

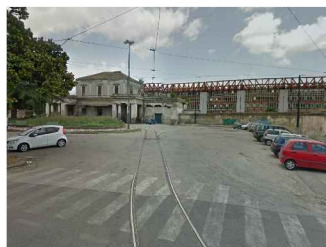


La tua
Campania
cresce in
Europa

COMUNE DI NAPOLI

Direzione centrale Infrastrutture, lavori pubblici e mobilità

Servizio Sistema delle infrastrutture di trasporto, delle opere pubbliche a rete e dei parcheggi



Grande progetto Riqualificazione urbana Napoli est

Realizzazione di sistemi di videosorveglianza
e adeguamento della caserma dei Vigili del fuoco

PROGETTO PRELIMINARE

Gruppo di progettazione - Comune di Napoli

progettazione urbana e infrastrutture: arch. Anna Rita Affortunato, ing. Marzia Di Caprio, arch. Francesca Spera, arch. Emilia Giovanna Trifiletti, geom. Luciano Marino, geom. Italo Ricci

impianti fognari: ing. Roberta Catapano, ing. Stefano Napolitano

impianti pubblica illuminazione: ing. Maria Teresa Giugliano

aspetti geologici: dott. Giuseppe Marzella

verde e alberature stradali: dott. Vincenzo Campolo

aspetti urbanistici: arch. Genoveffa Acampora

Gruppo di progettazione - Comando provinciale Vigili del Fuoco di Napoli

coordinamento generale: arch. Rosa D'Eliseo

progettazione: arch. Alfonso Giglio, ing. Luigi Madonna, ing. Giuseppe Salvati

coordinamento sicurezza in fase di progettazione: arch. Alfonso Giglio, ing. Giuseppe Salvati



Supporto Tecnico Scientifico - Università degli studi di Napoli "Federico II"

prof. arch. Luigi Piemontese, prof. ing. Emidio Nigro, prof. ing. Giorgio Serino



Responsabile del procedimento

arch. Giuseppe Pulli

Relazione specialistica di intervento di adeguamento della resistenza al fuoco

CONVENZIONE

TRA IL COMANDO PROVINCIALE DEI VIGILI DEL FUOCO DI NAPOLI

E

**IL DIPARTIMENTO DI STRUTTURE PER L'INGEGNERIA E
L'ARCHITETTURA**

DELL'UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II



**ATTIVITÀ DI RICERCA APPLICATA PER IL
SUPPORTO TECNICO-SCIENTIFICO ALLE RISORSE
TECNICHE INTERNE DEL COMANDO INERENTE GLI
INTERVENTI DI RIQUALIFICAZIONE E
TRATTAMENTO DI RESISTENZA AL FUOCO DELLE
STRUTTURE IN ACCIAIO**

RELAZIONE TECNICO-SCIENTIFICA

**SICUREZZA STRUTTURALE ANTINCENDIO DELLA PALAZZINA LOGISTICA DELLA
CASERMA DEI VIGILI DEL FUOCO DI NAPOLI**

RESPONSABILE SCIENTIFICO DELLA CONVENZIONE

PROF. ING. EMIDIO NIGRO

GRUPPO DI LAVORO

PROF. ING. EMIDIO NIGRO

ING. ANTONIO BILOTTA

ING. DONATELLA DE SILVA

ING. SANDRO MAUTONE

INDICE

1. PREMESSA	3
2. DESCRIZIONE GENERALE DELLA STRUTTURA	4
3. STATO ATTUALE DELLA SICUREZZA STRUTTURALE ANTINCENDIO	11
3.1 Piano terra.....	11
3.2 Primo e Secondo Piano.....	12
3.3 Terzo piano.....	13
3.4 Quarto piano	15
4. PROVE SPERIMENTALI INERENTI LA PROTEZIONE PASSIVA ANTINCENDIO DELLE STRUTTURE DELLA PALAZZINA LOGISTICA	16
5. INDIVIDUAZIONE DEGLI INTERVENTI PER LA PROTEZIONE ANTINCENDIO	35
6. DIMENSIONAMENTO PRELIMINARE DEGLI INTERVENTI DI RIPRISTINO DELLA PROTEZIONE PASSIVA	38
BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO	43

1. PREMESSA

La presente RELAZIONE TECNICO-SCIENTIFICA si riferisce alla Convenzione stipulata tra il Comando provinciale dei Vigili del Fuoco di Napoli ed il Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura inerente l' *"Attività di ricerca applicata per il supporto tecnico-scientifico alle risorse tecniche interne del Comando inerente gli interventi di riqualificazione e trattamento di resistenza al fuoco delle strutture in acciaio"* della Caserma dei Vigili del Fuoco di Napoli, sita in via Leopoldo Tarantini.

In particolare, la Relazione riguarda l'indagine preliminare sulle strutture esistenti dell'Edificio Logistica della Caserma dei Vigili del Fuoco di Napoli per la definizione degli interventi di riqualificazione e trattamento di resistenza al fuoco delle strutture in acciaio. Nel documento si sintetizzano i principali risultati ottenuti finora con l'attività di ricerca applicata, finalizzati alla valutazione dello stato attuale dei sistemi di protezione passiva ed alla individuazione degli interventi migliorativi ai fini della sicurezza antincendio dell'edificio citato.

La relazione si articola, quindi, nei seguenti punti principali:

- Descrizione delle strutture e dei sistemi di protezione antincendio dell'Edificio Logistica.
- Valutazione dello stato dei sistemi di protezione antincendio passiva ed attiva presenti nelle strutture, mediante rilievi in situ e prove sperimentali in situ e in laboratorio.
- Individuazione degli interventi di miglioramento delle misure di protezione passiva ed attiva delle strutture per la sicurezza in caso d'incendio e valutazione preliminare del comportamento termo-meccanico delle strutture sulla base di analisi teoriche e numeriche.

2. DESCRIZIONE GENERALE DELLA STRUTTURA

La descrizione delle strutture oggetto di studio è basata sulla documentazione tecnica del progetto esecutivo originario, fornita dal Comando provinciale dei Vigili del Fuoco di Napoli, su fonti bibliografiche ed iconografiche e sulle risultanze di una serie di sopralluoghi e di osservazioni dettagliate delle strutture (Figura 1). Si riporta di seguito la descrizione generale delle strutture, mentre i sistemi di protezione antincendio presenti sono descritti nel par. 3.



Figura 1- Foto dall'alto della Caserma dei Vigili del Fuoco di Napoli.

La caserma dei Vigili del Fuoco di Napoli, la cui costruzione è stata ultimata a metà degli anni '80, si articola in otto corpi di fabbrica principali, costituiti da strutture in acciaio sismoresistenti con tipologia costruttiva differente; alcune strutture sono di tipo tradizionale, altre più innovative.

Ogni corpo di fabbrica è caratterizzato da differenti funzioni (Figura 2):

- A- autorimessa, alloggi, mensa;
- B- colonna mobile;
- C- officina;
- D- castello di manovra;
- E- centrale termica-idrica;
- F- corpo di guardia;
- G- comando, uffici;
- H- palestra.

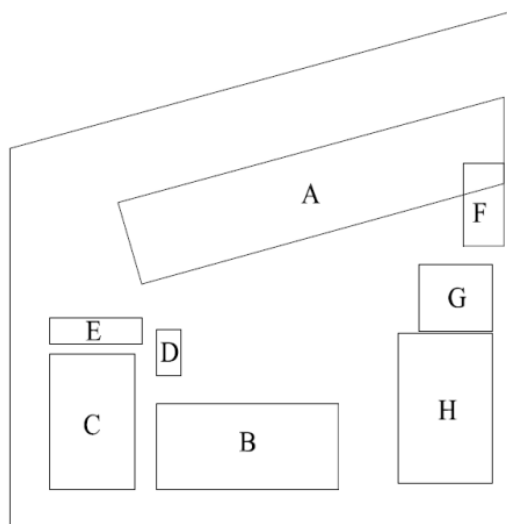


Figura 2- Disposizione fabbricati.

Questa identificazione corrisponde anche alla successione cronologica con cui gli edifici sono stati costruiti.

La progettazione fu sviluppata nel periodo 1979-1980, ovvero prima del terremoto del 23 novembre 1980, che è stato un evento significativo anche per i riflessi sulla progettazione strutturale, determinando l'inserimento della città di Napoli in zona sismica di III categoria. E' stato necessario, quindi, adeguare sismicamente il progetto che non nasceva antisismico.

Nel presente lavoro l'attenzione è stata focalizzata sull'**Edificio "A"** (Figura 3), che presenta varie destinazioni d'uso (denominato anche **Palazzina Logistica**).



Figura 3- Edificio "A".

Il requisito funzionale di avere ampi spazi coperti a piano terra completamente liberi da pilastri, anche per consentire un'agevole movimentazione degli automezzi, ha condotto all'adozione per questo fabbricato di uno schema sospeso.

I materiali utilizzati sono:

- il calcestruzzo armato per realizzare gli elementi verticali principali prevalentemente compressi (nuclei scale ed ascensori), che supportano le travi reticolari di copertura;
- l'acciaio per realizzare gli elementi inflessi di piano, i pendini ed i controventi che costituiscono l'ossatura sospesa, a cui sono affidati prevalentemente i carichi verticali;

- il sistema composto acciaio-calcestruzzo per le solette di impalcato e le travi di piano.

La struttura spaziale, quindi, è costituita da un sistema misto di elementi di acciaio/acciaio-calcestruzzo e di calcestruzzo armato, con l'ossatura in acciaio sospesa ad un graticcio di travature di copertura poggianti su nuclei scale ed ascensori in calcestruzzo armato (Figura 4).

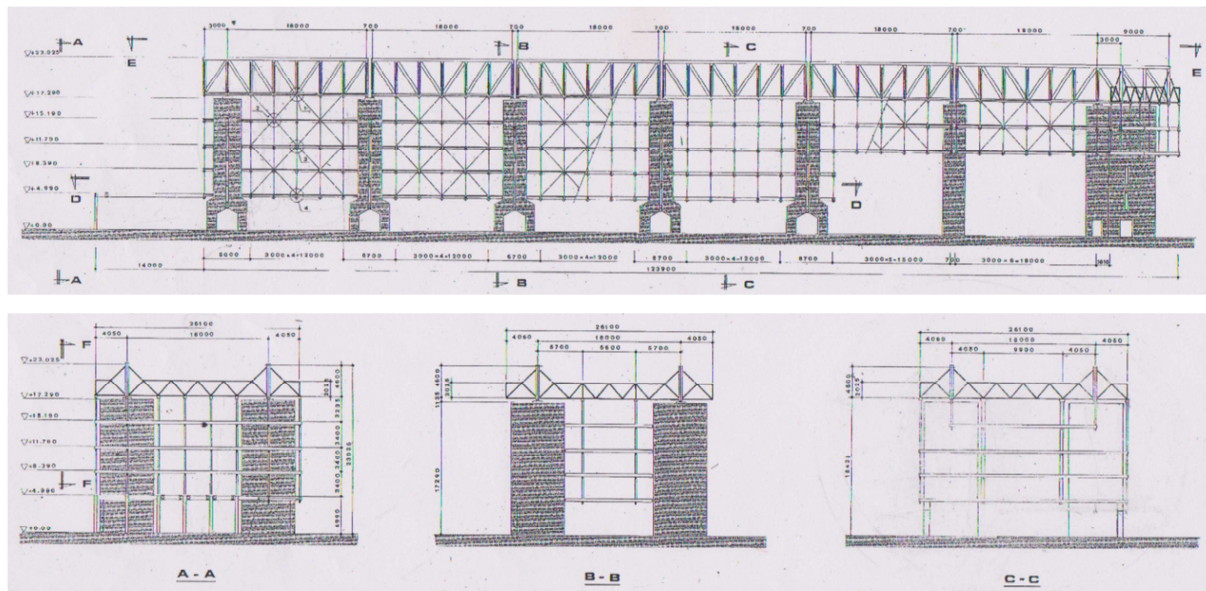


Figura 5- Sezioni longitudinali e trasversali.

L'edificio in esame si sviluppa su quattro piani in elevazione, oltre al piano terra completamente libero da pilastri; in particolare, si nota che i 4 livelli sono presenti solo in 4 nuclei, mentre in altri 2 sono presenti solo due livelli, con lo scopo di creare spazio per l'innesto del corpo di guardia (Figura 6).



Figura 6- Innesto corpo di guardia e vista dal piazzale interno.

La pianta è rettangolare allungata con larghezza di circa 26 m, scandita in senso longitudinale secondo un modulo di 3 m (Figura 7).

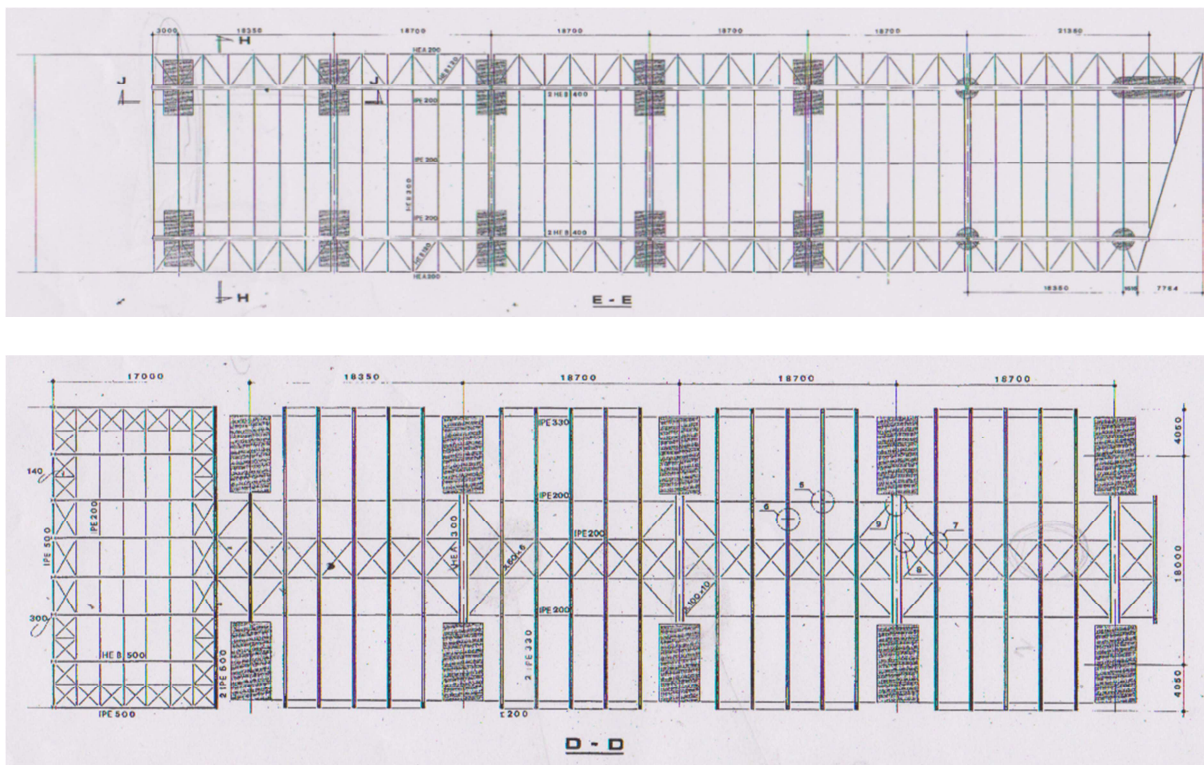


Figura 7- Pianta tipo e copertura.

