



## Analisi numerico-sperimentale della risposta strutturale di funi in acciaio sottoposte a transienti termici

V. Fontanari, B.D. Monelli

*Università di Trento, Dipartimento di Ingegneria dei materiali e delle tecnologie industriali, via Mesiano 77– 38121 Trento  
vigilio.fontanari@unitn.it*

F. Degasperi

*Laboratorio tecnologico impianti a fune (LaTIF), Via Provina 24 – 38040 Trento  
fabio.degasperi@provincia.tn.it*

---

**RIASSUNTO.** Nel presente lavoro viene descritto lo studio condotto per la messa a punto di una metodologia mirata alla determinazione della resistenza al fuoco di funi metalliche per impieghi civili e funiviari. Il problema è stato affrontato da un punto di vista numerico-sperimentale, puntando allo sviluppo di uno strumento di previsione della risposta della fune in presenza di transienti termici rappresentativi di uno scenario d'incendio (curva standard ISO 834). A tale scopo è stato messo a punto un modello di tipo parametrico agli Elementi Finiti, in grado di simulare la risposta termo-meccanica di un generico flessibile metallico. Sulla base delle informazioni ricavate, in termini di redistribuzione dei carichi durante la prova nonché di tempo e modalità di collasso, è stato possibile allestire in sicurezza la campagna sperimentale. I risultati sperimentali sono in ottimo accordo con le previsioni del modello numerico e permettono di affermare con ragionevole sicurezza che il metodo proposto possa essere utilizzato per l'analisi delle principali tipologie di funi metalliche.

**PAROLE CHIAVE.** Funi metalliche; Resistenza al fuoco; Schema di danno; Curva d'incendio ISO 834; FEM.

---

### INTRODUZIONE

A seguito di alcuni incidenti (Kaprun 2000, Zugspitze 2001) si è preso coscienza delle lacune di conoscenza sul comportamento dei flessibili in caso di incendio e il largo impiego di tali componenti in ambito civile rende ancora più impellente la necessità di colmare tali lacune. Oplatka [1], in un'indagine sugli incendi che negli anni recenti hanno coinvolto impianti funiviari ha censito 35 casi, 10 dei quali hanno portato al cedimento della fune, due volte in meno di 15 minuti.

L'esposizione della fune ad alte temperature porta ad un repentino deterioramento delle caratteristiche meccaniche dei fili con conseguente modifica della risposta della fune ai carichi applicati, fino al collasso. L'acciaio con cui vengono prodotti i fili presenta una microstruttura perlitica molto fine, caratterizzata da un alto livello di incrudimento a cui si associano importanti incrementi delle proprietà meccaniche [2-4]; tuttavia, a temperature superiori ai 300°C, l'attivazione del moto delle dislocazioni ed il processo di progressivo annichilimento delle stesse comportano la perdita irreversibile dello stato di incrudimento, con un conseguente calo delle prestazioni. Se poi le temperature raggiungono i 600°C non è da escludere anche l'attivazione del processo di ricristallizzazione, responsabile della formazione di una nuova grana cristallina, i cui effetti negativi sulle caratteristiche di resistenza sono ben noti in letteratura [5-8]. Per tempi prolungati e temperature elevate infine, si possono presentare fenomeni di scorrimento viscoso (creep). Durante un incendio tuttavia, il collasso dei flessibili sopraggiunge generalmente in tempi decisamente ristretti, e quindi tali da ipotizzare quasi trascurabili i contributi sia della ricristallizzazione che del creep.

---

In letteratura non esistono studi sulla risposta strutturale dei flessibili in caso d'incendio: l'elevato costo delle prove sperimentali e le difficoltà di allestimento delle stesse rappresentano infatti un forte ostacolo per la costruzione di database sperimentali sulle diverse classi di funi e per lo sviluppo di una normativa specifica. Per questo motivo è necessario far riferimento a quanto già pubblicato per le strutture civili, in cui per determinare in modo univoco la resistenza al fuoco di una struttura è necessario definire un profilo di temperatura standard che simuli il carico termico di un incendio reale. In tale ambito la resistenza al fuoco viene definita come l'attitudine di un elemento da costruzione a conservare nel tempo la stabilità (R), la tenuta (E), e l'isolamento termico (I). Con riferimento a queste tre caratteristiche, si identifica in normativa la classe di resistenza. Più precisamente la normativa prevede tre classi di resistenza, individuate dalle seguenti sigle seguite dal tempo espresso in minuti:

- ✓ REI: l'elemento deve conservare per un tempo determinato la stabilità, la tenuta e l'isolamento;
- ✓ RE: l'elemento deve conservare per un tempo determinato la stabilità e la tenuta;
- ✓ R: l'elemento deve conservare per un tempo determinato la stabilità.

Per quanto riguarda i flessibili, non esiste una normativa di riferimento in materia. Si può pensare di determinare il tempo di resistenza a fuoco di una fune per via sperimentale sottoponendo il componente ad un dato carico termico, scelto tra quelli già definiti in ambito civile. Per le caratteristiche intrinseche, sicuramente la curva ISO 834 [9-11] (Fig. 1) rappresenta un ottimo punto di partenza per la determinazione della resistenza a fuoco dei flessibili, anche se tale curva sovrastima la gravosità dell'incendio, in quanto non considera la sua fase d'inizio ed espansione, ma soltanto quella di 'flash over'.

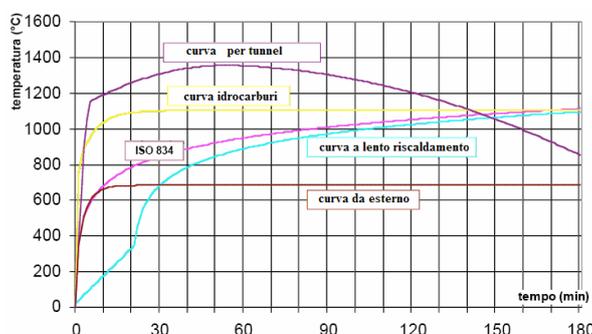


Figura 1: Curva ISO 834 e altre comunemente utilizzate per vari scenari di incendio (EN 1993 1-2).

Se è vero che mancano studi sul comportamento a fuoco delle funi metalliche, altrettanto non si può dire per quanto riguarda lo studio della loro risposta meccanica. In tale ambito, dato il numero considerevole di tipologie di flessibili e dei fenomeni coinvolti, diversi sono i modelli analitici e numerici sviluppati allo scopo di prevedere come i carichi applicati alla fune vengono ripartiti tra i vari fili e le azioni che questi si scambiano vicendevolmente [2,12]. Per quanto concerne le funi aperte, la risposta meccanica è strettamente correlata al contributo che ciascun filo è in grado di offrire nel sostentamento del carico. In questo senso gli approcci analitici possono essere raggruppati in due categorie principali: approcci *fiber-based* ed approcci *rod-based*. I primi [14-16] considerano i fili come delle fibre dotate di sola rigidità assiale; i secondi [17-20] prevedono, invece, che ciascun filo si comporti come una trave e, per questa ragione, abbia anche rigidità flessionale e torsionale. Il confronto con risultati sperimentali [21] ha evidenziato come i modelli *fiber-based* restituiscano una rappresentazione sufficientemente corretta soltanto per funi composte da un unico filo centrale attorno al quale sia avvolto secondo una spirale un singolo strato di fili. Per geometrie più complesse (funi multistrato a doppia elica), invece, è preferibile adottare un modello *rod-based*, anche se tale approccio conduce ad una trattazione matematica piuttosto complessa e poco maneggevole in fase progettuale. Nel caso delle funi chiuse la risposta del flessibile è al contrario determinata dalle proprietà di ciascun strato costituente la sezione trasversale piuttosto che dal singolo filo. Il modello a strati ortotropi proposto in [22] costituisce sicuramente l'approccio più aderente alla realtà sperimentale. Secondo tale modello ciascun manto di fili viene assunto come un continuo dotato di rigidità normale, torsionale e flessionale, le cui proprietà elastiche sono identiche lungo le direzioni giacenti nel piano tangente allo strato mentre assumono valori differenti lungo la direzione perpendicolare a tale piano.

Nonostante gli analitici riescano a spiegare come in una fune metallica vengono ripartiti i carichi applicati tra i vari elementi e, in alcuni casi, a prevedere qualitativamente l'andamento delle azioni mutue di contatto scambiate dai fili e dagli strati, sfortunatamente non sono in grado di descrivere in modo compiuto il comportamento di un generico flessibile a causa dei numerosi fenomeni che si manifestano contemporaneamente, quali soprattutto il contatto, l'attrito, la plasticità e i grandi spostamenti (full-slip regime vs. no-slip regime), che inevitabilmente influenzano la risposta meccanica. Per determinare l'effetto di tali fenomeni sono stati proposti alcuni approcci di tipo numerico basati sul Metodo degli



Elementi Finiti (MEF) [23-25], i quali, sfruttando la simmetria roto-traslatoria, hanno permesso di determinare lo stato tensionale sia in corrispondenza della zona di contatto che nella sezione trasversale di ciascun filo, anche in presenza di attrito e plasticizzazione del materiale. Attualmente gli approcci numerici hanno preso in considerazione esclusivamente flessibili di tipo spiroidale composti da tre strati e forniscono risultati più vicini alle evidenze sperimentali, per quanto concerne la stima delle rigidità normale, torsionale e flessionale, di quelli ottenuti a partire dai modelli analitici.

