

INAIL
Quaderni di ricerca

Metodologia per prove di rigidità e resistenza per i dispositivi di collegamento montante-traverso nei ponteggi metallici fissi di facciata

Luigi Cortis, Francesca Maria Fabiani, Luca Rossi,
Davide Geoffrey Svampa

I *Quaderni di ricerca* dell'Inail sono lo strumento a disposizione dei ricercatori e dei ruoli professionali dell'Istituto per rendere pubblici i risultati più rilevanti delle loro attività; accolgono anche contributi di ricercatori esterni, che partecipano ai progetti dell'Inail.

Gli autori hanno la piena responsabilità delle opinioni espresse nei *Quaderni*, che non vanno intese come posizioni ufficiali dell'Inail.

I *Quaderni* sono disponibili online all'indirizzo www.inail.it.

Comitato di redazione: Paolo Bragatto, Massimo De Felice,
Benedetta Persechino, Patrizio Rossi

Segreteria di redazione: Toni Saracino

Inail - Piazzale Giulio Pastore, 6 | 00144 Roma

ISBN 978-88-7484-550-7

Stampato presso la Tipografia Inail - Milano, aprile 2017

Metodologia per prove di rigidità e resistenza per i dispositivi di collegamento montante-traverso nei ponteggi metallici fissi di facciata

Luigi Cortis, Francesca Maria Fabiani, Luca Rossi, Davide Geoffrey Svampa¹

Sommario - L'attuazione del sistema normativo europeo presuppone una serie di verifiche di carattere progettuale e sperimentale in correlazione fra loro, finalizzate alla corretta modellazione strutturale dell'opera provvisoria sottoposta alle azioni previste per il suo esercizio.

In questo contesto, riveste particolare importanza la modellazione dei nodi montante/traverso/corrente che deve tener conto, secondo la UNI EN 12810-2 [1], delle caratteristiche strutturali non lineari dei nodi stessi.

Convenzionalmente l'analisi delle strutture in acciaio avviene idealizzando i nodi o come cerniere o come incastri perfetti. Nella realtà il comportamento cade a metà fra i due estremi. Una modellazione dei nodi strutturali più vicina al reale permette di ottimizzare le prestazioni strutturali dell'intera opera nei confronti delle azioni di progetto.

Il presente studio ha come finalità quella di individuare una metodologia sperimentale che consenta la caratterizzazione dei nodi strutturali, sia in termini di rigidità, che di resistenza, come previsto dalla UNI EN 12810-2 [1] e dalla UNI EN 12811-3 [2].

L'attività si inserisce in quella descritta nel Quaderno di ricerca n. 6 "Determinazione della resistenza caratteristica dei dispositivi di collegamento montante-traverso nei ponteggi metallici fissi di facciata" e ne rappresenta il proseguimento.

Lo studio comprende una fase analitica e una fase sperimentale che ha avuto lo scopo di acquisire elementi utili per la messa a punto della metodologia proposta. La campagna di sperimentazione ha riguardato il prodotto di un solo fabbricante.

Il presente quaderno fa riferimento al report "I ponteggi metallici fissi di facciata. Dispositivi di collegamento montante-traverso realizzati con sistemi modulari. Definizione di una metodologia per prove di rigidità e resistenza secondo la UNI EN 12811-3:2005" ((F.M.Fabiani, L. Cortis, L. Rossi, D.G. Svampa), pubblicato sul sito dell'Inail [FCRS-017].

¹ Gli autori svolgono la propria attività presso l'Inail nel Dipartimento Innovazioni Tecnologiche e sicurezza degli impianti, prodotti ed insediamenti antropici. Si ringraziano Ivano Bevilacqua, Carlo Ratti e Calogero Vitale per la collaborazione. Questo Quaderno fa riferimento ai risultati relativi alla linea di ricerca P24L05 *L'innovazione tecnologica relativa allo sviluppo di strumenti e metodologie atte al miglioramento della sicurezza delle opere provvisorie e delle attrezzature e delle metodiche nei cantieri temporanei o mobili. Verifica sperimentale ed affidabilità dei risultati da utilizzare in sede di progettazione e di normazione per i ponteggi metallici fissi e le scale portatili* (Responsabile scientifico Luigi Cortis) del Dipartimento innovazioni tecnologiche e sicurezza degli impianti, prodotti e insediamenti antropici dell'Inail.

Indice degli argomenti

Premessa	7
Definizioni e simboli	8
1. Riferimenti	10
1.1 Requisiti per le prove sperimentali secondo la UNI EN 12810-2:2004 e la UNI EN 12811-3:2005	10
2. Definizione dei requisiti delle prove sperimentali	13
2.1 Requisiti delle prove pilota	14
2.1.1 Criteri di validazione delle prove pilota	15
2.1.2 Diagrammi di flusso per la sequenza di esecuzione delle prove pilota	17
2.2 Requisiti delle prove di rigidezza e di resistenza cicliche	21
2.2.1 Criteri di validazione delle prove di rigidezza e di resistenza cicliche	21
2.2.2 Diagramma di flusso per la sequenza di esecuzione delle prove di rigidezza e resistenza cicliche	22
3. Prove sperimentali	23
3.1 Prove pilota	24
3.1.1 Disposizione e procedimento di prova per le prove pilota	25
3.1.1.1 Prove negative	27
3.1.1.2 Prove positive	27
3.1.2 Risultati sperimentali per le prove pilota	28
3.1.2.1 Sintesi dei risultati	28
3.1.2.2 Grafici delle prove pilota negative	30
3.1.2.3 Grafici delle prove pilota positive	32
3.1.2.4 Analisi dei risultati	34
3.1.3 Stima del carico massimo stimato $\overline{F_{max}}$	34
3.1.4 Stima di R_k^- e di R_k^+	36
3.1.5 Stima di c_{full}^- e di c_{full}^+	36
3.2 Prove di rigidezza e resistenza cicliche	36
3.2.1 Disposizione e procedimento di prova	36
3.2.1.1 Prove negative	37
3.2.1.2 Prove positive	39
3.2.2 Risultati sperimentali	41
3.2.2.1 Sintesi dei risultati	41
3.2.2.2 Grafici delle prove negative	44
3.2.2.3 Grafici delle prove positive	46
3.2.3 Analisi dei risultati	48
4. Conclusioni	50
Riferimenti bibliografici e normativi	52

Premessa - Finalità dello studio è l'individuazione di una metodologia sperimentale che consenta la caratterizzazione dei nodi strutturali sia in termini di rigidità sia in termini di resistenza, come previsto dalla UNI EN 12810-2 [1] e dalla UNI EN 12811-3 [2].

In questa ottica, già nel triennio 2009-2012, è stata effettuata un'analisi della suddetta normativa e dato inizio a una campagna di sperimentazione [CFRS-015].

Dall'analisi della normativa è emerso che i requisiti per le prove sperimentali secondo la UNI EN 12810-2:2004 e la UNI EN 12811-3:2005, necessarie alla valutazione del valore nominale caratteristico del momento di giunzione per i dispositivi di collegamento montante-traverso del tipo nodo con piastra, di fatto individuano il carico massimo per il dispositivo da sottoporre a prova come il fattore da cui partire per poter eseguire le prove stesse.

Visto che il carico massimo non può essere noto prima dell'esecuzione delle prove, è necessario eseguire delle prove preliminari, cosiddette pilota, per la stima di tale fattore.

La norma, peraltro, non fornisce una definizione di carico massimo né i criteri per la sua stima. Anche se è ragionevole identificare il valore del carico massimo con la condizione di rottura, la stessa norma non fornisce i criteri per l'individuazione di tale condizione.

Definiti i requisiti per le prove sperimentali, eseguite delle prove pilota, attraverso una attenta valutazione sperimentale, le risultanze della ricerca 2009-2012 hanno permesso di comprendere il comportamento strutturale del nodo (almeno per la tipologia analizzata). Nel contempo hanno evidenziato la difficoltà di individuare la condizione di rottura del dispositivo di collegamento [CFRS-015]. La ricerca del piano triennale 2013-2015 rappresenta il proseguimento della ricerca del piano 2009-2012.

Scelta la stessa tipologia di connessione montante - traverso, stabilita quale condizione di rottura quella che determina la diminuzione significativa di v_c , velocità di carico al minuto, è stata avviata una nuova campagna di sperimentazione utilizzando il prodotto di un solo fabbricante.

Nella prima fase sono state eseguite prove pilota di tipo monotono nel verso negativo e nel verso positivo dello spostamento, con lo scopo di:

- illustrare il raggiungimento della condizione di rottura del dispositivo;
- determinare il corretto valore della velocità di prova ai sensi della UNI EN 12811-3;
- mettere a punto un diagramma di flusso per la corretta esecuzione delle prove nel rispetto dei requisiti già analizzati in [CFRS-015];
- determinare il valore di R_k^- e di R_k^+ , alla base del calcolo del range di fase ciclica delle prove sperimentali di rigidità e resistenza del dispositivo di collegamento.

La seconda fase della sperimentazione ha avuto come obiettivo l'esecuzione delle prove sperimentali di rigidità e resistenza cicliche.

Definizioni e simboli

Dispositivo di collegamento

Dispositivo che permette il collegamento fra due o più componenti di un ponteggio di facciata (UNI EN 12810-1 [3]).

Dispositivo di collegamento montante-traverso

Dispositivo che permette il collegamento fra il montante e il traverso di un ponteggio di facciata (UNI EN 12810-1 [3]).

Montante

Elemento verticale di un ponteggio (UNI EN 12811-1 [4]).

Ponteggio o ponteggio di servizio

Costruzione temporanea, necessaria a fornire un luogo di lavoro sicuro per il montaggio, la manutenzione, la riparazione o la demolizione di edifici e di altre strutture e per il necessario accesso (UNI EN 12811-1 [4]).

Ponteggio di facciata

Ponteggio di servizio che, durante l'utilizzo, è destinato a essere ancorato alla facciata di un edificio mediante ancoraggi. Si intende costituito da elementi prefabbricati, nei quali i montanti sono realizzati in acciaio o lega di alluminio e gli altri elementi realizzati in questi stessi materiali o materiali derivanti da legno (UNI EN 12810-1 [3]).

Traverso

Elemento orizzontale di un ponteggio, disposto nella direzione della dimensione minore del ponteggio (UNI EN 12811-1 [4]).

Sistemi modulari

Sistemi in cui traversi e montanti sono componenti separati e in cui i montanti offrono elementi a intervalli (modulari) predeterminati per il collegamento di altri componenti del ponteggio (UNI EN 12811-1 [4]).

c_{full}

Carico ciclico completo che deve essere applicato per configurazioni e componenti che sono destinati ad essere sottoposti a inversioni delle sollecitazioni per misurare il comportamento strutturale caratteristico (vedere 7.2 di [2]).

F_{max}

Carico massimo raggiunto durante la prova sperimentale.

$\overline{F_{max}}$

Carico massimo stimato, valore statistico ottenuto dai carichi massimi registrati in cinque prove pilota.

R_k^+

Valore caratteristico della resistenza nella direzione positiva del carico (UNI EN 12811-3 [2]).

R_k^-

Valore caratteristico della resistenza nella direzione negativa del carico (UNI EN 12811-3 [2]).

v_c , *velocità di carico*

Velocità di carico registrata durante la prova.

v_{cmax} , *velocità di carico massima*

Massimo valore della velocità di carico, registrato durante la prova.

$v_{clim} = \frac{0,25 \cdot \overline{F_{max}}}{min}$, *velocità di carico limite in base al carico massimo*

Limite superiore per la velocità di carico, calcolato in base al carico massimo registrato durante la prova.

$\overline{v_{clim}} = \frac{0,25 \cdot \overline{F_{max}}}{min}$, *velocità di carico limite in base al carico massimo stimato*

Limite superiore per la velocità di carico, calcolato in base al carico massimo stimato.

v_s , *velocità di spostamento*

Velocità di spostamento da imporre o imposta durante le prove a controllo di spostamento.

γ_M

Fattore parziale di sicurezza per la resistenza (UNI EN 12811-1 [4]).

γ_F

Fattore parziale di sicurezza per l'azione (UNI EN 12811-1 [4]).

1. Riferimenti

1.1 Requisiti per le prove sperimentali secondo la UNI EN 12810-2:2004 e la UNI EN 12811-3:2005

Le prove sperimentali da eseguire per la valutazione della rigidezza e della resistenza dei nodi strutturali nei ponteggi di facciata, devono rispettare i requisiti di cui ai seguenti punti della UNI EN 12810-2 [1] e della UNI EN 12811-3 [2], che riportiamo per esteso in *corsivo*.

UNI EN 12810-2/4.3.1: Prove di rigidezza e resistenza

Le prove richieste devono essere eseguite e i risultati valutati in conformità alla EN 12811-3. Si devono eseguire almeno cinque prove per ogni parametro.

UNI EN 12811-3:2005:

5: Requisiti generali per le prove di carico

Il carico (i carichi) e gli spostamenti o rotazioni relativi devono essere registrati in un numero di fasi sufficiente durante il carico o lo scarico per definire completamente le curve di deformazione. Durante la prova dovrebbe essere disponibile un grafico continuo della deformazione principale rispetto al carico. Di preferenza, le prove devono essere eseguite con controllo dello spostamento. La velocità di carico deve essere sufficientemente lenta da consentire il pieno sviluppo delle deformazioni plastiche.

La velocità di carico statico può essere regolata in base al comportamento del componente o della configurazione sottoposti a prova, ma non deve essere maggiore del 25% del carico massimo stimato al minuto. Similmente, l'ampiezza delle fasi di carico può essere regolata in base al comportamento del componente o della configurazione sottoposti a prova, ma ogni fase non deve essere maggiore del 10% del carico massimo. Il carico può essere applicato in continuo, soggetto alla velocità di carico limite definita nel prospetto 1²; per il carico ciclico vedere 7.2.

7: Prove di configurazioni e componenti

7.1: Generalità: I collegamenti che utilizzano cunei o bulloni devono essere assemblati e smontati tre volte prima dell'assemblaggio per qualsiasi prova.

7.2: Prove per determinare la capacità portante, la rigidezza e il gioco

7.2.1: Generalità: Prima del carico a rottura, si deve applicare un carico ciclico nei casi seguenti:

Il carico ciclico completo (c_{full}) deve essere applicato per configurazioni e componenti che sono desti-

² Il prospetto 1 non riporta la velocità di carico limite.

nati ad essere sottoposti a inversioni delle sollecitazioni per misurare il comportamento strutturale caratteristico (vedere 7.2.2.1);

Il carico ciclico limitato (c_{lim}) deve essere applicato per configurazioni e componenti che possono presentare un gioco se a) non è richiesto.

7.2.2: Carico ciclico.

7.2.2.1 Per il carico ciclico completo (c_{full}) le prove devono essere eseguite per una gamma (range) di carico di:

$$\left[+1,0 \cdot \frac{R_k^+}{\gamma_M \cdot \gamma_F}; -1,0 \cdot \frac{R_k^-}{\gamma_M \cdot \gamma_F} \right]$$

dove:

R_k^+ è il valore caratteristico della resistenza nella direzione positiva del carico;

R_k^- è il valore caratteristico della resistenza nella direzione negativa del carico;

γ_M è il fattore parziale di sicurezza per la resistenza;

γ_F è il fattore parziale di sicurezza per l'azione.

A questo livello di carico devono essere eseguiti almeno tre cicli.

Al completamento di tale caricamento, il caricamento deve essere aumentato in una direzione di carico fino alla rottura con alcuni scarichi fino al livello zero.

Dal momento che le resistenze caratteristiche R_k non sono note all'inizio delle prove, si possono accettare valori stimati; per esempio da prove pilota.

Almeno cinque prove uguali devono essere eseguite per ogni parametro tracciato.

Una prova può essere eseguita con un carico (o momento) o con combinazioni di carichi, per determinare il comportamento di interazione.

Per il carico ciclico limitato (c_{lim}), tre cicli devono dapprima essere eseguiti per una gamma (range) di carico di:

$$\left[+0,1 \cdot \frac{R_k^+}{\gamma_M \cdot \gamma_F}; -0,1 \cdot \frac{R_k^-}{\gamma_M \cdot \gamma_F} \right],$$

quindi il carico deve essere aumentato fino a rottura con alcuni scarichi. Almeno cinque prove devono essere eseguite per ogni parametro tracciato.

9: Documentazione dei risultati di prova

9.3.5: Disposizione e procedimento di prova.

La disposizione di prova deve essere completamente dettagliata e documentata mediante disegni e fotografie quando appropriato. Le condizioni limite dei componenti sottoposti a prova devono essere chiaramente definite. Le posizioni dei carichi e degli strumenti nonché le posizioni degli appoggi devono essere indicate mediante dimensioni precise.

Il tipo e l'accuratezza dell'apparecchiatura di carico e di misurazione devono essere dichiarati. Il tipo di carico, controllato dallo spostamento o dalla forza, deve essere indicato. Caratteristiche quali la velocità di carico, gli scarichi e i cicli di isteresi devono essere documentate.

9.3.6: Risultati.

Per ogni prova, i risultati, tutte le fasi di carico (per esempio forza, momento) e le deformazioni corrispondenti (per esempio spostamenti, angoli) devono essere indicate numericamente su carta o elettronicamente. Le curve di carico-deformazione principali devono essere presentate anche graficamente. Per ogni tipo di prova, si devono fornire fotografie dei componenti rotti o dei componenti con deformazioni plastiche. Si devono indicare le parti dei componenti che causano la rottura e le ragioni della rottura. Si devono fornire commenti esplicativi su risultati di prova inconsueti.

2. Definizione dei requisiti delle prove sperimentali

I requisiti riportati nella UNI EN 12810-2 [1] e della UNI EN 12811-3 [2], si riferiscono in generale alle prove di configurazioni e componenti di attrezzature provvisorie.

In [CFRS-015] è stata eseguita un'analisi di tali requisiti finalizzata alla valutazione dei dispositivi montante - traverso nei ponteggi metallici fissi di facciata.

E' stata evidenziata la necessità di eseguire delle prove pilota che consentano di determinare i parametri fondamentali per l'esecuzione delle prove di rigidezza e resistenza nel rispetto delle norme [1] e [2], quali:

- v_s , velocità di spostamento da imporre;
- R_k^+ e R_k^- , valori caratteristici della resistenza nella direzione positiva e negativa del carico, necessari alla definizione del range di carico ciclico nelle prove di rigidezza e resistenza.

