

# I PONTEGGI METALLICI FISSI DI FACCIATA

**INAIL**

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

**2017**



# I PONTEGGI METALLICI FISSI DI FACCIATA

**INAIL**

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

**2017**

Pubblicazione realizzata da

**Inail**

Dipartimento innovazioni tecnologiche  
e sicurezza degli impianti, prodotti e insediamenti antropici

**Responsabile scientifico**

Luigi Cortis

**Autori**

Francesca Maria Fabiani  
Luigi Cortis  
Luca Rossi  
Davide Geoffrey Svampa

**Collaboratori**

Carlo Ratti  
Calogero Vitale

**Operatore tecnico**

Ivano Bevilacqua

**per informazioni**

**Inail**

Dipartimento innovazioni tecnologiche  
e sicurezza degli impianti, prodotti e insediamenti antropici  
Via di Fontana Candida, 1  
00078 Monte Porzio Catone (Roma)  
dit@inail.it  
**www.inail.it**

© 2017 Inail

ISBN 978-88-7484-527-9

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

Distribuita gratuitamente. Vietata la vendita e la riproduzione con qualsiasi mezzo.

È consentita solo la citazione con l'indicazione della fonte.

# Indice

Introduzione	5
Premessa	7
Definizioni e simboli	8
<b>1. Riferimenti</b>	11
<b>1.1 Requisiti per le prove sperimentali secondo la UNI EN 12810-2:2004 e la UNI EN 12811-3:2005</b>	11
<b>2. Definizione dei requisiti delle prove sperimentali</b>	13
<b>2.1 Requisiti delle prove pilota</b>	13
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
<b>2.2 Requisiti delle prove di rigidezza e di resistenza cicliche</b>	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	21
<b>3. Prove sperimentali</b>	24
<b>3.1 Prove pilota old</b>	25
3.1.1 Disposizione e procedimento di prova per le prove pilota old	26
3.1.1.1 Prove negative	28
3.1.1.2 Prove positive	28
3.1.2 Risultati sperimentali per le prove pilota old	29
3.1.2.1 Sintesi dei risultati	29
3.1.2.2 Grafici delle prove negative	30
3.1.2.2.1 Prova MNPP1	30
3.1.2.2.2 Prova MNPP2	31
3.1.2.2.3 Prova MNPP3	32
3.1.2.2.4 Prova MNPP4	33
3.1.2.2.5 Prova 2MNPP1	34
3.1.2.2.6 Prova 2MNPP2	35
3.1.2.2.7 Prova 2MNPP4	36
3.1.2.2.8 Prova 2MNPP5	37
3.1.2.3 Grafici delle prove positive	38
3.1.2.3.1 Prova MPPP1	38
3.1.2.3.2 Prova MPPP2	39
3.1.2.3.3 Prova MPPP3	40
3.1.2.3.4 Prova 2MPPP1	41
3.1.2.3.5 Prova 2MPPP2	42
3.1.2.3.6 Prova 2MPPP3	43
3.1.2.4 Analisi dei risultati	44
3.1.2.4.1 Prove pilota negative	44
3.1.2.4.2 Prove pilota positive	44
3.1.3 Stima del carico massimo stimato $\overline{F_{max}}$	45
3.1.4 Osservazioni	47
<b>3.2 Prove pilota new</b>	48
3.2.1 Disposizione e procedimento di prova per le prove pilota new	49
3.2.1.1 Prove negative	51
3.2.1.2 Prove positive	51
3.2.2 Risultati sperimentali per le prove pilota new	52
3.2.2.1 Sintesi dei risultati	52
3.2.2.2 Grafici delle prove pilota negative	53
3.2.2.2.1 Prova 2MNPP1:	53
3.2.2.2.2 Prova 2MNPP2:	56