I nuclei in calcestruzzo armato, che costituiscono la struttura portante verticale, sono accoppiati a due a due in senso trasversale e le varie coppie sono poste ad interasse di 18 m in senso longitudinale, in modo da formare maglie quadrate 18 x 18 m (Figura 8).

Le sommità dei nuclei sono collegate da travi reticolari in acciaio con correnti paralleli, disposte longitudinalmente con campate (separate in asse ai nuclei) di luce pari a 18 m.

In corrispondenza dei montanti delle travi longitudinali, ad interasse quindi di 3 m, poggiano le travi trasversali di copertura, anch'esse reticolari con luce di 18 m e sbalzi laterali di circa 4 m (Figura 8).

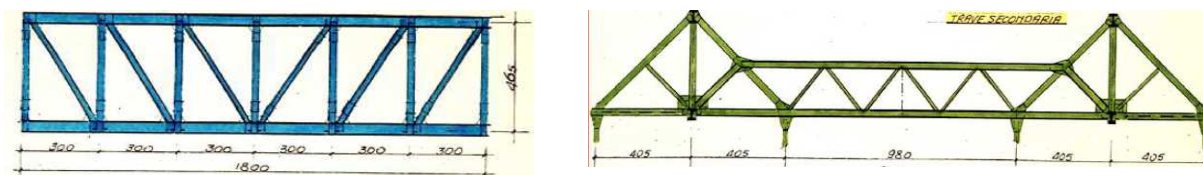


Figura 8- Travi di copertura.

L'insieme delle travi longitudinali e trasversali realizza in copertura un reticolo ortogonale di travi poggiate sui nuclei in cemento armato, secondo una maglia planimetrica di 18 x 18 m, completata da controventi orizzontali disposti lungo il perimetro longitudinale (Figura 8).

Le travi principali hanno una sezione retta costituita da due profili HEB 400 saldati, in modo da creare una sezione scatolare, dotata di rigidità torsionale non trascurabile soprattutto durante la fase di montaggio, in cui la trave principale non ha ancora il supporto delle travi secondarie.

A tale sistema reticolare, sono quindi sospesi, mediante tiranti variamente disposti, gli impalcati di piano (Figura 9).

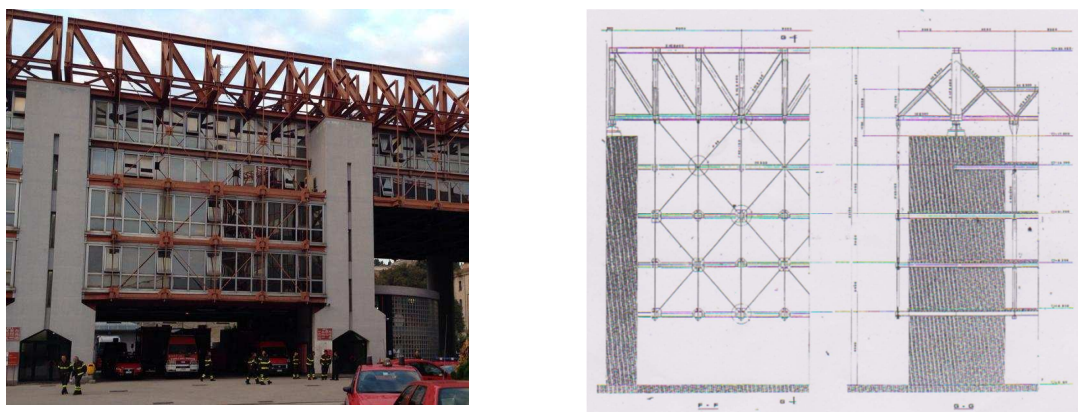


Figura 9- Sezioni tipo.

Ciascun impalcato sospeso è costituito da travi di piano IPE 330 accoppiate (il doppio profilo è importante perché il tirante è passante e attraversa le due travi), ordite in senso trasversale con interasse 3 m e sospese in quattro punti, che nella sezione corrente, scandiscono tre luci di 8,10-9,90-8,10 m, ad eccezione dell'ultimo impalcato che è arretrato di circa 4 m rispetto al perimetro (Figura 9).

Completano l'impalcato i controventi orizzontali di piano, ubicati, secondo l'asse longitudinale, al centro della pianta con sospensioni in corrispondenza dei nuclei.

Il solaio è costituito da una soletta composta acciaio-calcestruzzo, con lamiera grecata collegata all'estradosso delle flange delle travi trasversali IPE330 mediante pioli di tipo Nelson, che rendono collaborante la soletta di conglomerato gettato in opera (Figura 10).

I tiranti di perimetro, completati da un sistema di diagonali di controventamento, appartengono ad un piano verticale esterno avanzato rispetto ai pannelli vetrati di chiusura del corpo di fabbrica (Figura 11).



Figura 10- Particolare dell'impalcato di piano.

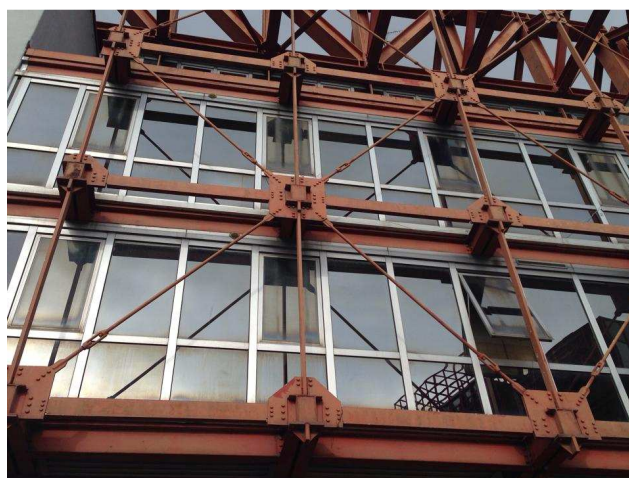


Figura 11- Particolare diagonali di facciata.

I nuclei di cemento armato hanno il compito di trasmettere alla fondazione, oltre ai carichi verticali portati dalla travatura di copertura, anche quelli orizzontali dovuti al vento e alle scosse sismiche.

Il sistema fondale è di tipo indiretto con pali trivellati di diametro $\phi 800$ mm e lunghezza di 18-20 m circa. I nuclei rettangolari in c.a. hanno fondazioni con basamenti di dimensioni 6 x 10,8 m e spessore 2 m, poggianti su quindici pali $\phi 800$ mm, mentre i nuclei circolari si fondano su basamenti 6x6 m e spessore 2 m, poggianti su 9 pali sempre di diametro $\phi 800$ mm.

La struttura oggetto di studio è munita di un sistema di appoggi, posti tra la sommità dei nuclei in c.a. e la struttura reticolare di copertura, che sono chiamati a svolgere una doppia funzione:

- a) consentire i movimenti della struttura sotto i carichi di esercizio (ad esempio le dilatazioni termiche giornaliere e stagionali);
- b) smorzare gli spostamenti indotti nella struttura dalle azioni sismiche con specifico riferimento alle scosse sussultorie.

La prima funzione è affidata ai vincoli che, utilizzando l'accoppiamento teflon-neoprene, realizzano cerniere fisse e carrelli mono e pluridirezionali; in particolare sulla maglia quadrata 18x18 m, uno spigolo è fisso e gli altri tre sono carrelli (Figura 12).

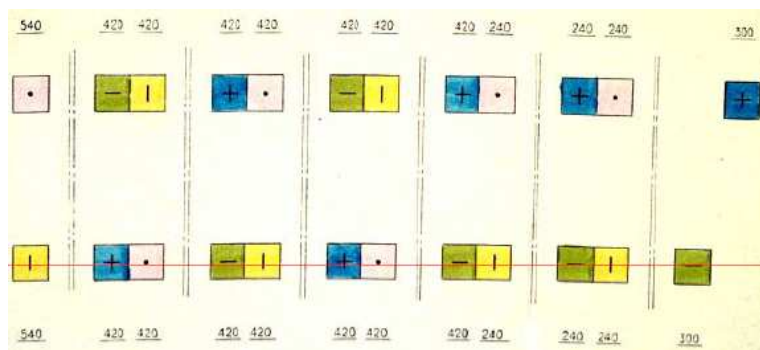


Figura 12- Disposizione vincoli in pianta.

Per quanto concerne la seconda funzione è stato garantito che:

- il sistema deve intervenire durante il sisma, ma deve essere bloccato in condizioni di esercizio;
- il sistema deve assorbire prevalentemente le scosse sussultorie, proprio perché esse sembrano arrecare maggior disturbo ad una struttura sospesa;
- l'assorbimento di energia è basato sullo snervamento degli elementi dissipatori;
- gli elementi dissipatori devono essere semplici, di facile sostituzione e di basso costo;
- il vincolo deve consentire spostamenti tali da mandare in campo plastico i dissipatori.

In virtù di queste esigenze, sono stati adottati cuscinetti di neoprene armato come elemento morbido, la cui deformabilità interviene quando il livello di sollecitazione trasmesso dai nuclei al sistema di sospensione supera quello corrispondente alle normali azioni di esercizio; i conseguenti spostamenti sono necessari a portare in campo plastico gli elementi dissipatori.

Il problema degli spostamenti orizzontali, peraltro ritenuti meno importanti per la notevole rigidità delle torri in c.a., è stato affrontato per proteggere la struttura dagli effetti di martellamento fra le pareti delle torri e gli impalcati dell'ossatura sospesa.

In particolare ad ogni estremità della trave facente capo al nucleo in c.a. è applicato un dispositivo con quattro cuscinetti di neoprene a struttura cellulare che per effetto di movimenti planimetrici contrastano contro le parti metalliche di una piastra ancorata alla parete in c.a. (Figura 13).

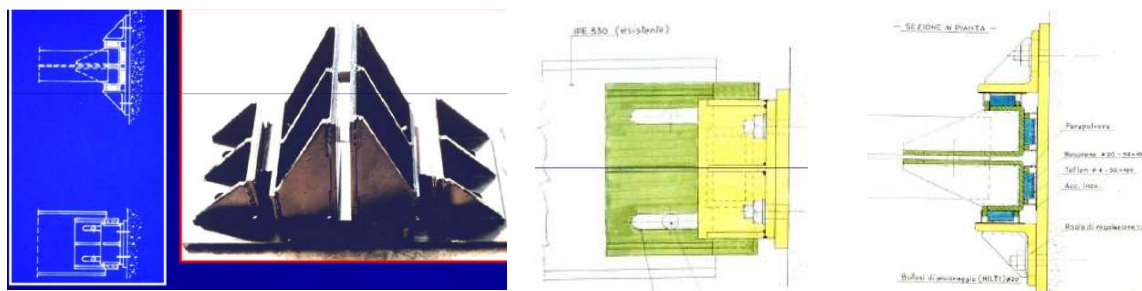


Figura 13- Dispositivi di piano.

3. STATO ATTUALE DELLA SICUREZZA STRUTTURALE ANTINCENDIO

È stato svolto un rilievo strutturale con particolare attenzione alla individuazione dei sistemi di protezione delle strutture contro l'incendio ed alla distribuzione degli spazi e delle destinazioni d'uso dei vari piani.

Il complesso strutturale è dotato di sistemi di protezione passiva, costituiti da vernice intumescente, applicata ad elementi strutturali con acciaio in vista (ad esempio i pendini interni di sospensione), e da pannelli di controsoffittatura, ubicati all'intradosso delle solette di impalcato; l'involucro esterno in acciaio non presenta protezione al fuoco. Non sono disponibili documentazioni tecniche e progettuali inerenti le caratteristiche della vernice intumescente e della controsoffittatura.

Si evidenzia che il complesso strutturale è dotato di un'insolita, ma efficace protezione attiva che è quella della presenza in loco dei Vigili del Fuoco, che possono prestare immediato intervento.

La struttura consta di quattro piani in elevazione, oltre al piano terra, che è completamente libero da pilastri. Si riportano di seguito le risultanze del rilievo in dettaglio.

3.1 PIANO TERRA

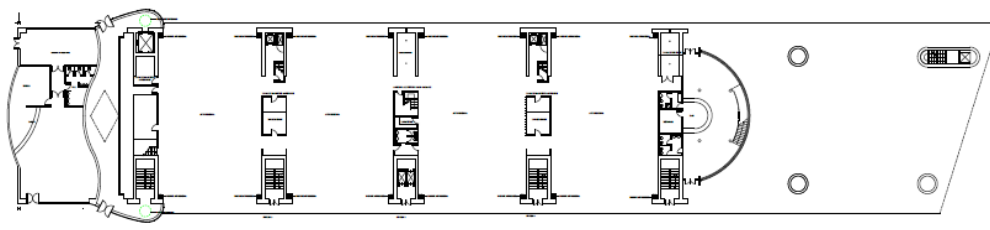


Figura 14- Pianta piano terra.

Il piano terra (Figura 14) è adibito ad autorimessa, ospita gran parte dei mezzi dei Vigili del Fuoco. Esso presenta il solaio composto acciaio-calcestruzzo con lamiera grecata in acciaio a faccia-vista, per cui la protezione al fuoco è costituita dalla vernice intumescente applicata alla lamiera.



Figura 15- Particolare della lamiera protetta con vernice intumescente.

Si osserva (Figura 15) che la vernice è ammalorata probabilmente a causa di infiltrazioni di acqua provenienti dal piano soprastante e di correnti vaganti; in alcuni casi si è totalmente “scollata” e pertanto alcune parti degli elementi sono prive di protezione al fuoco.

3.2 PRIMO E SECONDO PIANO

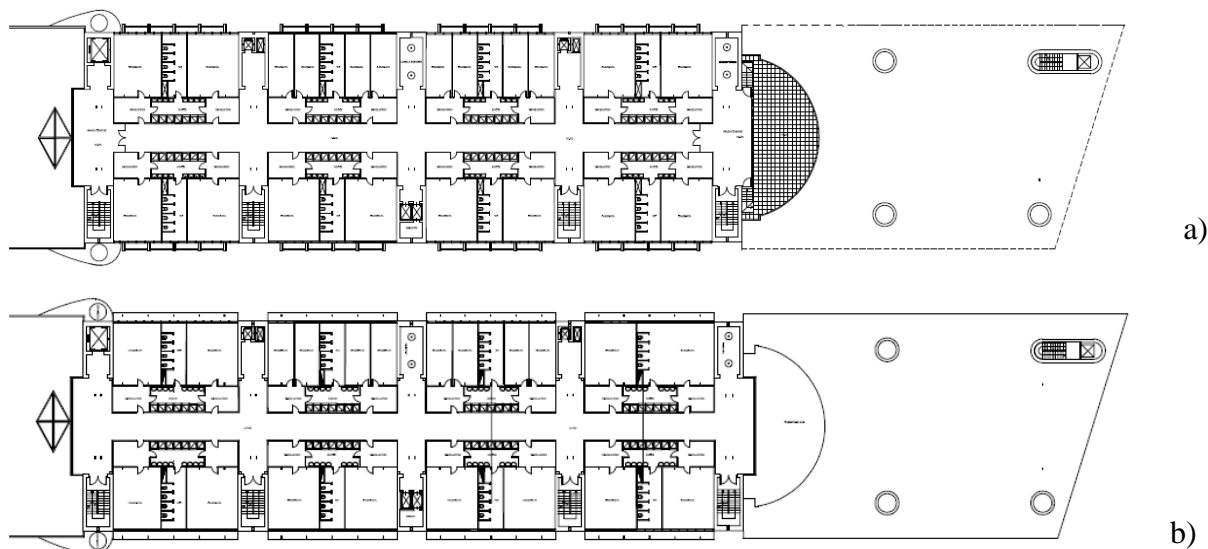


Figura 16- Piante primo a) e secondo piano b).