La norma [2] non chiarisce la modalità di esecuzione delle prove pilota. In [CFRS-015], sono stati definiti i requisiti per tali prove in accordo alla [2]. Sono state inoltre eseguite sia prove pilota monotone nel verso positivo e negativo dello spostamento che prove pilota cicliche senza inversione di carico, sia per carichi positivi che negativi.

Lo studio ha evidenziato che la condizione di collasso del nodo strutturale possa ricercarsi nella diminuzione significativa di v_c , velocità di carico al minuto, rispetto al valore massimo raggiunto nella prima fase della prova.

Tale condizione sulla velocità di carico corrisponde ad uno stato deformativo del nodo in cui, a seconda del verso di spostamento impresso, verso il basso o verso l'alto, per effetto della rotazione del traverso rispetto al montante, da una parte si perde il contatto tra la forchetta del traverso e il montante e dall'altra l'azione esplicata sul montante attraverso il contatto è tale da rendere evidente l'imbozzamento del montante stesso.

Incrementando lo spostamento oltre tale condizione, si assiste ad un ulteriore incremento di resistenza del nodo (incremento della velocità di carico) che però non può essere considerato significativo visto che si associa a elevate rotazioni del traverso con evidenti deformazioni plastiche di tutti gli elementi che costituiscono il dispositivo di collegamento.

Per quanto riguarda le prove di rigidezza e resistenza, la [2] non chiarisce con quali modalità, oltre la fase ciclica, il caricamento deve essere aumentato in una direzione di carico fino alla rottura, con quanti scarichi fino al livello zero e a quali livelli di carico prima del caricamento definitivo fino al collasso.

In [CFRS-015] sono state definite le modalità di carico oltre la fase ciclica, l'entità e il numero di scarichi a zero prima del caricamento fino al collasso.

Nel presente lavoro, vengono ripresi i requisiti definiti in [CFRS-015], eventualmente rivisti sulla base delle risultanze sperimentali.

2.1 Requisiti delle prove pilota

Lo scopo delle prove pilota è la determinazione dei parametri fondamentali per l'esecuzione delle prove di rigidezza e resistenza nel rispetto delle norme [1] e [2], quali:

- v_s , velocità di spostamento da imporre;
- R_k^+ e R_k^- , valori caratteristici della resistenza nella direzione positiva e negativa del carico, necessari alla definizione del range di carico ciclico nelle prove di rigidezza e resistenza.

Le prove pilota devono essere eseguite in controllo di spostamento in ognuno dei due versi, positivo e negativo (prove monotone nello spostamento). Lo spostamento deve essere aumentato in un verso fino al raggiungimento della condizione di collasso del nodo.

La condizione di collasso è raggiunta quando si ha una diminuzione significativa della velocità di carico v_c rispetto al valore massimo raggiunto nella prima fase della prova.

Il livello di carico al quale si ottiene tale condizione è definito carico massimo F_{max} .

La velocità di spostamento v_s impostata per le prove pilota, dovrà comportare che il valore massimo della velocità di carico raggiunta durante la prova risulti inferiore al 25% del *carico massimo stimato* al minuto [2].

Deve valere la condizione:

$$v_{cmax} \leq \overline{v_{clim}}$$

$$\text{con } \overline{v_{clim}} = \frac{0,25 \cdot \overline{F_{max}}}{\min}$$

Visto che il carico massimo stimato $\overline{F_{max}}$ non è noto a priori, per la sua determinazione, occorre eseguire almeno 5 prove pilota³.

La stima di $\overline{F_{max}}$ viene eseguita valutando statisticamente i carichi massimi ottenuti per ognuna delle prove eseguite.

Ipotizzando una distribuzione normale logaritmica dei carichi massimi ottenuti, si considera per $\overline{F_{max}}$ (F_{max}^+ o F_{max}^-) il valore caratteristico quale il quantile del 5% per un livello di confidenza del 75% (vedi 10.8 di [2], *Determinazione statistica del valore caratteristico di base della resistenza $R_{k,b}$*)⁴.

³ In [CFRS-015] si è ritenuto sufficiente eseguire tre prove pilota per il calcolo del carico massimo stimato. In [FCRS-017] si è osservato che solo tre prove possono fornire risultati molto dispersi rispetto alla media dei valori.

⁴ Il punto 10.8 di [2] fornisce le indicazioni per la determinazione statistica del valore caratteristico di base della resistenza $R_{k,b}$ dei componenti metallici, applicabile anche ai dispositivi di collegamento oggetto del presente studio (10.1 di [2]). Più precisamente la determinazione di $R_{k,b}$ viene eseguita valutando statisticamente i valori ultimi regolati $r_{u,i}^c$ che rappresentano valori di rottura $r_{u,i}^a$ regolati utilizzando opportuni coefficienti per tenere in conto le variazioni delle dimensioni effettive delle sezioni trasversali rispetto a quelle nominali (10.6 di [2]) e la proporzione delle proprietà dei

Dovranno essere eseguite, quindi, le seguenti prove pilota:

- almeno cinque prove pilota per la determinazione del carico massimo stimato $\overline{F_{max}}$;
- (eventualmente) almeno cinque prove pilota per la determinazione di R_k .

Il calcolo di R_k viene effettuato analogamente a quello per $\overline{F_{max}}$.

Dopo l'esecuzione delle prove pilota risulterà definita la velocità di spostamento v_s da imporre per le prove di rigidità e resistenza cicliche.

Per la sequenza di passi da eseguire si veda il paragrafo "Diagrammi di flusso per la sequenza di esecuzione delle prove pilota".

2.1.1 Criteri di validazione delle prove pilota

Prove pilota per la determinazione del carico massimo stimato $\overline{F_{max}}$

La velocità di spostamento v_s impostata per le prove pilota per la determinazione del carico massimo stimato $\overline{F_{max}}$, dovrà comportare che il valore massimo della velocità di carico raggiunta durante la prova risulti inferiore al 25% del *carico massimo* $\overline{F_{max}}$ raggiunto nella prova al minuto [CFRS-015].

Deve valere la condizione:

$$v_{cmax} \leq v_{clim}$$

(2.1.1-1)

$$\text{con } v_{clim} = \frac{0,25 \cdot \overline{F_{max}}}{min}$$

Prove pilota per la determinazione di R_k

La velocità di spostamento v_s impostata per le prove pilota per la determinazione di R_k , dovrà comportare che il valore massimo della velocità di carico raggiunta durante la prova risulti inferiore al 25% del *carico massimo stimato* al minuto [2].

materiali effettive rispetto a quelle garantite (10.7 di [2]). Inoltre i valori ultimi di rottura rau_i vengono determinati sulla base della costruzione di funzioni che approssimino le curve sperimentali spostamento carico (10.2; 10.3; 10.4 di [2]) e non coincidono con il valore massimo del carico ottenuto per ogni prova. Quindi si può dire che il valore caratteristico di base della resistenza $R_{k,b}$ viene determinato sulla base di valori ultimi approssimati come appena descritto.

Qui invece il valore del carico massimo stimato viene determinato direttamente sulla base dei valori massimi registrati per ogni prova, ritenendo non influente la regolazione dei valori al fine della valutazione della velocità di spostamento da imporre v_s).

Deve valere la condizione:

$$v_{cmax} \leq v_{clim} \quad (2.1.1-2)$$

con $\overline{v_{clim}} = \frac{0,25 \cdot \overline{F_{max}}}{min}$.

La condizione (2.1.1-2) equivale alla condizione imposta al punto 5 di [2] per il controllo della velocità di carico.

Se la condizione (2.1.1-1) - per le prove pilota per la determinazione del carico massimo stimato $\overline{F_{max}}$ - o la (2.1.1-2) - per le prove pilota per la determinazione di R_k - non è soddisfatta, la prova risulta non valida.

La velocità di carico massima si raggiunge di norma nella prima fase della prova, quando l'andamento del carico nel tempo è lineare, così come lo spostamento imposto. Ne consegue che velocità di spostamento inferiori comportano velocità di carico inferiori e proporzionali fra loro (almeno nel tratto lineare).

Se la prova non soddisfa la condizione (2.1.1-1) o la (2.1.1-2), deve essere ripetuta con una velocità di spostamento inferiore, fino ad ottenere la verifica richiesta.

Individuato un verso di spostamento, per esempio negativo, nel quale il nodo fornisce minore resistenza, dovranno essere eseguite almeno 5⁵ prove pilota valide.

Nelle prove pilota per la determinazione del carico massimo stimato $\overline{F_{max}}$, i carichi massimi di ognuna delle 5 prove eseguite devono essere trattati statisticamente per fornire il carico massimo stimato nel verso di spostamento individuato (in questo caso $\overline{F_{max}^-}$).

Viene definito $\overline{v_{clim}} = \frac{0,25 \cdot \overline{F_{max}}}{min}$, il valore limite delle velocità di carico pari al 25% del carico massimo stimato.

La valutazione di R_k (in questo caso R_k^-) dovrà essere effettuata trattando statisticamente i valori massimi di almeno 5 prove eseguite con stessa velocità di spostamento che comporti una velocità di carico inferiore al valore limite $\overline{v_{clim}}$.

Tale velocità di spostamento è assunta per l'esecuzione delle prove pilota nell'altro verso di spostamento (in questo caso, positivo). Con lo stesso iter deve essere valutato l'altro valore di R_k (in questo caso, R_k^+).

La velocità di spostamento da assumere per le prove di rigidità e resistenza cicliche sarà il valore v_s più basso impostato nei due versi di spostamento.

⁵ Vedi nota 3.

Per la sequenza di passi da eseguire si veda il paragrafo “Diagrammi di flusso per la sequenza di esecuzione delle prove pilota”.

2.1.2 Diagrammi di flusso per la sequenza di esecuzione delle prove pilota

Si riportano di seguito i diagrammi che illustrano la sequenza di passi da seguire per la esecuzione delle prove pilota, nel rispetto dei requisiti prima definiti.

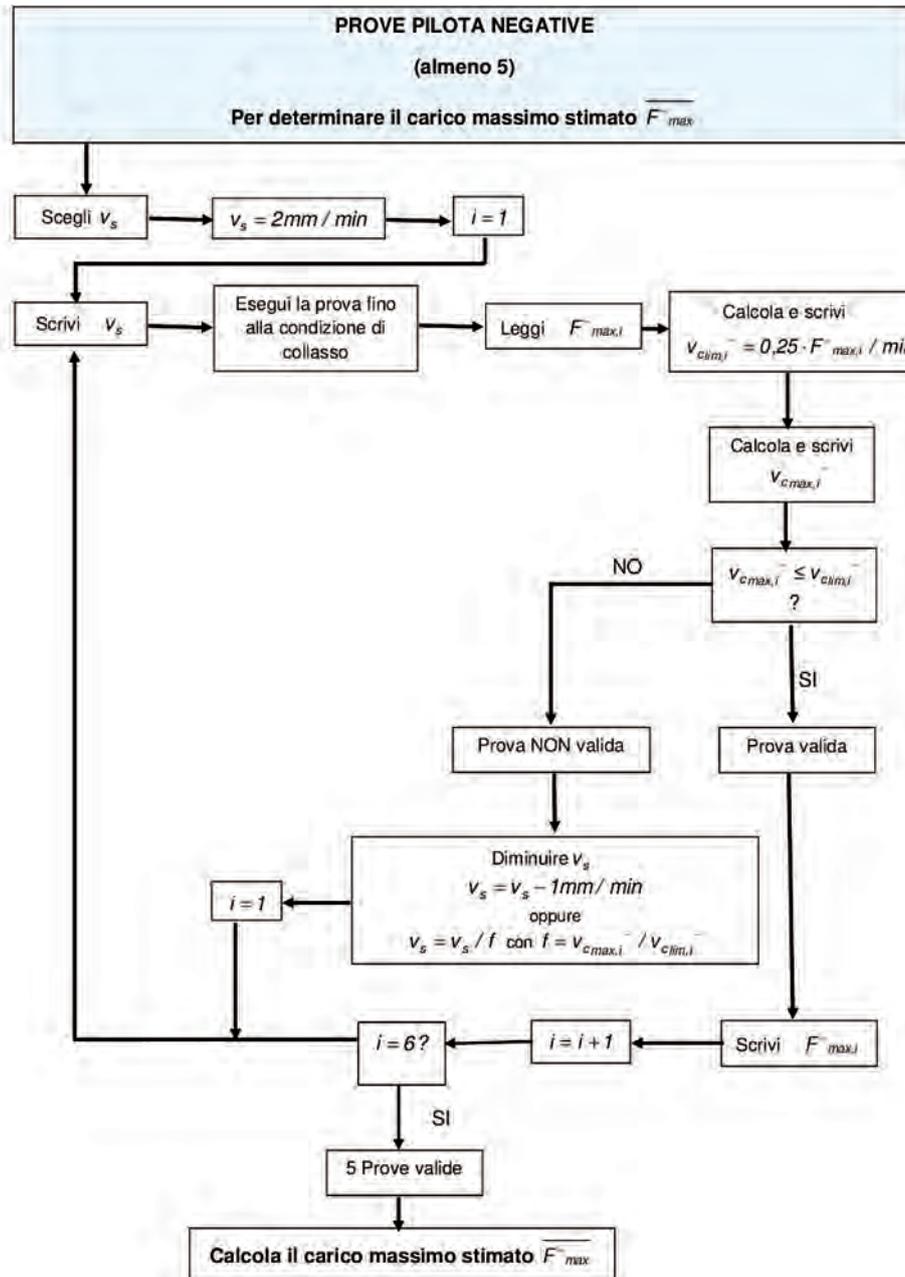


Figura 2-1: Sequenza di istruzioni per l'esecuzione delle prove pilota per determinare il carico massimo stimato

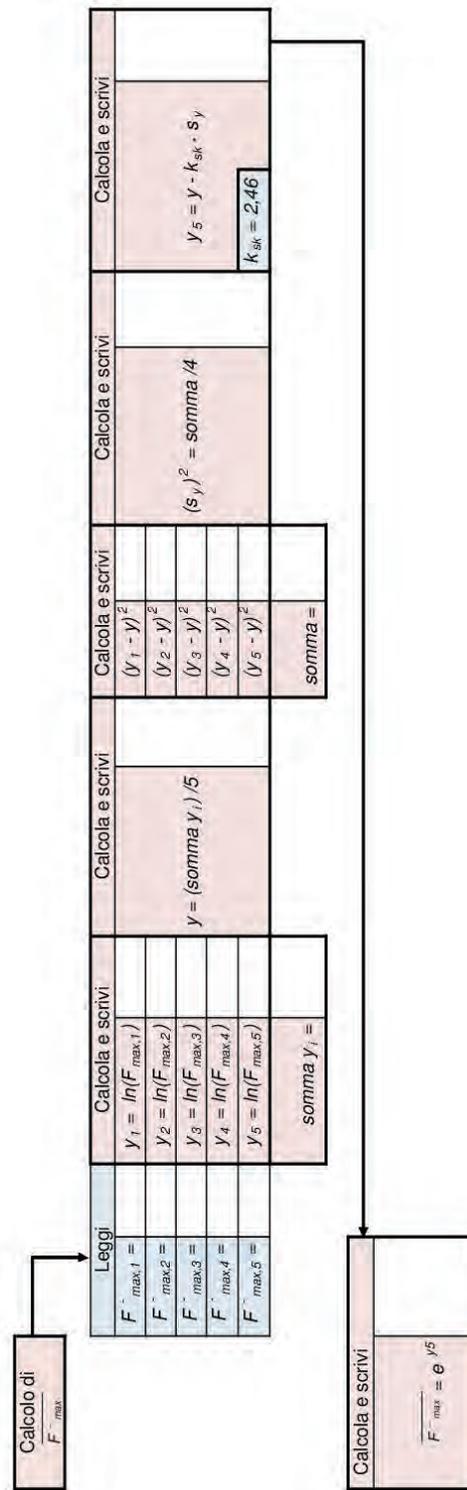


Figura 2-2: Schema per il calcolo del carico massimo stimato. Il fattore k_{sk} è preso dal Prospetto 4 del paragrafo 8 di [2]

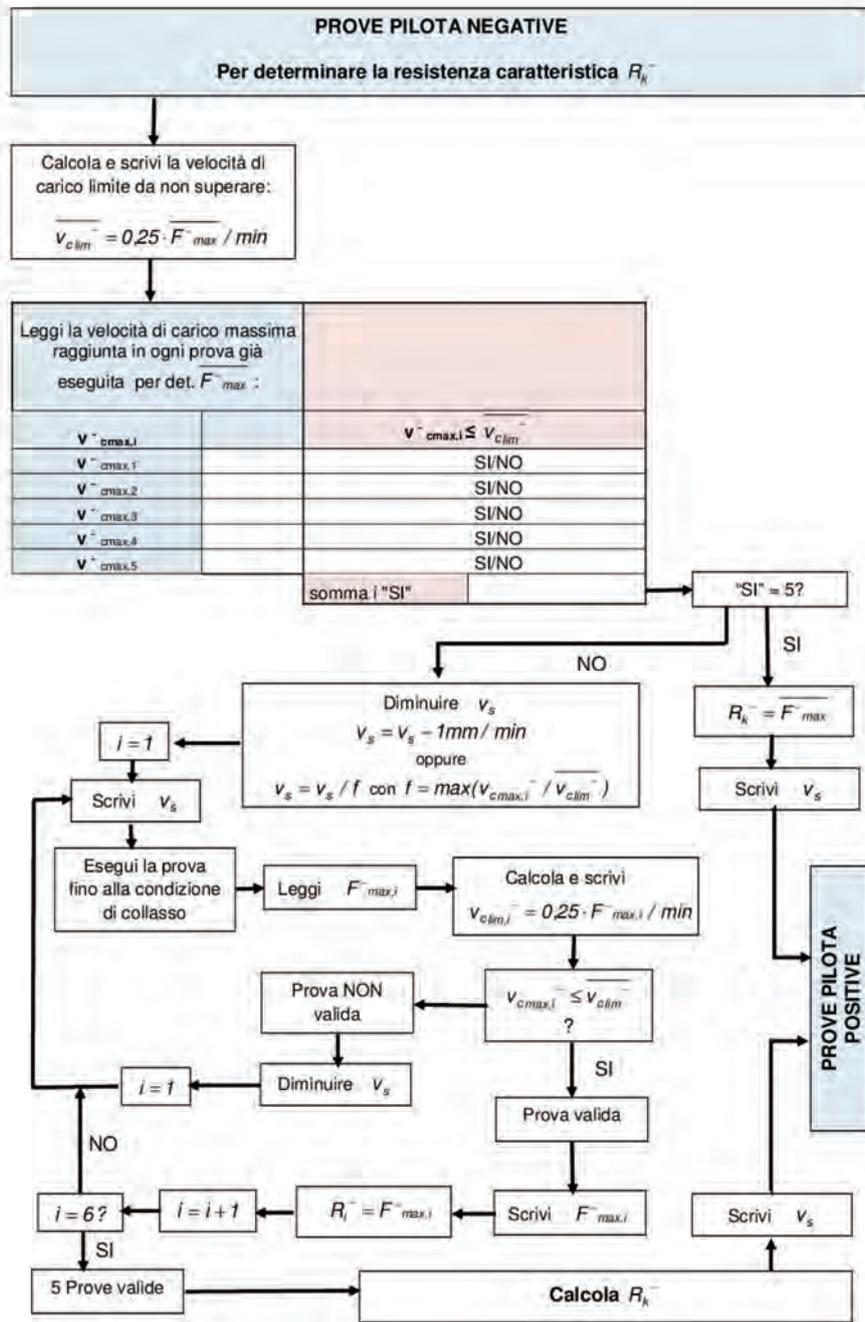


Figura 2-3: Sequenza di istruzioni per l'esecuzione delle prove pilota per determinare la resistenza caratteristica

