documentarsi sui diversi tipi di termocamere disponibili in commercio, è stato possibile definire il tipo di sensore, elemento discriminante per la scelta di questa apparecchiatura, di cui deve essere munito lo strumento, e quindi il campo spettrale in cui operare al fine di poter ottenere i dati di temperatura nei range termici di interesse (fino a 1500° - 2000° C). Una volta determinato il tipo di sensore necessario per l'applicazione sperimentale da svolgere, in particolare un composto di InSb (photovoltaic intrinsic; PD), è stata effettuata una ricerca per individuare le principali aziende produttrici e fornitrici di termocamere ad infrarosso e il dispositivo prescelto è la Flir® ThermaCAM Merlin®. Tale strumento è dotato di un particolare filtro fiamma, un filtro spettrale a banda stretta di tipo passa banda, cioè progettato in modo tale da lasciare passare solo la frequenza selezionata. La frequenza prescelta in questo caso è quella di 3,9 µm, che è la zona in cui la fiamma ha la sua trasparenza massima e quindi crea meno disturbo al soggetto inquadrato. Il diagramma di risposta spettrale del detector della termocamera e quello del filtro a 3,9 µm che può essere montato sull'ottica sono mostrati nella figura 8. Quando questo è installato la risposta totale del sistema è la combinazione delle due.

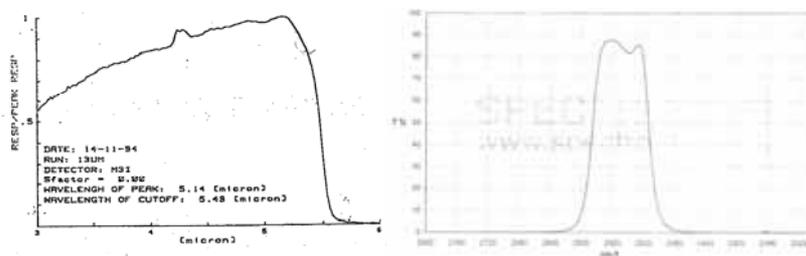


Figura 8 Diagramma di risposta spettrale del detector della termocamera (sx) e del filtro da 3.9 µm (dx)

#### 4.4.2 Termocoppie

Le scansioni della termocamera verranno accompagnate durante la prova da misure effettuate sulla parte posteriore del pannello tramite termocoppie. Il problema principale riscontrato nella scelta delle termocoppie è il dispositivo di fissaggio al pannello, dato che l'adesivo utilizzato per le prove non invasive non può resistere a temperature dell'ordine dei 1000°C. D'altro canto una termocoppia a rivetto risulterebbe troppo difficile da montare e quindi è stata presa in considerazione l'ipotesi dell'utilizzo della termocoppia "a perdere". Essa consiste in due matasse di filo conduttore in cui l'elemento sensibile si ricava sbucciando l'estremità di entrambi come per un normale cavo elettrico, unendo poi i lembi per saldatura, soluzione accettata per la maggiore praticità ed i costi contenuti. Dato il campo di temperature in gioco, sono consigliabili le leghe CHROMEL e ALUMEL in matasse di diametro di almeno 0.3 mm per ottenere una buona resistenza. Le termocoppie vengono fissate in punti opportuni del pannello, creando previamente un piccolo foro-guida., che fornisce il corretto posizionamento, e poi fermate con pasta siliconica per alta temperatura (massimo 1250°C).

### 5 ANALISI DEI RISULTATI PRELIMINARI

L'apparato sperimentale è stato impiegato per verificare il corretto assetto della strumentazione e per ottenere profili termici sul pannello, testandone quindi l'efficacia, tramite prove effettuate in diversi regimi di fiamma. Lo stesso pannello in fibra di basalto è stato preliminarmente sottoposto ad un getto incendiato di tipo premiscelato e successivamente ad un getto di tipo diffusivo. La prova in regime diffusivo riproduce le condizioni di un getto incendiato che si può verificare realmente in un contesto industriale, ma è di difficile controllo e definizione. La prova in regime premiscelato invece, presenta risultati più regolari ed è facilmente riproducibile, conoscendo le portate di combustibile e comburente alimentate al cannello. Inoltre la fiamma che si forma è regolare e concentrata su una zona limitata. Questo permette di ottenere dati significativi per studiare i fenomeni convettivi che avvengono all'interno del pannello in direzione trasversale alla fiamma.

