

Analisi numeriche e sperimentali per la determinazione della capacità portante di puntelli metallici in accordo alla norma UNI-EN 1065

INTRODUZIONE

La sicurezza sul lavoro nei cantieri è stato oggetto di molteplici attività negli ultimi anni. Sono state infatti introdotte nuove norme; sono stati responsabilizzati e coinvolti i professionisti del settore; si sono sviluppate nuove tecnologie ed impianti di cantiere che tutelino maggiormente gli operatori. Nonostante tutto questo, nell'Unione Europea il settore edile è tuttora quello a maggior rischio di infortuni con più di 1300 morti all'anno a causa di incidenti nei cantieri [2]. Uno dei problemi di maggiore attualità per quanto concerne la sicurezza nei cantieri è la realizzazione ed il corretto utilizzo delle opere provvisorie. L'esecuzione di queste opere rappresenta spesso un'operazione critica per l'incolumità degli operatori ed un loro utilizzo non appropriato può risultare pericoloso per tutti coloro che operano nell'ambito del cantiere.

I sistemi di puntellazione rientrano ovviamente nella categoria delle opere provvisorie e come tali vanno pensati e progettati, sia per quanto riguarda i requisiti strutturali che di sicurezza. Spesso invece la progettazione di questi sistemi è grossolana, se non del tutto assente, e la realizzazione dell'opera provvisoria risulta a volte approssimativa (vedi Fig. 1). Le cause dei crolli sono attribuibili a diver-

La norma europea EN1065 [1], recentemente recepita e pubblicata dall'UNI nella versione italiana necessita solo di notifica di adozione per esserle attribuito lo status di norma nazionale. In essa vengono fornite le linee guida per la progettazione e la costruzione di puntelli telescopici in acciaio e fissati i requisiti per la classificazione dei puntelli in base alle loro caratteristiche geometriche ed alla loro portata. Nel presente lavoro vengono presentati e commentati i principi della norma UNI-EN 1065, soffermandosi maggiormente sulle tecniche di esecuzione delle prove sperimentali e delle analisi numeriche suggerite per la determinazione della resistenza caratteristica del puntello. Vengono inoltre presentati e discussi, come esempio di applicazione della norma stessa, i risultati relativi ad una serie di puntelli analizzati e sperimentati dagli autori presso il Laboratorio Prove Materiali del Politecnico di Milano.

Numerical and experimental analyses for the determination of the load-bearing capacity of metal struts in accordance with the UNI-EN 1065 standard

The European EN 1065 standard [1], recently incorporated and published by UNI in its Italian version, requires only notification of its adoption before being given the status of a national standard. It supplies the guidelines for the design and construction of telescopic steel struts and lays down the requirements for the classification of the struts on the basis of their geometric characteristics and load-bearing capacity. This paper presents and comments on the principles of the UNI-EN 1065 standard, with particular reference to the techniques used to carry out the experimental tests and numerical analyses recommended for the determination of the characteristic resistance of the strut. As an example of the application of the standard, the paper also presents and discusses the results obtained from a series of struts analysed and experimented on by the authors in the Materials Test Laboratories of the Polytechnic of Milan.

si fattori quali l'utilizzo di sistemi di fortuna privi dei necessari requisiti di resistenza, il posizionamento errato, i collegamenti errati, l'irregolarità dei piani di posa, la mancanza di elementi di fissaggio di sicurezza, la mancanza di elementi di controvento ed il posizionamento dei puntelli a distanze eccessive. E' inoltre importante ricordare che nella fabbricazione dei puntelli vengono spesso utilizzati materiali di scarsa o non provata qualità per contenere il prezzo del prodotto e che non esistono indicazioni riguardo la loro reale portata e la vita utile in relazione alle condizioni di utilizzo. I puntelli fino ad oggi in commercio non sono classificati ed è quindi impossibile identificare in modo univoco le loro caratteristiche. Si trovano spesso puntelli nominalmente simili, ma le cui caratteristiche di portata si rivelano notevolmente diverse. Si comprende quindi l'importanza di introdurre una norma che preveda sia la certificazione che la classificazione di questi prodotti. La Norma EN1065 risponde a questa esigenza, classificando i

Fig. 1: realizzazione molto approssimativa, ma non rara, di un sistema di puntellazione.



puntelli in relazione alla loro portata e ponendo precise prescrizioni geometriche e meccaniche alle varie parti che compongono l'elemento. Nel presente lavoro verranno analizzate in modo particolare le indicazioni fornite riguardo la determinazione della capacità portante dei puntelli da considerarsi ai fini della loro classificazione. Vengono inoltre messi a confronto i risultati ottenuti da una serie di prove sperimentali con quelli ottenuti tramite un'analisi numerica, entrambe svolte secondo quanto prescritto dalla normativa europea.

LA NORMA UNI-EN 1065

La norma UNI-EN 1065 è stata recentemente recepita e tradotta dall'UNI [1] e necessita solo di notifica di adozione per esserle attribuito lo status di norma nazionale. Essa introduce una serie di prescrizioni atte a certificare la qualità dei puntelli telescopici regolabili in acciaio con filettatura coperta o scoperta, destinati all'uso in cantiere. A tale scopo vengono specificati materiali, requisiti di progetto, alternative di protezione contro la corrosione e metodi di verifica usando sia calcoli che prove sperimentali. Vengono inoltre definite cinque classi di resistenza caratteristica, ciascuna comprendente una serie di sottoclassi sulla base della massima estensione del puntello.

E' opportuno sottolineare che i valori delle resistenze caratteristiche determinabili dalla norma in oggetto non possono essere applicati direttamente per l'uso in cantiere ma devono essere opportunamente corretti mediante specifici fattori parziali di sicurezza γ_F e γ_M . La norma non fornisce informazioni riguardo all'installazione e all'uso dei puntelli.

Nel seguito verranno descritti brevemente i contenuti della norma, soffermandosi in particolare sulle prescrizioni per la determinazione sperimentale e numerica della resistenza caratteristica dei puntelli.

Classificazione dei puntelli

La normativa fissa i criteri per la classificazione dei puntelli in diverse classi in base alla categoria del puntello (A,B,C,D,E) ed alla massima lunghezza di estensione (vedi Tab. 1). Si individuano, ad esempio, le classi A40 e C40 per due puntelli con massima estensione pari a 4.00 metri ma appartenenti a diversa categoria e quindi con diversa capacità portante.

La portata nominale caratteristica del puntello ($R_{y,k}$ con $y = A, \dots, E$) è definita per ogni classe in funzione della lunghezza del puntello. Essa è determinabile dalle seguenti espressioni:

$$R_{A,k} = 51,0 \frac{l_{max}}{l^2} \leq 44,0 kN \tag{1a}$$

$$R_{B,k} = 68,0 \frac{l_{max}}{l^2} \leq 51,0 kN \tag{1b}$$

$$R_{C,k} = 102,0 \frac{l_{max}}{l^2} \leq 59,5 kN \tag{1c}$$

$$R_{D,k} = 34,0 kN \tag{1d}$$

$$R_{E,k} = 51,0 kN \tag{1e}$$

Dove:

$R_{y,k}$ è la resistenza caratteristica nominale espressa in kN per il puntello di categoria y ;

l_{max} è la massima lunghezza in metri relativa alla estensione del puntello;

l è la lunghezza di estensione reale anch'essa espressa in metri.