Partendo da queste informazioni nel presente lavoro viene affrontato lo studio della risposta strutturale delle funi metalliche in presenza di transitori termici molto gravosi, rappresentativi di uno scenario d'incendio. Allo scopo è stata realizzata un'analisi parametrica ad elementi finiti, in grado di simulare la risposta termo-meccanica della fune nel transitorio d'incendio (curva standard ISO 834). Quest'analisi numerica è fondamentale per definire l'allestimento sperimentale tale da condurre in sicurezza le prove sulle funi. Il modello è stato sviluppato utilizzando dati ottenuti da prove sperimentali: i risultati di prove meccaniche a freddo hanno permesso di definire il modello meccanico, mentre le storie termiche misurate in diversi punti della fune all'applicazione della curva standard ISO 834 sono state utilizzate per calibrare la risposta termica. Per definire il meccanismo di redistribuzione dei carichi tra i fili durante la prova a caldo è stato necessario condurre un'estesa campagna di prove sui singoli fili per ricavare le curve  $\sigma$ - $\epsilon$  alle diverse temperature. Queste curve sono state introdotte nel modello per la simulazione della risposta termo-meccanica della fune.

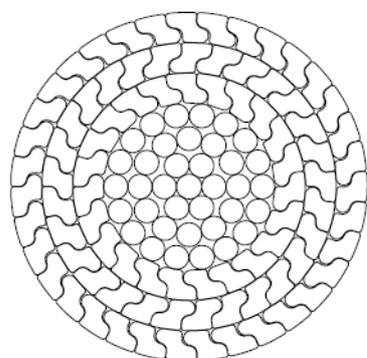
Sulla base delle informazioni ricavate dal modello numerico, sia in termini di redistribuzione dei carichi sia di tempo e modalità di collasso, è stato possibile allestire la sperimentazione su una fune metallica chiusa e realizzare un confronto con i risultati della modellazione numerica ottenendo risultati incoraggianti. Ciò ha permesso di estendere in ragionevole sicurezza la sperimentazione ad altre tipologie di funi e di porre le basi per lo sviluppo di una efficiente metodologia per la previsione della risposta termo-meccanica della fune.

## CARATTERISTICHE DELLE FUNI STUDIATE

Il presente lavoro è finalizzato alla definizione di uno strumento di previsione di applicabilità generale alle tipologie di funi usualmente utilizzate negli impianti a fune e nelle tensostrutture. Allo scopo viene affrontato sia lo studio delle funi a trefoli che quello delle funi chiuse. Per la definizione e la messa a punto del modello numerico si è fatto riferimento a due configurazioni geometriche specifiche, corrispondenti rispettivamente ad un fune chiusa di diametro nominale pari a 60 mm costituita da 124 fili ed ad una fune a trefoli Warrington-Seale 6x31 da 186 fili.

### La fune chiusa

La vista in sezione riportata in Fig. 2 evidenzia le caratteristiche costruttive della fune chiusa avente diametro nominale pari a 60 mm, costituita da un filo centrale, tre manti di fili tondi con avvolgimento incrociato e tre manti esterni di fili sagomati a Z anch'essi con avvolgimento incrociato. La sezione metallica della fune risulta pari a 2486 mm<sup>2</sup>, che corrisponde ad un coefficiente di riempimento (rapporto tra sezione metallica e nominale) di circa l'88%. La composizione chimica nominale dell'acciaio utilizzato per realizzare i fili invece è riportata in Tab. 1. Questa tipologia di fune è generalmente utilizzata per tensostrutture, per cui, dovendo lavorare in condizioni di carico prevalentemente assiali, presenta fili di sezione generalmente maggiore rispetto a quelle per utilizzi funiviari per le quali è richiesta un'elevata flessibilità.



	N° fili	$\Phi / H$ [mm]	Sezione [mm <sup>2</sup> ]
Filo centrale	1	$\Phi$ 4.26	14.24
Primo manto	6	$\Phi$ 4.09	13.14
Secondo manto	12	$\Phi$ 4.09	13.14
Terzo manto	18	$\Phi$ 4.09	13.14
Quarto manto	23	H 5.20	22.5
Quinto manto	29	H 5.20	23.2
Quinto manto	35	H 5.20	23.2

( $\Phi$ =diametro fili tondi, H=spessore fili sagomati)

Figura 2: Sezione trasversale della fune chiusa  $\varnothing$  60mm di formazione [1 + 6 + 12 + 18 + (23 + 29 + 35) Z].

### La fune Warrington-Seale

La fune in esame è una fune 6x31WS+SF, costituita da sei trefoli Warrington Seale da 31 fili con anima centrale polimerica (PPC). La sezione trasversale del flessibile è schematicamente rappresentata in Fig. 3a, in cui si può apprezzare l'avvolgimento a doppia elica dei fili nel trefolo e dei trefoli intorno all'anima. La sezione del trefolo è invece descritta dalla Fig. 3b, in cui si può identificare la classica configurazione dei fili: 12+6/6+6+1.

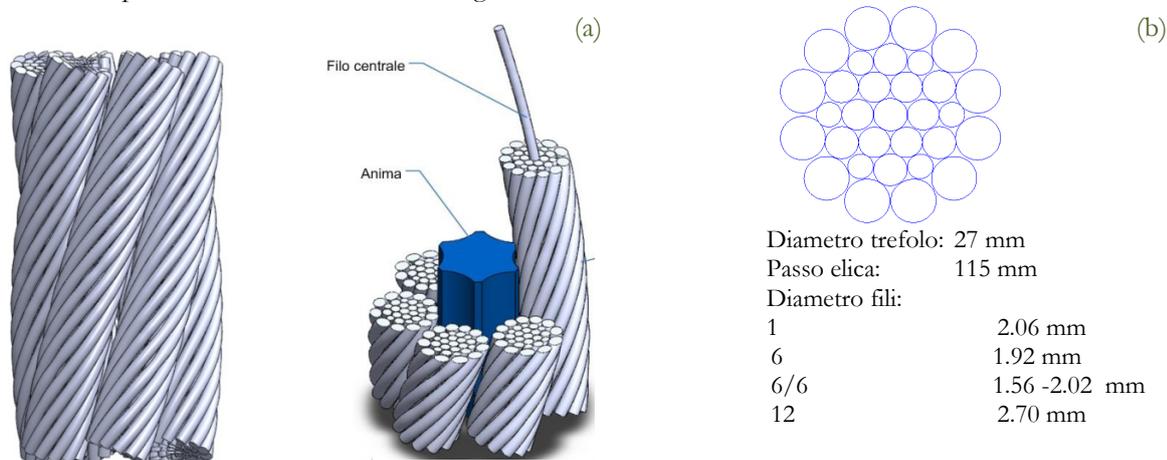


Figura 3: a) Spezzone di fune 6x31 WS b) sezione del trefolo WS in configurazione 12+6/6+6+1.

La composizione nominale dell'acciaio per le funi prescelte è riportata in Tab. 1.

Elem.	C	Mn	S	P	Si	Sn	Cu	Al	Mo	Ni	Cr	V
%	0.83	0.73	0.003	0.013	0.21	0.02	0.02	0.03	0.003	0.016	0.12	0.07

Tabella 1: Composizione chimica dell'acciaio per la fune scelta.

### Proprietà costitutive dei fili

Date le marcate differenze in termini di dimensioni diametrali riscontrate tra i fili è lecito aspettarsi che questi abbiano differenti proprietà costitutive. La campagna sperimentale di caratterizzazione dei fili, pertanto, è stata condotta in modo tale da poter cogliere anche gli effetti introdotti dalla lavorazione. A tale scopo sono stati testati dodici provini per ogni tipologia di fili costituenti le due funi, utilizzando una macchina universale servo-idraulica (Instron 8516 100 kN). L'allungamento è stato misurato con un estensimetro avente una gauge length pari a 12.5 mm. Nelle Fig. 4 e 5 sono rappresentate le curve  $\sigma$ - $\epsilon$  medie ottenute dalla suddetta campagna sperimentale.

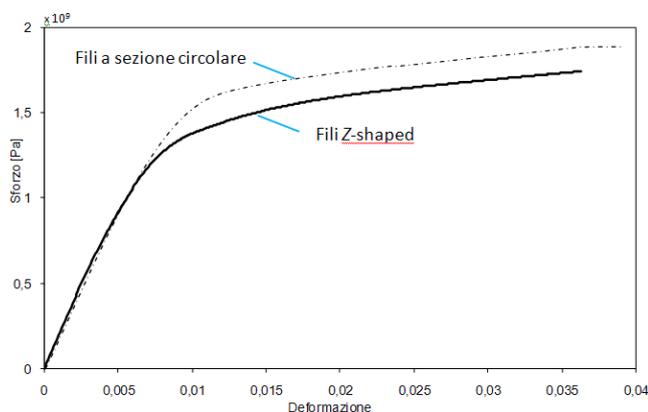


Figura 4: Fune chiusa  $\varnothing 60$ : curve sperimentali true stress-true strain medie dei fili.