Il primo ed il secondo piano (Figura 16) ospitano gli alloggi del personale operativo organizzati in camerate da 6/8 posti letto a gruppi di due nei campi tra i nuclei; nella parte mediana sono presenti i servizi igienici e gli spogliatoi.

Si è potuto riscontrare che, in questi casi, l’impalcato (travi, lamiera e controventi orizzontali) non presenta vernice intumescente, ma è dotato di controsoffittatura. La controsoffittatura è costituita da pannelli modulari alloggiati in un telaio in acciaio, facilmente smontabili. In diversi punti si presenta molto ammalorata, in altri invece manca completamente (Figura 17).

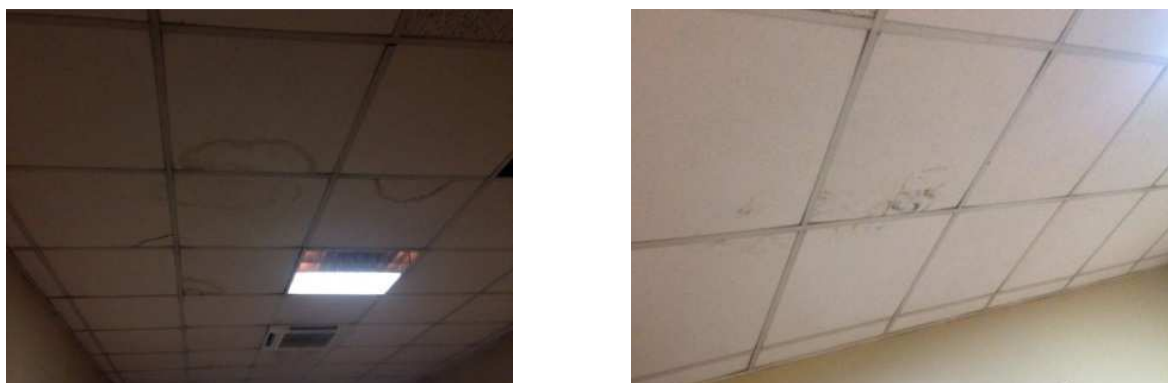


Figura 17- Controsoffittatura primo piano.

Alcuni tiranti in acciaio sono posti con uno o più lati in adiacenza ai tramezzi, altri invece sono completamente liberi; in entrambi i casi la vernice intumescente è presente su tutti e quattro i lati (Figura 18).



Figura 18 - Tiranti di piano.

3.3 TERZO PIANO

Il terzo piano (Figura 19) presenta una distribuzione di destinazione d'uso, come indicata di seguito:

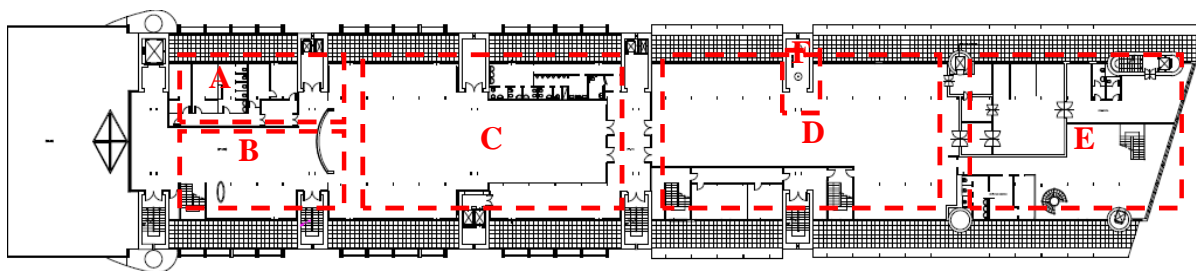
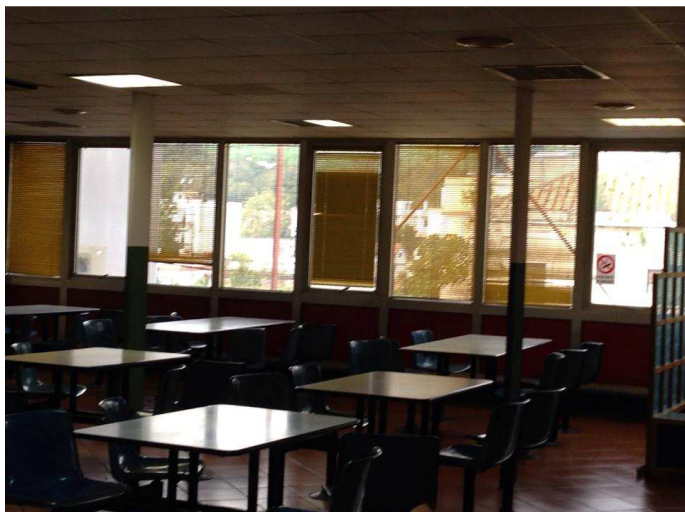


Figura 19- Pianta terzo piano.

- A- cappella;
- B- infermeria;
- C- sala conferenze;
- D- sala mensa;
- E- cucine e deposito merci;
- F- deposito merci.

Nelle zone A,B,C,D,F, il solaio è controsoffittato e tale controsoffittatura non presenta un elevato stato di degrado; i pendini in acciaio sono protetti da vernice intumescente, quasi tutti esposti sui quattro lati (Figura 20a,b). Nelle cucine la controsoffittatura è in acciaio e i pendini , protetti con vernice intumescente, presentano un lamierino esterno, probabilmente per motivi igienici (Figura 20c,d).



a)



b)



c)



d)

Figura 20- Particolare tiranti Mensa (a) e b)) e Cucina (c) e d)).

3.4 QUARTO PIANO

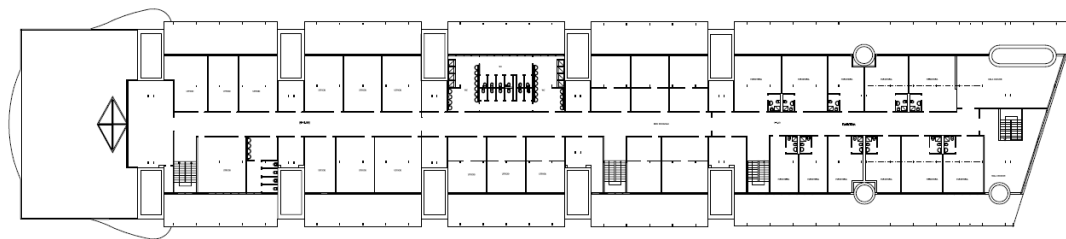


Figura 21- Pianta quarto piano.

Al quarto piano (Figura 21), in cui sono presenti prevalentemente uffici, non si accede da scale o ascensori presenti nei nuclei in cemento armato, poiché, per realizzare il sistema di appoggio delle travi portanti, i nuclei hanno uno spessore in testata di circa m. 1.50; l'accesso avviene, pertanto, attraverso scale indipendenti che partono dal terzo piano.

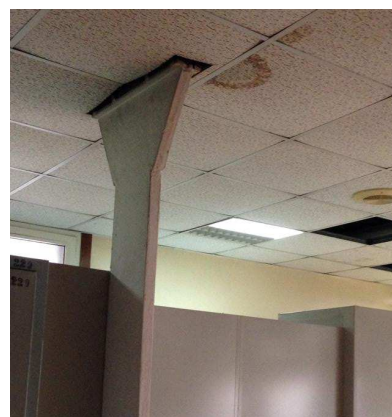


Figura 22- Particolare degrado della controsoffittatura.

Anche in questo caso il solaio è dotato di controsoffittatura e i pendini sono protetti con vernice intumescente su tutti i lati, sebbene alcuni di essi sono posti in adiacenza ai tramezzi.

Si è osservato che la controsoffittatura presenta un degrado elevato, a causa di infiltrazioni di acqua provenienti dalla copertura; infatti in alcune zone i moduli sono stati rimossi perché ritenuti poco stabili (Figura 22).

4. PROVE SPERIMENTALI INERENTI LA PROTEZIONE PASSIVA ANTINCENDIO DELLE STRUTTURE DELLA PALAZZINA LOGISTICA

4.1 PREMESSA

L'assenza di certificazioni riguardanti la vernice esistente e di un progetto in cui se ne specifica lo spessore sugli elementi della struttura protetti, ha reso necessarie una serie di prove sperimentali con lo scopo sia di caratterizzarne lo spessore medio che di valutare il grado di protezione che tali vernici intumescenti hanno conservato nel tempo.

Si descrivono di seguito in dettaglio le prove svolte.

4.2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SPERIMENTALI

Il tempo di resistenza al fuoco di un elemento strutturale in acciaio protetto con vernice intumescente dipende, a parità di caratteristiche fisico-chimiche del prodotto e di condizioni di carico e di vincolo, dallo spessore di protettivo applicato e dalla capacità di aderenza dello stesso sia in condizioni di esercizio che alle elevate temperature.

Per questo motivo la campagna di prove sperimentali ha previsto:

- misure di spessore del protettivo in situ;
- misure di adesione del protettivo in laboratorio ed in situ;
- prove in forno.

Oggetto di prova sono stati 22 elementi metallici lunghi 850mm prelevati dalla struttura in oggetto e dall'edificio "B". In particolare sono stati esaminati profili angolari aventi dimensioni differenti e quindi diverso fattore di sezione e un diverso grado di esposizione agli agenti atmosferici. In Tabella 1 si mostrano le principali caratteristiche geometriche dei provini metallici e delle vernici protettive. Inoltre, con riferimento alle prove in forno, si indica la curva di incendio utilizzata.

Tabella 1- prove in forno.

ID Provino	Sezione	Dimensioni (mm)	Curva di incendio	Vernice	Spessore (µm)
ANG-60x60x6-ref-ISO_1 #	Angolare	60x60x6	ISO834	Reference	516
ANG-60x60x6-rep-ISO_1 #	Angolare	60x60x6	ISO834	Repainted	1203
ANG-60x60x6-res-ISO_1 #	Angolare	60x60x6	ISO834	Restored	660
ANG-60x60x6-rep-SM_1 #	Angolare	60x60x6	Smouldering	Repainted	600
ANG-60x60x6-rep-SM_1 #	Angolare	60x60x6	Smouldering	Repainted	740
ANG-60x60x6-res-SM_1 #	Angolare	60x60x6	Smouldering	Restored	600
ANG-60x60x6-rep-SM_2 #	Angolare	60x60x6	Smouldering	Repainted	670
ANG-60x60x6-res-SM_2 #	Angolare	60x60x6	Smouldering	Restored	600
ANG-70x70x8-ref-ISO_1 ##	Angolare	70x70x8	ISO834	Reference	517
ANG-70x70x8-res-ISO_1 ##	Angolare	70x70x8	ISO834	Restored	657
ANG-70x70x8-rep-ISO_1 ##	Angolare	70x70x8	ISO834	Repainted	1243
ANG-70x70x8-res-ISO_2 ##	Angolare	70x70x8	ISO834	Restored	817
ANG-70x70x8-rep-ISO_2 ##	Angolare	70x70x8	ISO834	Repainted	1250

**RELAZIONE TECNICO-SCIENTIFICA SULLA SICUREZZA STRUTTURALE ANTINCENDIO
DELLA PALAZZINA LOGISTICA DELLA CASERMA DEI VIGILI DEL FUOCO DI NAPOLI**

ANG-70x70x8-ref-SM_1 ##	Angolare	70x70x8	Smouldering	<i>Reference</i>	500
ANG-70x70x8-res-SM_1 ##	Angolare	70x70x8	Smouldering	<i>Restored</i>	600
ANG-70x70x8-rep-SM_1 ##	Angolare	70x70x8	Smouldering	<i>Repainted</i>	920
ANG-70x70x8-res-SM_2 ##	Angolare	70x70x8	Smouldering	<i>Restored</i>	700
ANG-70x70x8-rep-SM_2 ##	Angolare	70x70x8	Smouldering	<i>Repainted</i>	950
ANG-100x100x10-res-ISO_1 ##	Angolare	100x100x10	ISO834	<i>Restored</i>	660
ANG-100x100x10-res-ISO_1 ##	Angolare	100x100x10	ISO834	<i>Restored</i>	1247
ANG-100x100x10-res-SM_2 ##	Angolare	100x100x10	ISO834	<i>Restored</i>	693
ANG-100x100x10-res-SM_2 ##	Angolare	100x100x10	ISO834	<i>Restored</i>	1367

elemento esposto agli agenti atmosferici;

elemento poco esposto agli agenti atmosferici

In particolare, il codice identificativo del provino è del tipo A-XxYxZ- α - β _n, dove A indica il tipo di sezione trasversale (ANG per angolare), X,Y,Z indicano rispettivamente le lunghezze delle due ali e lo spessore, α indica il tipo di rivestimento termico del provino, β la curva di incendio cui il provino è stato sottoposto in forno, ed n il numero ordinale di prova.

Per quanto riguarda il rivestimento, si è fatto riferimento a tre tipologie:

- *Reference* indica un elemento metallico testato così come è stato prelevato dalla struttura (stato attuale);
- *Repainted* indica un elemento metallico su cui è stata applicata una vernice nuova (spessore nominale di 600 μ m) direttamente sulla vernice esistente;
- *Restored* indica un elemento su cui la vernice nuova è stata applicata dopo un'accurata sverniciatura della vernice esistente (con spessori nominali differenti pari a 600 μ m o 1200 μ m).

Le prove hanno per scopo la caratterizzazione termica della vernice intumescente esistente in quanto non è disponibile alcuna certificazione. Per quanto riguarda il protettivo nuovo, è stato scelto un pacchetto intumescente costituito da un *primer*, dallo strato di vernice reattiva a base di solvente e dal *top coat*. I due spessori 600 μ m o 1200 μ m sono stati progettati per garantire R60 mediante apposite tabelle fornite dal produttore.

Nell'ultima colonna della Tabella 1 sono riportati gli spessori della vernice esistente (caso *reference*) e della vernice nuova (caso *repainted* e *restored*) effettivamente letti.