I valori della resistenza caratteristica nominale corrispondente alla massima estensione sono riportati, per ogni classe, nella Tab. 1. Le resistenze caratteristiche nominali delle varie classi sono anche diagrammate in Fig. 2 in funzione della lunghezza di estensione. Nella stessa figura sono anche evidenziate le capacità minime di portata relative alla massima estensione che coincidono con i valori indicati in Tab. 1

Classe	Lunghezza alla massima estensione L_{max} [m]	Resistenza caratteristica nominale $R_{y,k}$ [kN]
A25	2.50	20.4
A30	3.00	17.0
A35	3.50	14.6
A40	4.00	12.8
B25	2.50	27.2
B30	3.00	22.7
B35	3.50	19.4
B40	4.00	17.0
B45	4.50	15.1
B50	5.00	13.6
B55	5.50	12.4
C25	2.50	40.8
C30	3.00	34.0
C35	3.50	29.2
C40	4.00	25.5
C45	4.50	22.7
C50	5.00	20.4
C55	5.50	18.6
D25	2.50	34.0
D30	3.00	34.0
D35	3.50	34.0
D40	4.00	34.0
D45	4.50	34.0
D50	5.00	34.0
D55	5.50	34.0
E25	2.50	51.0
E30	3.00	51.0
E35	3.50	51.0
E40	4.00	51.0
E45	4.50	51.0
E50	5.00	51.0
E55	5.50	51.0

Tab. 1: resistenza caratteristica nominale per le varie classi di puntelli e loro relativa lunghezza massima.

Le espressioni riportate nelle equazioni (1a-e) indicano che per i puntelli appartenenti alle categorie A, B e C, la capacità portante nominale può essere aumentata per configurazioni aventi lunghezza inferiore a quella di massima estensione. Le classi D ed E, che si riferiscono a puntelli che presentano la portata più elevata, non beneficiano di un aumento della capacità portante per lunghezze inferiori alla massima. E' opportuno sottolineare che la portata massima è

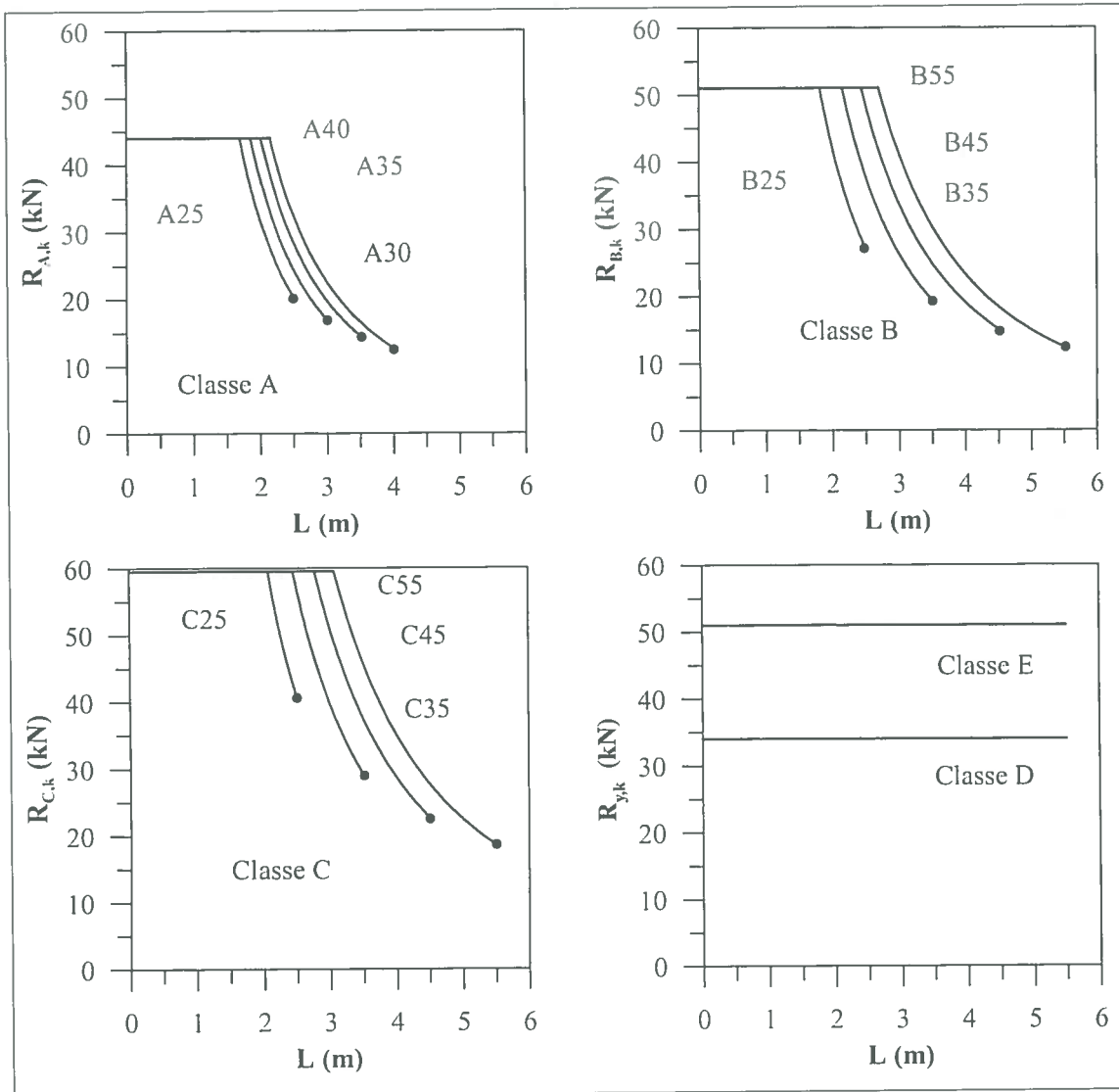


Fig. 2: resistenza caratteristica nominale delle varie sottoclassi dei puntelli in funzione della loro estensione. (I punti indicano la minima capacità portante per ogni classe in corrispondenza della lunghezza massima come deducibile anche dalla Tab. I.

limitata superiormente per le classi A, B e C dai valori 44.0 kN, 51 kN e 59.5 kN rispettivamente. Nella Fig. 3 è riportato, a titolo di esempio, il confronto tra le variazioni delle resistenze caratteristiche nominali di un puntello, avente lunghezza massima di 4.0 metri, in funzione delle varie categorie di appartenenza. Si nota che in corrispondenza della lunghezza massima la capacità portante più elevata è della classe E40, mentre è minima per la classe A40. I puntelli della serie A, B e C possono beneficiare, come visto precedentemente, di un incremento della portata nominale per lunghezze inferiori, ma rispettando la limitazione superiore imposta dalla normativa.