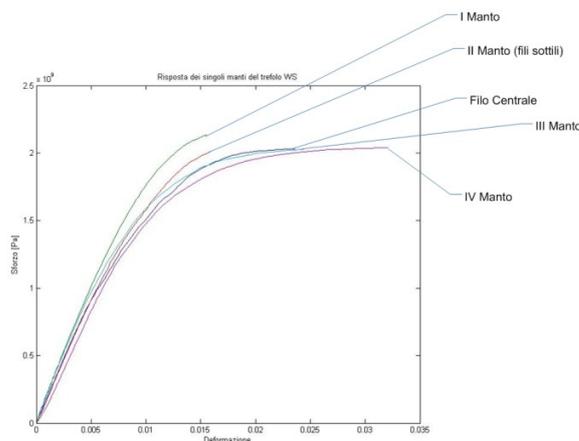


Figura 5: Fune a trefoli 6x31WS: curve sperimentali true stress-true strain medie dei fili.



### Risposta a trazione del trefolo WS e delle funi.

La caratterizzazione sperimentale delle funi oggetto di studio sono state condotte presso il La.TIF, impiegando una macchina servo-idraulica Instron da 10MN. Le misure sono state effettuate seguendo un protocollo sperimentale messo a punto da La.T.I.F che prevede una misura dell'allungamento mediante un estensimetro con base di misura pari ad 1 m e l'applicazione di 6 cicli di stabilizzazione con il carico variabile tra il 5% e il 50% del valore presunto di rottura, prima dell'effettiva misura. Nei primi cicli avviene l'assestamento dei contatti tra i fili fino alla totale stabilizzazione. Dopo assestamento la fune presenta risposta inizialmente lineare: in questo tratto è possibile definire il valore del modulo elastico che si attesta a 175 GPa se riferito alla sezione netta. L'estensimetro viene quindi rimosso e la prova portata a termine fino a cedimento della fune. In Fig. 6 è riportata la curva carico-deformazione ottenuta sperimentalmente con i cicli di stabilizzazione e un'immagine della fune dopo rottura.

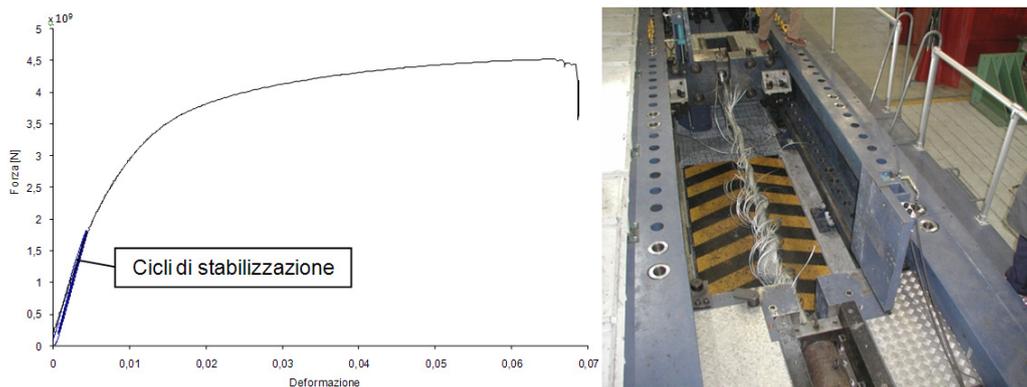


Figura 6: Fune chiusa  $\varnothing 60$ : a) caratteristica carico-deformazione della fune, b) fune dopo rottura.

Le prove sul trefolo e sulla fune WS sono state condotte sulla stessa macchina senza tuttavia giungere alla rottura del componente. Il trefolo presenta una risposta lineare, caratterizzata da un modulo pari a  $175 \pm 1$  GPa, fino ad un carico intorno ai  $150 \pm 10$  kN. Oltre tale valore si osserva un progressivo e marcato scostamento dalla linearità. La fune presenta invece un modulo pari a 136 GPa. In Fig. 7 sono riportate le curve rappresentative della risposta del trefolo e della fune.

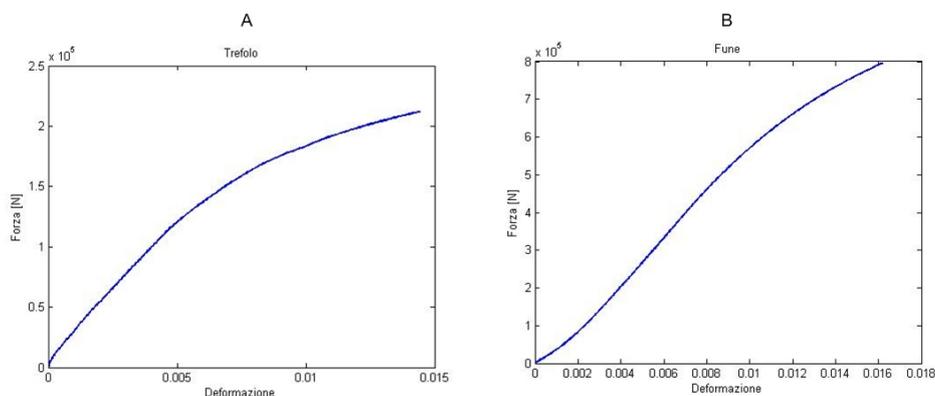


Figura 7: Curve ottenute dalle prove a trazione fino a inizio plasticizzazione per il trefolo (A) e la fune (B).

## MODELLAZIONE NUMERICA DELLA RISPOSTA STRUTTURALE

L'approccio è stato concepito in modo che, una volta definiti i parametri geometrico-costruttivi, il modello solido possa essere realizzato direttamente all'interno dell'ambiente di modellazione oppure via software di modellazione solida. La lunghezza dei tratti modellati è stata scelta considerando il bilanciamento di due aspetti contrastanti: il numero di elementi gestibile dal calcolatore e la minimizzazione degli effetti di bordo legati all'applicazione del carico e dei vincoli nel modello.

La modellazione ad elementi finiti è stata condotta con il codice Ansys Rev. 11 utilizzando elementi strutturali ad 8 nodi, mentre il contatto tra i fili è stato modellato con elementi di tipo *surface to surface*. Per contenere l'onere computazionale è

stata implementata una procedura per identificare le superfici di possibile contatto e minimizzare il numero di elementi di contatto. Inoltre, poiché dalle indagini condotte da Costello e Feyer [12,2] è emerso che nei flessibili sottoposti a condizioni di carico puramente assiale, gli spostamenti relativi tra i fili sono decisamente trascurabili, si può assumere che l'attrito non giochi un ruolo rilevante nella definizione dello stato tenso-deformativo. In definitiva, sebbene nei modelli si possano considerare anche gli effetti dell'attrito, i risultati ottenuti si riferiscono a condizioni di contatto in assenza d'attrito.

Per quanto concerne i modelli di materiale, ciascun filo di ogni manto è stato assunto omogeneo, isotropo e avente un legame costitutivo coincidente con la corrispondente curva *true stress-true strain*  $\sigma$ - $\varepsilon$  media ottenuta dalla campagna sperimentale precedentemente descritta (§ *Proprietà costitutive dei fili*).

Le condizioni di carico, infine, sono state introdotte analizzando il campo di spostamento corrispondente ad una configurazione di carico puramente assiale. Allo scopo, avendo la fune una dimensione longitudinale molto superiore alle altre, si può considerare che sotto l'azione del carico assiale, ad una sufficiente distanza dai vincoli (teste fuse), tutti i fili siano soggetti ad un uguale spostamento in direzione longitudinale (mantenimento superfici piane). La semplice imposizione dello spostamento in direzione assiale non è comunque sufficiente per la fune, in quanto i fili avvolti a spirale quando sono soggetti a trazione tendono a srotolarsi. Di conseguenza, si devono impedire gli spostamenti nelle direzioni trasversali su entrambe le superfici. Così facendo, si genera una reazione contraria al momento di "srotolamento" che esiste realmente nei manti della fune, la cui sommatoria però dà luogo ad un momento totale di entità moderata a causa dell'avvolgimento incrociato dei manti. Di seguito vengono descritti i modelli numerici messi a punto per le due tipologie di funi.

#### *Modello ad elementi finiti della fune chiusa*

Il modello per la fune chiusa è costituito da un filo centrale, tre manti di fili circolari avvolti a spirale in modo alternato destrorso-sinistrorso, tre manti di fili sagomati esterni ancora ad avvolgimento alternato (Fig. 8). In Fig. 9 è rappresentato il reticolo utilizzato ed un esempio di area di contatto tra due fili.