Misure di spessore

Un dettagliato rilievo degli spessori ha consentito di raggruppare gli elementi strutturali in categorie omogenee e di semplificare le valutazioni sul comportamento strutturale in condizioni di incendio. Per la valutazione degli spessori si può fare riferimento alle indicazioni suggerite nella norma UNI EN 2808 [6] che descrive sia i metodi di indagine che la modalità di elaborazione dei dati. Tra gli strumenti indicati per misurare lo spessore si annoverano quelli ad ultrasuoni e quelli di tipo ottico.

Lo strumento ad ultrasuoni ha un trasmettitore ed un ricevitore ultrasonici e lo spessore della vernice viene definito attraverso la misura del tempo di propagazione dell'onda attraverso lo strato da misurare (Figura 23).

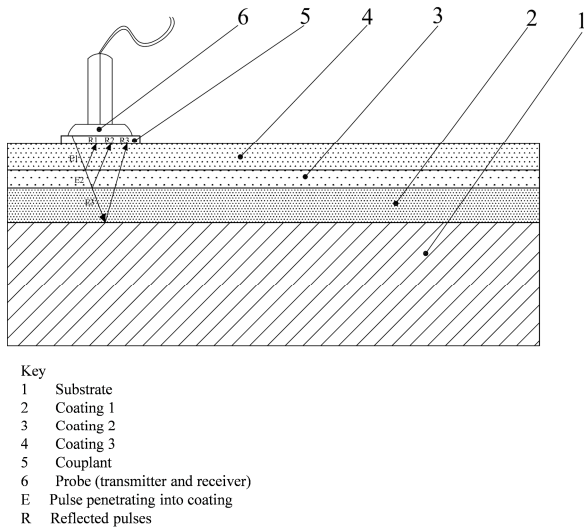


Figura 23 – Schema di funzionamento dello strumento ad ultrasuoni (UNI EN ISO 2808)

Figura 24 – Strumento ottico.

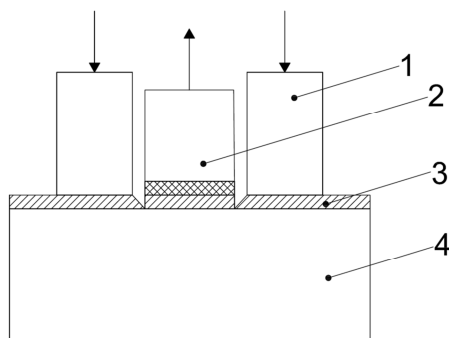
Vantaggi nell'utilizzo di tale strumento sono la non invasività e l'alto livello di precisione che può essere raggiunto. Il procedimento di taratura dello strumento e di calibratura in situ sono estremamente delicati.

Lo strumento ottico consente di effettuare una misura diretta dello spessore praticando un leggero taglio sull'elemento verniciato, fino a raggiungere il substrato in acciaio. Le lame sono di forma normalizzata in funzione dello spessore presunto da incidere e la lettura avviene direttamente mediante un microscopio graduato (Figura 24). Lo strumento è quindi leggermente invasivo, in quanto prevede l'incisione, ma è da considerarsi un ottimo strumento di controllo a campione delle letture ottenute mediante gli ultrasuoni.

Misure di adesione

La misura di adesione del sistema protettivo consente di valutare il grado di compatibilità tra i vari strati di prodotti vernicianti che compongono il pacchetto, in genere costituito da *primer*, vernice intumescente e *top coat*. È possibile fare riferimento alla norma UNI EN ISO 4624 [7] che descrive una serie di metodi per determinare l'adesione di uno strato unico o di un sistema a più strati di pittura, vernice o prodotti simili mediante la misura del minimo sforzo di trazione necessario per distaccare o rompere il rivestimento in una direzione perpendicolare al supporto. In particolare, si misura la minima forza di trazione necessaria per provocare lo strappo dello strato di vernice dal supporto (adesione) o all'interno dello strato del componente più debole (coesione).

È opportuno osservare che il risultato della prova può essere influenzato non solo dalle proprietà meccaniche del sistema sottoposto a prova, ma anche dalla natura e preparazione del supporto e dal tipo di strumento di prova utilizzato. Per questo è opportuno riferirsi ad indicazioni standardizzate [7], sebbene queste ultime siano per vernici di nuova applicazione e quindi possono fornire indicazioni su condizioni ambientali, di posa in opera e di prova, non sempre estendibili alle vernici esistenti. In Figura 25 si mostra uno dei possibili sistemi di prova previsti nella UNI EN 4624 [7] (cfr. par 9.4.2).



Assemblaggio di prova per supporti rigidi

Legenda

- 1 Anello esterno
- 2 Testina rivestita con adesivo
- 3 Rivestimento di pittura
- 4 Supporto

Figura 25 – Modalità prova di adesione (UNI EN ISO 4624).

Lo strumento misura la forza necessaria per tirare una testina di diametro noto (20mm nel caso specifico), incollata sul rivestimento oggetto di prova, attraverso l'applicazione di una pressione idraulica.

Si descrivono di seguito le fasi principali di preparazione ed esecuzione della prova.

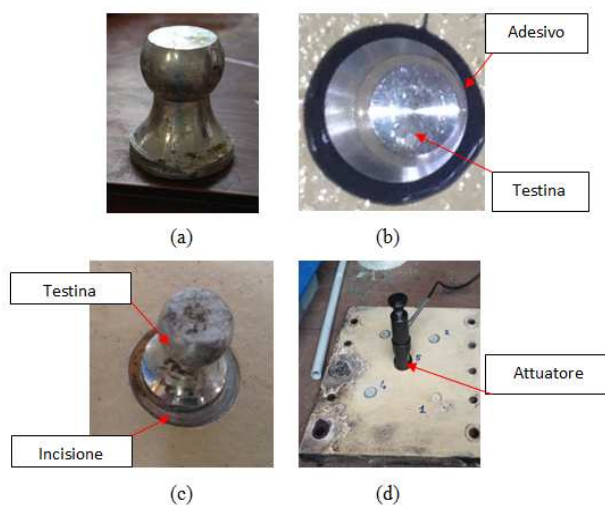


Figura 26 – Fasi di prova di adesione, a) testina standard; b) applicazione adesivo (vista dall'alto); c) incisione fino al supporto; d) posizionamento attuatore

Step 1- Preparazione superfici testina e rivestimento.

E' necessario assicurarsi che il rivestimento sia pulito. Per tale motivo va sgrassato con alcool o acetone nella zona oggetto di prova per migliorare l'incollaggio della testina. Anche la testina da incollare al rivestimento, opportunamente rigida e di diametro noto, deve essere pulita accuratamente.

Step 2- Applicazione dell'adesivo e della testina

L'adesivo deve avere proprietà di coesione e fissaggio maggiori di quelle del rivestimento sottoposto a prova, con lo scopo di ottenere una rottura del rivestimento (de Silva, 2014) [8]. È opportuno applicare una quantità di colla sufficiente a far aderire al meglio la testina imprimendo una leggera pressione che consente di espellere l'adesivo in eccesso (Figura 26 b). È infine necessario attendere il tempo necessario per l'asciugatura e la presa della colla.

Step 3- Separazione dell'area di prova

Prima di effettuare la prova è necessario rimuovere la vernice attorno alla testina applicando un'incisione fino al supporto (Figura 26 c) in modo da definire in maniera accurata la geometria dell'area di contatto. La metodologia con cui applicare il taglio è strettamente legata alle proprietà meccaniche del sistema di pittura (per esempio fragilità). Generalmente è possibile utilizzare una fresa con diametro leggermente superiore (circa 1mm) al diametro della testina.

Step 4- Montaggio dell'attuatore e applicazione del carico

Questa fase consiste innanzitutto nel posizionamento dell'attuatore che si inserisce sulla testina (Figura 26 d). È opportuno verificare il contatto tra testina ed attuatore, ma nella fase di posizionamento è consentito un certo gioco. Lo sforzo di trazione deve essere applicato perpendicolarmente al piano di supporto rivestito e deve aumentare ad una velocità uniforme, minore di circa 1 Mpa/s.

Prove in forno

Il forno utilizzato è di tipo orizzontale con apertura superiore avente dimensioni nette massime di 4.500 x 3.200 mm e altezza della camera di 3.200 mm.

Al fine di avere una distribuzione uniforme del calore sugli elementi in prova ed un carico termico sufficiente per garantire la realizzazione del programma termico previsto dalle norme, sono installati per il forno orizzontale 16 bruciatori nella potenzialità di 230.000 Cal/h ciascuno.

La temperatura del forno può seguire la curva standard ISO 834 o curve analoghe che possono essere memorizzate nel programmatore di temperatura, con temperatura e durata massima di 1.200°C circa e 360 minuti, rispettivamente.

Il layout di prova prevede il posizionamento dei provini a "tetto forno", ovvero scoperchiando solo un campo centrale della copertura del forno e posizionando i provini sui bordi delle campate laterali. I provini hanno lunghezza 850 mm, in modo da poggiarli sulle ali delle due travi di bordo della campata.

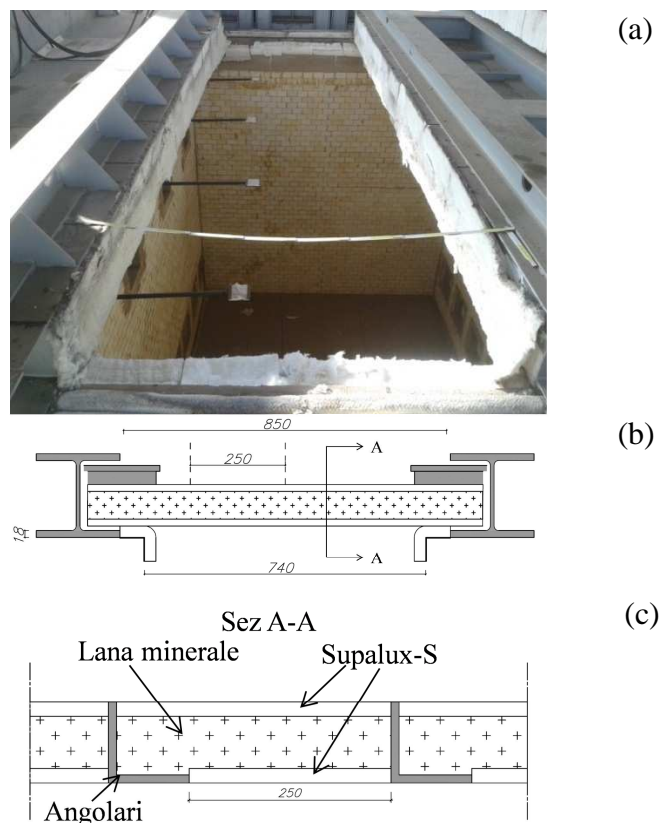


Figura 27 – Disposizione provini in forno: (a) foto del forno dall’alto, (b) vista trasversale, (c) vista longitudinale.

In Figura 27 a si mostra un dettaglio per la disposizione dei provini sul forno.

Dopo il posizionamento dei provini la zona centrale del forno è stata isolata termicamente mediante due lastre in calcio silicato di tipo *Supalux-S* di spessore $s = 9$ mm. Tra i due pannelli è stata posta lana minerale al fine di ottenere un “pacchetto” che possa garantire tenuta ed isolamento (EI) tra 60 e 120 minuti.

Tale pacchetto è stato posto tra un provino e l’altro, in modo da esporre direttamente al fuoco solo un’ala del provino, così come si può osservare in Figura 27 b.

Attraverso il programma di calcolo SAFIR2007 [9], è stato modellato il provino in forno, con lo scopo di prevedere e simulare i risultati delle prove e valutare le temperature raggiunte nell’elemento.

Dapprima è stato modellato il provino con tutto il pacchetto protettivo in calcio silicato e lana minerale (Figura 28).

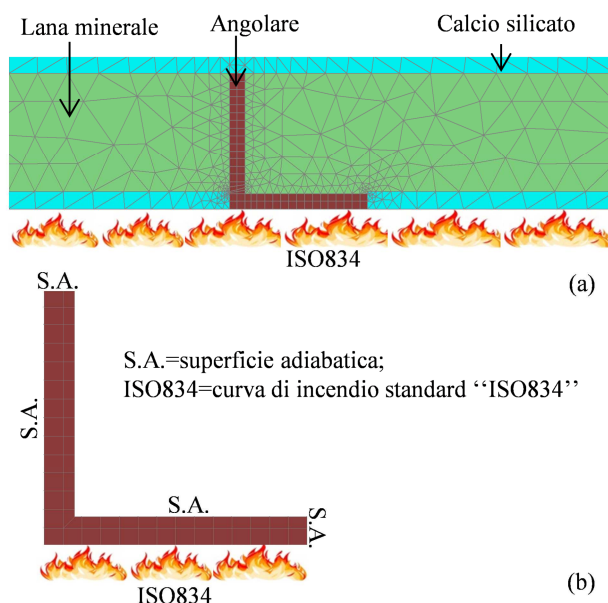


Figura 28 – Modellazioni a) setup di prova, b) condizione adiabatica

Successivamente, a scopo semplificativo, la modellazione completa del pacchetto protettivo è stata sostituita con la condizione di superficie adiabatica ai lati dell'angolare non direttamente esposti al fuoco (Figura 28 b).

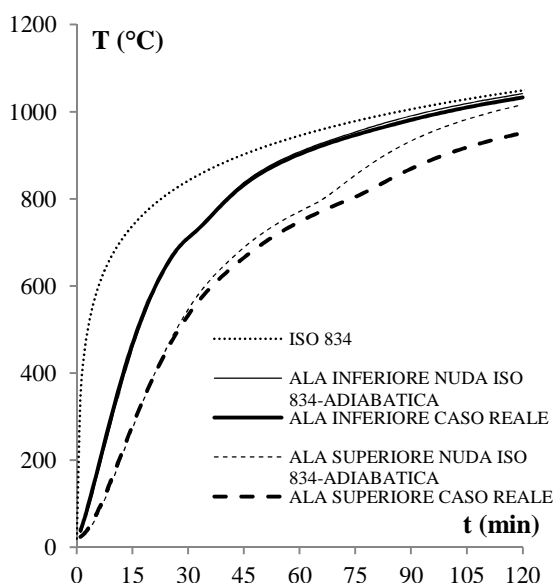


Figura 29 – Confronti tra modellazioni.

La Figura 29 mostra che nei due casi le temperature stimate mediante le simulazioni numeriche nell'ala inferiore dell'elemento, ovvero l'ala direttamente esposta al fuoco ed oggetto delle indagini sperimentali, sono praticamente uguali. Al contrario, la modellazione semplificata sovrastima le temperatura dell'ala superiore, probabilmente a causa della non perfetta adiabaticità del sistema reale per tale parte del profilo metallico.

Sono state utilizzate come input per le prove in forno la curva di incendio standard, ISO834 (Test 1), e la curva d'incendio a lento riscaldamento, *smouldering* (Test 2), descritte in precedenza. In Figura 30 si mostra la disposizione dei provini in forno durante le due prove.