Identificazione dei puntelli

I puntelli conformi alla norma UNI-EN 1065 devono riportare in una marchiatura impressa sul puntello, o su una targhetta ad esso fissata, un codice di identificazione in cui siano indicati, mediante opportuni simboli, le seguenti caratteristiche: la classe del puntello, la sagomatura delle basette, il tipo di dispositivo di regolazione della lunghezza, il metodo di protezione contro la corrosione, l'adattabilità a collegare giunti conformi alla norma EN74 con tubi di acciaio conformi alla prEN39 ed il tipo di livello di ispezione eseguita durante la fabbricazione. E' evidente che tutte le suddette informazioni rapor-

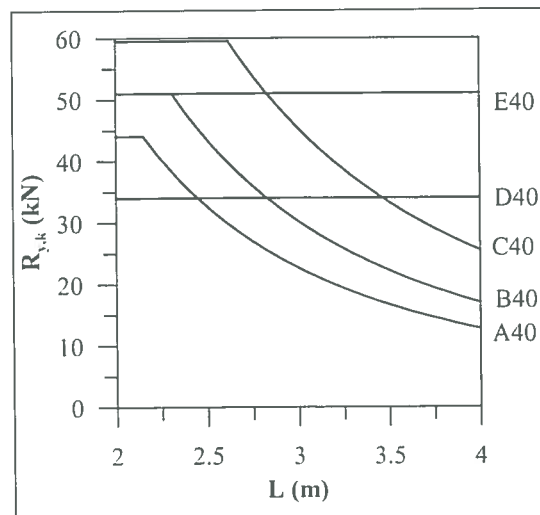


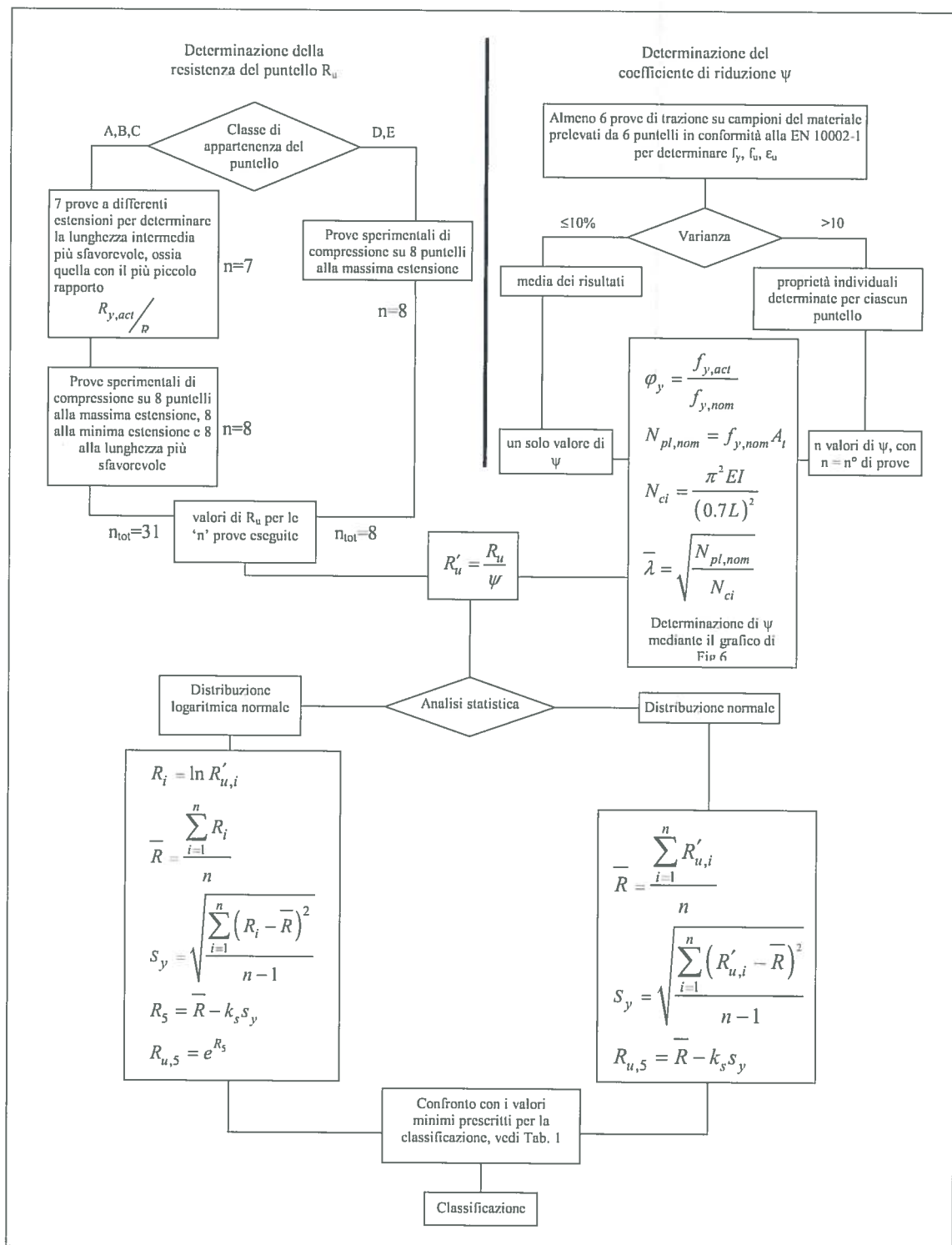
Fig. 3: confronto fra la resistenza delle varie classi di un puntello con $L_{max} = 4.00$ m.

tate sul puntello contribuiscono a facilitare la definizione della portata, ad assicurare l'affidabilità del prodotto e la sua rintracciabilità incrementando quindi la sicurezza sul lavoro.

I materiali

I materiali da utilizzare per la costruzione dei puntelli devono avere una buona resistenza alla corrosione, essere opportunamente protetti verso le con-

Fig. 4: procedura per la classificazione di un puntello sulla base di prove sperimentali.



dizioni atmosferiche ed essere privi di impurità o difetti. I materiali utilizzabili devono essere conformi alle norme europee vigenti. Se i tubi sono prodotti mediante lavorazione a freddo, gli acciai utilizzati devono presentare valori di snervamento minimi di 315 o 395 MPa ed un allungamento a rottura minimo del 18%. Ulteriori dettagli relativi alla corrosione sono riportati nel testo della norma.

Configurazione dei puntelli

La norma EN1065 impone che i tubi utilizzati per la costruzione dei puntelli debbano essere conformi alle norme di riferimento europee esistenti. Per i puntelli di classe B, C, D ed E lo spessore nomina-

le minimo dei tubi deve essere uguale o superiore a 2.6 mm mentre per i puntelli di classe A tale valore è di 2.3 mm.

La norma riporta anche importanti prescrizioni relative alle saldature, ai dispositivi di regolazione ed alle basette. Vengono anche specificate alcune prescrizioni relative all'anticorrosione ed antisgangnamento del tubo interno sempre allo scopo di preservare l'incolumità degli operatori.

La resistenza del puntello e delle sue parti

La norma EN1065 prevede che siano verificate sia la resistenza caratteristica globale del puntello che la resistenza dei dispositivi di regolazione quali la resistenza a taglio delle spine e dei supporti. Nel

seguito verrà esaminato il problema della sola resistenza del puntello.

La resistenza caratteristica reale di un puntello, $R_{y,act}$, può essere verificata, a discrezione del produttore, o mediante calcolo o mediante prove sperimentali. Non è specificatamente esclusa la possibilità di fare riferimento ad entrambe le metodologie come suggerito dagli autori del presente lavoro. Per puntelli appartenenti alle classi A, B e C, la verifica della resistenza deve essere fatta per tre estensioni: la massima, la minima e per la più sfavorevole configurazione intermedia. Tali valori dovranno risultare ovviamente superiori ai valori nominali caratteristici della classe corrispondente ($R_{y,k}$) rilevabili dalle eqs. 1a,e e dai grafici di Fig. 2. Si considera come configurazione più sfavorevole quella per cui il rapporto $R_{y,act}/R_{y,k}$ risulta minimo. La resistenza caratteristica reale di un puntello deve essere almeno uguale alla resistenza nominale della classe corrispondente per tutte le lunghezze di estensione possibili.

Determinazione della resistenza caratteristica del puntello mediante prove sperimentali e relativa classificazione

La procedura di classificazione del puntello in termini di resistenza caratteristica è stata riportata in forma schematica nel diagramma a blocchi di Fig. 4.