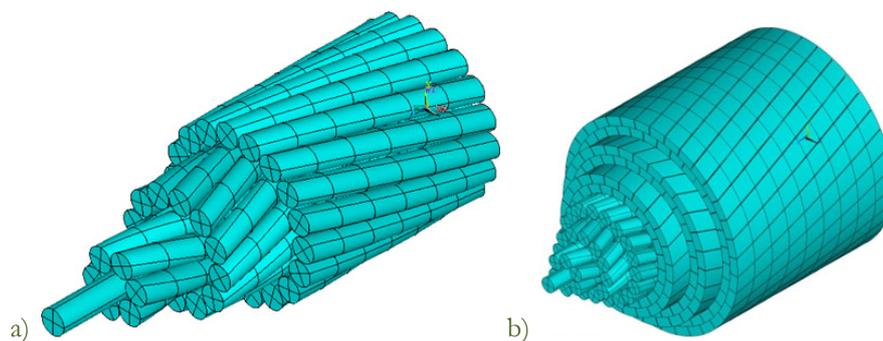


Figura 8: Fune chiusa  $\varnothing 60$ : a) nucleo ad avvolgimento incrociato, b) modello solido completo.

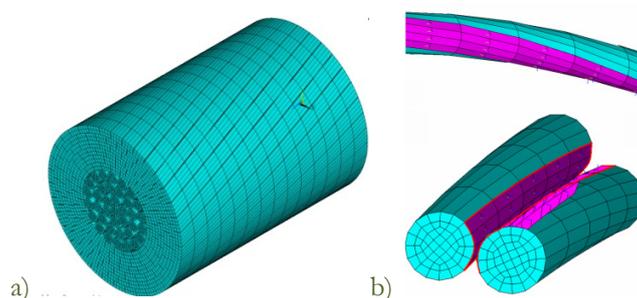


Figura 9: Fune chiusa  $\varnothing 60$ : a) maglia complessiva, b) esempio di definizione del contatto.

La dimensione degli elementi è stata scelta a seguito di un'analisi di convergenza.

### Modello ad elementi finiti del trefolo e della fune 6x31 WS

Data la notevole complessità geometrica che caratterizza questo tipo di sistemi e in modo particolare l'elevato numero di fili da discretizzare, la strada numerica diventa percorribile se e solo se le dimensioni complessive del modello risultano ragionevoli. A tale scopo, pertanto, è stata condotta una campagna di analisi preliminare su componenti più semplici (trefolo 6+1) volta a determinare le dimensioni longitudinali complessive del modello senza che gli effetti di bordo ne alterino la risposta. La qualifica del modello è stata in questo caso condotta confrontandone la risposta con quella fornita dal modello di Costello [12]. Da tale screening è emerso che gli effetti di bordo risultano trascurabili se la lunghezza longitudinale del modello è almeno pari ad  $1/16$  del passo dei fili nel trefolo, mentre gli elementi strutturali tridimensionali a 8 nodi devono avere una dimensione caratteristica non superiore a  $1/12$  del raggio di ciascun filo in direzione radiale e a  $1/10$  del passo in quella assiale (Fig. 10).

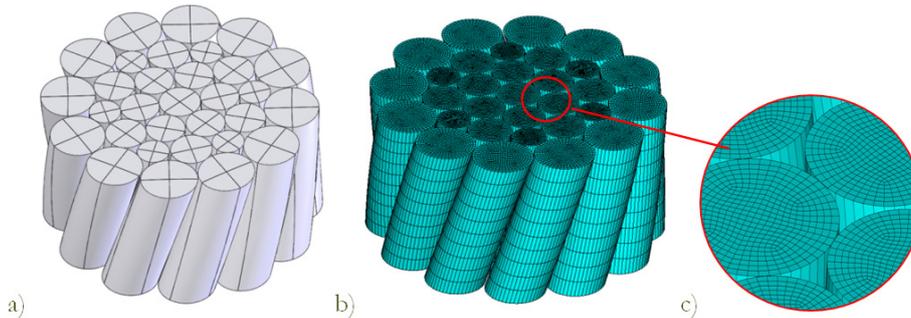


Figura 10: Trefolo Warrington-Seale 12-6/6-6-1: (a) modello solido del trefolo, (b) maglia adottata nelle simulazioni con particolare (c) della maglia in corrispondenza della sezione terminale 2.

La fune a trefoli si ottiene avvolgendo attorno a un'elica (definita elica principale) un trefolo. All'interno del singolo trefolo va poi ricordato che ogni filo ad esclusione di quello centrale è avvolto attorno a un'altra elica (detta elica secondaria) (Fig. 11a). Geometricamente quindi l'asse curvilineo di un filo (ad esclusione di quello centrale di ogni trefolo) si avvolge attorno a un'elica la quale si avvolge a sua volta attorno ad un'altra.

Il tipo di discretizzazione utilizzato, il numero di divisioni, le condizioni di carico e quelle al contorno e i tipi di elementi usati, sono analoghi a quelli utilizzati nell'analisi del trefolo WS. Va in aggiunta sottolineato che la funzione dell'anima centrale è quella di sostenere i fili. Per questo nella modellazione è stata considerata una superficie interna con lo scopo di simulare proprio il sostegno fornito dall'anima. Il modello così discretizzato è riportato in Fig. 11b.

### Validazione dei modelli ad elementi finiti

Essendo di fondamentale importanza cogliere correttamente la risposta strutturale dei flessibili analizzati, la validazione dei modelli è stata condotta confrontando la curva  $\sigma$ - $\epsilon$  ottenuta per via numerica con quella ricavata sperimentalmente. La verifica della capacità del modello di cogliere la risposta meccanica della fune si può condurre in modo rigoroso fino allo scostamento dalla linearità, nel tratto in cui è applicato l'estensimetro alla fune.

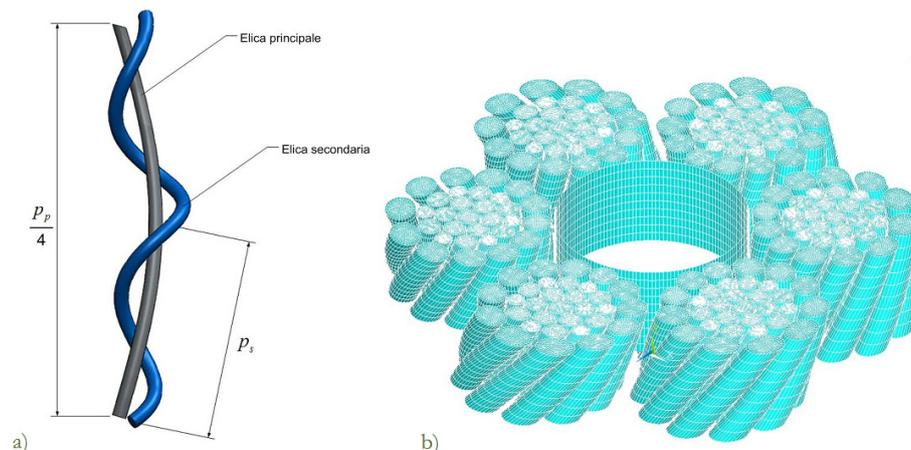


Figura 11: Fune a trefoli 6x31WS: a) avvolgimento a doppia elica di un singolo filo, b) modello FE della fune completa.



Tolto l'estensimetro, la deformazione sperimentale viene calcolata sulla base dello spostamento della traversa per cui si avrà una sovrastima della stessa. Nelle Fig. 12-14 sono riportati gli esiti di tale confronto, mentre nella tabella 2 sono raccolti i valori relativi al modulo elastico e allo scostamento dalla linearità ottenuti dai due approcci: numerico e sperimentale.

In Fig. 12 è presentato il confronto per la fune chiusa tra il risultato ottenuto dall'analisi numerica e quello ricavato dalle prove sperimentali relativamente al tratto elastico (a) e alla prima parte del tratto plastico (b). La modellazione EF riproduce in modo ragionevole la risposta della fune: anche nel modello EF avviene un iniziale assestamento dei fili (Fig. 12 a)); interpolando i punti compresi tra 200 e 600 MPa si ottiene un modulo elastico della fune di circa 171 GPa contro i 175 GPa delle prove sperimentali, l'errore nella simulazione è del 2.0%. Il modello coglie in modo accettabile anche lo scostamento dalla linearità.