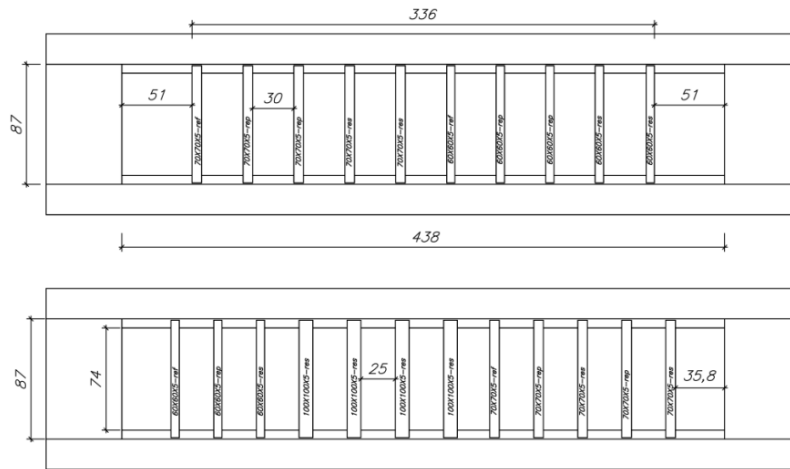


Figura 30 – Schemi di prova; (a) curva ISO 834, (b) curva *smouldering*

Per il monitoraggio della temperatura su ogni singolo elemento sono state posizionate 7 termocoppie, sia sull'ala direttamente esposta che su quella non esposta al fuoco. Le termocoppie sono state fissate all'elemento di acciaio con una colla che resiste alle alte temperature, con lo scopo di garantire l'aderenza della termocoppia al profilo durante la prova.

Le termocoppie sono state disposte secondo lo schema di Figura 31 con interassi costanti in tutti gli elementi.

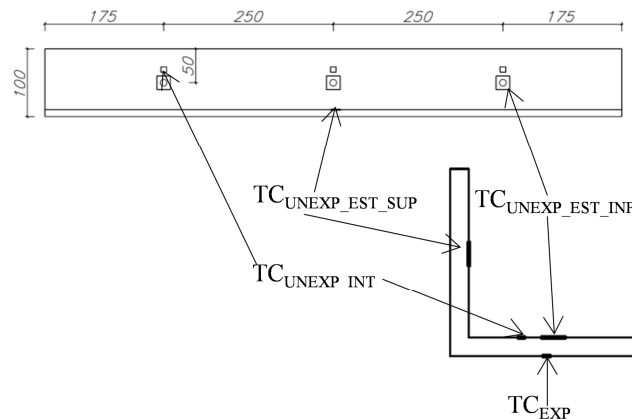


Figura 31 – Schema posizionamento termocoppie.

In particolare le termocoppie sui provini sono di quattro tipi:

- termocoppie disposte a contatto con l'elemento nella zona non esposta dell'ala inferiore - TC_{UNEXP_EST_INF};
- termocoppie disposte a contatto con l'elemento nell'ala superiore non esposta - TC_{UNEXP_EST_SUP};
- termocoppie che penetrano nell'elemento nella zona non esposta - TC_{UNEXP_INT};
- termocoppie a contatto con l'elemento, disposte all'interno del forno - TC_{EXP}.

Per il Test 1 le termocoppie TC_{UNEXP_INT} sono tre, mentre per il Test 2 sono due.

Ad esse si aggiungono otto termocoppie del forno poste su appositi bracci metallici all'interno del forno stesso atte a monitorare l'input di temperatura

Le letture delle termocoppie TC sono registrate in continuo durante la prova da un apposito sistema elettronico; in aggiunta una termocoppia mobile ha permesso di monitorare la temperatura del cartongesso all'estradosso ad intervalli di tempo predefiniti (ogni 15 min circa).

4.3 RISULTATI

Le misure di spessore e di adesione sono state condotte sia in sito che sui campioni prelevati per le successive prove in forno. La rielaborazione dei dati ha consentito di avere una stima sulla media dello spessore di vernice applicata, sulla tensione di adesione della stessa, sull'omogeneità dei risultati e su eventuali anomalie osservate.

Misure di spessore

Per le misure di spessore è opportuno individuare informazioni sulla probabilità che si osservi un dato valore nel campione di misure, ad esempio in termini di funzione di probabilità cumulata (cdf).

Ciò è stato fatto per tutti i piani della struttura in esame, con riferimento a tutti gli elementi verniciati.

In Figura 32 si mostrano le elaborazioni delle misure eseguite per un piano tipo della struttura in esame.

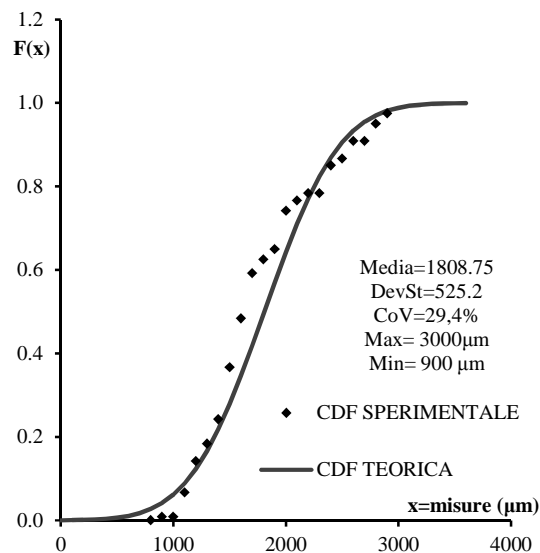


Figura 32 – Misure di spessore della vernice intumescente (risultati rilievo secondo piano).

Si osserva una sufficiente approssimazione della distribuzione normale con un valore del CoV pari a circa il 30 % e una media delle letture di circa 1800 μm. Si osserva inoltre che alcuni valori sono notevolmente maggiori rispetto al valor medio; ciò potrebbe attribuirsi alla modalità

di applicazione della vernice avvenuta probabilmente con pompa e quindi al conseguente colamento della vernice stessa e possibile concentrazione in zone specifiche.

Misure di adesione

Le misure di adesione sono state eseguite su una serie di elementi verniciati prelevati da due edifici differentemente esposti agli agenti atmosferici. In Tabella 2 sono riportati i valori della tensione di adesione misurati e la corrispondente modalità di rottura, in accordo alla tabella contenuta al paragrafo 9.5.2 della norma UNI EN ISO 4624[7].

Tabella 2- Risultati misure di adesione sugli angolari.

		Tensione di rottura (Mpa)	Spessore (µm)	Tipo di rottura	Tensione media (Mpa)	Spessore medio (µm)
B1	1	2.36	590	B/C	2.3	567
	2	2.93	570	-/Y		
	3	1.24	540	B/C_-/Y		
	3 bis	2.55	-	B/C		
	1 bis	7.92	-	B/C		
B1	4	5.5	700	B/C_-/Y	4.8	630
	5	-	630	-		
	6	4.95	560	B/C		
	5 (bis)	3.19	-	B/C		
	6 bis	5.65	-	B/C		
B1	10	2.28	760	B/C	2.8	790
	11	3.61	850	B/C		
	12	6.75	650	B/C_Y		
	13	2.55	750	B/C		
	14	2.62	800	B/C_-/Y		
B2	7	6.63	570	B/C	6.8	535
	8	7.06	500	B/C_-/Y		
	9	5.74	520	Y		
A1	1	0.92	1600	B/C	0.8	1600
	1 bis	0.57	-	B/C_n		
	2	0.88	1600	B/C		
A2	3	4.46	450	B/C_-/ Y	3.7	603
	4	4.03	740	B/C_-/ Y		
	5	3.93	620	B/C_- Y		
	5 bis	2.48	-	n		
A3	6	3.33	720	B/C_-/ Y	2.7	825
	7	1.58	930	B/C_-/ Y		
	6 bis	2.9	-	-/Y_B/C		
	7 bis	2.42	-	-/Y_B/C		
	7 tris	3.39	-	-/Y_B/C		
A4	8	1.46	900	B/C	2.1	1000
	9	2.27	1100	B/C		
	8 bis	1.49	-	B/C_-/Y		
	8 tris	2.98	-	B/C		

-B/C è la rottura di adesione fra il primo e il secondo strato;

Y è la rottura di coesione dell'adesivo;

-/Y è la rottura di adesione fra lo strato finale e l'adesivo;

n è la rottura di coesione dello strato n di un sistema a più strati;

In particolare si osserva una variabilità in termini di tensione di aderenza, mentre la rottura sembra essere avvenuta spesso per perdita di adesione tra il primo ed il secondo strato (*primer* e vernice intumescente). Sebbene tale rottura non sia auspicabile perché indica una possibile rottura tra i vari strati del pacchetto protettivo, è opportuno osservare che la rottura avviene sempre per valori di tensione superiori al limite indicato nella norma UNI 10898-1 Appendice B [10].

Si osserva inoltre che i valori di tensione di aderenza sono mediamente più elevati per i campioni prelevati dall'edificio meno esposto agli agenti atmosferici (indicato con la lettera B nella Tabella 2).

In Figura 33 è riportato l'andamento della tensione di adesione misurata in funzione dello spessore di vernice applicato; si osserva che maggiore è lo spessore, minore risulta essere la tensione di adesione della vernice prima del distacco.

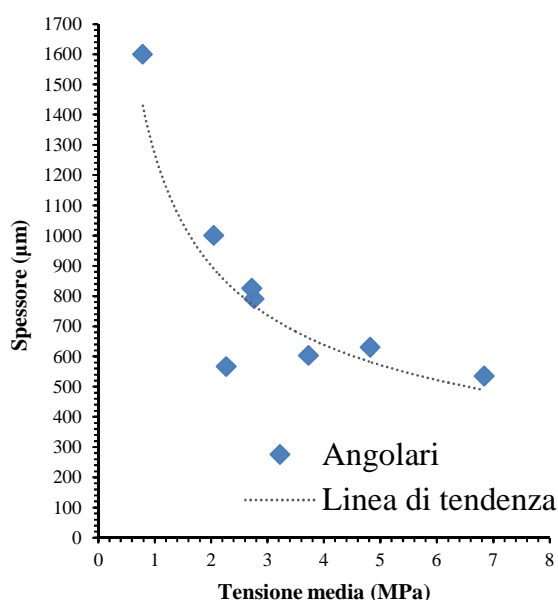


Figura 33 – Variazione della tensione di adesione con lo spessore.

Prove in forno

Prima di procedere con l'analisi delle temperature registrate dalle termocoppie durante le prove, si mostrano le curve delle temperature lette dalle termocoppie guida forno, ovvero le otto termocoppie poste all'interno del forno, utilizzate per il controllo dell'input termico (Figura 34). Si può osservare innanzitutto l'elevata omogeneità delle temperature nel forno, a testimonianza della bontà di funzionamento del forno stesso. Inoltre per il Test1 con la curva ISO834 c'è una perfetta riproduzione della curva di input nominale ad eccezione dei primi 2-3 minuti. Viceversa, per il Test2 si può osservare che la curva *smouldering* è stata seguita egregiamente solo a partire dai 15 minuti. In particolare dopo pochi minuti è stato raggiunto un picco di temperatura non previsto nella curva nominale. Tuttavia tale picco ha avuto una durata particolare e non ha

indotto l'innescio delle vernici intumescenti, previsto tra i 250° e i 350°C. Per questo motivo, anche l'attendibilità del Test2 è ritenuta elevata.

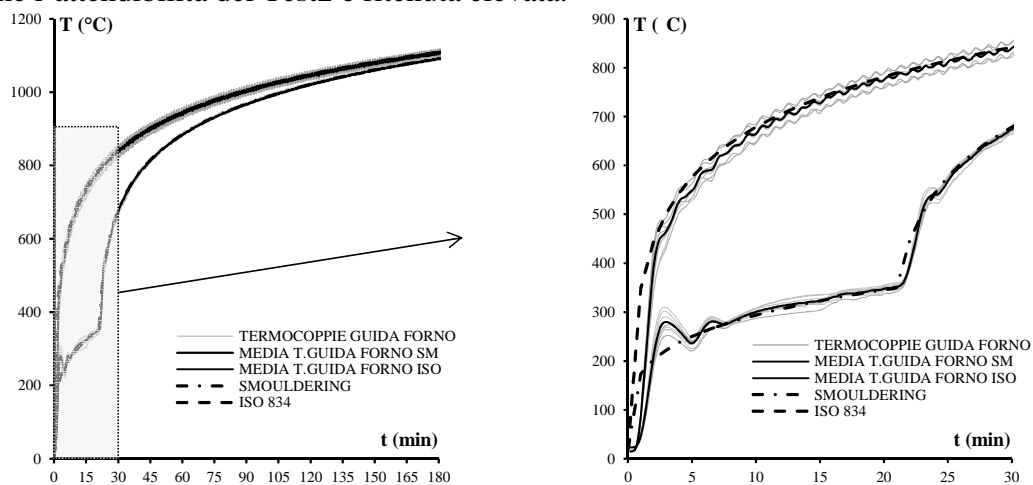
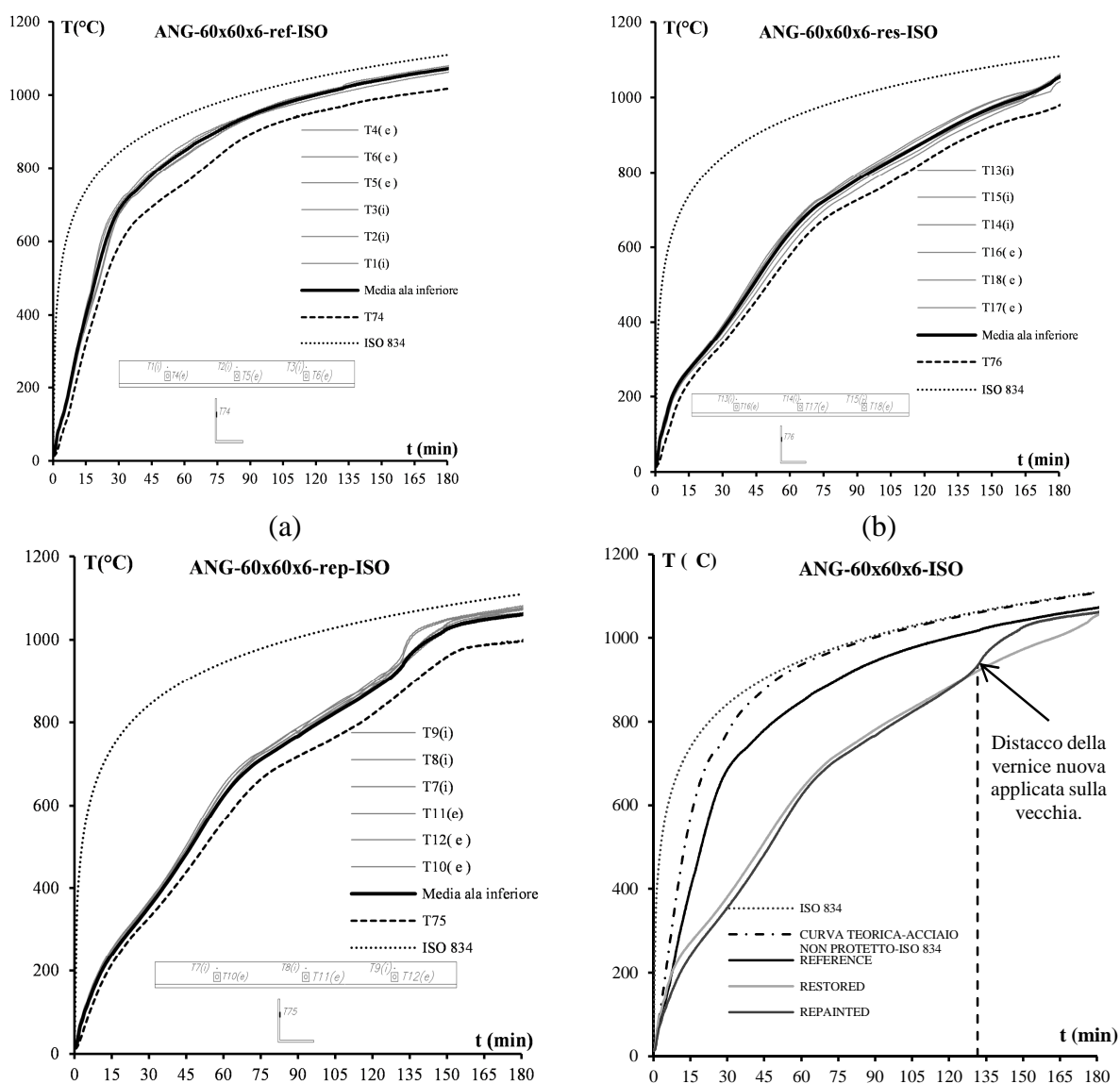


Figura 34 – Temperature registrate in forno e curve nominali (ISO834 e *smouldering*)

Test 1 (ISO 834)



(c)

(d)

Figura 35 –Risultati Test 1. (a) *reference*; (b) *restored*; (c) *repainted*; (d) confronti.