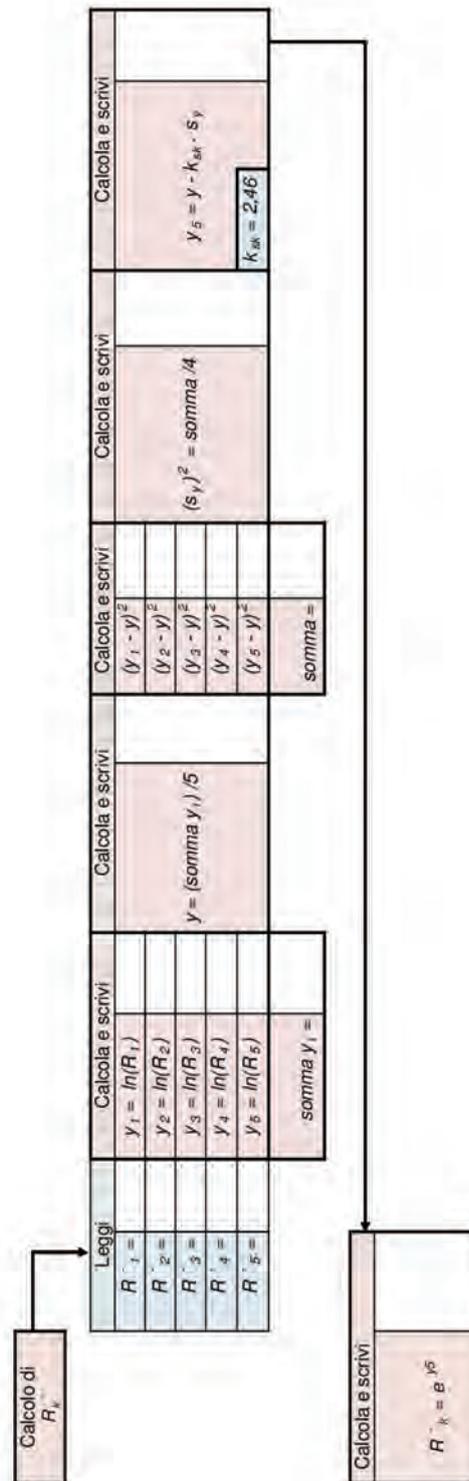


Figura 2-4: Schema per il calcolo della resistenza caratteristica. Il fattore k_{sk} è preso dal Prospetto 4 del paragrafo 8 di [2]

2.2 Requisiti delle prove di rigidezza e di resistenza cicliche

Le prove devono essere eseguite in controllo di spostamento.

La valutazione della rigidezza e della resistenza del nodo deve essere effettuata nei due versi di spostamento.

Devono essere effettuate 5 prove nel verso positivo e cinque prove nel verso negativo dello spostamento.

Completate le prove pilota, risulta nota la velocità di spostamento v_s da imporre e determinati i valori di R_k^+ e di R_k^- .

Si definisce di conseguenza il range del carico ciclico completo (c_{full}):

$$c_{full} : \left[+1,0 \cdot \frac{R_k^+}{\gamma_M \cdot \gamma_F}; -1,0 \cdot \frac{R_k^-}{\gamma_M \cdot \gamma_F} \right],$$

Scelto un verso di spostamento, si eseguono tre cicli nel range c_{full} a partire dalla condizione iniziale, nel verso dello spostamento scelto.

Oltre tale livello di carico, il caricamento deve essere aumentato nel verso di spostamento scelto, con fasi di carico e scarico a zero di ampiezza non maggiore del 10% del carico massimo (punto 5 di [2]). Il caricamento deve proseguire fino al collasso.

La condizione di collasso è raggiunta quando si ha una diminuzione sensibile della velocità di carico v_c rispetto al valore massimo raggiunto nella prima fase della prova.

2.2.1 Criteri di validazione delle prove di rigidezza e di resistenza cicliche

Impostata la velocità di spostamento v_s , dovrà sempre risultare soddisfatta la condizione:

$$v_{cmax} \leq v_{clim}$$

$$\text{con } \frac{\quad}{v_{clim}} = \frac{0,25 \cdot \overline{F_{max}}}{min} \quad (2.2.1-1)$$

L'ampiezza delle fasi di carico oltre la fase ciclica della prova può essere preliminarmente imposta pari al 10% di R_k . Se il carico massimo registrato sarà maggiore di R_k la prova sarà valida. Altrimenti, la prova dovrà ritenersi non valida e dovrà essere ripetuta imponendo l'ampiezza della fase di carico pari al 10% del carico massimo appena trovato (vedi 3.5 di [CFRS-015]).

2.2.2 Diagramma di flusso per la sequenza di esecuzione delle prove di rigidità e resistenza cicliche

Si eseguono cinque prove a rottura in controllo di spostamenti e imponendo la velocità di spostamento v_s .

Per ognuna delle prove, partendo dalla condizione iniziale⁶, scelto un verso di spostamento per esempio positivo, si eseguirà la sequenza di istruzioni descritta alla figura seguente.

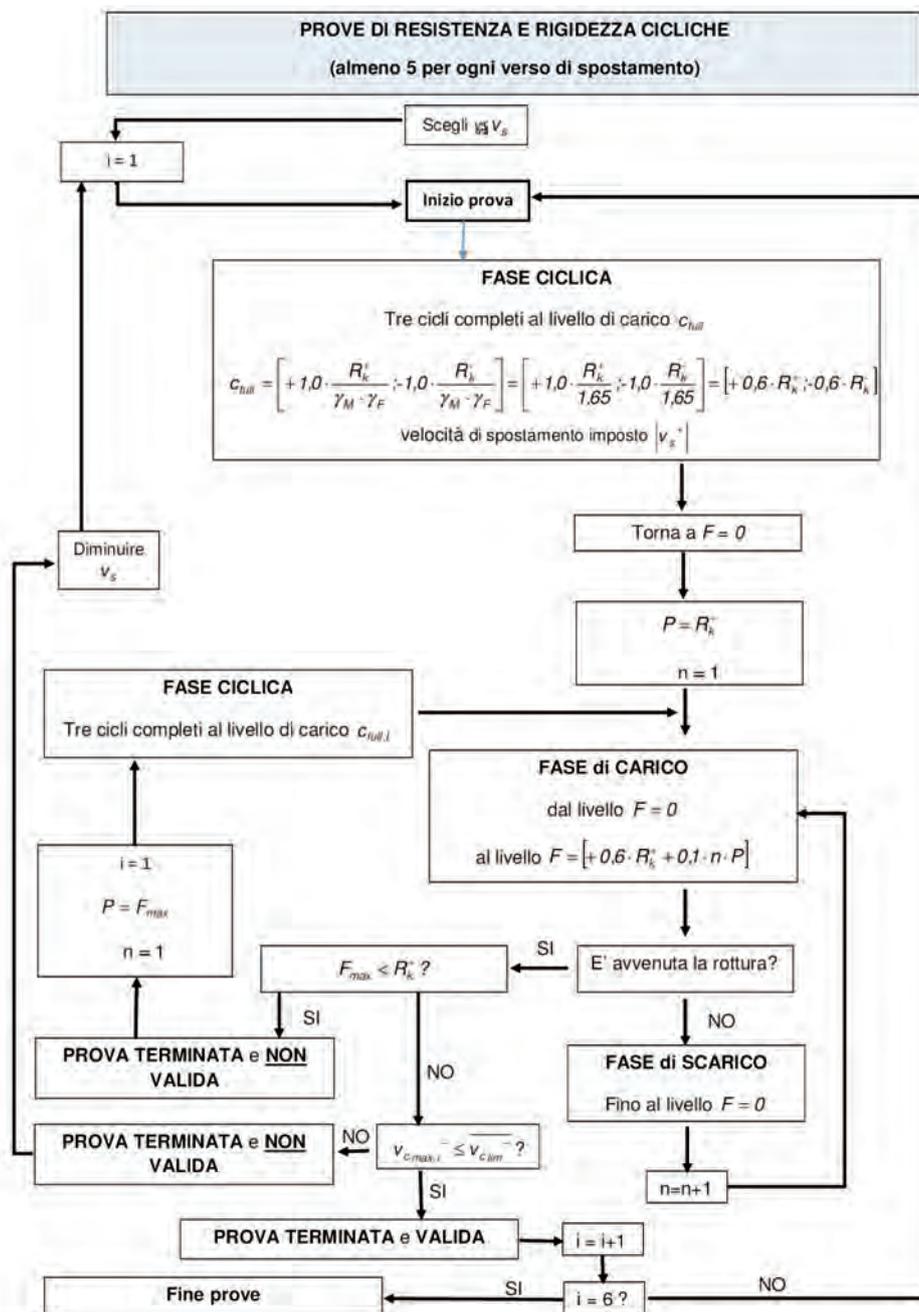


Figura 2-5: Sequenza di istruzioni per l'esecuzione delle prove di rigidità e resistenza cicliche

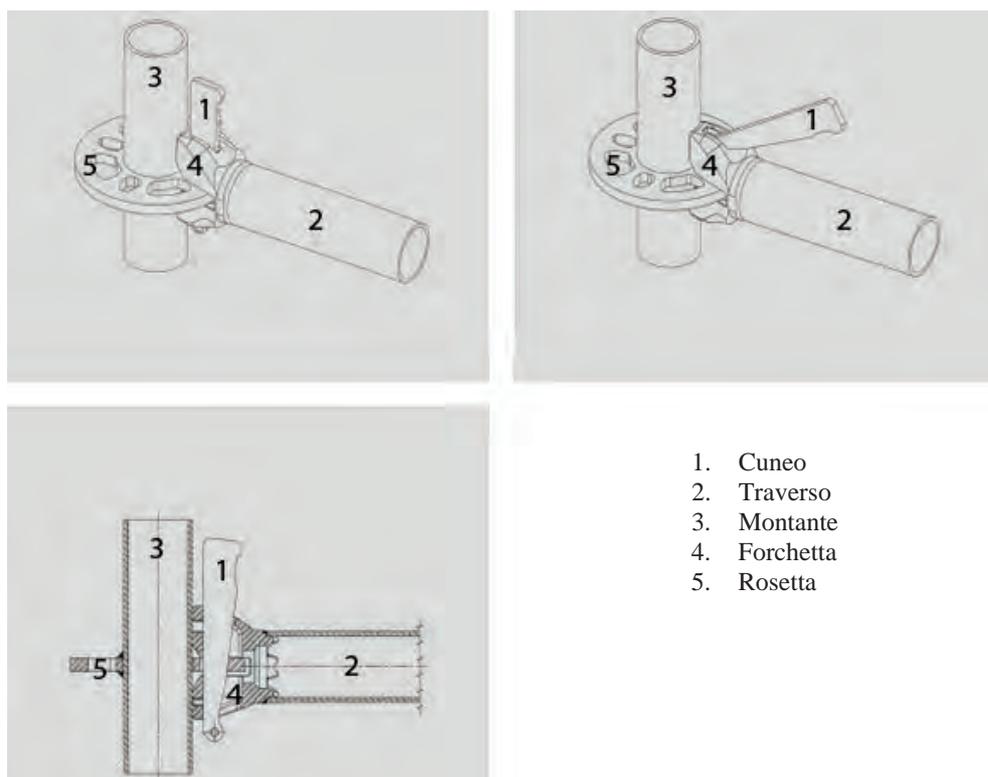
⁶ Si assume che la condizione iniziale sia la condizione di montaggio del dispositivo di collegamento.

Risulteranno, per ognuna delle prove eseguite, i seguenti valori del carico massimo:

prova i	1	2	3	4	5
$F_{max,i}^+$	$F_{max,1}^+$	$F_{max,2}^+$	$F_{max,3}^+$	$F_{max,4}^+$	$F_{max,5}^+$

3. Prove sperimentali

La tipologia (produttore, marca e modello) dei dispositivi sottoposti a prova è la stessa di quella utilizzata in [CFRS-015] (vedi Figura 3-1).



1. Cuneo
2. Traverso
3. Montante
4. Forchetta
5. Rosetta

Figura 3-1: Geometria e nomenclatura degli elementi sottoposti a prova

Nella prima fase della sperimentazione sono state eseguite prove pilota di tipo monotono nel verso negativo e nel verso positivo dello spostamento.

Nella seconda fase, prove di rigidezza e resistenza cicliche.

Ogni prova è stata condotta, utilizzando un tratto di montante e un traverso. Il tratto di montante è stato bloccato in corrispondenza delle estremità in modo che il dispositivo di collegamento fosse risultato nella mezzeria. Su tale dispositivo è stato montato il traverso, con le modalità previste dal costruttore. Ciascun collegamento è stato assemblato e smontato tre volte prima dell'assemblaggio per ogni prova (7.1 di [2]).

Per ogni prova sperimentale eseguita si descriverà nel seguito:

- a disposizione e il procedimento di prova;
- i risultati sperimentali.

3.1 Prove pilota

Le prove pilota sono prove di tipo monotono nello spostamento.

La strumentazione utilizzata è costituita da:

1. Macchina per prove meccaniche ZWICK-ROELL Z100 SW, con cella di carico (FS=100kN);
2. Due Inclinometri Lunitek SSL20, range +/-90°;
3. Un inclinometro Lunitek SSL20, range +/-10°;
4. Accessorio per il trasferimento dello spostamento della traversa della macchina di prova al traverso del dispositivo di collegamento sottoposto a prova (vedi Figura 3-3);
5. Telaio rigido di contrasto;
6. Telecamera Logitech HD1080P;
7. Sistema di acquisizione e registrazione dati: testXpert II ver.3.5 e Catman AP ver. 3.4.

La tecnologia della macchina di prova permette l'impostazione di un qualsiasi valore della velocità di spostamento della traversa, compreso nel range 0.00005 ..1000 mm/min.

La velocità di spostamento della traversa della macchina è stata impostata pari a $v_s = 2\text{mm/min}$, valore stimato in [FCRS-017].

In accordo ai diagrammi in Figura 2-1 e in Figura 2-3, sono state dapprima eseguite le prove pilota negative per il calcolo del carico massimo stimato $\overline{F_{max}^-}$ e di R_k^- . Successivamente sono state eseguite le prove pilota positive per il calcolo di $\overline{F_{max}^+}$ e di R_k^+ .

Le prove pilota già eseguite per il calcolo di $\overline{F_{max}^-}$ e di $\overline{F_{max}^+}$, sono state sufficienti anche per il calcolo di R_k^- e di R_k^+ .

3.1.1 Disposizione e procedimento di prova per le prove pilota

Le prove sono state eseguite in controllo di spostamento, imponendo uno spostamento verticale della traversa della macchina con velocità costante pari a 2 mm/min.

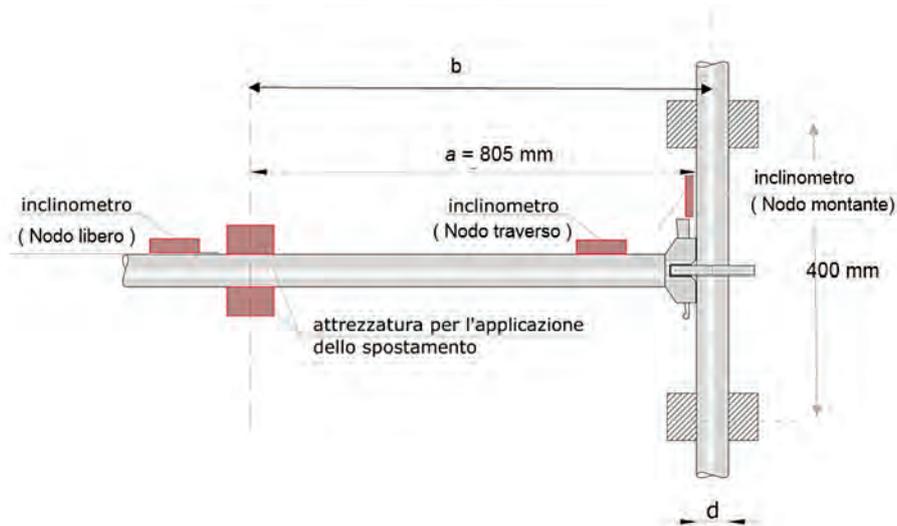


Figura 3 2: Schema di prova

La strumentazione ha permesso di registrare ogni 1 sec le seguenti grandezze:

- Carico (kg_f) al contatto con il traverso
- Inclinazione ($^\circ$) del traverso in corrispondenza del collegamento al montante (nodo traverso)
- Inclinazione ($^\circ$) del montante in corrispondenza del collegamento al traverso (nodo montante)
- Inclinazione ($^\circ$) del traverso in corrispondenza dell'estremità non vincolata, oltre il punto di applicazione dello spostamento (nodo libero).

Lo spostamento controllato della traversa è stato trasferito al traverso per mezzo dell'accessorio illustrato in Figura 3-3.



Figura 3-3: Accessorio per il trasferimento dello spostamento della traversa della macchina di prova al traverso del dispositivo di collegamento sottoposto a prova

L'accessorio di trasferimento del carico è stato avvitato alla cella di carico della macchina di prova per mezzo di una interfaccia adatta. Il peso dell'accessorio è stato annullato prima della prova.