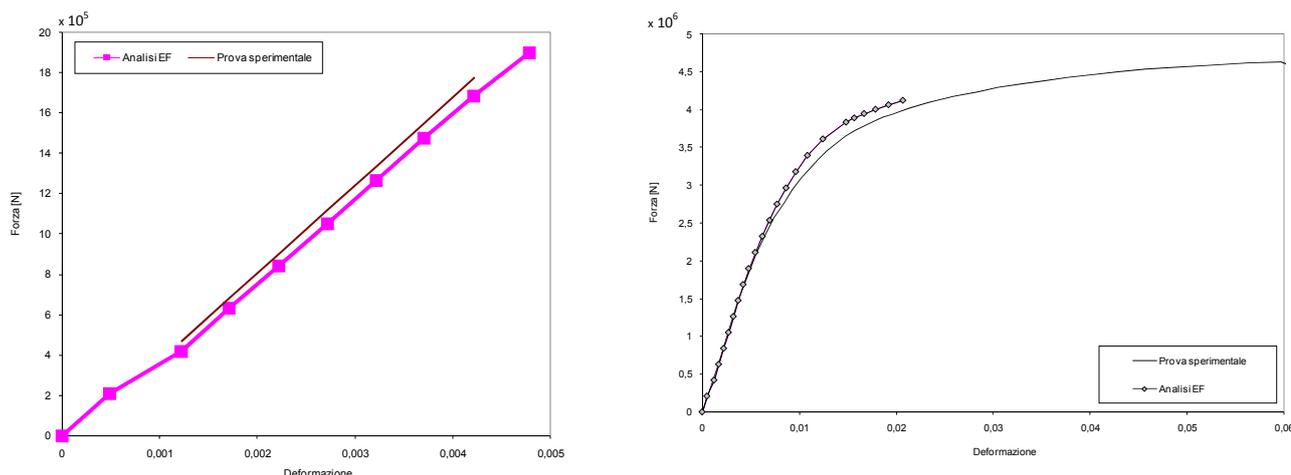
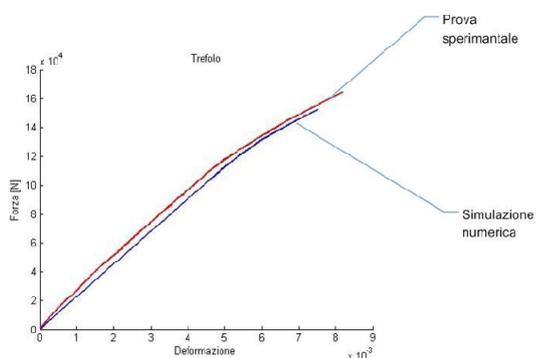
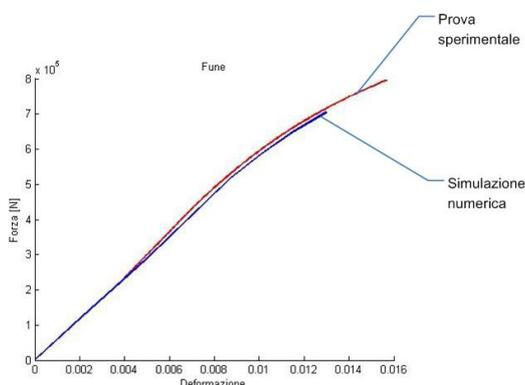


Figura 12: Fune chiusa Ø60: confronto tra la curva sperimentale e numerica: a) tratto elastico, b) risposta elasto-plastica.



	Sperimentale	Numerico
Modulo Elastico (GPa)	176	175
Scostamento dalla proporzionalità (kN)	150	148

Figura 13: Trefolo WS 31 fili: curva forza-deformazione per la prova sperimentale e il modello numerico.



	Sperimentale	Numerico
Modulo Elastico (GPa)	136	135
Scostamento dalla proporzionalità (kN)	660	650

Figura 14: Fune a trefoli 6x31WS: curva forza-deformazione per la prova sperimentale e il modello numerico.



Per quanto concerne le risposte del trefolo WS da 31 fili e della fune 6x36WS, anche in questo caso l'esito del confronto tra i due approcci è senza dubbio estremamente positivo: in entrambe i casi gli scostamenti relativi sono comunque inferiori all'1% e all'1.5% per il modulo elastico e lo scostamento dalla linearità rispettivamente. Grazie all'ottima corrispondenza riscontrata tra l'approccio numerico e le evidenze sperimentali, è possibile esplorare come il carico venga ripartito tra i fili e il relativo meccanismo di cedimento, nonché le cause che lo innescano. Questa analisi esula peraltro dall'obiettivo primario del presente lavoro e non viene riportata. Di seguito l'attenzione sarà quindi focalizzata sulla messa a punto dell'analisi termo-meccanica per lo studio del transitorio termico subito dalla fune nella simulazione d'incendio. In questo caso le informazioni che possono venire dalla modellazione numerica sono essenziali per la definizione delle condizioni di prova in sicurezza della fune. Allo scopo, l'analisi numerica è stata focalizzata sulle funi chiuse che presentano una minore onerosità computazionale.

### SVILUPPO E CALIBRAZIONE DEL MODELLO PER LA SIMULAZIONE DELLA RISPOSTA DELLA FUNE NEL TRANSITORIO TERMICO

Il transitorio termico è applicato alla fune mediante un forno inserito nella macchina di prova, il quale è in grado di riprodurre la curva ISO 834 su un segmento di fune di lunghezza pari a circa 1.5 m. La limitata durata del transitorio termico permette di trascurare il creep e assumere che il collasso della fune sia da attribuire quasi unicamente al decadimento delle prestazioni meccaniche del materiale. Risulta pertanto fondamentale riprodurre in modo corretto il transitorio termico dei singoli fili, in quanto esso influisce fortemente sulla redistribuzione dei carichi. Le rilevazioni sperimentali si ottengono da una termocoppia al centro della fune, quattro termocoppie equispaziate di 90° sulla superficie esterna e quattro nella camera del forno per rilevare la temperatura dell'aria. I risultati ottenuti sono riportati in Fig. 15a. Le termocoppie "retroazione" e "aria 1" sono poste nella parte centrale del forno ed evidenziano come il forno raggiunga la curva ISO dopo circa tre minuti riuscendo poi a seguirla abbastanza fedelmente. Si osserva che le quattro termocoppie poste sulla superficie esterna della fune registrano il medesimo valore: è lecito supporre pertanto che il contributo dell'irraggiamento sia uniforme su tutta la pelle della fune e che sui manti di fili sagomati vi sia una trasmissione del calore puramente radiale. La termocoppia centrale inizia a risentire del riscaldamento solo dopo tre minuti dall'inizio della prova. Il gap di temperatura risulta elevato. Il modello termico deve essere tarato impostando iterativamente alcuni parametri: il coefficiente di scambio termico globale fune aria, la resistenza di contatto tra i manti di fili sagomati ed infine la resistenza di contatto tra i fili dei manti interni. Sfruttando le misure sperimentali ed introducendo le proprietà termiche del materiale al variare della temperatura, reperite in letteratura [5,6,26,27], si ottiene una ottima riproduzione del ciclo termico subito da ognuno dei fili. In Fig. 15b è riportato il risultato della simulazione del ciclo ISO 834. Sulla base di questi risultati e dei risultati della modellazione meccanica, si può considerare il modello EF ragionevolmente accurato per affrontare lo studio del transitorio termomeccanico.

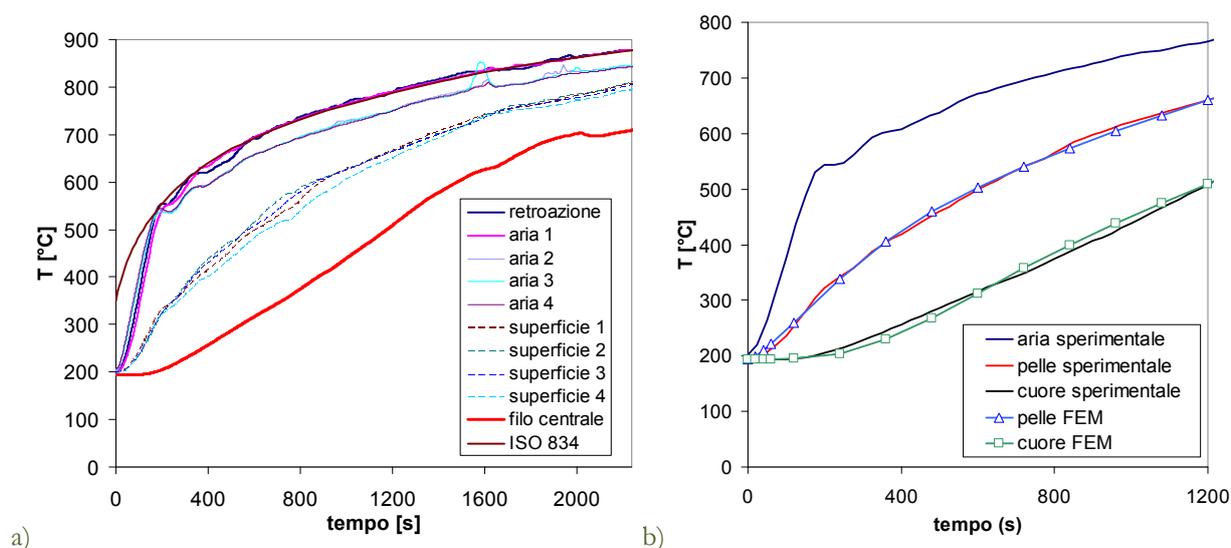


Figura 15: a) andamento delle temperature dell'aria, sulla pelle della fune e al centro, b) confronto tra i risultati numerici e sperimentali.