In Figura 35 a,b,c si mostrano le curve di temperatura registrate sugli angolari 60x60x6mm per i tre casi di provino *reference*, *restored* e *repainted*, rispettivamente. In ogni figura si mostra anche l'andamento della temperatura nel forno (curva ISO834). Si evidenzia, innanzitutto, che le temperature delle sei termocoppie poste sull'ala orizzontale direttamente esposta (curve continue grigie), sono tutte molto vicine per l'elevata conducibilità termica dell'acciaio ed approssimano bene la curva media (curva continua nera). Viceversa la temperatura nell'ala verticale (curva nera tratteggiata), che non è direttamente esposta alle alte temperature, è generalmente inferiore. In Figura 35 d è rappresentato in un unico diagramma l'andamento delle medie delle temperature.

Il provino *reference* mostra la temperatura più alta, a testimonianza della scarsa efficacia della vernice esistente. Il massimo livello di protezione sembra essere garantito per temperature comprese prossime ai 300 °C ovvero alla temperatura di innesco della reazione nella vernice intumescente.. Un indice di questo livello di protezione può essere rappresentato mediante il parametro di efficienza:

$$\eta = \frac{T_{np,th} - T_{p,exp}}{T_{np,th}} = 1 - \frac{T_{p,exp}}{T_{np,th}} \quad (1)$$

dove:

- $T_{np,th}$ è la temperatura media nella flangia esposta ottenuta mediante simulazione numerica su un provino in acciaio non protetto
- $T_{p,exp}$ è la temperatura media nella flangia esposta registrata durante la prova.

In particolare a circa 300 °C si ha $\eta=0.6$ e $\eta=0.3$ per le vernici nuove ed esistenti rispettivamente. Tali valori si dimezzano a circa 600°C, ovvero una possibile temperatura di deterioramento della stessa.

Inoltre la vernice nuova applicata direttamente sulla vernice esistente (caso *repainted*), ha funzionato egregiamente per circa 120 minuti garantendo prestazioni addirittura lievemente migliori del provino *restored*, dove la nuova vernice è stata applicata direttamente a contatto con l'acciaio.

Dopo circa 130 minuti, si ha un repentino incremento della temperatura a causa di un distacco della vernice. A 180 minuti la curva del provino *repainted* si approssima quindi a quella del provino *reference*.

In Figura 36a sono confrontate le curve di temperatura degli angolari 70x70x8mm per i tre casi di provino *reference*, *restored* e *repainted*.

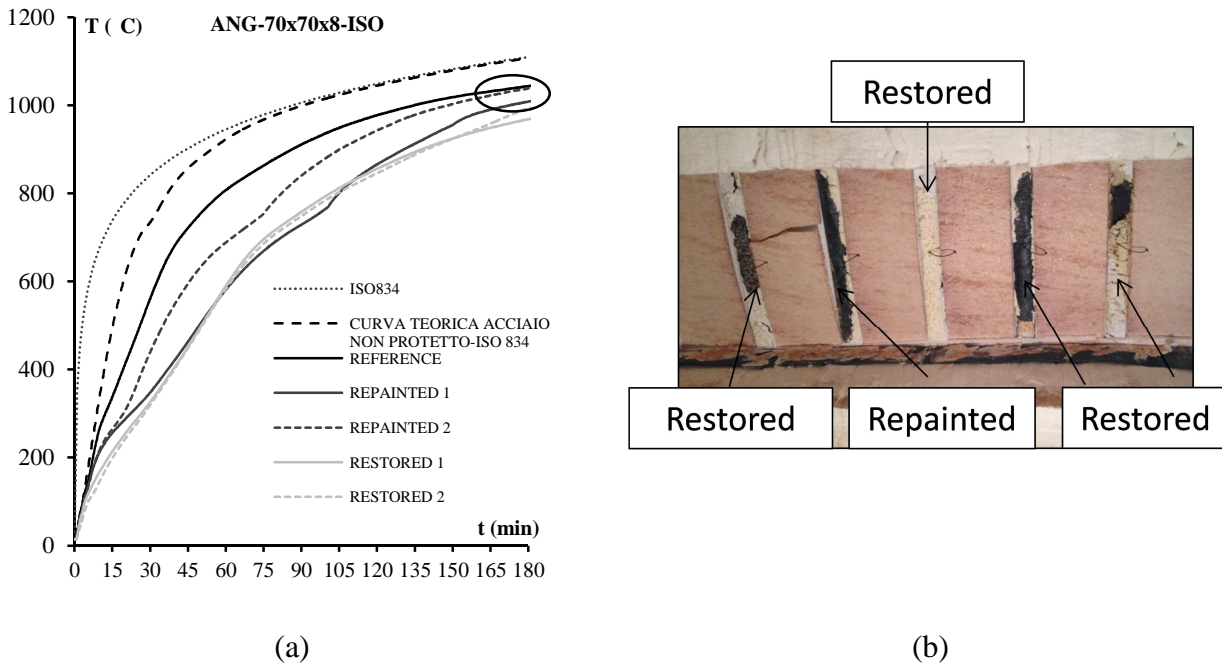


Figura 36 – Confronto angolari 70x70x8mm; (a) curve di riferimento; (b) situazione in forno dopo la prova (Test 1).

Anche in questo caso il campione “reference” si comporta in modo simile ad un elemento non protetto, confermando la scarsa efficacia dell’intumescente. D’altra parte, in questo caso si osserva che le curve di temperature dei due provini “restored” sono molto vicine, mentre per i provini “repainted” si ha uno scarto sin dal raggiungimento di temperature pari a 300°C, ovvero in prossimità dell’innesco della reazione nella vernice intumescente. Ciò sembrerebbe indicare che la vernice esistente potrebbe aver reagito diversamente nei due casi “repainted”. Ad una temperatura di circa 700°C le curve mostrano una piccola variazione di pendenza causata da una forte discontinuità nella legge di variazione del calore specifico dell’acciaio al variare della temperatura stessa. Infine per il provino ANG-70x70x8-res-ISO_2 si osserva il parziale distacco della vernice dopo circa 120 minuti. Ciò troverebbe conferma anche osservando la Figura 36b, che rappresenta i provini 70x70x8mm dopo la prova: solo per il provino ANG-70x70x8-res-ISO_1 non si vede alcun distacco della vernice.

In Figura 37 sono confrontate le curve di temperatura degli angolari 100X100X10mm.

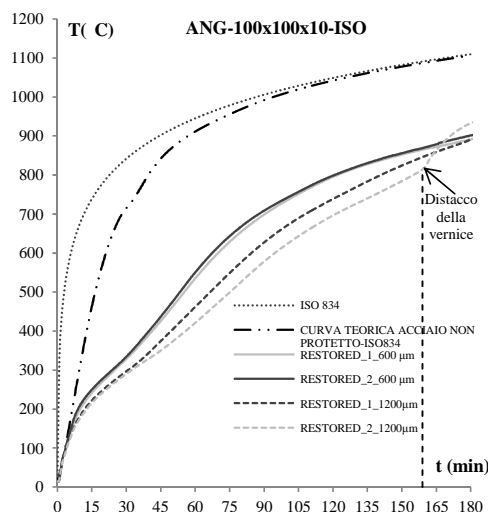
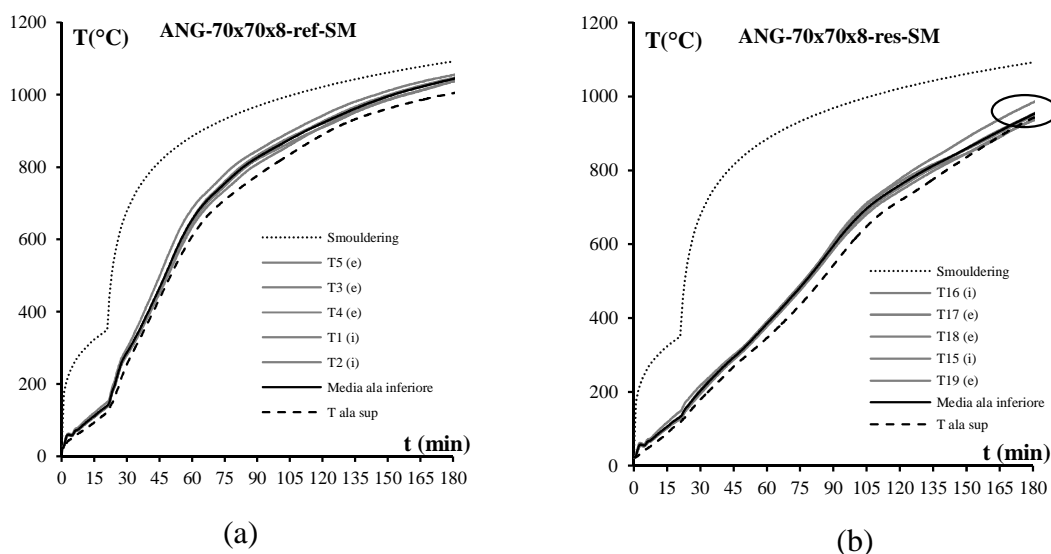


Figura 37 – Confronto angolari 100x100x10mm (Test 1).

Si osserva che i due provini protetti con 600µm di vernice danno una risposta molto simile, mentre le curve di temperatura dei provini protetti con 1200µm di vernice divergono leggermente. Anche questa volta, al provino ANG-100X100X10-res-ISO_2, è stato applicato uno spessore di vernice leggermente maggiore (1367µm vs 1247µm). Si osserva inoltre che per lo stesso provino, che ha uno spessore maggiore rispetto a tutti gli altri casi (1367 µm), a circa 160 minuti si ha un aumento repentino della temperatura, causato da un distacco della vernice.

Test 2 (Smouldering)

In Figura 38a,b,c si mostrano le curve di temperatura registrate sugli angolari 70x70x8mm per i tre casi di provino *reference*, *restored* e *repainted*, rispettivamente. In ogni figura si mostra anche l'andamento della temperatura nel forno (curva *smouldering*).



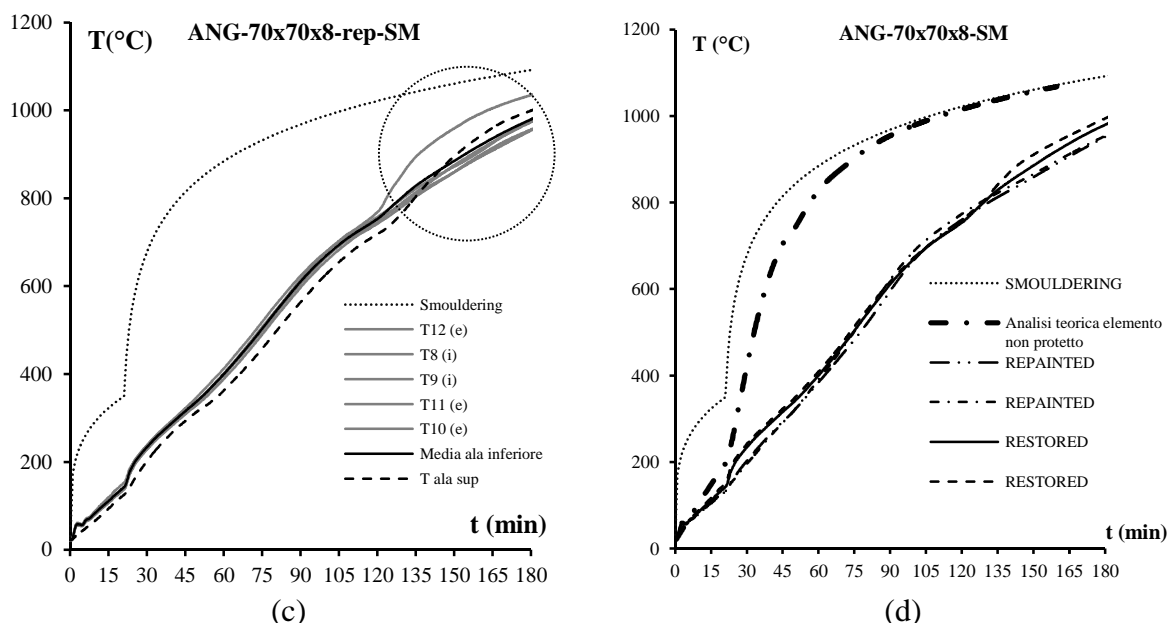
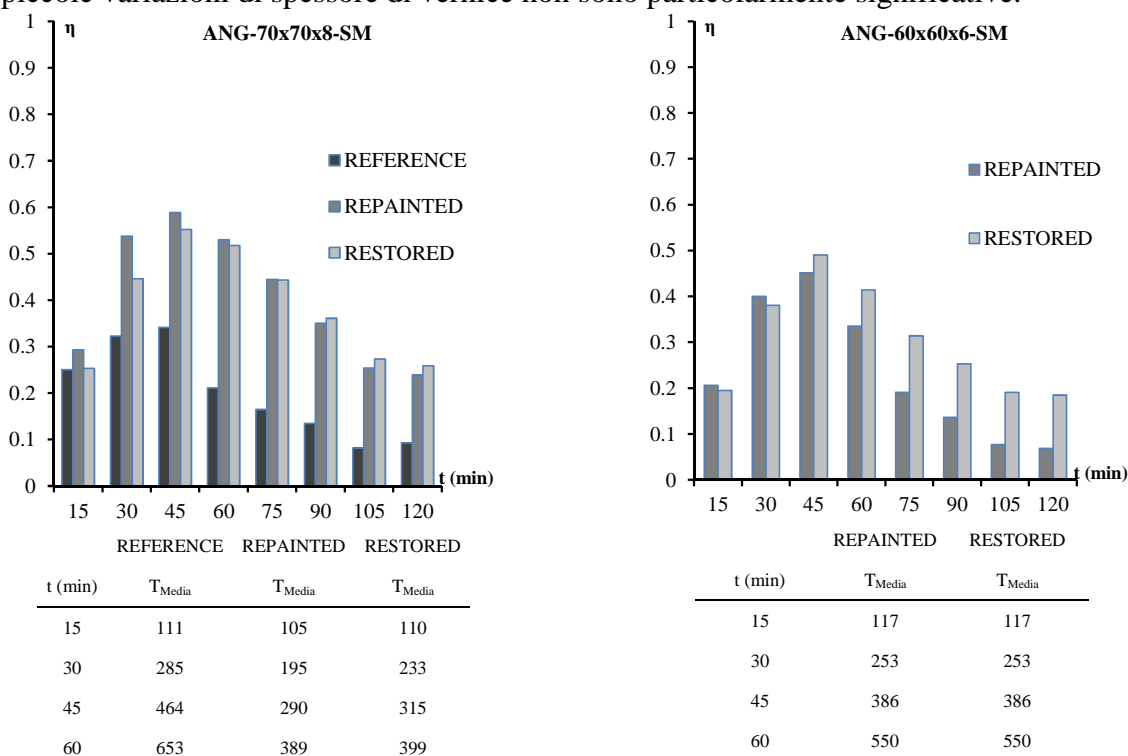


Figura 38 – Risultati Test 2. (a) *reference*; (b) *restored*; (c) *repainted*; (d) confronti.