Successivamente i cuscinetti regolabili sono stati posti a contatto con il traverso, mantenendo inalterata la inclinazione assunta dal traverso dopo l'assemblaggio al montante.

Il carico conseguente al contatto non è stato annullato ad inizio prova.

Il carico applicato al traverso è risultato ad una distanza dall'asse del montante pari a (vedi Figura 3-2):

$$b \text{ (mm)} = 805 + d/2 \quad \text{con } d \text{ diametro esterno del montante.} \quad (3.1.1-1)$$

La rotazione del collegamento è stata misurata attraverso un inclinometro digitale montato in modo solidale al traverso, il più possibile in prossimità dell'innesto con il montante.

Altri due inclinometri sono stati fissati rispettivamente, sul montante e sulla estremità non vincolata del traverso.

La strumentazione informatica ha consentito di visualizzare real-time:

- la curva carico- tempo
- la velocità di carico istantanea (derivata o *rate* della curva carico tempo)
- le curve inclinazione - tempo
- la curva carico-inclinazione traverso
- il video della prova perfettamente sincronizzato alla strumentazione di misura.

Al termine di ogni prova è stato calcolato dal software di gestione della prova, opportunamente programmato, il grafico della velocità di carico espressa in [carico]/min, conseguente alla velocità di spostamento imposto alla traversa.

La velocità di carico è stata calcolata come velocità media per ogni minuto, pari alla differenza del carico rilevato ad ogni minuto e il carico rilevato al minuto precedente o successivo secondo le formule:

- $v_i = F(i-1) - F_i$ con $i=1,2,..t_{fin}$ (min) per prove monotone negative;
- $v_i = F_i - F(i-1)$ con $i=1,2,..t_{fin}$ (min) per prove monotone positive.

In questo modo è stato possibile verificare real time se la prova rispettasse o meno la condizione sulla velocità di carico, sovrapponendo alla curva della velocità di carico media, il valore della velocità limite calcolata in base al carico massimo raggiunto nella prova.

Con la velocità di spostamento $v_s = 2\text{mm/min}$ si è ottenuta la verifica della condizione sulla velocità di carico per tutte le prove negative e positive.

3.1.1.1 Prove negative

Le prove 2MNPP sono state eseguite nel verso negativo dello spostamento (spostamento della traversa verso il basso). Sono state eseguite sottoponendo il dispositivo di collegamento alle azioni riportate nello schema seguente, avendo imposto alla traversa della macchina a contatto con il traverso, uno spostamento verso il basso.

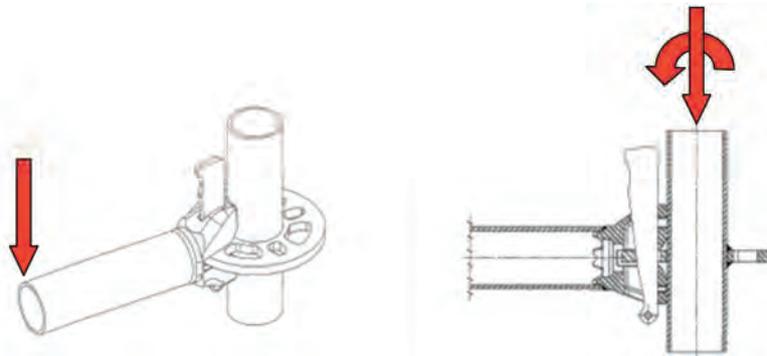


Figura 3-4: Schema di applicazione dello spostamento negativo e azioni al nodo

La velocità di spostamento è stata imposta pari a $v_s = 2$ mm/min.

Sono state eseguite 6 prove. La prova 2MNPP4 è stata ritenuta non valida per difetto di montaggio che ne ha pregiudicato il risultato. Secondo lo schema di Figura 2-1 sono state eseguite 5 prove valide per il calcolo del carico massimo stimato $\overline{F_{max}^-}$. Tali prove sono risultate valide anche per il calcolo di R_k .

La Figura 3-6 e la Figura 3-7 mostrano la condizione iniziale e finale di un dispositivo di collegamento sottoposto a prova.

3.1.1.2 Prove positive

Le prove 2MPPP sono state eseguite nel verso positivo dello spostamento (spostamento della traversa verso l'alto). Sono state eseguite sottoponendo il dispositivo di collegamento alle azioni riportate nello schema seguente, avendo imposto alla traversa della macchina a contatto con il traverso, uno spostamento verso l'alto (positivo).

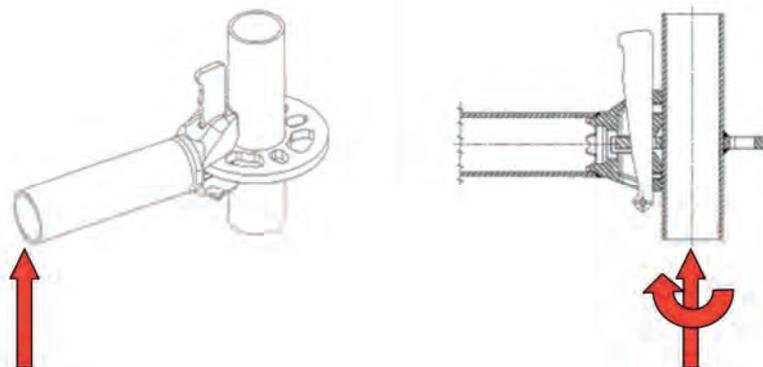


Figura 3-5: Schema di applicazione dello spostamento positivo e azioni al nodo

La velocità di spostamento è stata imposta pari a $v_s = 2$ mm/min.

Secondo lo schema di Figura 2-1 sono state eseguite 5 prove valide per il calcolo del carico massimo stimato $\overline{F_{max}^+}$. Tali prove sono risultate valide anche per il calcolo di R_k^+ .

3.1.2 Risultati sperimentali per le prove pilota

3.1.2.1 Sintesi dei risultati

Nella tabella seguente sono riassunte, per ogni prova eseguita, le informazioni relative a:

- Velocità di spostamento imposto v_s
- Carico massimo registrato F_{max}
- Velocità di carico massima raggiunta durante la prova v_{cmax}
- Velocità di carico limite v_{clim} secondo la formula (2.1.1-1)
- L'esito della verifica della condizione (2.1.1-1)

Tabella 1 - Sintesi dei risultati sperimentali per le prove pilota negative

Nome prova	Velocità di spostamento imposto	Carico massimo	Velocità di carico massima raggiunta	Velocità di carico limite	Verifica per la velocità di carico
	v	F_{max}	v_{cmax}	$v_{clim} = (0,25 F_{max})/min$	$v_{cmax} \leq v_{clim}$
	mm/min	kg _f	kg _f / min	kg _f / min	
2MNPP1	2	-128,44	12,59	32,11	SI
2MNPP2	2	-129,47	11,66	32,37	SI
2MNPP3	2	-125,24	8,98	31,31	SI
2MNPP4 ¹	2	-81,51	8,33	20,38	SI
2MNPP5	2	-144,41	11,7	36,10	SI
2MNPP6	2	-144,22	14,95	36,06	SI

Note: ⁽¹⁾ Prova non valida per difetto di montaggio

Tabella 2 - Sintesi dei risultati sperimentali per le prove pilota positive

Nome prova	Velocità di spostamento imposto	Carico massimo	Velocità di carico massima raggiunta	Velocità di carico limite	Verifica per la velocità di carico
	v	F_{max}	v_{cmax}	$v_{clim} = (0,25 F_{max})/min$	$v_{cmax} \leq v_{clim}$
	mm/min	kg _f	kg _f / min	kg _f / min	
2MPPP1	2	154,07	11,85	38,52	SI
2MPPP2	2	140,03	11,68	35,01	SI
2MPPP3	2	141,43	15,23	35,36	SI
2MPPP4	2	149,42	12,83	37,36	SI
2MPPP5	2	143,99	13,09	36,00	SI

Le Figure seguenti mostrano la condizione iniziale e finale in una prova pilota negativa e in una prova pilota positiva.



Figura 3-6: Prova pilota negativa. Foto inizio prova



Figura 3-7: Prova pilota negativa. Foto fine prova



Figura 3-8: Prova pilota positiva. Foto inizio prova



Figura 3-9: Prova pilota positiva. Foto fine prova

3.1.2.2 Grafici delle prove pilota negative

Si riportano nel seguito i grafici relativi alla prova 2MNPP1. Per i grafici relativi a tutte le prove eseguite si rimanda a [FCRS-017].

3.1.2.2.1 Prova 2MNPP1

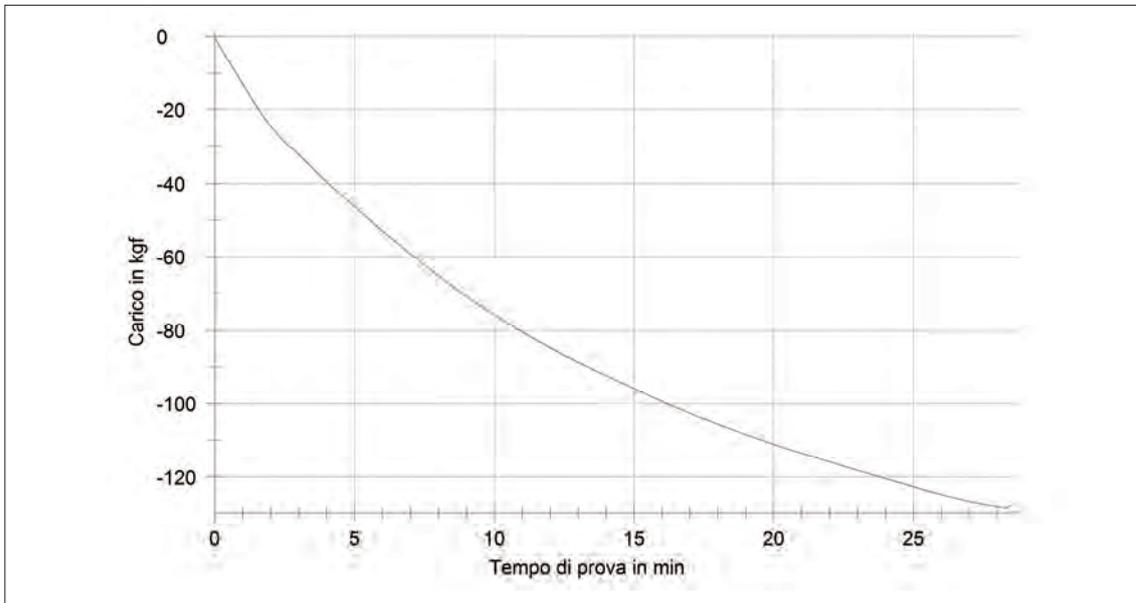


Figura 3-10 : Curva carico-tempo

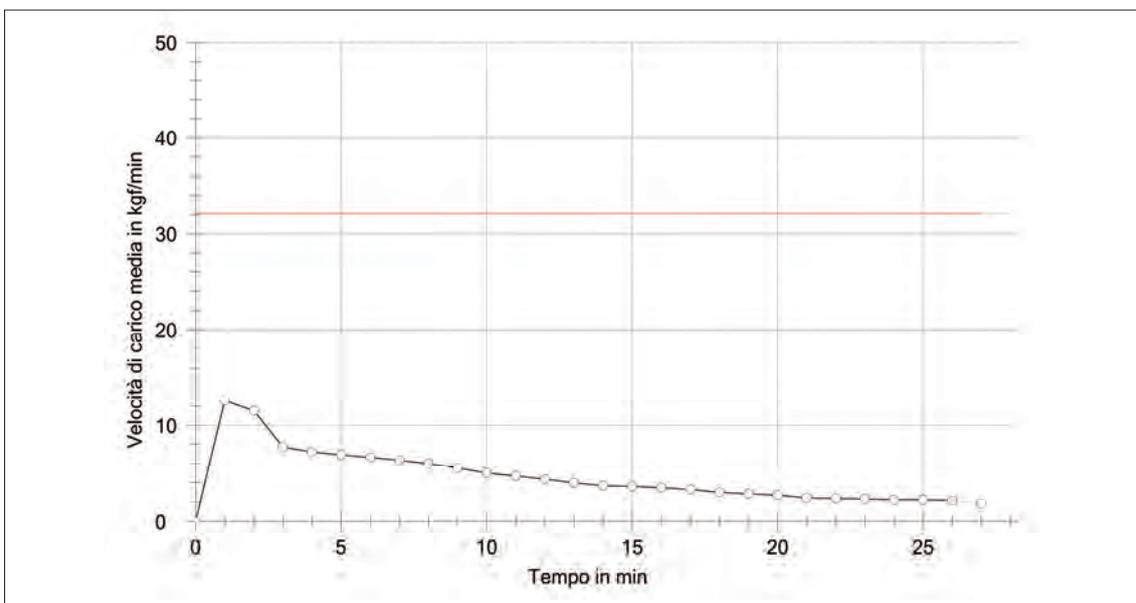


Figura 3-6 : Velocità di carico media (kg_f/min). Limite per la velocità di carico calcolato in base al massimo carico registrato.

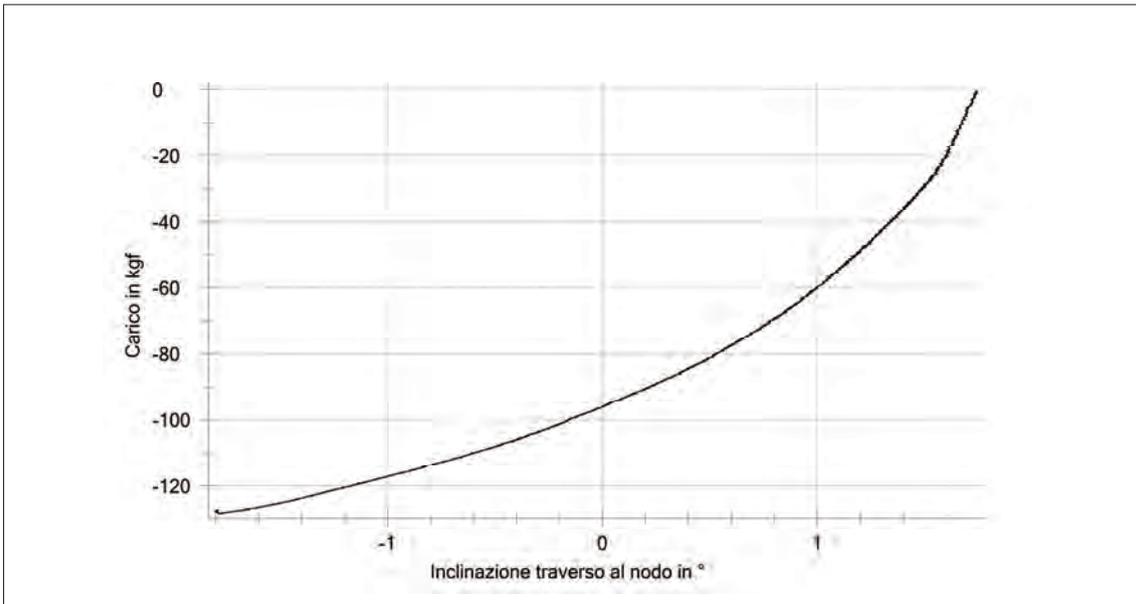


Figura 3-7 : Curva carico - inclinazione trasverso al nodo

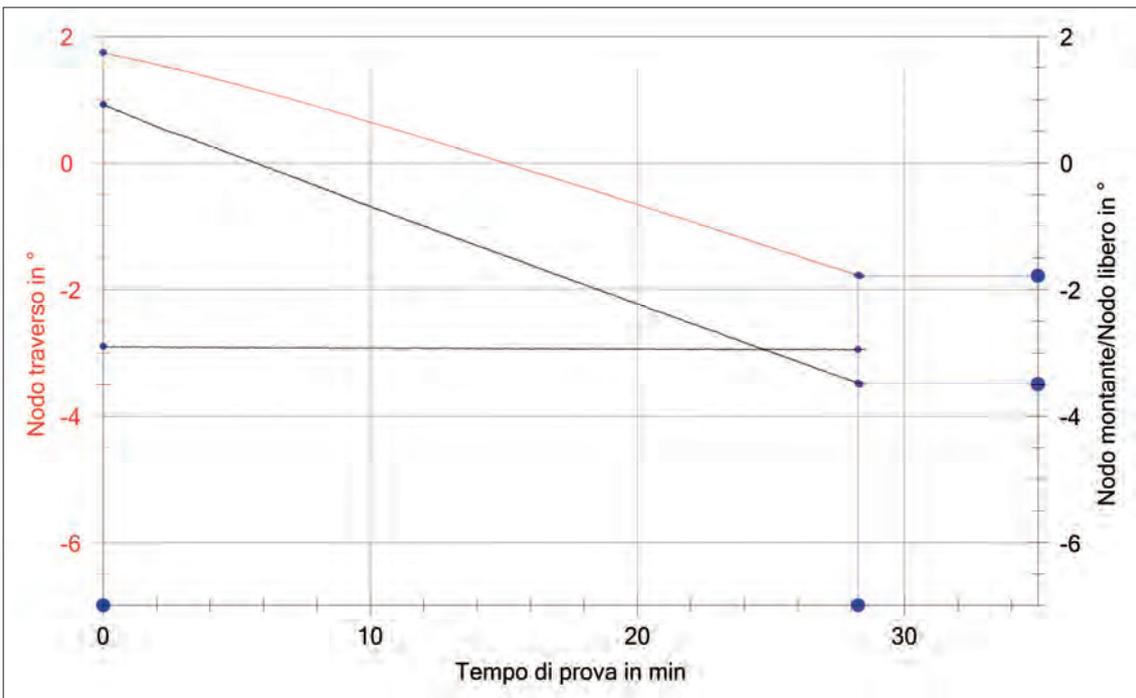


Figura 3-8 : Inclinazione nodo trasverso, nodo libero e nodo montante nel tempo

3.1.2.3 Grafici delle prove pilota positive

Si riportano nel seguito i grafici relativi alla prova 2MPPP1. Per i grafici relativi a tutte le prove eseguite si rimanda a [FCRS-017].