Si nota come siano necessarie due attività sperimentali parallele. La prima per la determinazione della resistenza a compressione del puntello (colonna sinistra dello schema di Fig. 4), la seconda per la verifica delle caratteristiche meccaniche del materiale (colonna destra di Fig. 4). In una fase successiva è possibile ridurre i risultati ottenuti mediante opportuni coefficienti e ricavare la resistenza caratteristica reale su basi statistiche. Il successivo confronto con i valori nominali delle varie classi di puntelli ne permetterà la classificazione.

Le prove di compressione sui puntelli. Le prove sperimentali sui puntelli devono essere eseguite ponendo i puntelli in una macchina di prova a compressione per la lunghezza di estensione richiesta e posizionando alla base del puntello stesso un supporto piano in acciaio o di calcestruzzo che permetta la formazione di un angolo di un grado tra la bassetta del puntello ed il supporto stesso.

All'estremità opposta del puntello è necessario posizionare un giunto a sfera con un'eccentricità pari a 10mm (e) che deve trovarsi dallo stesso lato della linea di contatto della base del puntello come indicato nello schema di Fig. 5. E' opportuno notare che la base del puntello si deve assumere già inclinata di un angolo ϕ_{b1} dovuto al gioco tra il tubo interno ed il tubo esterno che compongono il puntello, quindi la pendenza della bassetta di appoggio risulta pari a $\phi_{b1} + 1^\circ$.

La resistenza del puntello può essere determinata mediante una serie di prove a compressione su campioni reali ed una successiva rielaborazione statistica dei risultati ottenuti. Il valore caratteristico dei risultati è calcolato come frattile 5% con livello di confidenza 75% assumendo, in alternativa, o una distribuzione statistica logaritmica, o una normale. Il numero di prove da eseguire è differente per le varie classi. Per le classi D ed E è suffi-

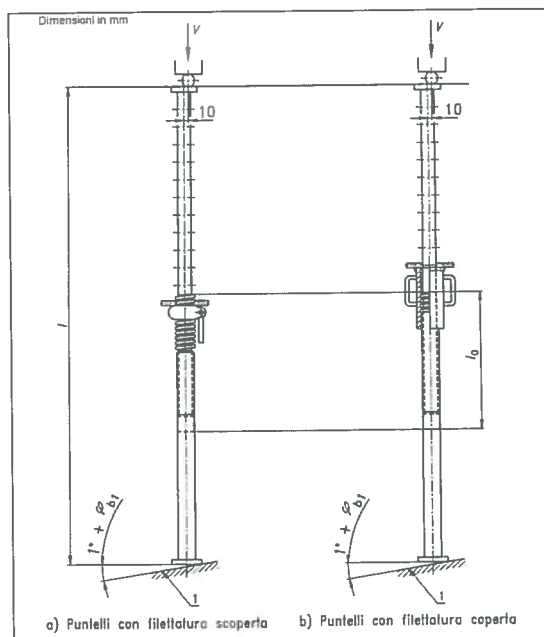


Fig. 5: descrizione dell'apparato di prova per le prove sperimentali. Figura tratta da [1].

ciente effettuare 8 prove a compressione su altrettanti puntelli, scelti a caso da un lotto di almeno 500 prodotti analoghi e predisposti alla massima estensione. Per le classi A, B e C è necessario invece effettuare anche 8 prove per la configurazione completamente chiusa ed 8 prove con il puntello regolato per una lunghezza intermedia considerata come la più sfavorevole. Tale lunghezza deve essere individuata mediante 7 prove preliminari da effettuarsi a diverse lunghezze. Per ogni prova si determina un valore R_u della resistenza a compressione che deve essere successivamente ridotto secondo la procedura schematizzata in Fig. 4.

Verifica delle caratteristiche dei materiali. Le caratteristiche meccaniche dei tubi utilizzati per la costruzione dei puntelli devono essere determinate in conformità alle prove EN10002-1 per valutare la tensione di snervamento f_y , la tensione di rottura f_u ed il relativo allungamento ϵ_u . Le prove devono essere effettuate su almeno 6 spezzoni di materiale prelevati da altrettanti puntelli. Si fa notare che i valori ottenuti sperimentalmente possono essere significativamente diversi per campioni prelevati dal tubo interno ed esterno in quanto i due tubi, che presentano diametri e spessori diversi, provengono sicuramente da prodotti piani ottenuti da diverse laminazioni. La norma non specifica da quale elemento del puntello devono essere prelevati i campioni.

Se la varianza dei risultati ottenuti è inferiore al 10% si assume come valore reale per il calcolo la media dei risultati della tensione di snervamento. In caso contrario la procedura per la determinazione del coefficiente di riduzione ψ , definito nel successivo paragrafo, dovrà essere ripetuta per ogni singolo puntello

Riduzione dei risultati ottenuti e determinazione della classe del puntello. Le resistenze ultime a compressione ottenute dalle prove sperimentali devono essere opportunamente ridotte e rielaborate statisticamente al fine di ottenere la resistenza caratteristica del puntello. La procedura, riportata

schematicamente in Fig. 4, si basa sulla definizione di un coefficiente di riduzione ψ da applicarsi ai risultati sperimentali ottenuti. Tale coefficiente dipende dalla snellezza adimensionale del puntello $\bar{\lambda}$ così definita:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,nom}}{N_{c,i}}} \quad (2)$$

e dal rapporto tra la tensione di snervamento reale dei materiali utilizzati per la fabbricazione dei tubi con quella nominale

$$\varphi_y = f_{y,act} / f_{y,nom} \quad (3)$$

Il fattore ψ è determinabile dai grafici di Fig. 6. Per la valutazione della snellezza occorre calcolare la resistenza ultima a compressione della sezione trasversale ($N_{pl,nom}$) e il carico di collasso per insta-

bilità ($N_{c,i}$). Il primo valore si ottiene semplicemente come prodotto fra la tensione di snervamento nominale dei tubi e l'area della sezione trasversale. Essendo questa diversa per i tubi interno ed esterno, si fa riferimento alla resistenza minore che, nel caso più comune di uguale snervamento nominale dei due tubi, coincide con la resistenza a compressione del tubo con sezione trasversale minore.

Il carico di collasso $N_{c,i}$ corrisponde con il carico critico di un'asta incastrata alla base e incernierata all'altra estremità. La sua espressione è riportata nell'eq.(4) dove I_{int} rappresenta il momento d'inerzia del tubo interno ed L l'estensione del puntello.

$$N_{c,i} = \frac{\pi^2 EI_{int}}{(0.7L)^2} \quad (4)$$

Una volta determinato il coefficiente di riduzione mediante le curve di Fig. 6, è possibile ridurre le resistenze ottenute dalle prove di compressione mediante l'espressione

$$R'_u = \frac{R_u}{\psi} \quad (5)$$

Si può notare dalla Fig. 6 come il coefficiente di riduzione ψ sia maggiore per i puntelli meno snelli e per quelli il cui materiale ha evidenziato una resistenza caratteristica reale sensibilmente superiore a quella nominale. (valori maggiori di φ_y). Ciò ovviamente per cautelarsi nei confronti di caratteristiche del materiale non regolari.

E' a questo punto possibile determinare la resistenza caratteristica del puntello $R_{u,5}$ mediante la procedura schematizzata nella parte inferiore di Fig. 4. La norma EN1065 permette di scegliere alternativamente o la distribuzione logaritmica o quella normale.

Fig. 6: curve per la determinazione del fattore ψ in funzione della snellezza $\bar{\lambda}$ e del parametro φ_y .