## PROPRIETÀ MECCANICHE A CALDO DEL MATERIALE

Le proprietà dei fili cambiano in funzione della temperatura per cui è necessario poter fornire al modello FEM un database di curva sperimentali ottenute a diverse temperature e per diversi tempi di stabilizzazione. Nonostante il tipo di acciaio utilizzato nelle funi sia molto comune, queste informazioni non sono reperibili in letteratura: si impone quindi di condurre una serie di prove a caldo sui fili opportunamente sfilati da uno spezzone della fune. Le prove sono state condotte su una macchina servo-idraulica da 100 kN equipaggiata con un forno che permette di effettuare la prova a vari livelli di temperatura. La temperatura sul filo viene rilevata tramite l'utilizzo di termocoppie di tipo K opportunamente posizionate. Particolare cura viene posta a stabilizzare la temperatura del filo nei tempi tipici della prova d'incendio. Per le prove in temperatura, come fatto per le quelle a freddo, sarebbe necessario effettuare la sperimentazione sia sui fili a sezione circolare che quelli sagomati. In realtà dopo alcune prove preliminari si è osservato già da temperature inferiori ai 300°C il comportamento meccanico risulta il medesimo nei due tipi di filo. In seguito a queste osservazioni è possibile condurre le prove solo sui fili a sezione circolare. Le prove sono state realizzate in un intervallo di temperatura compreso tra i 100 e 600°C ad intervalli di 100°C. Con un'opportuna procedura d'inserimento si è riusciti a limitare ad alcuni minuti (tipicamente 5-6) il transitorio termico del filo prima di raggiungere la temperatura di prova. Al termine del transitorio, ad ogni livello di temperatura, per verificare come il tempo di permanenza incida sul comportamento del materiale, sono state eseguite tre prove di trazione dopo 2-3 minuti di permanenza del campione stabilizzato nel forno e tre prove di trazione a 8-10 minuti di permanenza nel forno dopo stabilizzazione.

In Fig. 16 sono riportate le curve  $\sigma$ - $\varepsilon$  in funzione della temperatura, mentre la Tab. 3 riassume i relativi moduli di Young, tensioni di snervamento e di rottura. Per i livelli di temperatura 100°C e 200°C si è riportata un'unica curva in quanto si è osservato che a queste temperature i tempi di permanenza adottati non influenzano le proprietà del materiale. Per tutti i livelli successivi invece sono riportate due curve, riferite ai due tempi di permanenza. Si può osservare che il comportamento del materiale risulta particolarmente sensibile al tempo soprattutto per le temperature attorno ai 400°C. Si può supporre che per temperature inferiori la cinetica dei fenomeni sia più lenta e siano quindi necessari tempi più lunghi per osservare variazioni sensibili. Al contrario a temperature elevate la cinetica risulta molto accelerata e i fenomeni di rinvenimento avvengono in tempi molto contenuti.

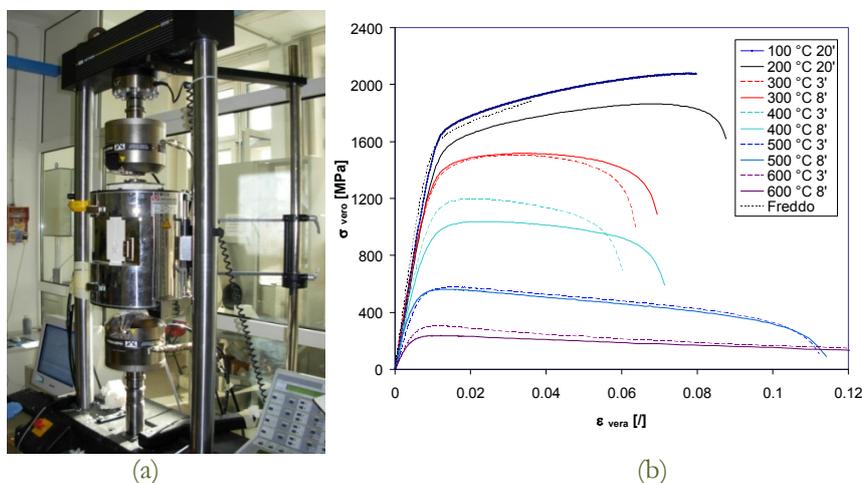


Figura 16: a) attrezzatura per le prove a caldo b) curve  $\sigma$ - $\varepsilon$  ottenute alle diverse temperature e per diversi tempi di stabilizzazione.

T [°C]	E [GPa]	$\sigma_{y,stab 2'}$ [MPa]	$\sigma_{y,stab 8-10'}$ [MPa]	$\sigma_{R,stab 2'}$ [MPa]	$\sigma_{R,stab 8-10'}$ [MPa]
20	186	1560	1560	1885	1885
100	169	1630	1630	2078	2078
200	157	1490	1490	1864	1864
300	140	1280	1320	1503	1517
400	125	1055	890	1196	1039
500	110	510	505	575	563
600	87	285	214	306	238

Tabella 3: risultati delle prove a caldo sui fili.

## DETERMINAZIONE NUMERICA DELLA RESISTENZA AL FUOCO DELLA FUNE

### Modello termostrutturale.

Il modello EF utilizzato per questa analisi è quello generato nello studio del comportamento a freddo della fune. Le caratteristiche del materiale devono essere inserite in funzione della temperatura. Si deve ricordare che dalle prove sperimentali è emerso che le proprietà del materiale sono influenzate sia dalla temperatura che dal tempo di permanenza nel forno. Per verificare la sensibilità che questo differente comportamento può avere sul tempo di resistenza al fuoco della fune si è deciso di effettuare due simulazioni: una inserendo le proprietà del materiale dopo il periodo di stabilizzazione più lungo ed una con quello più breve. I due tempi di resistenza al fuoco che si ottengono possono essere considerati come il limite inferiore e quello superiore entro i quali ci si attende vada a posizionarsi il valore reale di resistenza al fuoco.

Le condizioni di vincolo imposte al modello sono identiche a quelle definite nel modello a freddo. Per ricreare correttamente le modalità di applicazione del carico così come avviene nella prova sperimentale, si impone una rampa di carico che parte da un valore nullo e arriva al carico nominale di esercizio posto pari al 30% del carico di rottura cioè di 1.26MN. Durante la fase di pretensionamento si impone che tutti i nodi della fune si trovino alla temperatura iniziale di 20°C. Raggiunto il livello di pretensionamento, mantenendo la forza di trazione costante, si impone ai fili di seguire il transitorio di temperatura determinato nell'analisi termica e generato dall'imposizione della curva ISO 834 (Fig. 17).

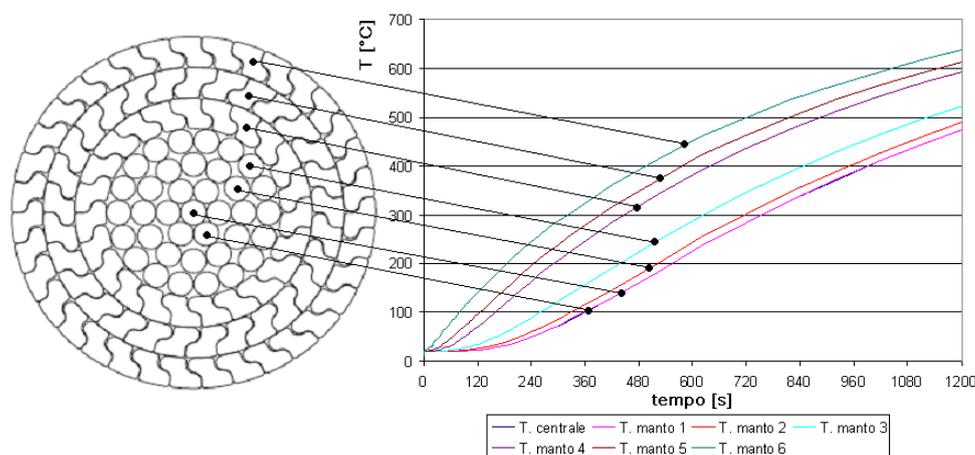


Figura 17: Curve di temperatura da imporre ai fili della fune in funzione del tempo.

### Comportamento della fune soggetta al carico di incendio

In Fig. 18a è riportato l'andamento della deformazione della fune in funzione del tempo ottenuto dalle due simulazioni: il limite inferiore ottenuto inserendo le proprietà del materiale corrispondenti alla stabilizzazione di circa 8 minuti, limite superiore per proprietà del materiale dopo stabilizzazione più breve. Si osserva che il comportamento della fune nelle due analisi risulta simile nel primo tratto mentre presenta un marcato scostamento in prossimità della rottura. Si può ipotizzare che la prova sperimentale possa collocarsi all'interno di questi due limiti. Non essendo possibile conoscere con esattezza le proprietà meccaniche di ogni filo, il tempo di resistenza al fuoco non può essere univocamente definito: questa analisi fornisce un intervallo abbastanza ristretto entro il quale si stima possa avvenire la rottura. Si possono distinguere due fasi: nella prima parte, ad andamento praticamente lineare, la deformazione è quasi unicamente di origine termica, nel secondo tratto, più breve, si osservano deformazioni più marcate e con velocità crescente (Fig. 18 a). La conferma che nel primo tratto l'allungamento sia fortemente influenzato dalla dilatazione termica si può ricavare analizzando la deformazione accumulata al netto del contributo dovuto alla dilatazione termica (Fig. 18b).