Anche in questo caso, per effetto dell'elevata conducibilità termica dell'acciaio, le temperature misurate dalle termocoppie sull'ala orizzontale sono tutte molto vicine, mentre la temperatura nell'ala verticale, non direttamente esposta, è generalmente inferiore a quella dell'ala direttamente esposta. Solo per il provino ANG_RES_70 B_SM_920 (Figura 38c), due termocoppie di cui una applicata sull'ala superiore del campione, dopo circa 120 minuti, hanno iniziato a misurare delle temperature maggiori rispetto alle altre, ciò è probabilmente da attribuirsi ad un distacco localizzato della vernice. Infine Dai confronti (Figura 38d) si osserva che piccole variazioni di spessore di vernice non sono particolarmente significative.



75	753	501	502	75	730	730
90	826	620	610	90	825	825
105	876	712	694	105	881	881
120	921	773	753	120	946	946

Figura 39 – Parametri di efficienza del sistema protettivo (*smouldering*).

In Figura 39, infine, si mostra il parametro di efficienza η per i provini ANG_RES_70 e ANG_RES_60.

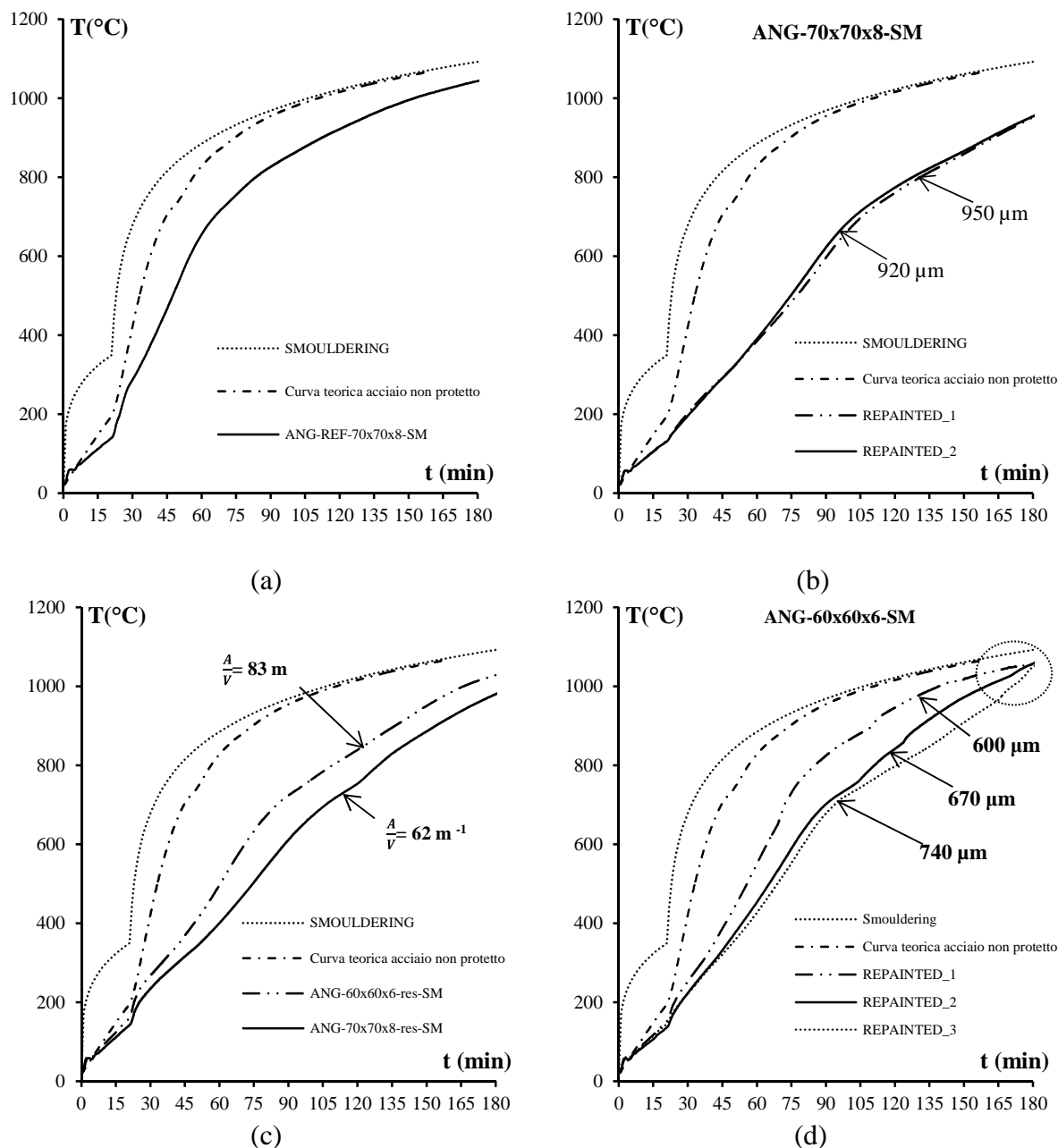


Figura 40 – Confronti (Test 2).

La Figura 40a mostra che la vernice intumescente esistente ha reagito, anche se scarsamente, conservando uno scarto di temperatura di circa 100°C rispetto alla curva di temperatura simulata sullo stesso elemento in acciaio privo di protezione.

Dalla Figura 40b emerge che le temperature raggiunte negli elementi sono molto simili tra loro, in quanto essi presentano uno spessore di vernice che differisce di soli 30µm.

Dalla Figura 40c si osserva che a parità di spessore di vernice, l'elemento avente un fattore di sezione maggiore, presenta temperature più elevate.

In Figura 40d si confrontano le curve di temperatura relative a provini *repainted* aventi lo stesso fattore di sezione. Il provino con lo spessore di vernice minore (curva tratteggiata) ha le temperature maggiori, mentre il provino con lo spessore maggiore (curva tratto-punto) non ha le temperature minori. Queste piccole incongruenze potrebbero essere dovute ad eterogeneità della vernice esistente. Dalla stessa figura emerge inoltre che dopo circa 160 minuti, la vernice avente 670 µ di spessore, inizia a staccarsi dall'elemento di acciaio.

4.4 CONCLUSIONI

La resistenza al fuoco di elementi strutturali in acciaio protetti con vernice intumescente dipende, a parità di caratteristiche fisico-chimiche del prodotto protettivo, dallo spessore del protettivo applicato e dalla capacità di aderenza dello stesso sia in condizioni di esercizio che alle elevate temperature.

Le prove sperimentali sono state condotte su elementi metallici appartenenti alla struttura in esame risalente agli anni '80 e riguardano (a) misure di spessore in situ, (b) misure di adesione in laboratorio ed in situ e (c) prove in forno. Le prove in forno sono state condotte su 22 elementi metallici lunghi 850mm. In particolare sono stati esaminati profili angolari aventi dimensioni differenti e quindi diversi fattori di sezione. Inoltre sono state utilizzate due differenti curve di riscaldamento, ovvero la curva di incendio standard (ISO 834) e la curva a lento riscaldamento (*smouldering*), con lo scopo di esaminare eventuali problemi con curve di riscaldamento a basso gradiente termico per temperature prossime a quelle di attivazione della vernice.

L'attività sperimentale ha avuto come obiettivo la determinazione dell'efficienza della vernice esistente e la valutazione del grado di miglioramento di protezione che si può ottenere applicando una vernice intumescente nuova sull'elemento metallico sverniciato (*restored*) o sulla stessa vernice esistente (*repainted*).

Le prove in forno hanno mostrato innanzitutto che la vernice intumescente esistente ha perso gran parte delle caratteristiche di protezione al fuoco, in quanto i campioni *reference* si sono comportati in maniera molto simile ad elementi in acciaio non protetti. È necessario quindi provvedere nuovamente alla protezione degli elementi strutturali.

Inoltre, si è osservato un legame tra lo spessore della vernice e la sua resistenza all'adesione sia in condizioni ambientali ordinarie che alle alte temperature. Infatti si è osservato che elementi con spessori più elevati (circa 1000 µm) di vernice presentano resistenze all'adesione ben più basse di quelli con spessori meno elevati. Analogamente la vernice con spessori maggiori,

durante le prove in forno, si è staccata dall'elemento prima di quella avente spessori più contenuti. In particolare, le prove sugli elementi *restored*, in cui la vernice nuova è applicata dopo la rimozione della vernice esistente, mostrano abbastanza chiaramente che può essere più conveniente applicare uno spessore di vernice non troppo elevato al fine di soddisfare il livello di protezione richiesto.

Per le prove sugli elementi *repainted*, in cui la vernice è applicata su quella esistente, lo spessore da considerare è quello complessivo che tiene conto anche della vernice esistente. Tuttavia, anche per gli elementi *repainted*, nonostante la vernice esistente non fosse in ottime condizioni, il distacco della vernice è avvenuto generalmente dopo circa 120 minuti nel Test 1 (ISO 834) e dopo circa 160 minuti nel Test 2 (*smouldering*), ovvero ben oltre il tempo che generalmente può essere richiesto per una verifica in condizioni di incendio.

Pertanto i risultati indicano la possibilità di riapplicare la nuova vernice protettiva sulla vecchia, con considerevoli vantaggi economici, a patto di garantire una buona condizione di adesione del substrato esistente.

5. INDIVIDUAZIONE DEGLI INTERVENTI PER LA PROTEZIONE ANTINCENDIO

L'esame dello stato di fatto e la campagna di rilievi ed indagini sperimentali condotta in situ ed in laboratorio ha consentito di appurare che la vernice intumescente esistente ha perso quasi del tutto le sue caratteristiche di protezione al fuoco. Analogamente la protezione offerta dai controsoffitti agli impalcati è attualmente parziale per le condizioni che li caratterizzano in alcune zone. In aggiunta si recepisce la richiesta da parte dei VVF che la controsoffittatura, di cui comunque non si conoscono le caratteristiche termiche, non vada considerata come elemento di protezione antincendio, viste le numerose operazioni di manutenzione degli impianti, che spesso la rendono inadeguata.

Pertanto, al fine di conferire alla struttura il necessario livello di resistenza in condizioni di incendio, sono stati previsti una serie di interventi di ripristino della protezione passiva, consistenti nel rifacimento della vernice intumescente nelle zone dove già è presente e l'applicazione ex novo della stessa sugli elementi strutturali dove essa non era originariamente stata applicata (Tabella 3).

Il requisito di resistenza al fuoco richiesto, definito in accordo con il Comando Provinciale dei Vigili del Fuoco di Napoli, è **R60**.

Tabella 3- Protezione passiva con intumescente nello stato attuale.

	Impalcato (lamiera, travi, angolari)	tiranti
Piano terra	V	-
1° piano	NV	V
2° piano	NV	V
3° piano	NV	V
4° piano	NV	V

V= già verniciati con intumescente

NV= attualmente non verniciati con intumescente

Nei paragrafi seguenti si descrivono in dettaglio gli interventi previsti ai vari piani dell'edificio, che presentano situazioni differenti relativamente al tipo e condizioni della protezione esistente.

5.1 RIPRISTINO DELLA VERNICE INTUMESCENTE AL PIANO TERRA

Al piano terra non essendo presenti tiranti, sarà necessario solo proteggere l'impalcato costituito dal solaio composto acciaio-calcestruzzo, da travi di acciaio e da elementi diagonali irrigidenti di piano pure in acciaio. Si descrivono di seguito le operazioni principali previste e quelle complementari:

a) Sverniciatura delle zone particolarmente danneggiate

Essendo la lamiera già verniciata con intumescente sono state individuate zone dove è necessario asportare la vernice esistente. Si prevede di effettuare la sverniciatura di tipo

meccanico, o sabbiatura laddove possibile.

b) **Applicazione della nuova vernice intumescente,**

Applicazione della vernice intumescente di spessore idoneo per raggiungere il requisito di resistenza al fuoco R60 (nel par. 6 è riportato un dimensionamento dello spessore della vernice protettiva).

c) A causa della **presenza di impianti di vario genere**, l'applicazione del protettivo andrà eseguita con particolare attenzione (tenendo conto di ciò nella valutazione dell'incidenza della manodopera).

d) **Rifacimento dei bagni, degli impianti malfunzionanti e dei solai particolarmente danneggiati**

Questa operazione è necessaria per rendere efficace, nonché duratura, l'applicazione delle vernici intumescenti.

5.2 RIPRISTINO VERNICE INTUMESCENTE AI PIANI SUPERIORI (IMPALCATI)

Ai piani superiori l'impalcato non è verniciato con intumescente ed è dotato di una controsoffittatura costituita da elementi modulari alloggiati in un telaio in acciaio, facilmente smontabili. In diversi punti si presenta molto ammalorata, in altri invece manca completamente. Si descrivono di seguito le operazioni principali previste e quelle complementari:

a) **Smontaggio della controsoffittatura esistente**

E' previsto lo smontaggio dei pannelli della controsoffittatura, preoccupandosi di non danneggiarla per poterla riapplicare nuovamente dopo l'intervento.

b) **Applicazione della nuova vernice intumescente**

Applicazione della vernice intumescente di spessore idoneo per raggiungere il requisito di resistenza al fuoco R60 (nel par. 6 è riportato un dimensionamento dello spessore della vernice protettiva).

c) **Rimontaggio della controsoffittatura**

Dopo la verniciatura si procederà al rimontaggio della controsoffittatura, sostituendo i pannelli particolarmente degradati ed inserendo quelli mancanti. Anche in questo caso sarà necessario fare particolare attenzione alla presenza di impianti.

d) A causa della **presenza di impianti di vario genere**, l'applicazione del protettivo andrà eseguita con particolare attenzione (tenendo conto di ciò nella valutazione dell'incidenza della manodopera).