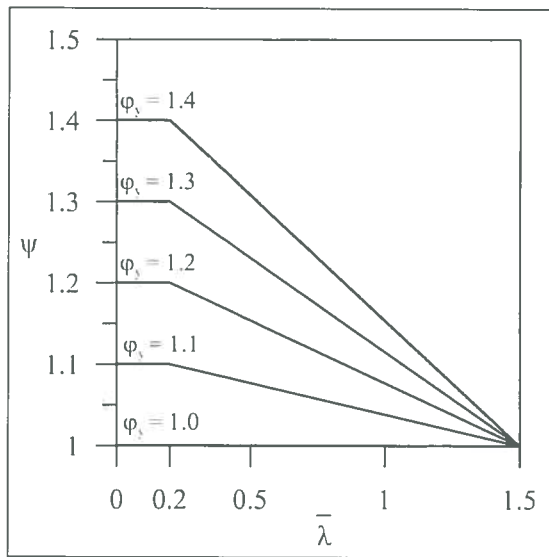
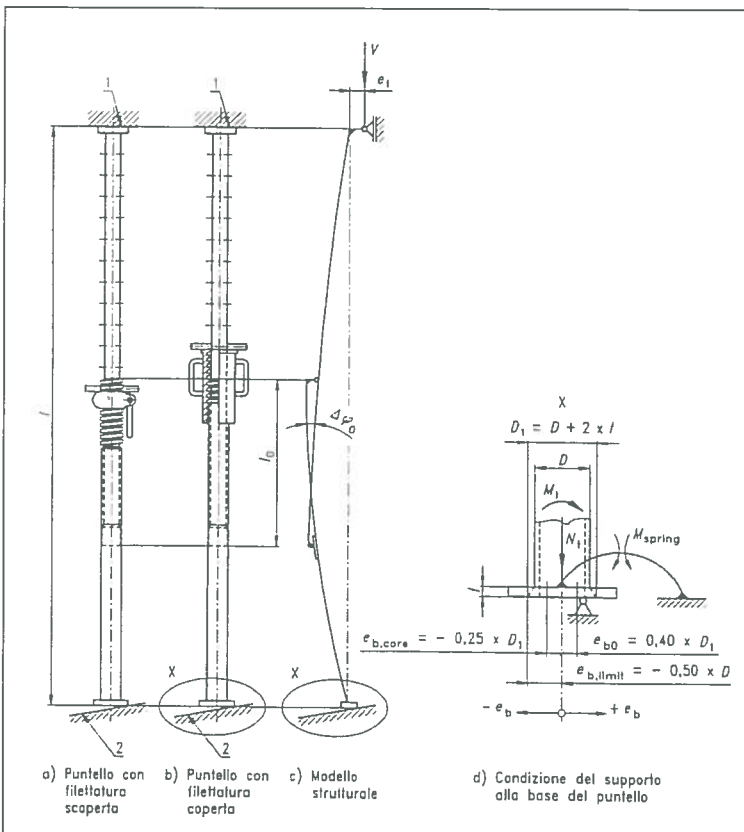


Fig. 7: schema statico per il calcolo della resistenza del puntello. Figura tratta da [1].



Determinazione della resistenza caratteristica del puntello mediante analisi numerica e relativa classificazione

In alternativa all'approccio sperimentale, la determinazione della resistenza caratteristica dei puntelli può essere definita mediante un approccio numerico. La norma fornisce le caratteristiche principali del modello numerico che deve includere gli effetti del secondo ordine in quanto il puntello, oltre ad essere compresso, presenta delle imperfezioni iniziali non trascurabili. Le azioni interne e le reazioni vincolari devono essere determinate adottando un legame costitutivo del materiale indefinitamente elastico lineare.

Schema statico ed imperfezioni. Lo schema statico da utilizzare (vedi Fig. 7) prevede la presenza di un'eccentricità di carico di 10 mm, uguale a quella introdotta nelle prove sperimentali ed un'imperfezione iniziale di forma sinusoidale avente ampiezza massima pari ad 1/500 della lunghezza estesa considerata. Deve essere anche considerato il gioco fra i tubi il quale è responsabile della configurazione iniziale non rettilinea. Nella definizione dello schema statico occorre anche tener conto del particolare vincolo fra i tubi interno ed esterno. Questo è schematizzabile utilizzando un carrello all'estremità inferiore della zona di sovrapposizione ed una cerniera in prossimità del dispositivo di regolazione della

lunghezza. Il comportamento della base di appoggio è descritto mediante l'utilizzo di una molla rotazionale con comportamento non lineare.

La base di appoggio. La modellazione del comportamento della base d'appoggio risulta essere l'aspetto più complesso dell'approccio analitico. Il modello prevede una molla torsionale non lineare alla base le cui caratteristiche di rigidità variano in funzione del carico applicato in modo da descrivere il comportamento che la basetta ha a contatto con il terreno (vedi Fig. 8). In particolare l'estremo inferiore del puntello è vincolato con un'eccentricità di $0.4 \cdot D_1$, essendo D_1 l'effettivo diametro alla base, mentre la molla presenta una rigidità iniziale nulla (ovvero si comporta come una cerniera) fino a quando la rotazione alla base raggiunge il valore di 1° .

In seguito la molla deve essere considerata con rigidità infinita (e quindi il vincolo diventa assimilabile ad un incastro) fino a che l'eccentricità di carico e_b raggiunge il valore $e_{b,core} = -0.25 \cdot D_1$. Per valori più alti dell'eccentricità, calcolata come $e_b = M_1/N_1$, si assume una rigidità della molla $C_t = 3 \cdot 10^7$ Nmm/rad. La capacità portante del puntello si considera esaurita al raggiungimento di un'eccentricità e_b pari a $e_{b,lim} = -0.5 \cdot D_1$.

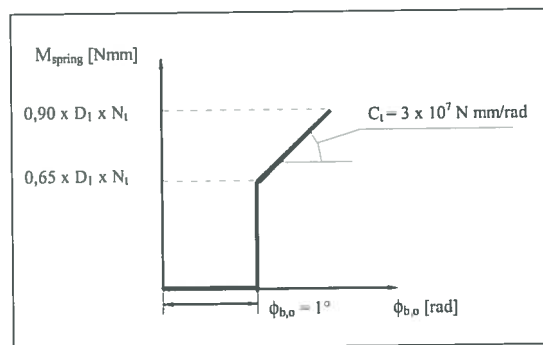


Fig. 8: comportamento della molla di base in funzione del carico applicato.

Le caratteristiche geometriche dei puntelli

Sono stati esaminati 12 puntelli della stessa tipologia, ma con due differenti estensioni massime. I puntelli presentavano una geometria tradizionale ovvero erano costituiti da due tubi coassiali e dotati di basette terminali di dimensioni 12x12 cm. Il sistema di regolazione della lunghezza era composto da un perno che, introdotto in appositi fori praticati sul tubo interno, permette la regolazione di massima e da una ghiera filettata, applicata al tubo esterno, da usarsi per la regolazione fine. Di tutti i puntelli a disposizione, sei erano caratterizzati da una lunghezza di massima estensione di 3.00 m, mentre i rimanenti potevano raggiungere una lunghezza di 3.60 m. I valori medi delle dimensioni dei tubi, rilevati prima di eseguire i test di compressione, sono riportati in Tab. 2 dove con Cx (x = 1,...6) sono indicati i puntelli corti (3.00 m) e con Lx i puntelli lunghi (3.60 m).