3.1.2.3.1 Prova 2MPPP1

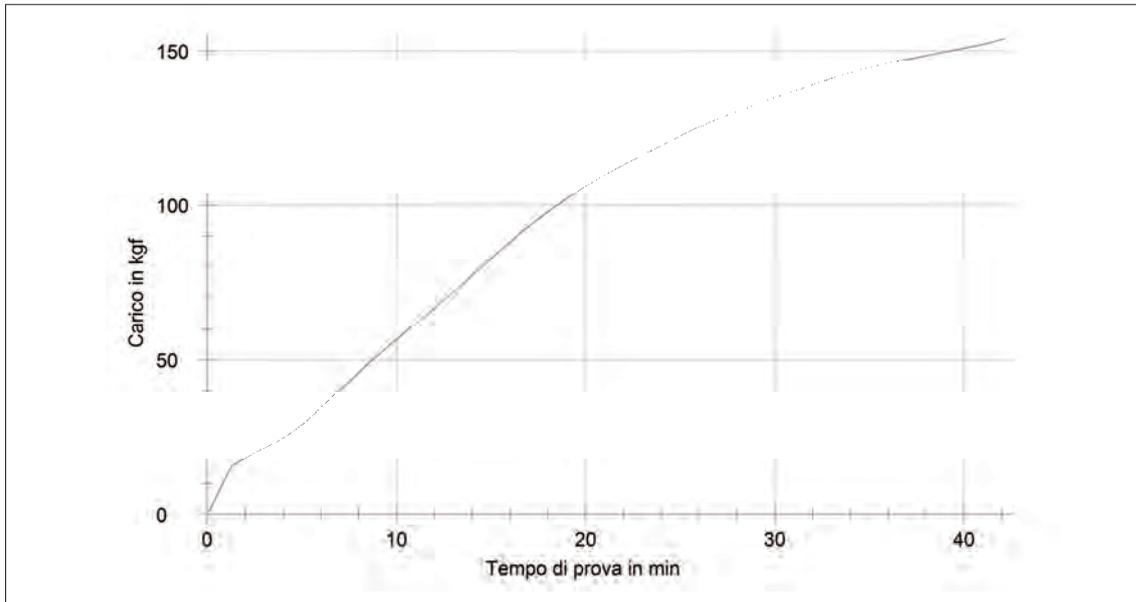


Figura 3-14 : Curva carico-tempo

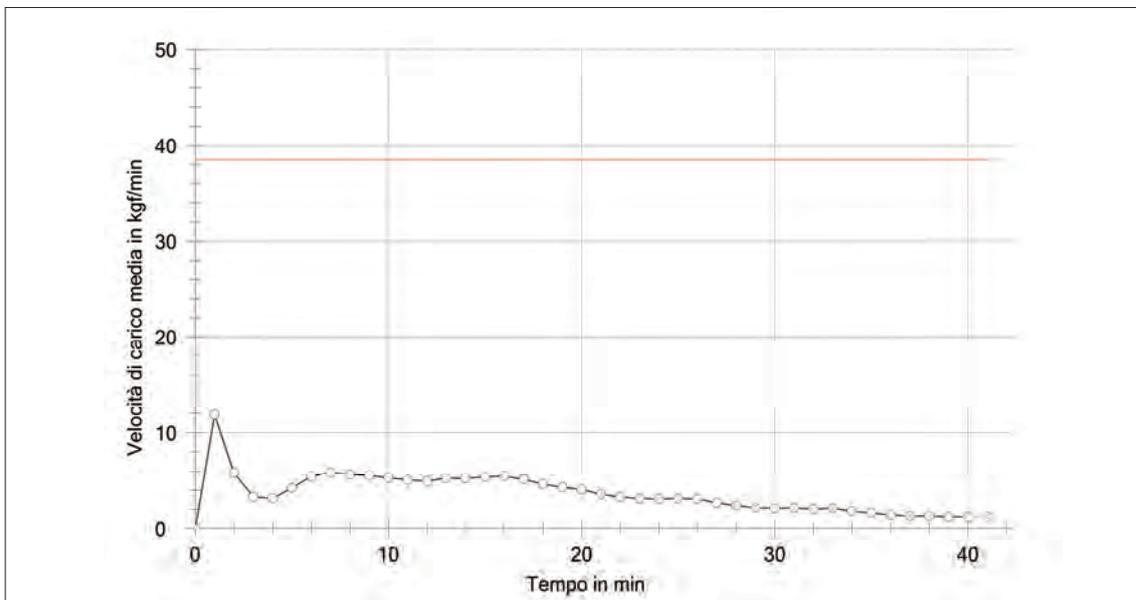


Figura 3-15 : Velocità di carico media (kg_f/min). Limite per la velocità di carico calcolato in base al massimo carico registrato

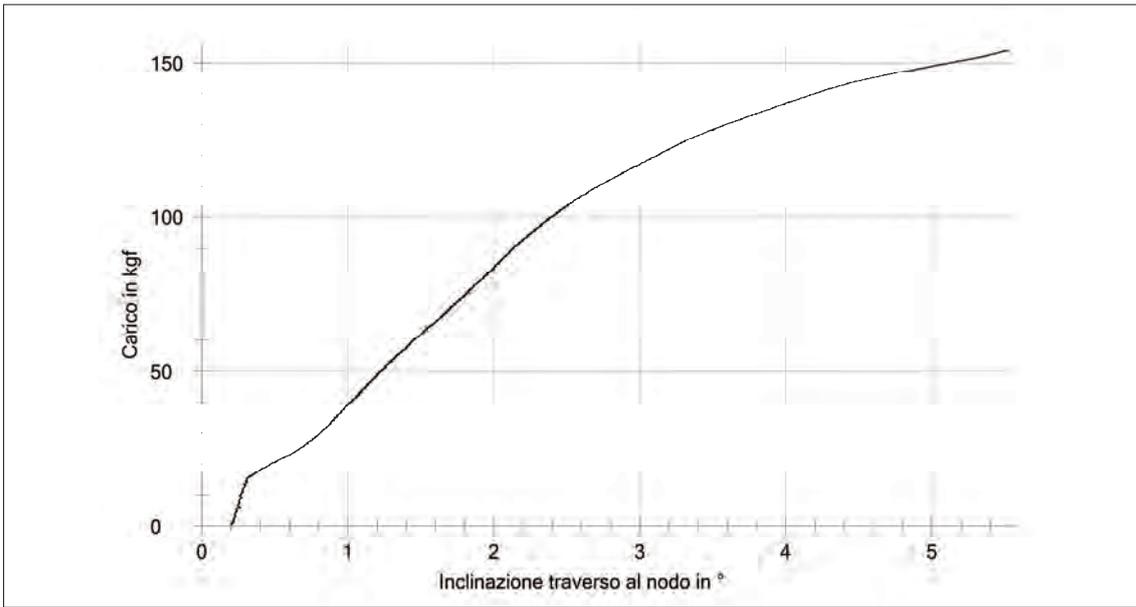


Figura 3-16 : Curva carico - inclinazione traverso al nodo

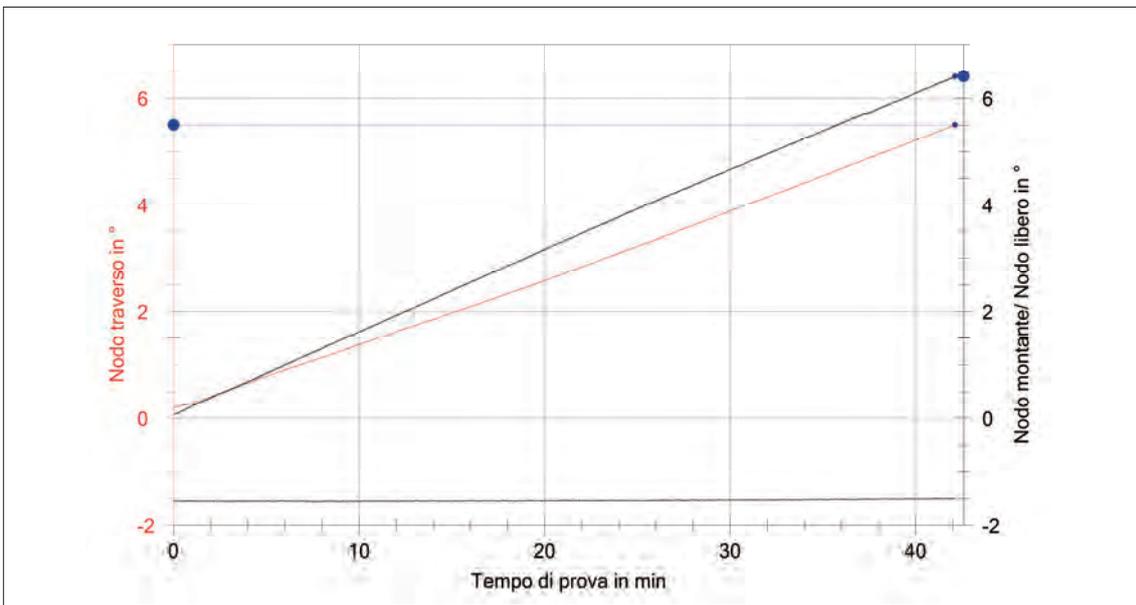


Figura 3-17 :Inclinazione nodo traverso, nodo libero e nodo montante nel tempo

3.1.2.4 Analisi dei risultati

Per le prove eseguite si ha analogo andamento della curva carico-tempo, con un tratto iniziale quasi lineare.

La rigidità iniziale, espressa in carico/min, risulta essere per le prove negative, compresa fra 9 e 15 kg_f/min; per le prove positive, compresa fra 11 e 16 kg_f/min.

Nel primo minuto di prova risulta soddisfatta la verifica della velocità di carico $v_{cmax} < v_{clim}$.

Per la valutazione del carico massimo stimato $\overline{F_{max}^-}$ risultano valide le prove 2MNPP1, 2MNPP2, 2MNPP3, 2MNPP5, 2MNPP6. Per la valutazione del carico massimo stimato $\overline{F_{max}^+}$ risultano valide le prove 2MPPP1, 2MPPP2, 2MPPP3, 2MPPP4, 2MPPP5.

L'inclinazione del traverso in corrispondenza dell'innesto al montante (cd. *Nodo traverso* nei grafici delle prove pilota) all'inizio della prova, è risultata diversa per ogni prova. In ogni prova è risultata diversa l'inclinazione iniziale del traverso in corrispondenza dell'innesto al montante (cd. *Nodo traverso* nei grafici delle prove pilota) e quella all'altra estremità (cd. *Nodo libero* nei grafici delle prove pilota).

L'inclinazione del montante in corrispondenza dell'innesto del traverso (cd. *Nodo montante*) è risultata costante durante ogni prova; il montante quindi non è influenzato dalla rotazione del traverso. Ne risulta che il sistema di vincolo del montante è efficace e la rotazione del *nodo traverso* rappresenta la rotazione relativa traverso-montante.

In ogni prova è evidente la differenza di rotazione (inclinazione rispetto alla inclinazione iniziale) fra il *nodo traverso* e il *nodo libero*. Le linee che rappresentano le due inclinazioni risultano infatti non parallele, con inclinazione maggiore del nodo libero per effetto della maggiore inflessione del traverso in prossimità del punto di applicazione del carico.

L'entità del carico registrato dalla cella di carico, in prossimità del nodo libero, è influenzato quindi sia dalla rigidità del nodo, sia dalla rigidità flessionale del traverso.

3.1.3 Stima del carico massimo stimato $\overline{F_{max}}$

La stima di $\overline{F_{max}}$ viene eseguita valutando statisticamente i carichi massimi ottenuti per ognuna delle prove eseguite.

Ipotizzando una distribuzione normale logaritmica dei carichi massimi ottenuti, si considera per $\overline{F_{max}}$ ($\overline{F_{max}^+}$ o $\overline{F_{max}^-}$) il valore caratteristico quale il quantile del 5% per un livello di confidenza del 75%.

Risulta, per prove negative, $\overline{F_{max}^-} = -113,42 \text{ kg}_f$

numero prove valide		n = 5		k _{sk} = 2,46				Carico massimo stimato
	Carico massimo							
Prove valide	$F_{max,j}$	$y_i = \ln(F_{max,j})$	$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$	$(y_i - \bar{y})^2$	s_y^2	$y_5 = \bar{y} - k_{sk} \cdot \sqrt{s_y^2}$	$\overline{F_{max}} = e^{y_5}$	
2MNPP1	-128,44	4,85546		0,00186				
2MNPP2	-129,47	4,86345		0,00124				
2MNPP3	-125,24	4,83023		0,00468				
2MNPP5	-144,41	4,97266		0,00548				
2MNPP6	-144,22	4,97134		0,00529				
			4,89863		0,00464	4,73112		-113,42
media	-134,36							

Risulta, per prove positive, $\overline{F_{max}^+} = +132,09 \text{ kg}_f$

numero prove valide		n = 5		k _{sk} = 2,46				Carico massimo stimato
	Carico massimo							
Prove valide	$F_{max,j}$	$y_i = \ln(F_{max,j})$	$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$	$(y_i - \bar{y})^2$	s_y^2	$y_5 = \bar{y} - k_{sk} \cdot \sqrt{s_y^2}$	$\overline{F_{max}} = e^{y_5}$	
2MPPP1	+154,07	5,037407		0,00312				
2MPPP2	+140,03	4,941857		0,00157				
2MPPP3	+141,43	4,951805		0,00088				
2MPPP4	+149,42	5,006761		0,00064				
2MPPP5	+143,99	4,969744		0,00014				
			4,98151		0,00159	4,88346		+132,09
media	+145,79							

Il valore del carico massimo stimato impone che la velocità di carico massima per le ulteriori prove pilota (prove per determinare R_k^- e R_k^+) dovrà essere:

- per prove negative:

$$v_c^- \leq 0,25 \cdot \frac{\overline{F_{max}^-}}{\min} = 0,25 \cdot 113,42 \frac{\text{kg}_f}{\min} = 28,36 \frac{\text{kg}_f}{\min} = v_{clim}^-$$

(3.1.3-1)

- per prove positive:

$$v_c^+ \leq 0,25 \cdot \frac{\overline{F_{max}^+}}{\min} = 0,25 \cdot 132,09 \frac{kg_f}{\min} = 33,02 \frac{kg_f}{\min} = \overline{v_{clim}^+} \quad (3.1.3-2)$$

3.1.4 Stima di R_k^- e di R_k^+

Nelle prove eseguite per il calcolo di $\overline{F_{max}^-}$ e di $\overline{F_{max}^+}$, il massimo valore della velocità di carico risulta inferiore ai valori di cui alla (3.1.3-1 e alla (3.1.3-2).

Ne consegue (vedi diagrammi in Figura 2-1 e in Figura 2-3):

$$R_k^- = \overline{F_{max}^-} = - 113,42 \text{ kg}_f$$

$$R_k^+ = \overline{F_{max}^+} = + 132,09 \text{ kg}_f$$

3.1.5 Stima di c_{full}^- e di c_{full}^+

Risulta:

$$c_{full}^- = \frac{R_k^-}{\gamma_M \cdot \gamma_F} = - \frac{113,42}{1,1 \cdot 1,5} = -68,74 \text{ kg}_f$$

$$c_{full}^+ = \frac{R_k^+}{\gamma_M \cdot \gamma_F} = + \frac{132,09}{1,1 \cdot 1,5} = +80,04 \text{ kg}_f$$

3.2 Prove di rigidità e resistenza cicliche

Determinati i valori di R_k^- e R_k^+ e stimata la corretta velocità di spostamento da imporre (vedi 3.1.4 di [FCRS-017]), sono state eseguite le prove di rigidità e resistenza cicliche.

Sono state dapprima eseguite le prove negative (3_5Cicl N); successivamente le prove positive (3_5Cicl P).

3.2.1 Disposizione e procedimento di prova

La prova è stata eseguita in controllo di spostamento, imponendo uno spostamento verticale della traversa della macchina con velocità costante pari a 3,5mm/min.

Per lo schema di prova, la strumentazione utilizzata e i tipi di grafici visualizzati in real time, vedasi il paragrafo 3.1.

Il grafico della velocità di carico istantanea ha permesso di riconoscere la condizione di rottura, quale il raggiungimento di una velocità di carico prossima allo zero.

Alla fine della prova, noto il carico massimo raggiunto, è stato possibile procedere alla validazione della prova stessa, confrontando il massimo valore della velocità di carico con il limite ammesso.

Con la velocità di spostamento imposto $v_s = 3,5 \text{ mm/min}$ tutte le prove, negative e positive, sono risultate valide.

3.2.1.1 Prove negative

Le prove cicliche negative (3_5CiclN) sono state eseguite partendo dalla condizione iniziale (t_0 , F_0 , φ_0) e imponendo alla traversa della macchina uno spostamento iniziale verso il basso (fase di carico).

Sono stati quindi eseguiti (vedi Figura 3-18):

- 3 cicli di carico nel range ; $\left[-1,0 \cdot \frac{R_k^-}{\gamma_M \cdot \gamma_F} ; +1,0 \cdot \frac{R_k^+}{\gamma_M \cdot \gamma_F} \right] = [-68,74 ; +80,04] \text{kg}_f$;
- 1 fase di scarico a zero: $+ [80,04 ; 0] \text{kg}_f$
- fasi di carico e scarico a zero fino al raggiungimento del collasso.

Le fasi di carico sono di ampiezza crescente con incremento pari a $10\%R_k^- = 11,34 \text{ kg}_f$ (vedi [FCRS-017]).

La prova risulta valida se si raggiunge almeno il quarto incremento di carico prima del collasso e se è soddisfatta la condizione (2.2.1-1

La Figura 3-6 e la Figura 3-7 mostrano la condizione iniziale e finale di un dispositivo di collegamento sottoposto a prova.