3.2.2.2.3 Prova 2MNPP3:	59
3.2.2.2.4 Prova 2MNPP5:	62
3.2.2.2.5 Prova 2MNPP6:	65
3.2.2.3 Grafici delle prove pilota positive	68
3.2.2.3.1 Prova 2MPPP1:	68
3.2.2.3.2 Prova 2MPPP2:	71
3.2.2.3.3 Prova 2MPPP3:	74
3.2.2.3.4 Prova 2MPPP4:	77
3.2.2.3.5 Prova 2MPPP5:	80
3.2.2.4 Analisi dei risultati	83
3.2.2.4.1 Prove pilota negative	83
3.2.2.4.2 Prove pilota positive	83
3.2.3 Stima del carico massimo stimato $\overline{F_{max}}$	84
3.2.4 Stima di $R_k^-$ e di $R_k^+$	86
3.2.5 Stima di $C_{full}^-$ e di $C_{full}^+$	86
3.2.6 Osservazioni	86
<b>3.3 Prove di rigidezza e resistenza cicliche</b>	87
3.3.1 Disposizione e procedimento di prova	87
3.3.1.1 Prove negative	89
3.3.1.2 Prove positive	91
3.3.2 Risultati sperimentali	93
3.3.2.1 Sintesi dei risultati	93
3.3.2.1.1 Prova 3_5CicIN1	95
3.3.2.1.2 Prova 3_5CicIN2:	98
3.3.2.1.3 Prova 3_5CicIN3:	101
3.3.2.1.4 Prova 3_5CicIN4:	104
3.3.2.1.5 Prova 3_5CicIN5:	107
3.3.2.2 Grafici delle prove positive	110
3.3.2.2.1 Prova 3_5CicIP3:	110
3.3.2.2.2 Prova 3_5CicIP4:	113
3.3.2.2.3 Prova 3_5CicIP5	116
3.3.2.2.4 Prova 3_5CicIP7	119
3.3.2.2.5 Prova 3_5CicIP8	122
3.3.3 Analisi dei risultati	125
<b>4. Conclusioni</b>	127
<b>Bibliografia e riferimenti normativi</b>	128

## Introduzione

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.



## Premessa

La presente ricerca ha come finalità quella di individuare una metodologia sperimentale che consenta la caratterizzazione dei nodi strutturali, sia in termini di rigidezza, che 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 una analisi della suddetta normativa e iniziata una campagna di sperimentazione [3].

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 della 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 capire 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 [3].

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:

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

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

Le prove pilota sono state effettuate in due periodi distinti, a causa della intervenuta necessità di sostituire la strumentazione di prova non più funzionante.

Le prove pilota eseguite con la vecchia strumentazione saranno nel seguito denominate *old*.

Le prove pilota eseguite con la nuova strumentazione saranno nel seguito denominate *new*.

Le prove sperimentali di rigidezza e resistenza cicliche sono state eseguite con la nuova strumentazione.



## 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 [4]).
- *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 [4]).
- *Montante*  
Elemento verticale di un ponteggio (UNI EN 12811-1 [5]).
- *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 [5]).
- *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 [4]).
- *Traverso*  
Elemento orizzontale di un ponteggio, disposto nella direzione della dimensione minore del ponteggio (UNI EN 12811-1 [5]).
- *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 [5]).
- $C_{full}$   
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.
- $v_{c\ max}$  , *velocità di carico massima*  
Massimo valore della velocità di carico, registrato durante la prova.
- $v_{c\ lim} = \frac{0,25 \cdot |F_{max}|}{min}$  , *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.
- $v_{c\ lim} = \frac{0,25 \cdot |F_{max}|}{min}$  , *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.
- $\gamma_M$   
Fattore parziale di sicurezza per la resistenza (UNI EN 12811-1 [5]).
- $\gamma_F$   
Fattore parziale di sicurezza per l'azione (UNI EN 12811-1 [5]).



## 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 rigidità 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 rigidità 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 1<sup>1</sup>; 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 rigidità 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 destinati 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;

<sup>1</sup> Il prospetto 1 non riporta la velocità di carico limite

$\gamma_M$  è il fattore parziale di sicurezza per la resistenza;

$\gamma_F$  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 provvisoria.

In [3] è stata eseguita un'analisi di tali requisiti finalizzata alla valutazione dei dispositivi montante – traverso nei ponteggi metallici fissi di facciata.