### Considerazioni sulle possibili modalità di rottura

Per la prova sperimentale è particolarmente importante conoscere la modalità con cui avviene la rottura. L'analisi numerica consente di arrivare a delle ipotesi importanti. In base alle curve riportate in Fig. 16, i fili più esterni, dopo aver superato lo sforzo massimo, possono presentare una estesa deformazione a carico pressoché costante o addirittura leggermente calante, con conseguente trasferimento dei carichi verso i manti interni. Poiché tutti i fili subiscono circa lo stesso allungamento durante la prova, la rottura di ciascuno di essi sarà determinata dal massimo valore di deformazione

sopportabile, il quale dipende dalla temperatura alla quale si trova il materiale. Per questo motivo è lecito supporre che i primi fili che arriveranno a rottura sono quelli dei manti più interni, in quanto per il tempo stimato di rottura essi si trovano ad una temperatura di circa 400°C. A seguito della rottura di questi manti si avrà un sovraccarico istantaneo sugli altri fili e la fune giungerà al collasso. Si può tuttavia osservare che i fili sagomati esterni, vista l'elevata temperatura raggiunta (550°C), permettano un elevatissimo grado di deformazione arrivando per ultimi a rottura, contenendo così tutti gli altri fili rotti e dissipando una notevole quantità di energia prima della rottura, limitando l'effetto frusta che si osserva tipicamente nella prova a freddo (Fig. 5b). Questo è molto importante perché permette di condurre in relativa sicurezza la prova con il forno inserito in macchina.

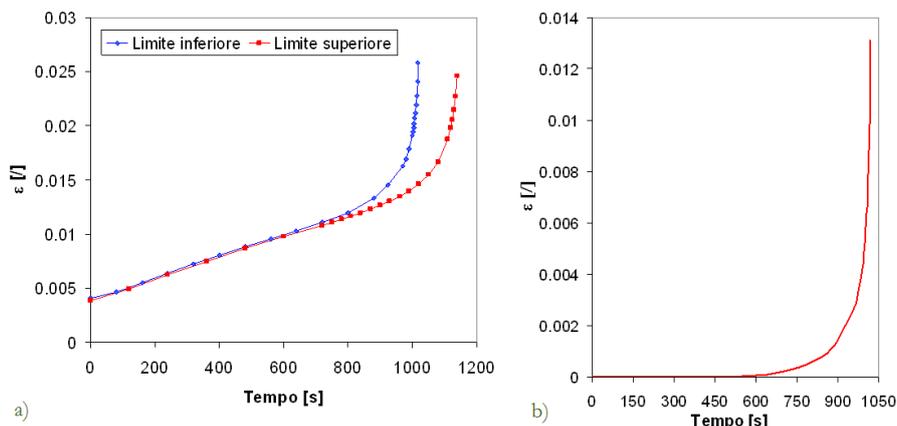


Figura 18: a) andamento della deformazione in funzione del tempo per il limite inferiore e superiore, b) andamento per il caso 'limite inferiore' della deformazione al netto della dilatazione termica.

### DETERMINAZIONE SPERIMENTALE DELLA RESISTENZA AL FUOCO DELLA FUNE CHIUSA

La macchina di trazione da 10 MN e il sistema di riscaldamento sono gli stessi utilizzati per le prove di trazione a freddo e per la determinazione della distribuzione delle temperature all'interno della fune. Il forno non riesce a riprodurre correttamente la curva ISO 834, per cui risulta necessario effettuare un preriscaldamento. Tale operazione implica l'impossibilità di inserire la fune prima che il forno raggiunga la temperatura prefissata. Per rispettare le prescrizioni normative si deve inoltre mettere in tiro la fune al carico nominale almeno 15 minuti prima di effettuare la prova, in modo che essa sia completamente stabilizzata. Questo problema è stato risolto adottando la soluzione schematizzata in Fig. 19. Si considera la prova conclusa quando le deformazioni risultano eccessive: allo scopo di evitare danni sul sistema di riscaldamento ci si basa sui risultati dell'analisi numerica, la quale consente di prevedere la rottura dei fili interni e un effetto schermo dei manti esterni, limitando in tal modo la pericolosità della rottura.

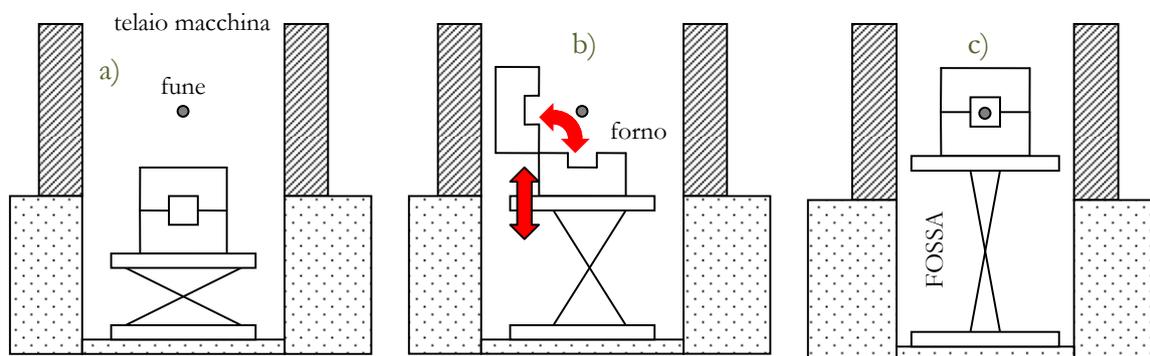


Figura 19: a) forno chiuso abbassato, preriscaldamento con fune in trazione, b) sollevamento e apertura del forno; c) chiusura del forno ed inizio prova.

Sono state condotte due prove su due spezzoni della stessa fune che hanno presentato curve di risposta praticamente sovrapposte con uno sfasamento temporale al collasso di meno di 30 secondi: la prima prova ha presentato cedimento



dopo circa 18 minuti e 30", la seconda dopo un intervallo di poco superiore ai 19 minuti. Dall'analisi numerica si è previsto un limite inferiore di 17 minuti ed uno superiore di 19. In Fig. 20 è riportato il confronto tra i risultati numerici e una delle due curve sperimentali. L'andamento è praticamente sovrapposto nel primo tratto, mentre si osserva uno scostamento dalla linearità leggermente anticipato e transizione più graduale nell'ultimo tratto della curva. Si può tuttavia affermare che esiste un buon accordo tra i risultati sperimentali e quelli numerici: il modello EF riesce a riprodurre in maniera corretta i fenomeni termo-meccanici che si sviluppano quando la fune, soggetta ad un carico di trazione, viene sottoposta ad un transitorio termico molto gravoso. Lo schema proposto può essere adottato allo studio di funi chiuse di diverso diametro e con limitate modifiche può essere esteso anche allo studio delle funi aperte.

In considerazione del fatto che come dimostrato nella simulazione numerica e verificato sperimentalmente, la prova a caldo può essere condotta in condizioni di sicurezza per le attrezzature, si è deciso di condurre un certo numero di prove sperimentali sulle funi chiuse e sulle funi aperte, necessarie per identificare i limiti di validità della procedura numerica implementata.

Pertanto di seguito verranno riportati i risultati di queste prove sperimentali che contribuiscono ad arricchire le informazioni disponibili e che fungeranno da base per la futura generalizzazione della procedura numerica in modo da produrre uno strumento di valutazione progettuale, che rappresenta l'obiettivo finale del lavoro.

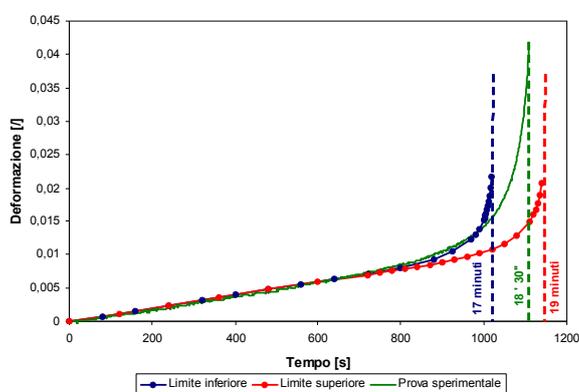


Figura 20: Andamento della deformazione della fune in funzione del tempo.

## CAMPAGNA SPERIMENTALE DI CARATTERIZZAZIONE DELLA FUNI CHIUSE E DELLE FUNI WARRINGTON SEALE

### *Risposta termo-strutturale delle funi chiuse*

**P**er quanto riguarda le funi chiuse, la campagna sperimentale è stata condotta su due ulteriori diametri di fune oltre a quello precedentemente descritto ed utilizzato per la definizione dell'approccio numerico sperimentale. In particolare sono state sottoposte alla simulazione d'incendio sotto carico le funi aventi diametro nominale rispettivamente: 80 mm e 26 mm, in tal modo viene coperto l'intervallo dei diametri più tipicamente utilizzati. Le prove sono state allestite con la stessa procedura descritta per la fune da 60 mm.

In Fig. 21 sono riportate le curve deformazione vs. tempo misurate per le tre tipologie di funi chiuse.