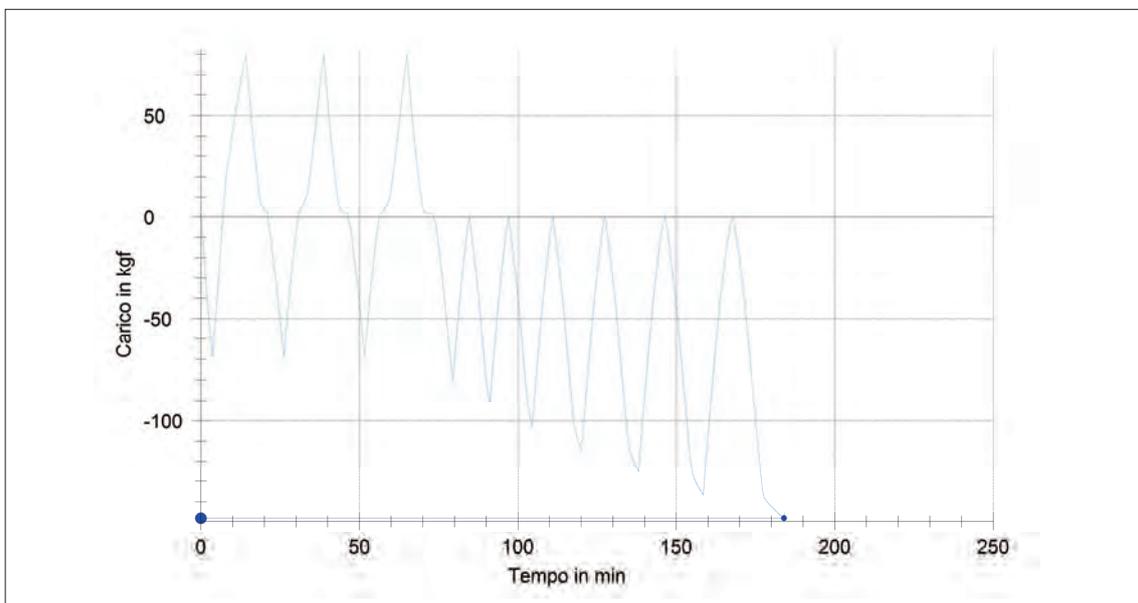


Figura 3-18 : Esempio di grafico *Carico - tempo* in una prova di rigidità e resistenza ciclica negativa

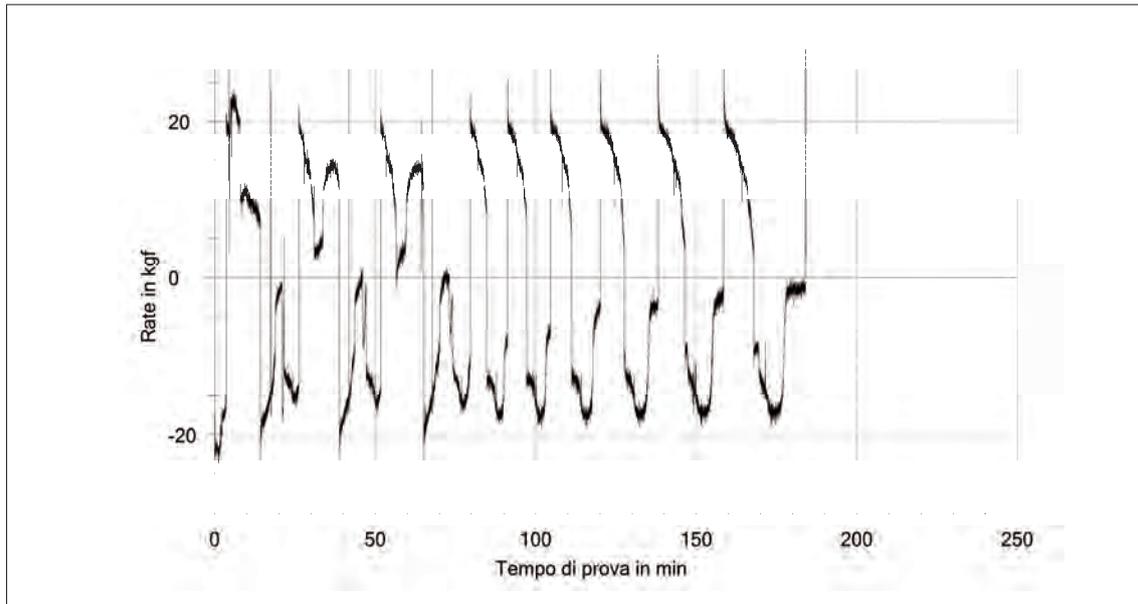


Figura 3-19 : Esempio di grafico *Velocità di carico (Rate) - tempo* in una prova di rigidità e resistenza ciclica negativa. La prova viene terminata quando la velocità di carico diminuisce al valore di circa 2kg_f/min . Tale valore risulta circa pari al 10% del valore massimo (circa 25 kg_f/min) raggiunto nel primo ciclo di carico.



Figura 3-20 : Foto inizio prova

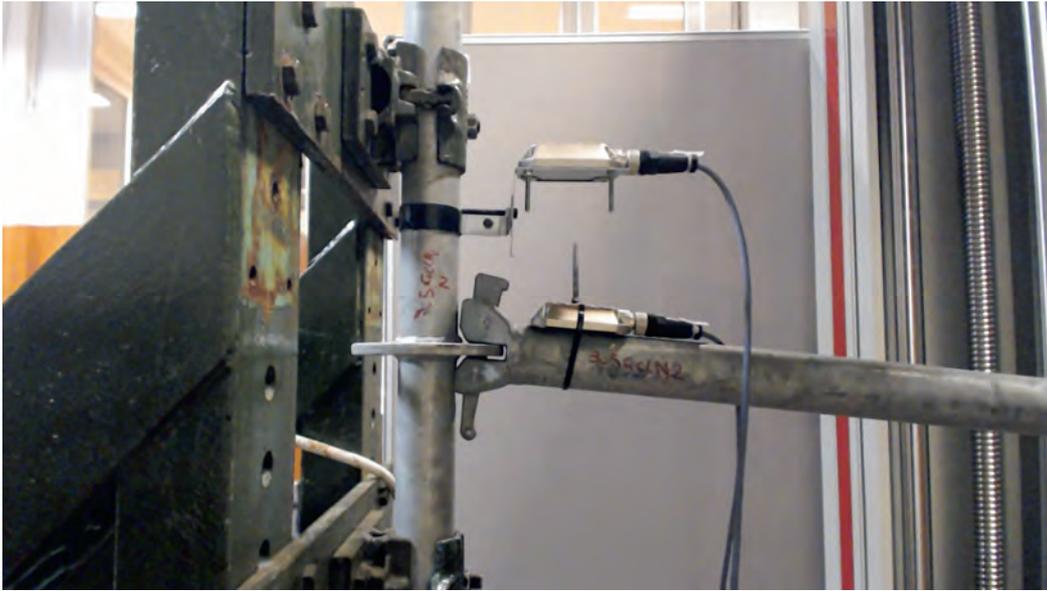


Figura 3-21 : Foto inizio prova

3.2.1.2 Prove positive

Le prove cicliche positive (3_5CiclP) sono state eseguite partendo dalla condizione iniziale ($t_0; F_0; \varphi_0$) e imponendo alla traversa della macchina uno spostamento iniziale verso l'alto (fase di carico), Sono stati quindi eseguiti (vedi Figura 3-22):

- 3 cicli di carico nel range, $\left[+1,0 \cdot \frac{R_k^+}{\gamma_M \cdot \gamma_F}; -1,0 \cdot \frac{R_k^-}{\gamma_M \cdot \gamma_F} \right] = [+80,04; -68,74] kg_f$;
- 1 fase di scarico a zero: $[-68,74; 0] kg_f$
- fasi di carico e scarico a zero fino al raggiungimento del collasso.

Le fasi di carico sono di ampiezza crescente con incremento pari a $10\%R_k^+ = 13,21 kg_f$.

La prova risulta valida se si raggiunge almeno il quarto incremento di carico prima del collasso e se è soddisfatta la condizione (2.2.1-1

La Figura 3-74 e la Figura 3-75 mostrano la condizione iniziale e finale di un dispositivo di collegamento sottoposto a prova.

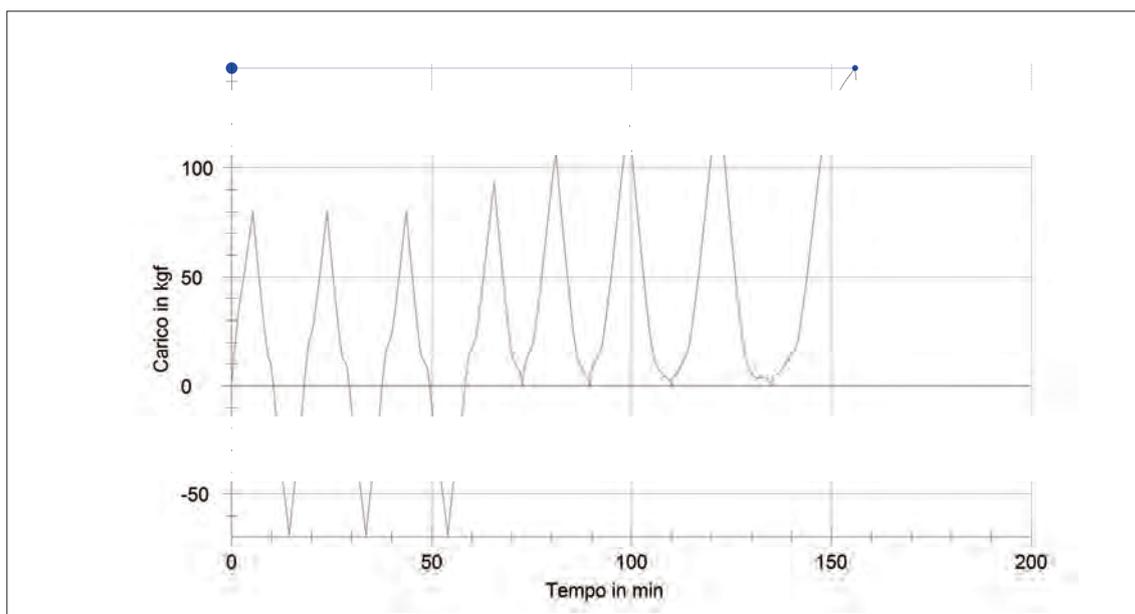


Figura 3-22: Esempio di grafico *Carico - tempo* in una prova di rigidità e resistenza ciclica positiva

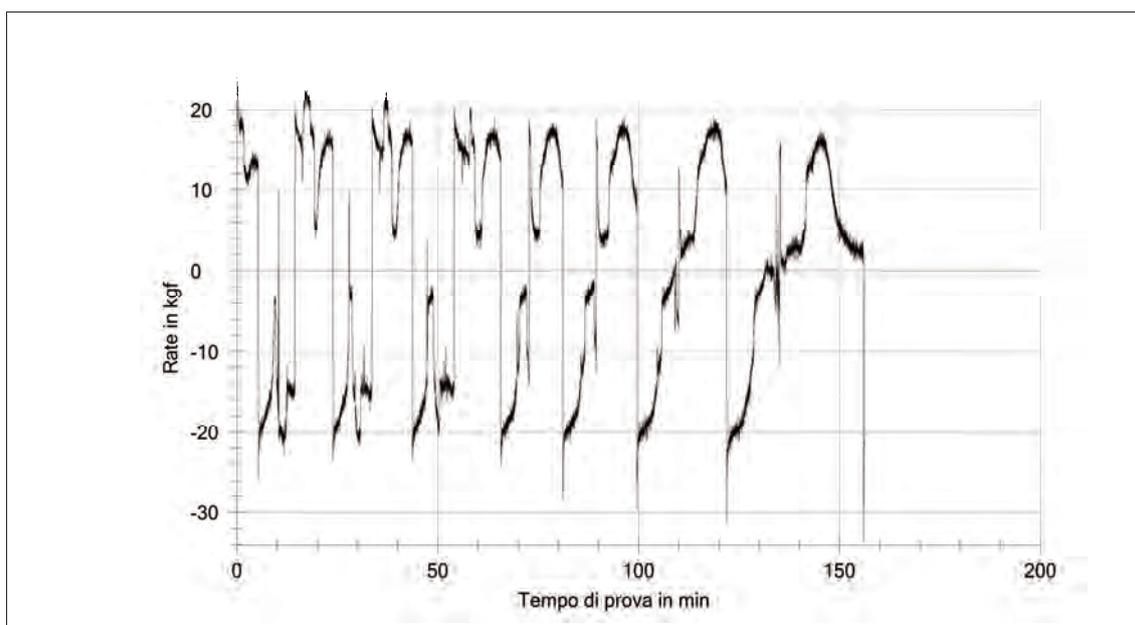


Figura 3-9: Esempio di grafico *Velocità di carico (Rate) - tempo* in una prova di rigidità e resistenza ciclica positiva. La prova viene terminata quando la velocità di carico diminuisce al valore di circa $2\text{ kg}_f/\text{min}$. Tale valore risulta circa pari al 10% del valore massimo (circa $25\text{ kg}_f/\text{min}$) raggiunto nel primo ciclo di carico.

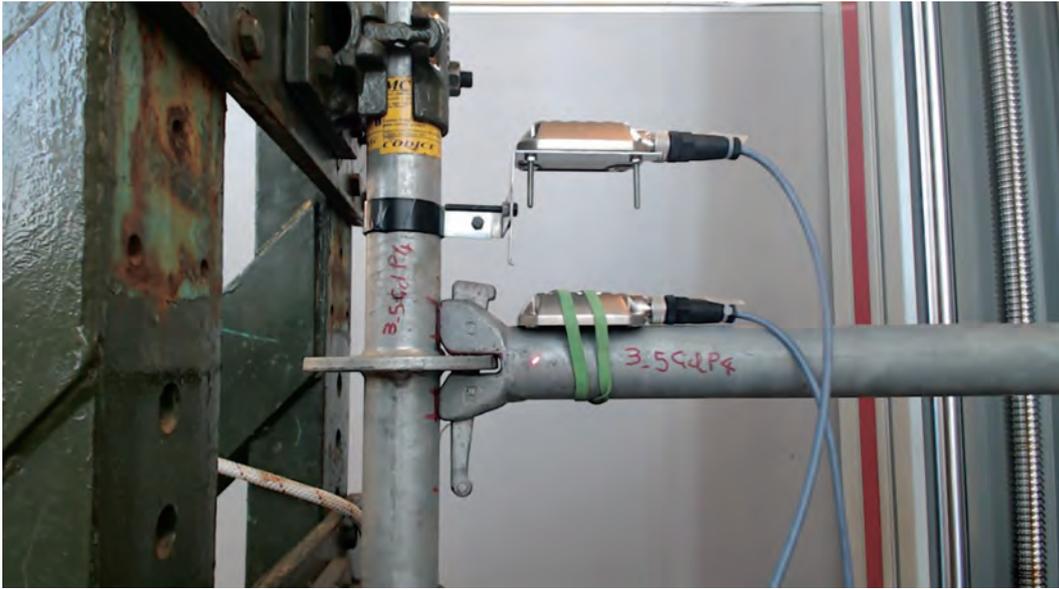


Figura 3-24 : Foto inizio prova

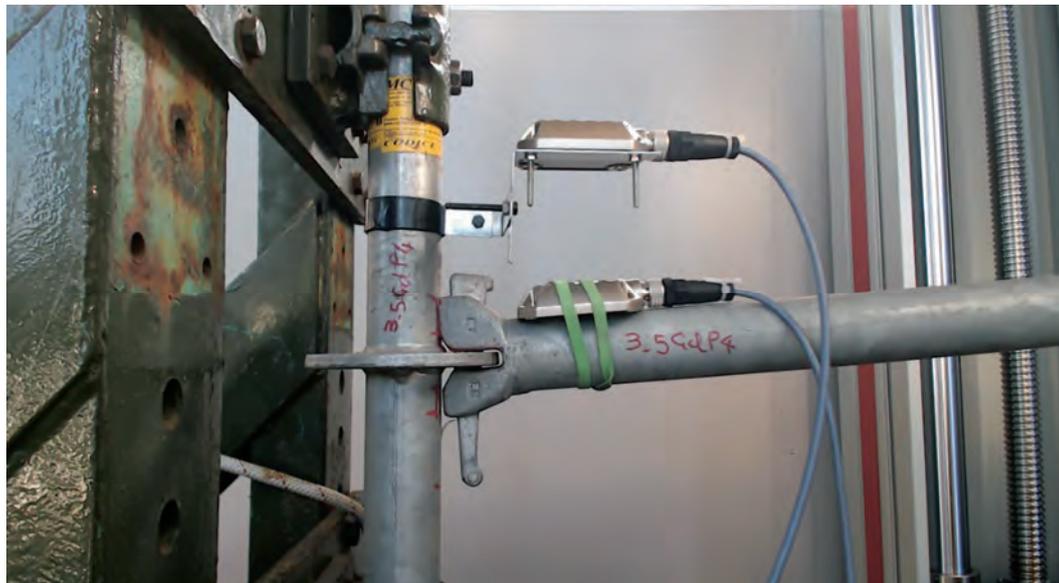


Figura 3-25 : Foto fine prova

3.2.2 Risultati sperimentali

3.2.2.1 Sintesi dei risultati

Nella tabella seguente sono riassunte, per ogni prova eseguita, le informazioni relative a:

- Diametro esterno del montante d

- Distanza del punto di applicazione del carico dal montante a
- Velocità di spostamento imposto v_s
- Carico massimo registrato F_{max}
- Calcolo del momento massimo M_{max} rispetto all'asse del montante
- Velocità di carico massima raggiunta durante la prova v_{cmax}
- Velocità di carico limite v_{clim}
- Velocità di carico limite v_{clim}
- L'esito della verifica della condizione per la velocità di carico massima.

d =	48.3 mm	Braccio		Carico massimo	Momento massimo (asse montante)	Velocità di carico massima raggiunta	Velocità di carico limite (in base al carico massimo)	Verifica per la velocità di carico	Carico massimo stimato dalle prove pilota	Velocità di carico limite (in base al carico massimo stimato)	Verifica per la velocità di carico
a =	805 mm	$b = a + d/2$		F_{max}	M_{max}	v_{cmax}	$v_{elim} = (0,25 F_{max})/min$	$v_{cmax} \leq v_{elim}$	F_{max}	$v_{elim} = (0,25 F_{max})/min$	$v_{cmax} \leq v_{elim}$
$v_e =$	3.5 mm/min	mm	mm	kgF	kgF m / kNm	kgF / min	kgF / min		kgF	kgF / min	
Nome prova											
3.5 CicIN1		829.15		-135.00	-111.94 -1.10	28.32	33.75	SI	-113.42	28.36	SI
3.5 CicIN2		829.15		-148.11	-122.81 -1.20	24.47	37.03	SI			SI
3.5 CicIN3		829.15		-141.15	-117.03 -1.15	24.3	35.29	SI			SI
3.5 CicIN4		829.15		-146.67	-121.61 -1.19	25.38	36.87	SI			SI
3.5 CicIN5		829.15		-148.06	-122.76 -1.20	24.27	37.02	SI			SI

Tabella 3 Sintesi dei risultati sperimentali per le prove di rigidezza e resistenza cicliche negative

d =	48.3 mm	Braccio		Carico massimo	Momento massimo (asse montante)	Velocità di carico massima raggiunta	Velocità di carico limite (in base al carico massimo)	Verifica per la velocità di carico	Carico massimo stimato dalle prove pilota	Velocità di carico limite (in base al carico massimo stimato)	Verifica per la velocità di carico
a =	805 mm	$b = a + d/2$		F_{max}	M_{max}	v_{cmax}	$v_{elim} = (0,25 F_{max})/min$	$v_{cmax} \leq v_{elim}$	F_{max}	$v_{elim} = (0,25 F_{max})/min$	$v_{cmax} \leq v_{elim}$
$v_e =$	3.5 mm/min	mm	mm	kgF	kgF m / kNm	kgF / min	kgF / min		kgF	kgF / min	
Nome prova											
3.5 CicIN1		829.15		-135.00	-111.94 -1.10	28.32	33.75	SI	-113.42	28.36	SI
3.5 CicIN2		829.15		-148.11	-122.81 -1.20	24.47	37.03	SI			SI
3.5 CicIN3		829.15		-141.15	-117.03 -1.15	24.3	35.29	SI			SI
3.5 CicIN4		829.15		-146.67	-121.61 -1.19	25.38	36.87	SI			SI
3.5 CicIN5		829.15		-148.06	-122.76 -1.20	24.27	37.02	SI			SI

Tabella 4 Sintesi dei risultati sperimentali per le prove di rigidezza e resistenza cicliche positive

3.2.2.2 Grafici delle prove negative

Si riportano nel seguito i grafici relativi alla prova 3_5CiclN2. Per i grafici relativi a tutte le prove eseguite si rimanda a [CFRS-016].