## 5.1 Test a fuoco in regime premiscelato

Il test a fuoco in regime premiscelato è stato condotto utilizzando il cannello in posizione centrale ed ortogonale rispetto al pannello (figura 9), a 120 mm dalla superficie. La portata di idrogeno alimentata era pari a circa 2000 NI/h, con pressione pari a 0.8 barg e una corrispettiva pressione dell'aria pari a 1 barg, alimentata in modo tale da mantenere una fiamma stabile. La termocamera è stata posizionata a 3.9 m di distanza dal pannello con il fuoco in asse con il centro del pannello, a 1.05 m di altezza dal piano di calpestio. Si rimanda alla figura 9 per il posizionamento delle termocoppie. E' stato scelto di non registrare la temperatura in asse con la fiamma, dalla parte posteriore, ma di adottare una disposizione simmetrica. La prova è stata condotta per circa 35 minuti, raggiungendo velocemente lo stazionario in 5 minuti circa, verificando l'efficacia della protezione, che ha resistito senza perforazione. Le registrazioni della termocamera (Figura 10 sx) hanno dato significative indicazioni sullo sviluppo del profilo termico, che sostanzialmente presenta una zona termicamente attivata dalla fiamma, pari a circa 100 mm di diametro, in cui si superano i 1000°C (Figura 10 dx). Il resto del pannello invece si riscalda in modo uniforme con temperature decrescenti in modo simmetrico dai 200°C circa fino a temperatura ambiente. La resina epossidica si innesca immediatamente al contatto con la fiamma, ma la fiamma generata si estingue dopo circa 2 minuti, non appena il materiale viene consumato con la combustione, con sviluppo regolare della prova. In Figura 11 riportiamo la registrazione delle termocoppie, includendo la fase di transitorio, stazionario e il successivo raffreddamento del pannello.

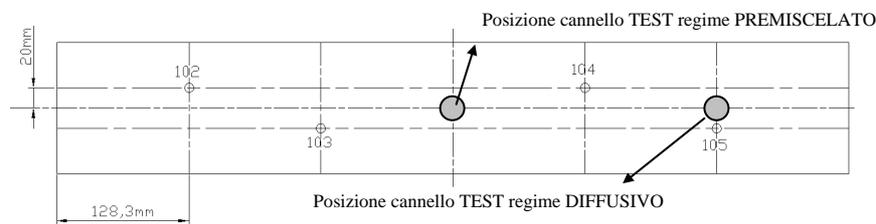


Figura 9 Schema del pannello con la disposizione delle termocoppie ed il posizionamento del cannello.

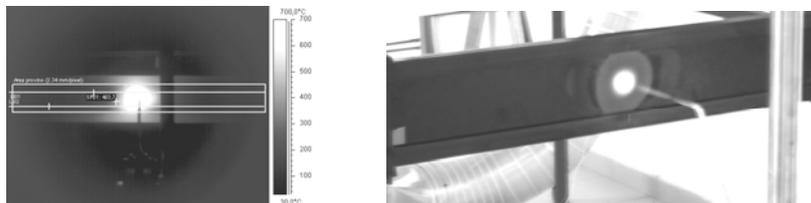


Figura 10 Sx: immagine tratta dalla registrazione della termocamera durante il test in regime premiscelato.  
Dx: immagine tratta dalla registrazione della videocamera digitale.