È 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 [3], 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 [3] 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 [3], 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:

$$v_{c\ max} \leq \overline{v_{c\ lim}}$$

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

Visto che il carico massimo stimato  $\overline{F_{max}}$  non è noto a priori, per la sua determinazione, occorre eseguire almeno 5 prove pilota <sup>2</sup>.

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  $R_{k,b}$* )<sup>3</sup>.

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.

<sup>2</sup> In [3] si è ritenuto sufficiente eseguire tre prove pilota per il calcolo del carico massimo stimato. Nel presente studio si è osservato che solo tre prove possono fornire risultati molto dispersi rispetto alla media dei valori (vedi i successivi paragrafi 3.1.3 e 3.1.4)

<sup>3</sup> 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 materiali effettive rispetto a quelle garantite (10.7 di [2]). Inoltre i valori ultimi di rottura  $r_{u,i}^a$  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  $v_s$ ).

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 [3].

Deve valere la condizione:

$$v_{cmax} \leq v_{clim} \quad (2.1.1-1)$$

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

*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].

Deve valere la condizione:

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

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

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 5<sup>4</sup> prove pilota valide.

<sup>4</sup> Vedi nota 2



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

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 rigidezza e resistenza cicliche sarà il valore  $v_s$  più basso impostato nei due versi di spostamento.

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.