3.2.2.2.1 Prove negative

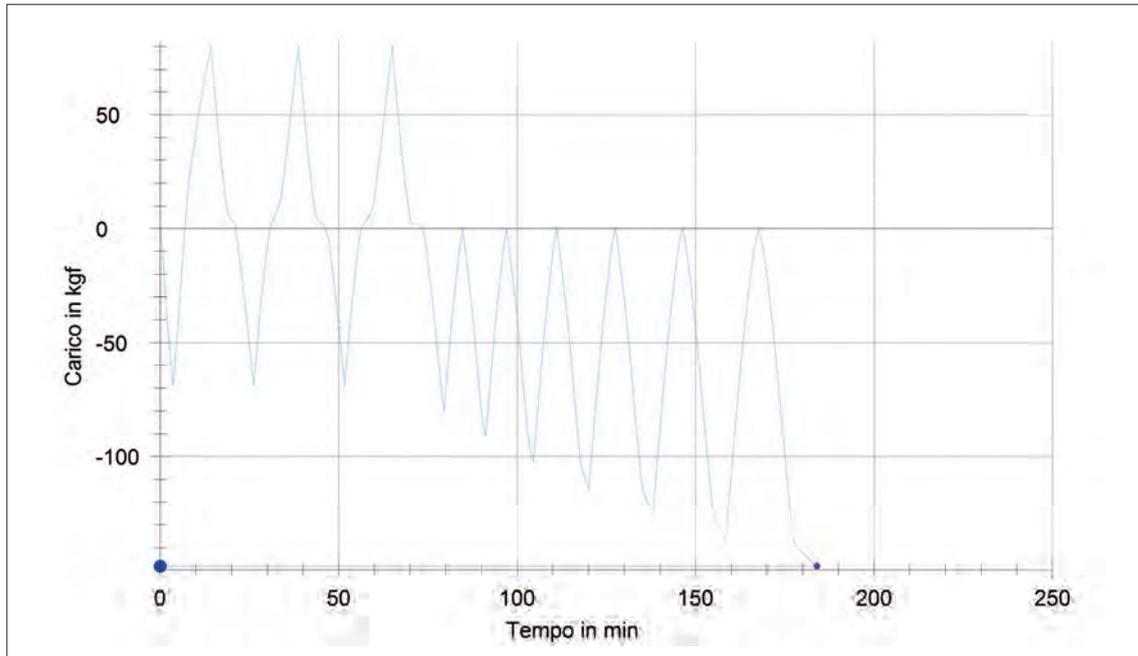


Figura 3-26 : Curva carico-tempo.

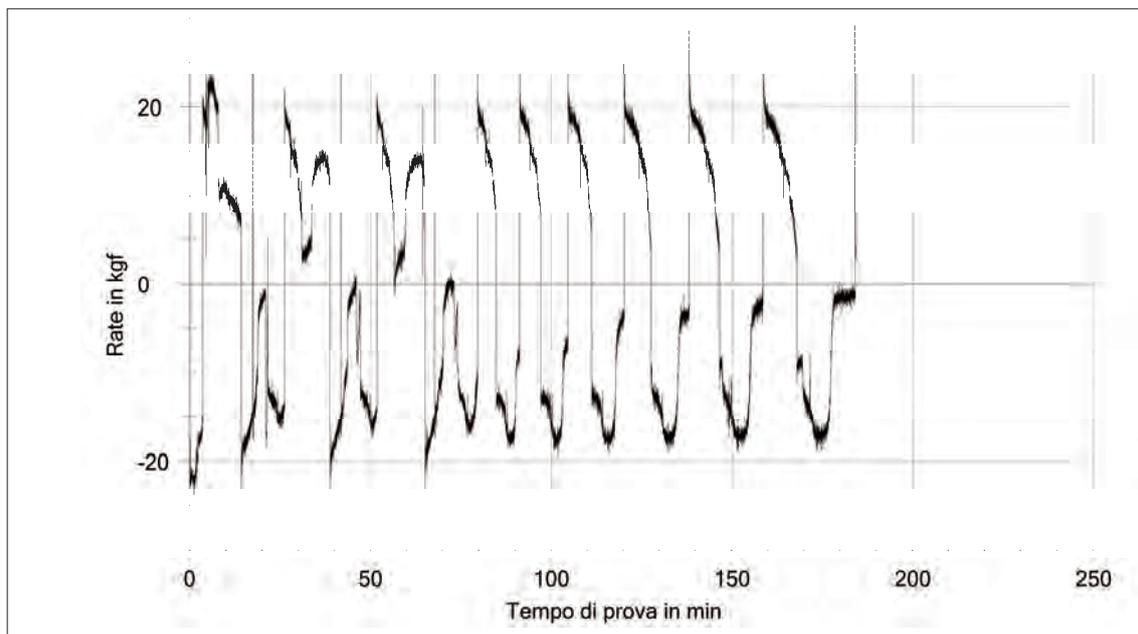


Figura 3-27 : Velocità di carico istantanea (kg/min).

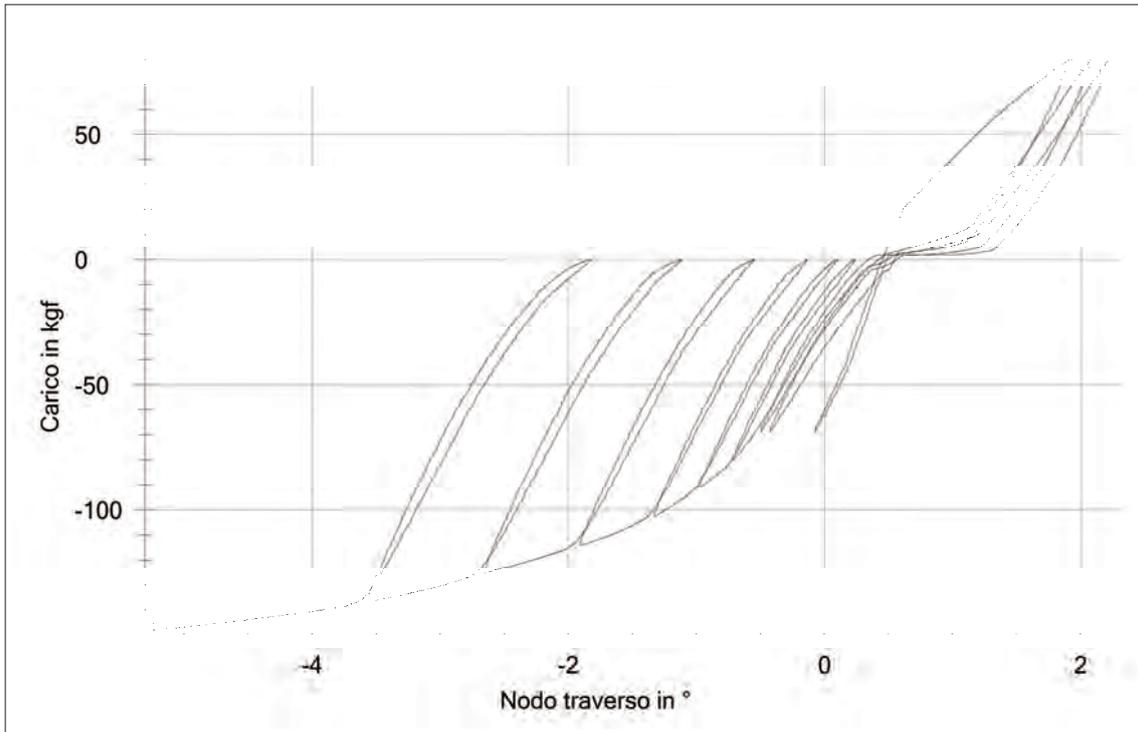


Figura 3-28 : Curva carico - inclinazione traverso al nodo

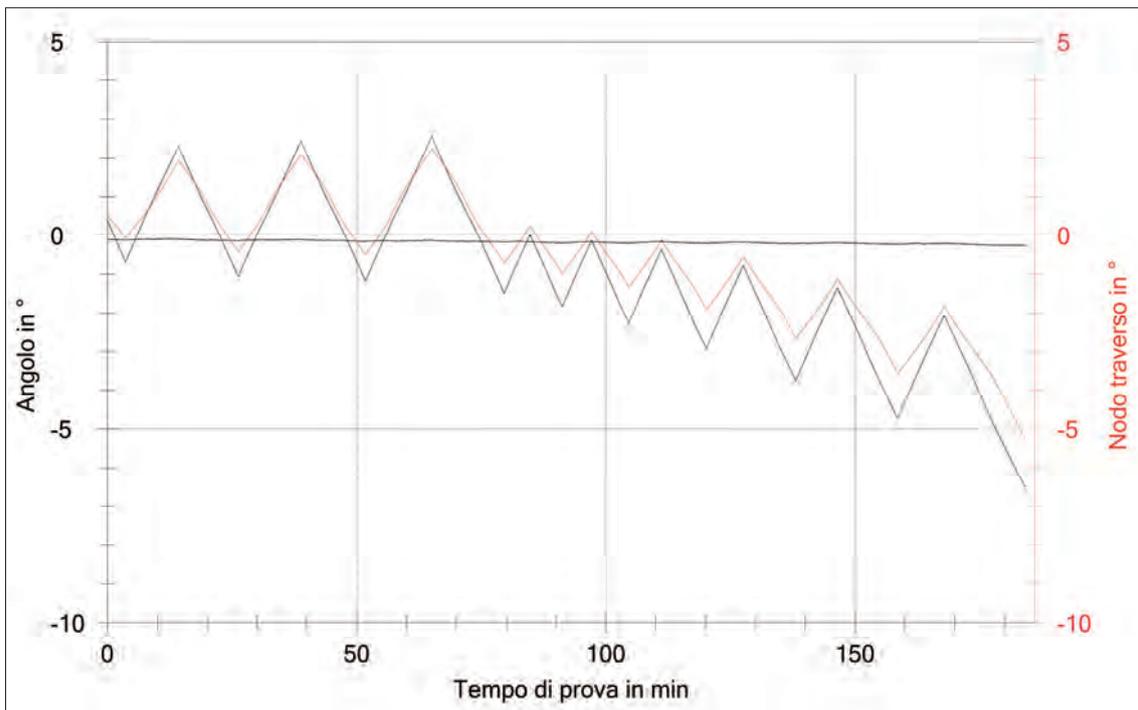


Figura 3-29 : Inclinazione nodo traverso, nodo libero e nodo montante nel tempo

3.2.2.3 Grafici delle prove positive

Si riportano nel seguito i grafici relativi alla prova 3_5CiclP4. Per i grafici relativi a tutte le prove eseguite si rimanda a [FCRS-017].

3.2.2.3.1 Prova 3_5CiclP4:

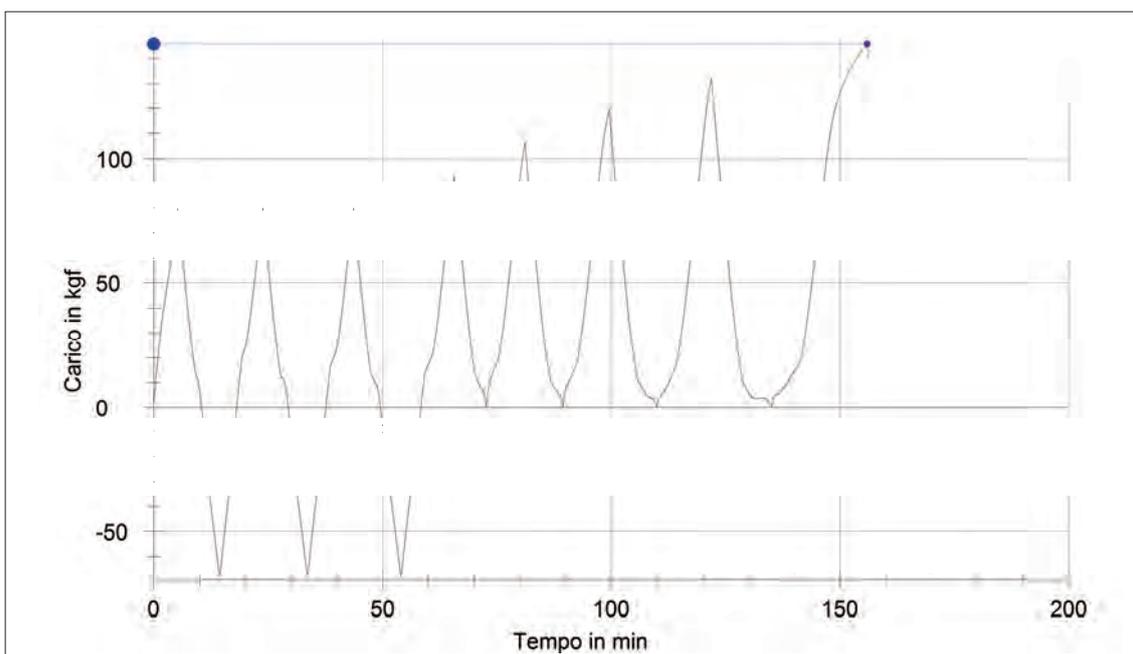


Figura 3-30 : Curva carico-tempo.

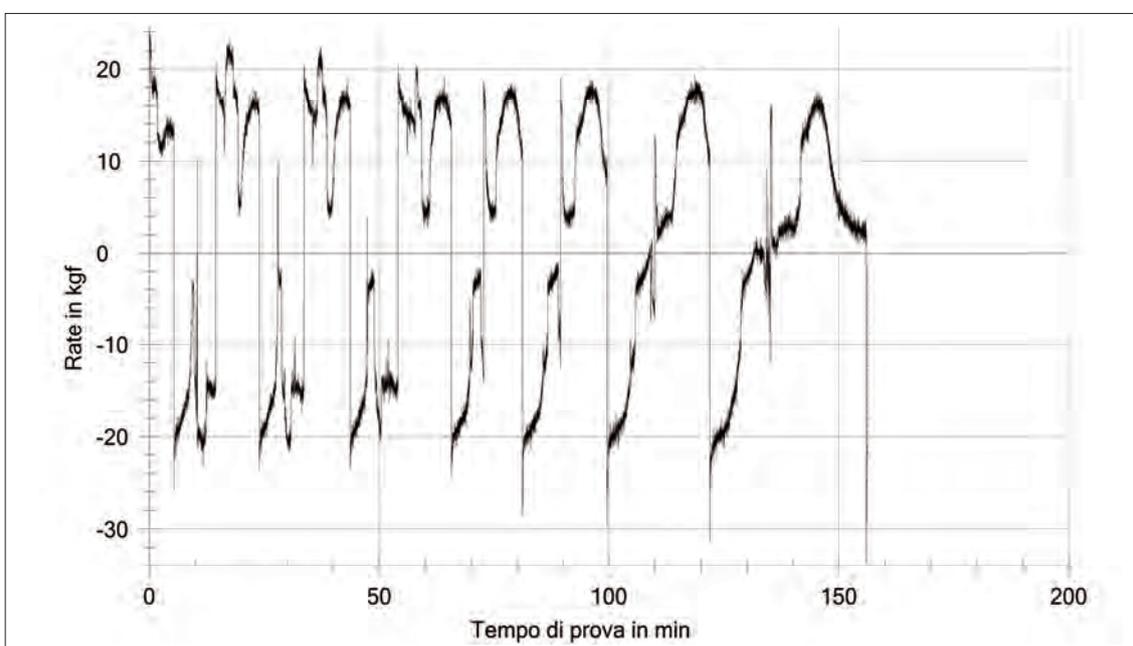


Figura 3-31 :Velocità di carico istantanea (kg/min).