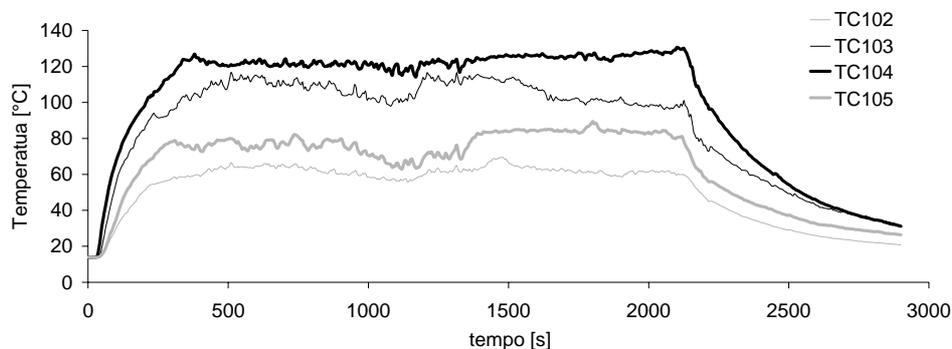


Figura 11 Andamento della temperatura nel corso della prova in regime premiscelato, in base alle registrazioni delle termocoppie TC 102-105 secondo la disposizione riportata in figura 9.

## 5.2 Test a fuoco in regime diffusivo

Il test a fuoco in regime diffusivo è stato condotto utilizzando il cannello in posizione laterale ed ortogonale rispetto al pannello (Figura 9), a 120 mm dalla superficie, in una posizione intermedia tra le termocoppie TC104 e TC105 (per la precisione, riportando le termocoppie sull'asse mediano, 8 cm da TC105 e 5 cm da TC104); la portata di idrogeno alimentata era pari a circa 2000 NI/h, con pressione pari a 0.8 barg senza però alimentare l'aria comburente. La termocamera è stata posizionata a 2.1 m di distanza dal pannello in posizione laterale per meglio inquadrare il fenomeno, a 1.05 m di altezza dal piano di calpestio. Anche in questo caso si rimanda alla Figura 9 per il posizionamento delle termocoppie. La termocoppia TC 105 è stata posizionata in asse con il cannello e quindi registra la temperatura corrispondente alla zona di impatto della fiamma. La prova è stata condotta per circa 20 minuti, raggiungendo anche in questo caso lo stazionario dopo circa 5 minuti, verificando l'efficacia della protezione, che ha resistito senza perforazione. Le registrazioni della termocamera (Figura 12sx) mostrano come la zona termicamente attivata dalla fiamma sia di dimensioni maggiori rispetto al caso premiscelato, anche se le temperature in gioco sono più basse. Il resto del pannello invece si riscalda in modo uniforme con temperature decrescenti in modo simmetrico dai 300°C circa fino a temperatura ambiente. La resina epossidica si innesca immediatamente al contatto con la fiamma, incendiando un'elevata superficie del pannello ed estinguendosi dopo circa 5-10 minuti, provocando supplementari sollecitazioni termiche oltre a quelle della fiamma diffusiva.

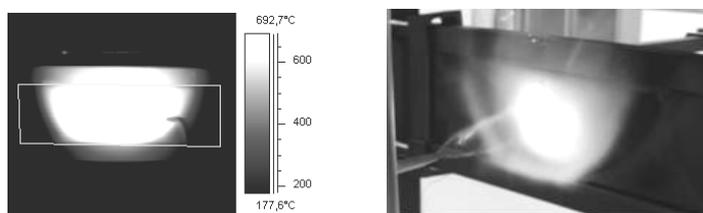


Figura 12 Sx: immagine tratta dalla registrazione della termocamera durante il test in regime diffusivo. Dx: immagine tratta dalla registrazione della videocamera digitale.