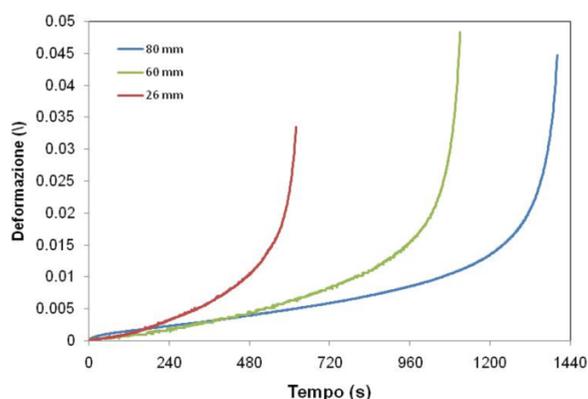


Figura 21: Curve di resistenza al fuoco per le tre funi chiuse.

Stimati i tempi di collasso si può ottenere il seguente diagramma, durata (s) vs. diametro nominale della fune (Fig. 22).

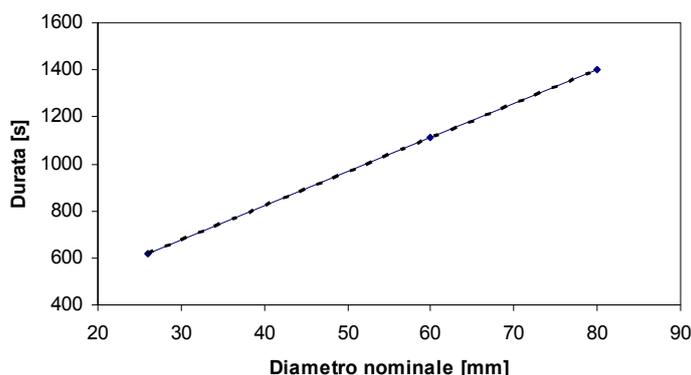


Figura 22: Durata delle funi in funzione del diametro nominale.

### Risposta termo-strutturale delle funi WS

Le funi a trefoli presentano un'anima polimerica che può avere un ruolo molto importante sulla risposta della fune in presenza d'incendio. Al fine di valutare le modalità di combustione del polimero costituente l'anima, sono state condotte alcune prove con la fune non caricata, che hanno evidenziato come il polimero tenda dapprima a rammollire fino a liquefazione, per poi incendiarsi, dando un notevole impulso energetico. Il controllo del forno è in grado tuttavia di mantenere entro limiti accettabili la corrispondenza con il profilo di temperatura previsto dalla ISO 834.

Le prove sono state condotte su quattro tipologie di funi, caratterizzate rispettivamente dai diametri: 14, 24, 35 e 52 mm. In Fig. 23 sono riportate le curve deformazione vs. tempo misurate.

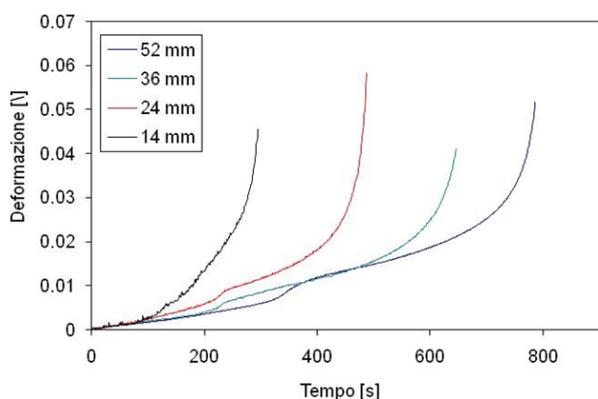


Figura 23: Curve di resistenza al fuoco per le quattro funi sottoposte a prova.

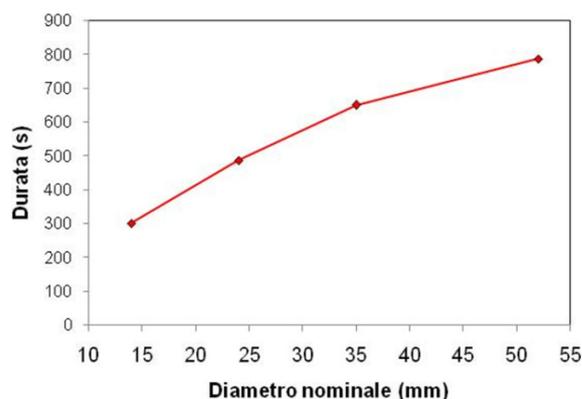


Figura 24: Durata delle funi in funzione del diametro nominale.

Si può osservare nella curva il momento corrispondente all'innescio dell'incendio dell'anima polimerica delle funi. Dopo un iniziale incremento di temperatura, il forno è in grado di riprendere la curva ISO 834 e la fune dimostra di avere ancora delle residue capacità di tenuta.

Stimati i tempi di collasso si può ottenere il seguente diagramma, durata (s) vs. diametro nominale della fune (Fig. 24).

## CONCLUSIONI

In questo lavoro sono stati presentati i risultati della ricerca volta a definire una procedura numerico sperimentale per lo studio della resistenza al fuoco di funi metalliche sia chiuse che a trefoli. I modelli numerici ad elementi finiti hanno dimostrato di poter riprodurre con notevole precisione la risposta meccanica delle due tipologie di funi e, limitatamente alla fune chiusa hanno anche consentito di simulare il transitorio termico rappresentativo di un incendio, consentendo di prevedere il collasso della fune e di definire le condizioni di prova in sicurezza. Le prove sperimentali successivamente condotte hanno permesso di costruire un data base di informazioni sulle quali verrà costruito lo



strumento progettuale di previsione della risposta termo meccanica delle funi, basato sulla simulazione ad elementi finiti delle stesse.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Oplatka, *ISR – International Seilbahn Rundschau*, 1 (2001) 8.
- [2] K. Feyrer, *Drahtseile Bemessung, Betrieb, Sicherheit*, Ed. Springer Verlag, (2000)
- [3] J. G. Wistreich, *Metall. Rev.*, 3 (1958) 97.
- [4] V. Fontanari, M. Benedetti, U. Bulf, *J. of materials processing technology*, 170 (2005) 97.
- [5] G. E. Dieter, *Mechanical metallurgy*, Mc Graw-Hill Book Company, (1988).
- [6] R. E. Reed-Hill, R. Abbaschian, *Physical Metallurgy Principles*, PWS Publishing Company, (1994).
- [7] C.R. Chaplin, *Engineering Failure Analysis*, 2 (1) (1995) 45.
- [8] A. Ray, S. K. Dhua, K. B. Mishra, S. Jha, *Practical Failure Analysis*, 3 (4) (2003) 51.
- [9] A. Amico, G. Bellomia, *Meccanica dell'incendio e valutazione del rischio*, Dario Flaccovio Editore (2002).
- [10] A. Amico, G. Bellomia: "Carico di incendio e resistenza al fuoco delle strutture", Dario Flaccovio Editore (2002).
- [11] S. Pustorino: "Sicurezza Incendio" ETS (2007).
- [12] G. A. Costello, *Theory of Wire Rope*, New York: Ed. Springer Verlag (1990).
- [13] M. Raoof, *Struct. Engineering Rev.*, 4 (1992) 223.
- [14] F. H. Hruska, *Wire and wire products*, 27 (1952) 459.
- [15] J. Lanteigne, *Journal of Applied Mechanics*, 52 (1985) 423.
- [16] D. Elata, R. Eshkenazy, M.P. Weiss, *Int. J. of Solids and Structures*, 41 (2004) 1157.
- [17] S. A. Velinsky, G. L. Anderson, G. A. Costello, *J. of Engng. & Mech. Div. ASCE*, 110 (1984) 380.
- [18] J. W. Phillips, G. A. Costello, *Transaction ASME*, 52 (1985) 510.
- [19] R. C. Wang, W. M. McKewan, *O.I.P.E.E.C. Bulletin*, 81(2001) 15.
- [20] G. A. Costello, R. E. Miller, *J. Engng. & Mech. Div. ASCE*, 105 (4) (1979) 597.
- [21] C. Jolicoeur, A. Cardou, *J. of Energy Res. Tech.*, 113 (1991) 241.
- [22] M. Raoof, I. Kraincanic, *Computers & structures*, 69 (1998) 305.
- [23] W. G. Jiang, J. L. Henshall, J. M. Walton, *Int. J. of Mech. Science*, 42 (2000) 63.
- [24] K.H. Wehking, S. Ziegler, *Draht*, 5 (2003) 32.
- [25] M. Giglio, A. Manes, *Engineering Failure Analysis*, 12 (2005) 549.
- [26] ASM, *ASM Handbook, ASM Metals Park OHIO*, 1 (1998).
- [27] P.L. Dowling, J.E. Harding, R. Bjorhovde. *Constructional steel design – an international guide*, Elsevier applied science, (1992).
- [28] V. Fontanari, B. D. Monelli, F. Degasperi, In: *2009 SEM Annual Conference & Exposition on Experimental and Applied Mechanics*, Albuquerque, New Mexico, (2009).