Le proprietà dei materiali dei puntelli esaminati

Le caratteristiche meccaniche del materiale dei tubi sono state determinate mediante l'esecuzione di 12 prove sperimentali di trazione su altrettanti provini estratti da 6 puntelli (6 provini estratti dai tubi interni e 6 dai tubi esterni). Le resistenze di snervamento e rottura, i cui valori medi ed i relativi scarti sono riportati in Tab. 3, sono risultati sensibilmente differenti tra i tubi interni ed esterni. Questo aspetto non è particolarmente sorprendente e può essere imputato al differente materiale da cui sono stati prodotti i tubi.

	f_y (MPa)	s_y (MPa)	f_u (MPa)	s_u (MPa)
Tubo interno	342.7	2.08	380.3	2.08
Tubo esterno	300.6	7.50	331.0	3.60

Tab. 3: caratteristiche meccaniche medie dei tubi dei puntelli e loro scarto quadratico medio

Si può notare che il dato relativo allo snervamento del materiale del tubo esterno non rispetta la limitazione inferiore di 315 MPa richiesta dalla norma per tubi prodotti mediante lavorazione a freddo. Per la riduzione e rielaborazione statistica dei dati

UN ESEMPIO DI APPLICAZIONE DELLA NORMA

Come precedentemente visto, la norma EN1065 permette l'utilizzo sia dell'approccio sperimentale che numerico per la definizione della capacità portante del puntello. L'utilizzo del solo approccio numerico può generare risultati non affidabili se non validati da riscontri sperimentali. In particolare non sono in questo caso note le imperfezioni geometriche che caratterizzano la qualità dei puntelli e che chiaramente influiscono sulla loro capacità portante. Viceversa la sola campagna sperimentale richiede un numero obiettivamente molto elevato di prove con costi non trascurabili. In particolare si ritiene che il numero di prove suggerite per la definizione della lunghezza intermedia più sfavorevole sia eccessivo e poco significativo. Gli autori hanno preferito una soluzione mista basata sull'integrazione ed il confronto di prove sperimentali con risultati numerici in quanto la norma non esclude esplicitamente questa possibilità.

Presso il Laboratorio Prove Materiali del Politecnico di Milano sono state predisposte le attrezzature per le prove meccaniche ed è stato implementato un codice di calcolo idoneo ad elaborare i modelli proposti dalla norma. Per verificare l'applicabilità della procedura proposta, è stata presa in considerazione una serie di puntelli reperibili sul mercato ed è stata effettuata la loro classificazione.

Puntelli	Tubo interno					Tubo esterno				
	ϕ int. (mm)	ϕ est. (mm)	L (mm)	Area (mm ²)	I_x (mm ⁴)	ϕ int. (mm)	ϕ est. (mm)	L (mm)	Area (mm ²)	I_x (mm ⁴)
CI÷C6	41.1	48.3	1750	505	127085	52.5	57.0	1500	387	145254
LI÷L6	41.1	48.3	2000	505	127085	52.5	57.0	1800	387	145254

Tab. 2: valori medi delle caratteristiche geometriche dei puntelli testati

Fig. 9: configurazione iniziale della prova.

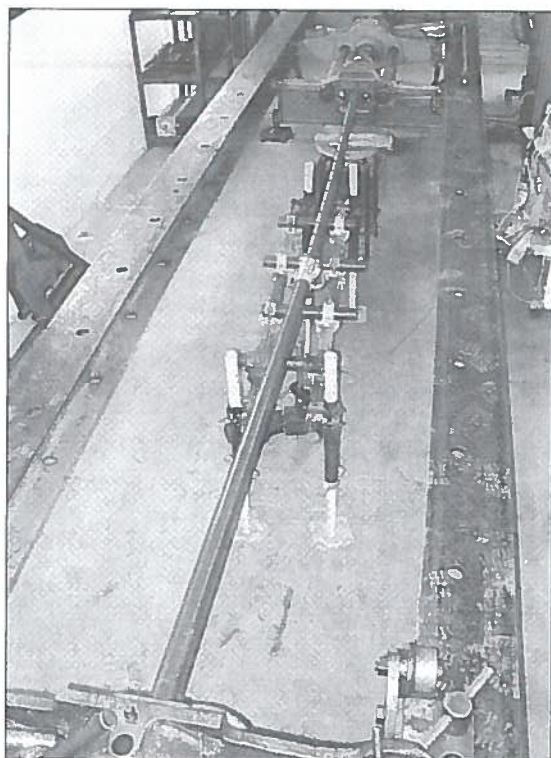


Fig. 10: dispositivo per l'applicazione del carico eccentrico.

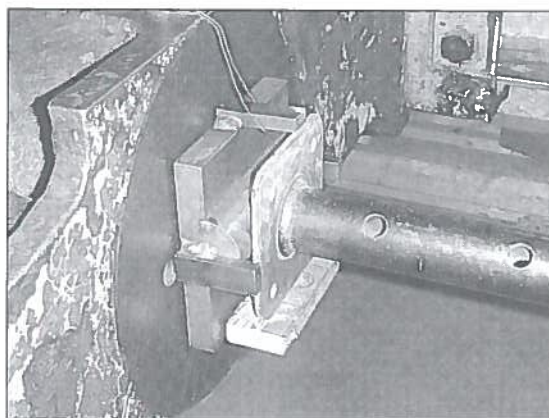
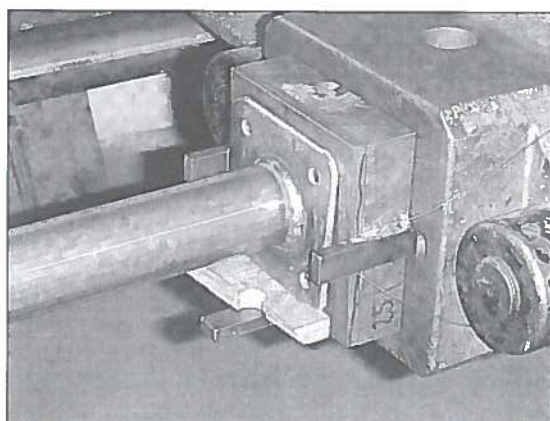


Fig. 11: supporto inclinato di base.



sperimentali ottenuti sui puntelli è stato adottato un solo valore della tensione di snervamento, ovvero il valore inferiore riferito al tubo esterno, $f_{y,acq} = 300$ MPa, mentre il valore nominale del materiale era $f_{y,nom} = 275$ MPa.

Risultati delle prove sperimentali di compressione e rielaborazione statistica

Le prove di compressione sono state eseguite secondo quanto indicato dalla norma ovvero misu-

rando lo spostamento laterale in mezzeria ed applicando il carico di compressione ad una velocità tale da non superare un incremento pari al 20% del carico massimo per ogni minuto. Per l'esecuzione delle prove è stata utilizzata una macchina di prova orizzontale con capacità massima di 300 kN (Fig. 9) alla quale sono stati applicati due opportuni dispositivi in grado di creare l'eccentricità di carico e la pendenza all'appoggio come richiesto dalla norma (Fig. 10 e Fig. 11).

Le resistenze ottenute a compressione sono riportate in Tab. 4 mentre un tipico andamento carico-spostamento relativo ad un puntello corto ($L_{max} = 3.00$ m), è riportato in Fig. 12.