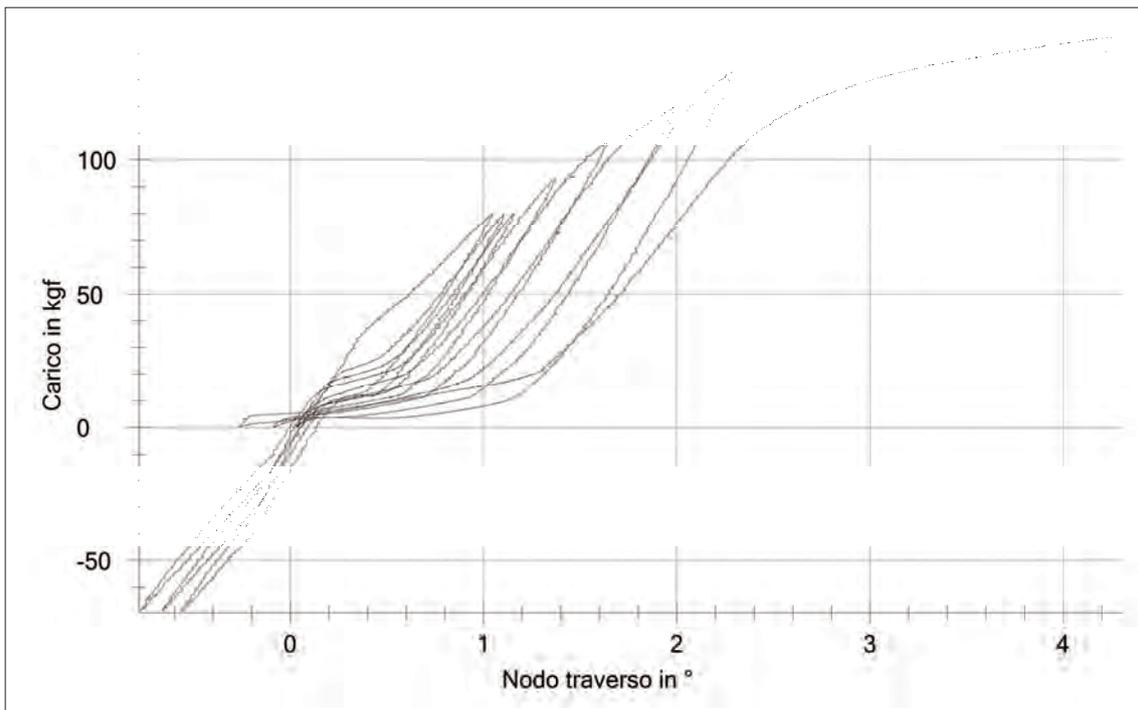


Figura 3-32 : Curva carico - inclinazione traverso al nodo

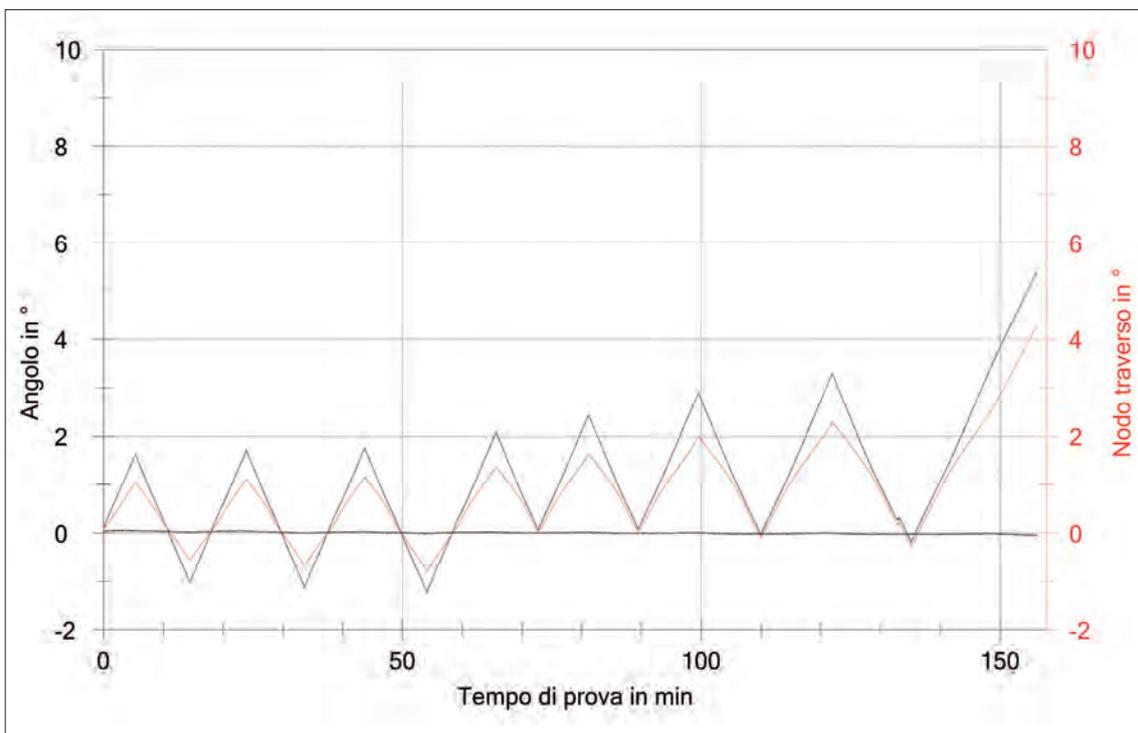


Figura 3-33 : Inclinazione nodo traverso, nodo libero e nodo montante nel tempo

3.2.3 Analisi dei risultati

In tutte le prove, positive e negative, la velocità di carico massima raggiunta risulta inferiore al limite calcolato in base alle prove pilota.

Durante ogni prova, l'inclinazione del montante in corrispondenza dell'innesto del traverso (cd Nodo montante) è risultata costante per ogni fase di carico e scarico con variazioni trascurabili tra le due fasi rispetto alla inclinazione del cosiddetto nodo traverso. Il montante quindi non è influenzato dalla rotazione del traverso. Ne risulta che il sistema di vincolo del montante è efficace e la rotazione del *nodo traverso* rappresenta la rotazione relativa traverso-montante.

In ogni prova è evidente la differenza di rotazione (inclinazione rispetto alla inclinazione iniziale) fra il nodo traverso e il nodo libero. Le linee che rappresentano le due inclinazioni risultano infatti non parallele, con inclinazione maggiore del nodo libero per effetto della maggiore inflessione del traverso in prossimità del punto di applicazione del carico.

L'entità del carico registrato dalla cella di carico, in prossimità del nodo libero, è influenzato quindi sia dalla rigidità del nodo, sia dalla rigidità flessionale del traverso.

In tutte le prove negative, ad esclusione della prima, già dal primo ciclo ($-c_{full}$; $+c_{full}$) si assiste ad un appiattimento della curva carico tempo per valori poco maggiori dello carico nullo (vedi Figura 3-34).

Durante la prova è stato osservato che ciò corrisponde ad un allentamento del cuneo.

Per effetto della inversione dello spostamento della traversa, dal basso verso l'alto, ad un certo punto il cuneo tende a sollevarsi e ad allentarsi. Si assiste quindi alla rotazione del traverso senza che il nodo opponga resistenza; la cella di carico rileva il carico costante necessario a sostenere il peso del traverso.

Nelle prove negative tale appiattimento non si osserva oltre la fase ciclica.

Al contrario nelle prove positive (vedi Figura 3-35), tale fenomeno è presente anche oltre la fase ciclica, e amplificato per effetto della maggiore entità dello spostamento in direzione positiva (verso l'alto).

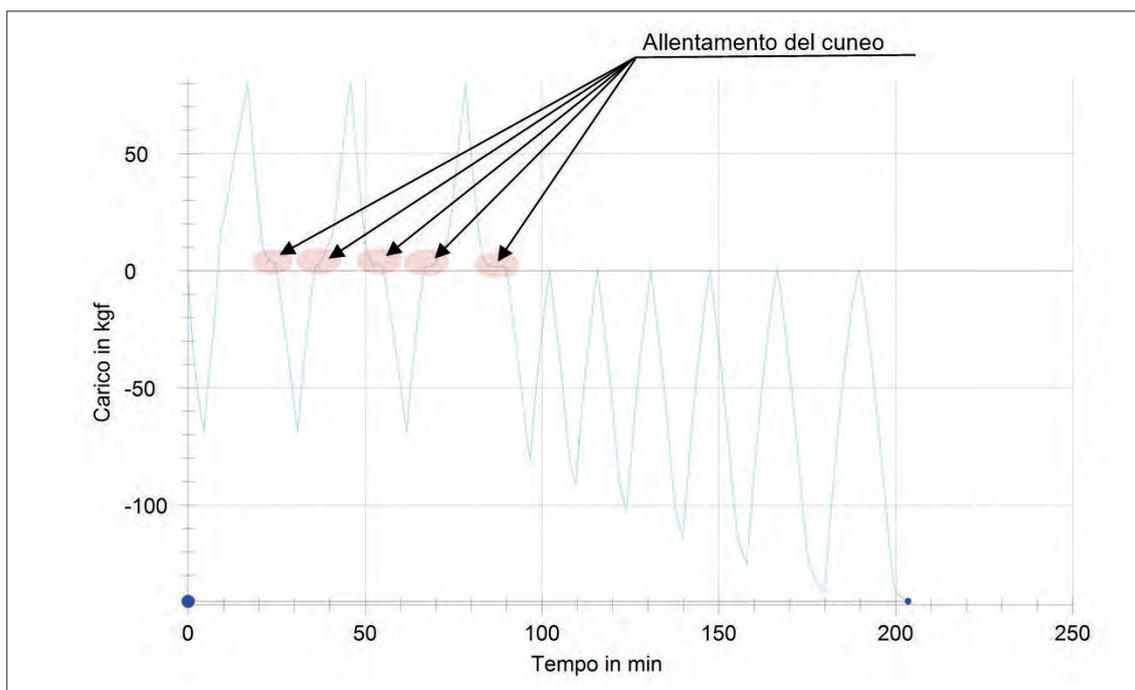


Figura 3-34 Curva carico tempo in una prova di rigidezza e resistenza ciclica negativa. Individuazione delle zone in cui la curva si appiattisce. Ciò corrisponde all'allentamento del cuneo

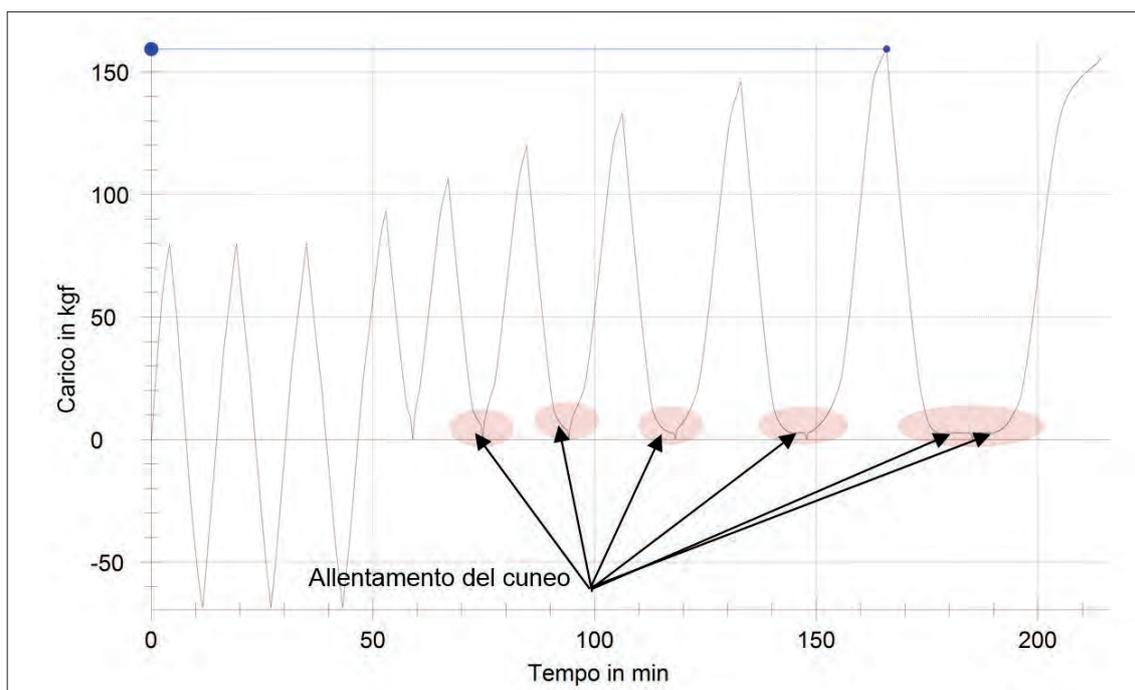


Figura 3-35 Curva carico tempo in una prova di rigidezza e resistenza ciclica positiva. Individuazione delle zone in cui la curva si appiattisce. Ciò corrisponde all'allentamento del cuneo

4. Conclusioni

Le prove di rigidezza e resistenza sui dispositivi di collegamento montante-traverso nei ponteggi di facciata realizzati con sistemi modulari devono essere eseguite rispettando i requisiti riportati nella UNI EN 12810-2 e nella UNI EN 12811-3.

Essi risultano generici e riguardano le prove di carico su configurazioni e componenti di attrezzature provvisorie di lavoro in generale.

Nel presente studio è stata dunque proposta una metodologia per la valutazione del dispositivo di collegamento montante traverso, compatibile con i requisiti generali imposti dalla UNI EN 12811-3:2005.

Lo studio comprende una fase analitica e una fase sperimentale.

Secondo la metodologia, prima della esecuzione delle prove di rigidezza e resistenza è necessaria una fase preliminare per determinare i parametri fondamentali utili alla esecuzione delle prove stesse. Tale obiettivo si raggiunge attraverso l'esecuzione di prove cosiddette pilota per le quali è stata messa a punto una procedura mirata.

La procedura impostata per le prove pilota rispetta tutti i requisiti generali per le prove di carico imposti dalla UNI EN 12811-3.

La procedura fornisce tutte le indicazioni per la determinazione della corretta velocità di spostamento v_s da imporre nelle prove sperimentali e di R_k attraverso la valutazione del *carico massimo stimato* $\left| \overline{F_{max}} \right|$.

Risulta fondamentale, a tal fine, la definizione della condizione di rottura del dispositivo di collegamento che qui viene assunta come quella che determina la sostanziale diminuzione della velocità di carico media rispetto al massimo valore raggiunto durante la prova ($v_c \leq 10\% v_{cmax}$).

La campagna di sperimentazione ha riguardato il prodotto di un solo fabbricante.

Nell'ambito della valutazione del dispositivo di collegamento montante traverso nei sistemi modulari, la metodologia impostata dovrebbe essere applicata sia a dispositivi di collegamento della stessa tipologia qui utilizzata ("nodo con piastra") ma di produttori diversi, sia a dispositivi di collegamento di tipologie diverse al fine di garantirne la validità generale.

La messa a punto della metodologia potrebbe inoltre facilitare il confronto fra i produttori e i laboratori di prova ad esempio nella finalizzazione delle certificazioni previste all'art. 131 del d.lgs. 81/08, quali parte integrante della Richiesta di Autorizzazione alla costruzione e all'impiego dei ponteggi fissi al Ministero del Lavoro e delle Politiche Sociali, prima dell'immissione sul mercato.

Ulteriore sviluppo dello studio finora condotto potrebbe indirizzarsi verso la definizione della

curva analitica Momento - Curvatura, partendo dalle curve sperimentali, secondo quanto prescritto dalla UNI EN 12810-2 e UNI EN 12811-3.

In questo modo, con l'ausilio di programmi di calcolo agli elementi finiti, sarà possibile effettuare la modellazione del nodo strutturale nell'ambito dell'analisi elastica del secondo ordine dell'intero ponteggio.

Riferimenti bibliografici e normativi

[CFRS-015] L. Cortis, F. M. Fabiani, L. Rossi, D. G. Svampa - *I ponteggi metallici fissi di facciata. Determinazione del valore nominale della resistenza caratteristica secondo la UNI EN 12811-3:2005 dei dispositivi di collegamento montante-traverso realizzati con sistemi modulari*, Inail, 2015

[FCRS-017] F.M. Fabiani, L. Cortis, L. Rossi, D.G. Svampa - *I ponteggi metallici fissi di facciata. Dispositivi di collegamento montante-traverso realizzati con sistemi modulari. Definizione di una metodologia per prove di rigidezza e resistenza secondo la UNI EN 12811-3:2005*, Inail, 2017.

Norme tecniche italiane

[1] UNI EN 12810-2:2004 - *Ponteggi di facciata realizzati con componenti prefabbricati - Parte 2: Metodi particolari di progettazione strutturale*

[2] UNI EN 12811-3:2005 - *Attrezzature provvisorie di lavoro - Parte 3: Prove di carico*

[3] UNI EN 12810-1:2004 - *Ponteggi di facciata realizzati con componenti prefabbricati - Parte 1: Specifiche di prodotto*

[4] UNI EN 12811-1:2004 - *Attrezzature provvisorie di lavoro - Parte 1: Ponteggi - Requisiti prestazionali e progettazione generale*

I Quaderni di ricerca

- 1 - G. Ciriello, M. De Felice, R. Mosca, M. Veltroni, *Infortuni sul lavoro. Un modello di lettura (della numerosità) su "open data" dell'Inail.*
- 2 - L. Cortis, F. M. Fabiani, C. Ratti, L. Rossi, D. G. Svampa, C. Vitale, *Analisi e valutazione del comportamento dell'assorbitore di energia nei sistemi di arresto caduta con differenti masse di prova.*
- 3 - P. Rossi, *Danno biologico: monitoraggio, criticità e prospettive d'interesse medico-legale a dieci anni dall'introduzione della nuova disciplina.*
- 4 - M. De Felice, A. Goggiamani, R. Mosca, M. Veltroni, *Malattie professionali. Un modello di lettura (della numerosità) su "open data" dell'Inail.*
- 5 - L. Cortis, F. M. Fabiani, L. Rossi, D. G. Svampa, *Nuovi strumenti per la valutazione dello scivolamento e ribaltamento delle scale portatili.*
- 6 - L. Cortis, F. M. Fabiani, L. Rossi, D. G. Svampa, *Determinazione della resistenza caratteristica dei dispositivi di collegamento montante-traverso nei ponteggi metallici fissi di facciata.*
- 7 - S. Carruba, R. Grimaldi, M. Sparro, S. Tomasini, *Vendor Rating: il modello di valutazione delle forniture IT dell'INAIL*
- 8 - P. Agnello, S. M. Ansaldi, *Una proposta di ontologia per gli Open Data Inail sugli infortuni: dalla numerosità dei dati alla gestione della conoscenza*
- 9 - A. Alvino, A. Antonini, C. Delle Site, A. Di Loreto, F. Giacobbe, D. Lega, E. Pichini, M.A. Pierdominici, L. Ricciardi, A. Tonti, *Analisi delle cause di rottura di materiali metallici: esempi di applicazione.*
- 10 - L. Cortis, F. M. Fabiani, L. Rossi, D. G. Svampa, *Light workers e criticità dell'assorbitore di energia nei sistemi di arresto caduta.*
- 11 - S. Carruba, R. Grimaldi, M. Sparro, S. Tomasini, *Vendor Rating: la valutazione delle forniture IT dell'Inail per il 2015.*