5.3 RIPRISTINO VERNICE INTUMESCENTE PIANI SUPERIORI (TIRANTI)

I tiranti di acciaio verticali (pendini) interni sono verniciati con intumescente a tutti i piani, ma in alcuni casi si presentano in aderenza ai tramezzi. Si descrivono di seguito le operazioni principali previste e quelle complementari:

a) **Rimozione momentanea dei tramezzi**

Questa fase riguarda tutti i tramezzi adiacenti ai tiranti ed è necessaria per facilitare l'applicazione della vernice sui tiranti.

b) **Sverniciatura delle zone danneggiate**

Dove la vernice esistente risulta danneggiata sarà necessario sverniciare attraverso sverniciatura meccanica, o sabbiatura laddove possibile.

c) **Applicazione della nuova vernice intumescente**

Applicazione della vernice intumescente di spessore idoneo per raggiungere il requisito di resistenza al fuoco R60 (nel par. 6 è riportato un dimensionamento dello spessore della vernice protettiva).

d) **rimontaggio dei tramezzi**

e) A causa della **presenza di impianti di vario genere**, l'applicazione del protettivo andrà eseguita con particolare attenzione (tenendo conto di ciò nella valutazione dell'incidenza della manodopera) .

6. DIMENSIONAMENTO PRELIMINARE DEGLI INTERVENTI DI RIPRISTINO DELLA PROTEZIONE PASSIVA

6.1 PROGETTAZIONE PRELIMINARE DELLA PROTEZIONE PASSIVA

In generale, il progetto dello spessore delle vernici intumescenti viene definito attraverso apposite tabelle fornite dal produttore, in funzione della resistenza al fuoco che si vuole garantire. Le tabelle sono a loro volta definite sulla base di una caratterizzazione sperimentale certificata della vernice. Nel caso in esame la **classe di resistenza al fuoco** da garantire è **R60**.

Il dimensionamento preliminare dello spessore della vernice richiede il calcolo della temperatura critica degli elementi, che dipende strettamente dal fattore di utilizzazione, definito come il rapporto tra la sollecitazione in condizione di incendio (supposta costante nel tempo) e la resistenza al tempo 0 di esposizione all'incendio:

$$\mu_0 = E_{fi,d} / R_{fi,d}$$

In tabella 4 si riportano i carichi considerati; in particolare si è fatto riferimento alla combinazione eccezionale, in accordo a quanto stabilito nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC2008)

$$G_1 + G_2 + P + A_d + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$$

Tabella 4- analisi dei carichi.

Analisi dei carichi - fase di utilizzo - Solaio tipo interno						
Carico permanente strutturale	Gk1	γ_{g1}	γ_{g2}	γ_{q1}	ψ_{02}	Gd1
	[kN/m2]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN/m2]
Peso proprio lamiera	0.15	1.3	-	-	-	0.20
Peso proprio soletta c.a.	2.35	1.3	-	-	-	3.06
Totale	2.50					3.25
Carico permanente non strutturale	Gk2	γ_{g1}	γ_{g2}	γ_{q1}	ψ_{02}	Gd2
	[kN/m2]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN/m2]
Pavimentazione	0.40	-	1.5	-	-	0.60
Massetto	1.00	-	1.5	-	-	1.50
Controsoffitto + impianti	0.30	-	1.5	-	-	0.45
Incidenza tramezzi	1.00	-	1.5	-	-	1.50
Totale	2.70					4.05
Carico variabile	Qk	γ_{g1}	γ_{g2}	γ_{q1}	ψ_{02}	Qd
	[kN/m2]	[-]	[-]	[-]	[-]	[kN/m2]
Uffici non aperti al pubblico (cat. B1)	2.00	-	-	1.5	0.3	0.90
Uffici aperti al pubblico (cat. B2)	3.00	-	-	1.5	0.3	1.35
Ambienti suscettibili di affollamento (cat. C2-sala convegni)	4.00	-	-	1.5	0.6	3.60
Cat. H1 Coperture e sottotetti accessibili per sola manutenzione	0.50	-	-	1.5	0	0.00

In Figura 42 si mostra una generica tabella, esemplificativa per la procedura utilizzata. Si entra con la temperatura di progetto (temperatura critica) e con il fattore di sezione dell'elemento che si vuole proteggere al fine di ricavare lo spessore necessario di protettivo.

Nel caso della struttura in esame gli elementi strutturali da proteggere sono:

- i tiranti di piano,
- le travi,
- la lamiera grecata costituente il solaio composto acciaio-cls.

Nella Figura 41 sono riportate le caratteristiche geometriche e il livello di carico del tirante e della trave più sollecitata, necessarie per la progettazione dello spessore di vernice.

TRAVE TRASVERSALE (2 IPE 330 ACCOPPIATE)		
μ_0	A/V (m ⁻¹)	$\theta_{critica}$ (°C)
0.43	105.7	590
TIRANTE 4 PIANO 250X40mm		
μ_0	A/V (m ⁻¹)	$\theta_{critica}$ (°C)
0.28	58.0	665

Figura 41- Caratteristiche elementi strutturali.

RESISTENZA AL FUOCO R-60						
Temperatura di progetto [°C]	350	400	450	500	550	600
Fattore di sezione	Spessore del materiale di protezione al fuoco per mantenere la temperatura al di sotto della temperatura di progetto					
70	n.a.	1894	1023	465	567	400
75	n.a.	1958	1137	465	622	430
80	n.a.	2010	1212	465	667	468
85	n.a.	2054	1284	465	716	509
90	2564	2076	1353	465	769	554
95		2088	1419	465	827	604
100		2225	1502	700	907	678
105		2374	1593	909	993	757
110		2516	1695	1095	1085	843
115		2606	1810	1263	1185	935
120		2661	1931	1319	1224	969
125		2711	1956	1351	1248	989

Figura 42-Tabella progetto spessori.

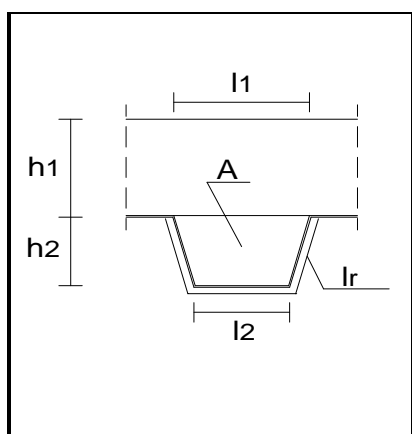
Si osserva dalla Figura 42 che nella tabella non è possibile entrare con il fattore di sezione caratteristico del **tirante**, più basso del minimo valore di tabella. Tuttavia, procedendo a vantaggio di sicurezza, ci si riferisce al valore $A/V=70 \text{ m}^{-1}$, maggiore di quello dell'elemento strutturale oggetto del calcolo. In tale ipotesi, volendo garantire una temperatura di 600°C, inferiore a quella critica associata al livello di carico dell'elemento strutturale (665 °C), si ricava uno spessore necessario di 400 μm .

Per le **travi**, ci si pone sulla riga $A/V=105 \text{ m}^{-1}$ e su una colonna con $\theta_{cr}=550 \text{ °C}$ minore di 590°C, ricavando uno spessore di vernice necessario pari a 993 μm .

Per quanto riguarda il solaio composto acciaio-calcestruzzo, è stato utilizzato un metodo che consente di tener conto della presenza benefica del calcestruzzo.

Per la valutazione della temperatura nelle **solette composte acciaio-calcestruzzo**, si è fatto riferimento ad un procedimento semplificato contenuto nell'allegato D della norma EN1994-1-2. Questo metodo consente di valutare, sulla base delle relazioni analitiche ivi fornite, la temperatura della lamiera (suddivisa in tre parti: flangia inferiore, flangia superiore e anima), delle eventuali barre di rinforzo interne e della soletta di calcestruzzo.

Si riporta di seguito la geometria del solaio come da rilievi preliminari che ad oggi è stato possibile effettuare con l'ausilio del personale dei VV.F. (Figura 43).



DIMENSIONI SOLETTA		
l1	75	mm
l2	75	mm
l3	75	mm
h1	75	mm
h2	75	mm
A/lr	56.3	-
φ	0.414214	-

Figura 43-Dimensioni della lamiera grecata.

Sempre procedendo a vantaggio di sicurezza, si considera la temperatura massima nella lamiera metallica, ovvero quella che si raggiunge nella flangia inferiore dopo 60 minuti di esposizione all'incendio standard (Tabella 4), che tiene conto dell'effetto benefico del calcestruzzo presente nelle nervature e nella soletta.

Con tale valore di temperatura si può calcolare (ad esempio mediante il nomogramma – vedi EN1993-1-2 e Nigro et Al, 2009), con riferimento ad un elemento metallico, un fattore di sezione equivalente cui corrisponde la predetta temperatura per un tempo di esposizione di 60 minuti. In Tabella 4 si riportano i valori ottenuti per il caso in esame, ed in particolare il fattore di sezione equivalente dedotto sulla base del procedimento descritto. Tale valore viene utilizzato nelle apposite tabelle per la progettazione degli spessori delle vernici per elementi metallici, in analogia a quanto fatto per pendini e travi.

Tabella 4- Calcolo della temperatura massima nella soletta composta e di A/V equivalente.

Flangia inferiore (t=60 min)	b0	b1	b2	b3	b4	θa	A/V _{equ}
	[°C]	[°C*mm]	[°C/mm]	[°C]	[°C]	[°C]	[m ⁻¹]
	951	-1197	-2.32	86.4	-150.7	814.5	27

Per il calcolo della temperatura critica della soletta composta si è uguagliata l'espressione analitica del momento resistente della soletta composta in condizioni di incendio, $M_{Rd,fi}$, che tiene conto del degrado delle proprietà meccaniche del calcestruzzo e dell'acciaio, al valore momento sollecitante calcolato per la combinazione di carico solitamente usata in condizioni di incendio, $M_{Ed,fi}$. Mediante successive iterazioni è stato valutato il valore del coefficiente $k_{y,\theta}$, corrispondente alla temperatura critica, θ_{cr} , della soletta composta (i.e. $M_{Rd,fi} = M_{Ed,fi}$). I valori di $k_{y,\theta}$ e θ_{cr} ottenuti sono riportati in Tabella 5.

Tabella 5- Calcolo della temperatura critica.

A_p [mm ²]	1209.6
h [mm ²]	150
d [mm ²]	37.5
d' [mm ²]	112.5
F_{yk} [N/mm ²]	275
F_{ck} [N/mm ²]	20.75
α_{slab}	0.85
b [mm]	1000
$M_{fi,Sd}$ [N*mm]	8617500
$k_{y,\theta}$	0.239929537
ϑ critica corrispondente [°C]	650

Infine, con il fattore di sezione equivalente A/V_{equ} e con il valore della temperatura critica, θ_{cr} , si è ottenuto lo spessore di vernice minimo necessario per la lamiera della soletta composta, pari a 400 μm . Nella tabella 6 si riporta un riepilogo degli spessori progettati con i criteri di dimensionamento sopra descritti.

Tabella 6- tabella riepilogativa degli spessori minimi.

	Spessore [μm]
Tiranti	400.00
Travi	993.00
Soletta	400.00

In definitiva, l'assunzione cautelativa di uno spessore di vernice intumescente pari a 1000 μm , unico per tutti gli elementi strutturali (tiranti, travi e lamiere), consente di soddisfare il requisito di resistenza al fuoco richiesto (R60), coprendo le incertezze sulle proprietà geometriche e meccaniche degli elementi strutturali, ancora presenti sulla base dei rilievi effettuati in questa fase preliminare.

Una possibile scelta opzionale sarebbe quella di uno spessore di intumescente pari 1000 μm per tiranti e travi (elementi principali) e di uno spessore pari a 600 μm per la lamiera delle solette di

piano; il maggiore coefficiente di sicurezza confermato con tale scelta per i tiranti è giustificato dalla sostanziale isostaticità di tali elementi e dalla conseguente esigenza di dotare l'edificio di un adeguato grado di robustezza strutturale in caso di incendio.

Napoli, 30/11/2014

Il Responsabile Scientifico della Convenzione
Prof. Ing. EMIDIO NIGRO

BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

- [1] NTC 2008 - Norme tecniche per le costruzioni - D.M. 14 Gennaio 2008
- [2] Decreto 16 febbraio 2007 “Classificazione di resistenza al fuoco di prodotti ed elementi costruttivi di opere da costruzione”.
- [3] Bilotta A., Dattilo F., de Silva D., Ferraro A., Mastrogioseppe C., Nigro E., Parisi G., Ponticelli L., “Prove su vernici intumescenti per la protezione al fuoco di strutture in acciaio esistenti” rivista “Antincendio” EPC editori, n°9, (25 pp), Settembre 2014.
- [4] S.Bourbigot, M.Le Bras, B.Revel. Comprehensive study of the degradation of an intumescent EVA-based material during combustion. Journal of materials science 34 (1999) 5777 – 5782.
- [5] UNI EN 1363-2-Luglio 2001 “Prove di resistenza al fuoco - Procedure alternative e aggiuntive”.
- [6] UNI EN 2808-Marzo 2007 “Determinazione dello spessore del film”.
- [7] UNI EN ISO 4624-Giugno 2006 “Misura dell’adesione mediante prova di trazione”.
- [8] de Silva D.: “Analisi teorico-sperimentale in caso di incendio di una struttura esistente in acciaio della caserma dei VVF di Napoli protetta con vernice intumescente”- Tesi di Laurea Magistrale-Aprile 2014, Università di Napoli Federico II; Relatori: prof ing Emidio Nigro, ing Guido Parisi, ing Michele Maria La Veglia.
- [9] Franssen J.-M.: SAFIR. A Thermal/Structural Program Modelling Structures under Fire. Engineering Journal, A.I.S.C., Vol 42, No. 3 (2005), 143-158.7
- [10] UNI 10898-1-Maggio 2012 “Sistemi protettivi antincendio. Modalità di controllo dell’applicazione. Parte 1: Sistemi intumescenti”
- [11] David I. Rush, Luke A. Bisby, Allan Jowsey. Evaluating design guidance for intumescent fire protection of concrete filled steel hollow sections. Structures in Fire (SIF) Shanghai, China, 2014
- [12] EN 13381-8 “Metodi di prova per la determinazione del contributo alla resistenza al fuoco di elementi strutturali-Parte 8: protettivi reattivi applicati ad elementi di acciaio”.
- [13] Nigro E., Pustorino S., Cefarelli G., Princi P. (2009). Progettazione di strutture in acciaio e composte acciaio-calcestruzzo in caso di incendio secondo gli Eurocodici e le Norme Tecniche per le Costruzioni, Hoepli, Milano.
- [14] Ponticelli L., Caciolai M. (2008) (a cura di De Angelis C.). Resistenza al fuoco delle costruzioni, Utet, Torino.