PROVA	R_u [kN]	R_u' [kN]
C1	35.3	34.9
C2	35.2	34.8
C3	25.9	25.6
C4	28.4	28.1
C5	26.3	26.0
C6	30.4	30.1
	$\bar{R}_u = 30.2$	$\bar{R}_u = 29.9$
	$s_R = 4.2$	$s_R = 4.17$
L1	18.8	18.8
L2	20.5	20.5
L3	19.7	19.7
L4	18.6	18.6
L5	19.6	19.6
L6	17.2	17.2
	$\bar{R}_u = 19.1$	$\bar{R}_u = 19.1$
	$s_R = 1.14$	$s_R = 1.14$

Tab. 4: valori ottenuti dalle prove sperimentali.

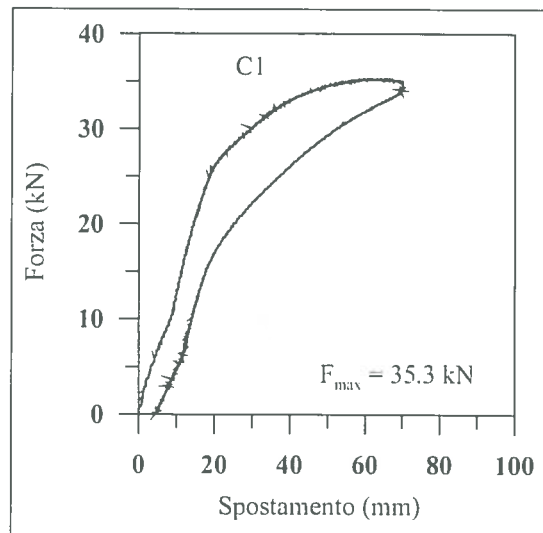


Fig. 12: andamento della curva carico assiale-spostamento trasversale registrato durante la prova sperimentale del puntello C1.

Durante le prove si è riscontrato uno spostamento trasversale considerevole in corrispondenza della mezzeria dei puntelli dovuto agli effetti indotti dalla eccentricità di carico ed alla inclinazione della basetta di estremità. Durante le prove sperimentali non sono stati riscontrati fenomeni di localizzazione delle deformazioni e gli spostamenti trasversali del puntello dovuti agli effetti instabilizzanti delle imperfezioni hanno coinvolto tutta la lunghezza dell'elemento. Dall'esame dei risultati ottenuti ri-

sulta evidente la maggiore variabilità delle resistenze dei puntelli più corti. I valori medi (R_u) e gli scarti quadratici medi (s_R) delle resistenze ottenute sono riportati in Tab. 4.

Al fine di ottenere la resistenza caratteristica i risultati sperimentali sono stati ridotti secondo l'eq. (5), dove il coefficiente ψ è derivabile dalla procedura prima descritta e riportata in fig. 4.

I valori ottenuti sono indicati qui sotto.

$$\varphi_y = \frac{f_{y,act}}{f_{y,nom}} = \frac{300}{275} = 1.09$$

$$N_{pl,nom} = f_{y,nom} A = 275 \cdot 387 = 106.4 \text{ kN}$$

$$N_{c,i} = \frac{\pi^2 EI}{(0.7L)^2} = \begin{cases} 59.73 \text{ kN per i puntelli corti} \\ 41.61 \text{ kN per i puntelli lunghi} \end{cases}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,nom}}{N_{c,i}}} = \begin{cases} 1.33 \text{ per i puntelli corti} \\ 1.60 \text{ per i puntelli lunghi} \end{cases}$$

Dal grafico riportato in Fig. 6 si ottengono i coefficienti ψ :

$$\psi = \begin{cases} 1.01 \text{ per i puntelli corti} \\ 1.00 \text{ per i puntelli lunghi} \end{cases}$$

I valori delle resistenze di prova ridotte sono riportate in Tab. 4. Si può notare come per i puntelli lunghi non si abbia alcuna riduzione in quanto ψ risulta essere pari ad 1 ed anche la riduzione per i puntelli corti sia del tutto trascurabile. Questo aspetto è dovuto sia al basso valore del parametro φ_y che indica lo scostamento della resistenza del materiale da quella nominale, che dall'alto valore della snellezza.

I valori ridotti delle resistenze sperimentali, R'_u , devono essere poi elaborati in forma statistica per stabilire i valori corrispondenti ad un frattile del 5% con un livello di confidenza del 75%. Essendo il valore medio e lo scarto quadratico medio:

$$\bar{R}' = \frac{\sum R'_i}{n}$$

$$s_{R'} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (R'_i - \bar{R}')^2}$$

se si assume una distribuzione statistica normale è possibile calcolare il valore caratteristico dall'espressione:

$$R'_{u,5} = \bar{R}' - k_s \cdot s_{R'}$$

avendo assunto $k_s = 2.33$ (come da Tab. 5) poiché sono state effettuate 6 prove. I risultati sono riportati in Tab. 6.

Osservando i valori ottenuti si nota come per i puntelli corti, che presentano uno scarto maggiore, la riduzione dei risultati sperimentali sia maggiore rispetto a quella relativa ai puntelli lunghi. Effettivamente le resistenze reali dei puntelli corti sono più disperse (vedi Tab. 4) influenzando note-

PROVE	\bar{R}' [kN]	$s_{R'}$ [kN]	$R'_{u,5}$ [kN]
C1-C6	29.9	4.17	20.1
L1-L6	19.1	1.14	16.4

Tab. 6: Risultato valutazione statistica

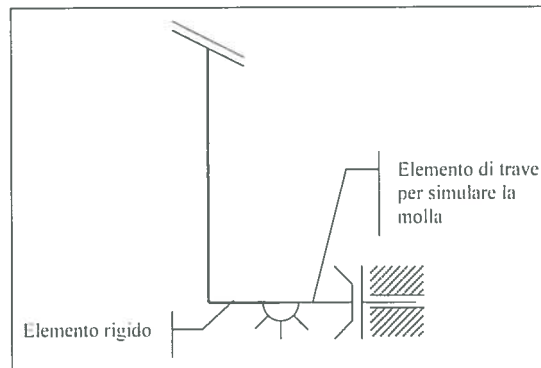


Fig. 13: modellazione del vincolo di base.

volmente il valore di resistenza caratteristica da usare per la classificazione. Risulta evidente l'importanza di un adeguato controllo di qualità di tali prodotti sia per i materiali che per il processo produttivo.

Risultati delle analisi numeriche

Le analisi numeriche sono state eseguite utilizzando un codice di calcolo ad elementi finiti in grado di considerare sia le non linearità di tipo geometrico che le non linearità di tipo meccanico.

L'elemento strutturale è stato modellato mediante 30 elementi di trave con possibilità di inflessione nel piano di eccentricità del carico. Per la presenza delle imperfezioni iniziali questo piano corrisponde alla direzione preferenziale di inflessione del puntello. Si è assunto un materiale con legame elastico - perfettamente plastico con $f_y = 275$ MPa e modulo elastico $E = 210$ GPa.

Si fa notare che a differenza di quanto stabilito dalla norma, non si è assunto un materiale indefinitamente elastico lineare ma si è preferito, nonostante la snellezza dell'elemento considerato, includere un comportamento elasto-plastico.

Particolarmente complessa risulta la modellazione della molla di base come richiesto dalla normativa. Il problema è stato risolto sostituendo alla molla stessa una trave fittizia in grado di simulare il comportamento non lineare assegnato. Lo schema statico della base del puntello è riportato in Fig. 13: si possono notare: un elemento rigido, atto ad introdurre l'eccentricità iniziale $e_{b0} = 0.4 \cdot D_1$, ed un elemento di trave vincolato a terra mediante un'opportuna combinazione pattino-manicotto. A questo elemento sono state assegnate proprietà geometriche e meccaniche tali per cui il suo comportamento risulta identico a quello della molla di base prevista

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
k_s	5.12	3.15	2.68	2.46	2.33	2.25	2.19	2.14	2.10	2.07	2.05	2.03
n	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
k_s	2.00	1.99	1.98	1.96	1.95	1.94	1.93	1.92	1.92	1.91	1.90	1.90
n	26	27	28	29	34	39	44	49	54	55	.	.
k_s	1.89	1.88	1.88	1.87	1.87	1.85	1.83	1.82	1.81	1.80	1.64	.