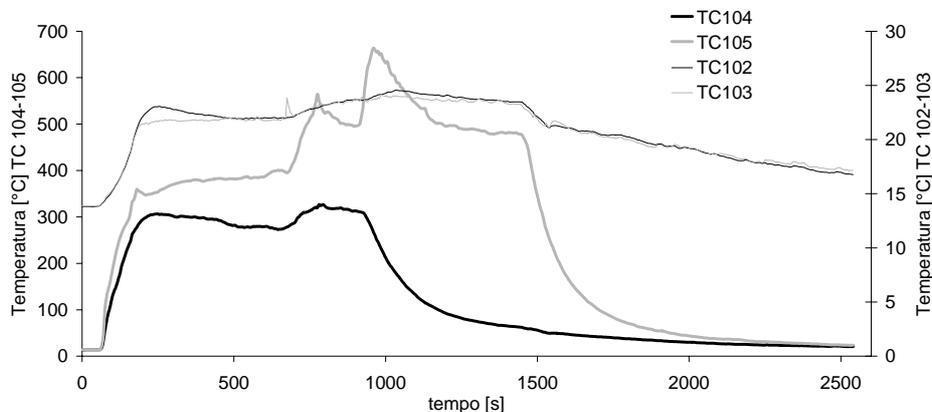


Figura 13 Andamento della temperatura nel corso della prova in regime diffusivo, in base alle registrazioni delle termocoppie TC 102-105 secondo la disposizione riportata in figura 9.

## 6 CONCLUSIONI

In questo lavoro è stato presentato il criterio di scelta, progettazione e caratterizzazione sperimentale dei pannelli per la protezione passiva di strutture sottoposte ad incendio. In particolare, sono stati sviluppati pannelli in fibra di basalto impregnati con matrici in resina epossidica sottoposti a test a fuoco, in modo da verificarne l'efficacia e determinare i profili termici. A tale scopo, è stato messo a punto un apparato sperimentale realizzato sulla base delle indicazioni degli standard e normative internazionali e nazionali, opportunamente modificato per produrre risultati significativi. I risultati preliminari hanno mostrato l'efficacia delle fibre di basalto ma, allo stesso tempo, la necessità di sviluppare matrici impregnanti più

adeguate alla resistenza al fuoco. Infatti la resina epossidica si innesca istantaneamente a contatto con la fiamma, generando da un lato carichi termici supplementari e dall'altro indebolimento del composito, specie dopo il test diffusivo.

## **RINGRAZIAMENTI**

Gli autori desiderano ringraziare il Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca per il supporto finanziario ottenuto nell'ambito del progetto di ricerca FISR 264Ric/05.

## **RIFERIMENTI**

1. AIChE CCPS 2000. Guidelines for chemical process quantitative risk analysis, II Ed. New York:.
2. Cozzani, V. and Zanelli, S. An approach to the assessment of domino accidents hazard in quantitative area risk analysis. Proc. 10th Int. Symp. on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, Elsevier, Amsterdam, 2001, pp. 1263.
3. Delvosalle, C, A methodology for the identification and evaluation of domino effects, Belgian Ministry of Employment and Labour Report No. CRC/MT/003.
4. Lees, F.P. Loss Prevention in the Process Industries, Butterworth-Heinemann II Ed., Oxford, 1996.
5. International database MHIDAS (Major Hazard Incident Data Service), developed by MHAU (Major Hazard Assessment Unit), UK HSE.
6. Fire Protection Handbook. 17th edition. Published by the NFPA, 1991.
7. D.A. Spagni and A.G. Gibson, General principles and guidelines for the application of glass reinforced composites offshore, Marinetech North West Programme on Cost-Effective Use of Fibre Reinforced Composites Offshore Report No. CP275, Phase II, Marinetech Research, Manchester, UK, 1994.
8. A.G. Gibson, Y.-S. Wu, H.W. Chandler, J.A.D. Wilcox and P. Bettess, A model for the thermal performance of thick composite laminates in hydrocarbon res, Rev. L'Inst. Fr. Pet. 50 (1) (1995) pp. 69–74.
9. M.R.E. Looyeh and P. Bettess, A finite element model for the re performance of GRP panels including variable thermal properties, Int. J. Finite Element Anal. Des. 30 (1998) pp. 313–324.