Tab. 5: valori di k_s per la determinazione del quantile 5% con un livello di confidenza del 75%.

Fig. 14: confronto tra le curve carico assiale - spostamento trasversale ottenute tramite la prova sperimentale del puntello C4 e relativa analisi numerica.

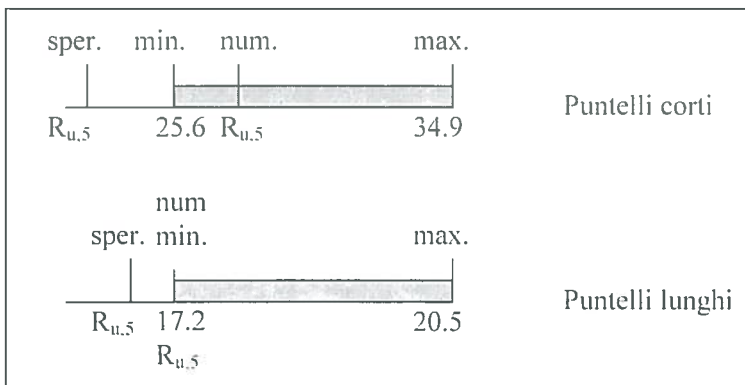
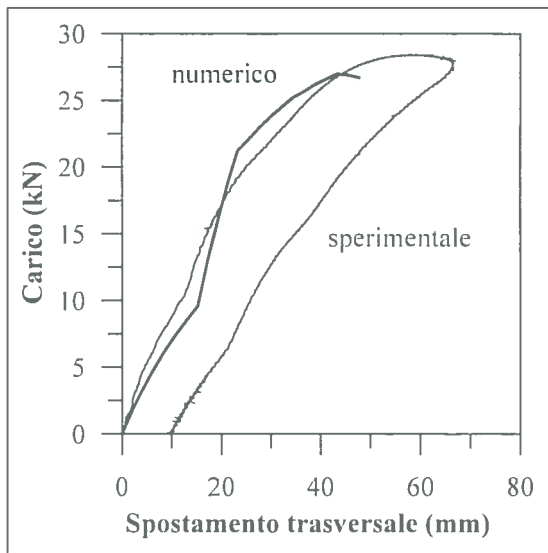


Fig. 15: confronto fra i valori caratteristici e quelli reali.

dalla normativa. Ciò è stato possibile modificando il valore del modulo elastico del materiale di cui è costituita la trave fittizia in funzione delle reazioni vincolari alla base.

Il carico massimo ottenuto attraverso le analisi numeriche è riportato in Tab. 7 sia per il puntello corto che per quello lungo, mentre la curva carico assiale - spostamento trasversale del solo puntello corto è riportata in Fig. 14.

Facendo riferimento proprio a questa curva si può notare un primo tratto, da 0 a 10 kN, in cui la molla ha rigidità nulla e quindi la risposta del modello simula la fase di rotazione della basetta di un grado. Il secondo tratto, a pendenza sensibilmente maggiore fino ad un carico di circa 21 kN, è ottenuto assegnando una rigidità infinita alla molla di base (per la procedura implementata si applica un modulo elastico molto elevato alla trave fittizia) mentre nel terzo ed ultimo tratto la risposta della molla varia in funzione della rotazione alla base fino a quando viene raggiunta l'eccentricità limite di $e_{b,lim} = -0.5 \cdot D_1$.

Il carico da considerare come resistenza caratteristica coincide con il massimo carico raggiunto durante l'analisi numerica.

Tab. 7: carichi massimi ottenuti dalle analisi numeriche.

Lunghezza di estensione	Resistenza (modello numerico)
3.00 m	27.0 kN
3.60 m	17.2 kN

Classificazione dei puntelli - confronti e commenti

Dall'esame dei risultati ottenuti mediante le analisi numeriche e le resistenze a compressione fornite dalle prove sperimentali si può concludere che:

- i valori reali ottenuti sperimentalmente sono, nella quasi totalità dei casi, maggiori di quelli ottenuti numericamente;
- i valori caratteristici ottenuti dalle prove sperimentali sono inferiori ai corrispondenti valori numerici (vedi Tab. 8 e Fig. 15);
- il maggior scostamento (vedi Tab. 8) delle resistenze caratteristiche ottenute con i due approcci è relativo ai puntelli corti ed è dovuto essenzialmente alla maggior dispersione dei dati sperimentali.

Puntello	Rk sperimentale (kN)	Rk numerica (kN)
Cx	20.1	27.0
Lx	16.4	17.2

Tab. 8: confronti fra i valori caratteristici ottenuti per via sperimentale e numerica.

La classificazione dei puntelli risulta la seguente :

- il puntello lungo rientra nella classe A35 sia considerando i risultati numerici che quelli sperimentali
- il puntello corto rientra nella classe A30 se si considerano i risultati sperimentali. L'appartenenza alla classe B30, ottenibile considerando i risultati numerici, non è possibile a causa delle dimensioni dei tubi che presentano uno spessore inferiore rispetto a quello richiesto dalla normativa (2.6 mm).

Essendo i puntelli di classe A occorrerebbe verificare la resistenza anche alla estensione minore e nella configurazione intermedia più sfavorevole. Il procedimento è analogo a quello appena illustrato, ma la mancanza di un numero elevato di puntelli ha impedito la realizzazione di ulteriori prove di compressione.

CONCLUSIONI

Sono stati presentati e commentati i principi della norma UNI-EN 1065 per la classificazione dei puntelli telescopici. Sono state descritte le tecniche di esecuzione delle prove sperimentali e delle analisi numeriche suggerite per la determinazione della resistenza caratteristica del puntello. Sono stati inoltre presentati e discussi, come esempio di applicazione della norma stessa, i risultati relativi ad una serie di puntelli analizzati e sperimentati dagli autori presso il Laboratorio Prove Materiali del Politecnico di Milano.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare l'ing. F. Cattaneo per l'apporto dato alla ricerca, nello svolgimento sia delle prove sperimentali che delle analisi numeriche. Si ringrazia anche il personale tecnico del Laboratorio Prove Materiali del Politecnico di Milano per la disponibilità mostrata durante la preparazione e l'esecuzione delle prove sperimentali.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Norma Europea EN 1065: Puntelli telescopici regolabili – Specifiche di prodotto, progetto e verifica attraverso calcoli e prove.
- [2] Agenzia europea per la sicurezza e la salute sul lavoro. Lo stato della sicurezza e della salute sul lavoro nell'Unione – Studio pilota 2000. ISBN 92-95007-08-5
- [3] L.Falsino, A.Michelori, M.Vina Ponteggi: progetto, norme e procedure, pianificazione per la sicurezza, giurisprudenza, edizioni DEI Roma 1990
- [4] Eurocode 3 - Design of steel structures – Part 1-1: General rules, 1992
- [5] F. Cattaneo, Analisi numerica e sperimentale della capacità portante di puntelli telescopici per applicazioni edili, tesi di laurea, I Facoltà di Ingegneria, Politecnico di Milano, 2001