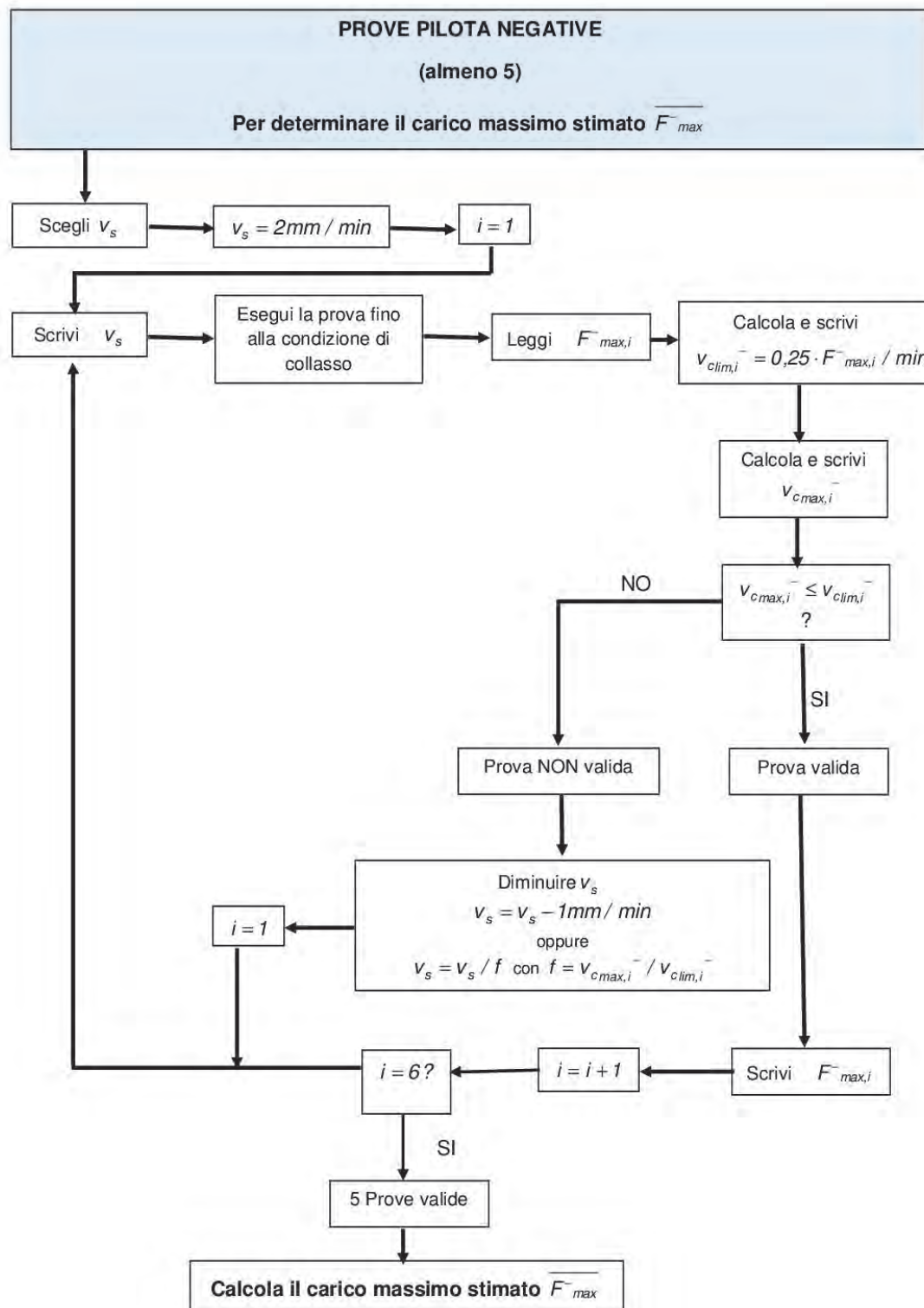


Figura 2-1 Sequenza di istruzioni per l'esecuzione delle prove pilota per determinare il carico massimo stimato

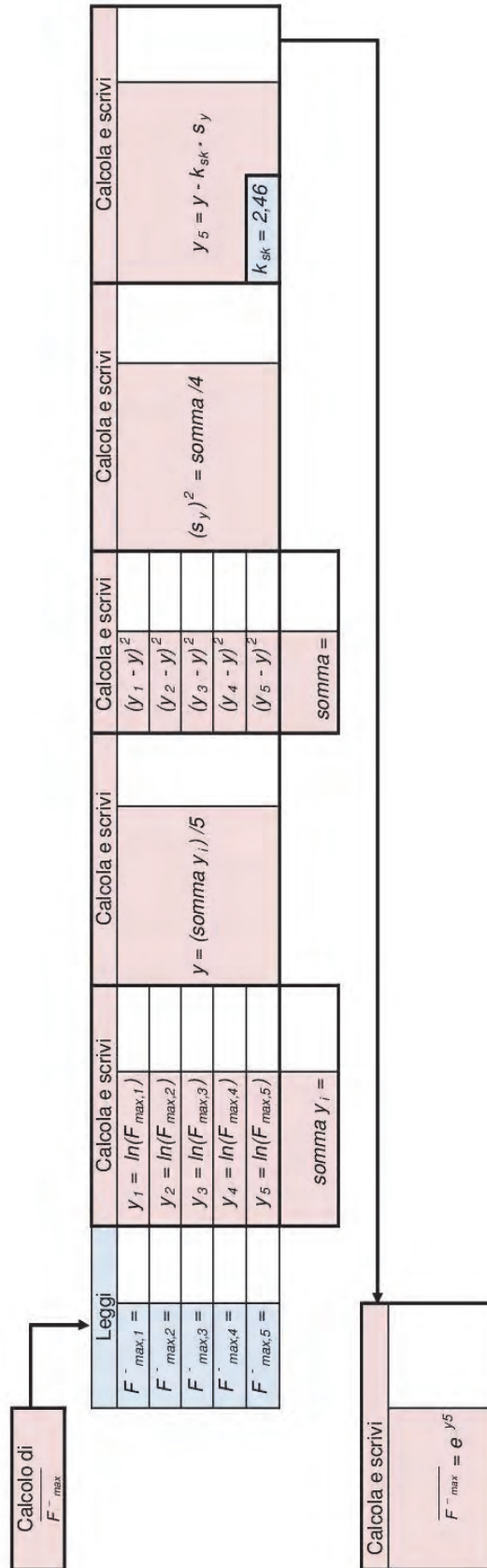


Figura 2-2 Schema per il calcolo del carico massimo stimato. Il fattore  $k_{sk}$  è preso dal Prospetto 4 del paragrafo 8 di [2]



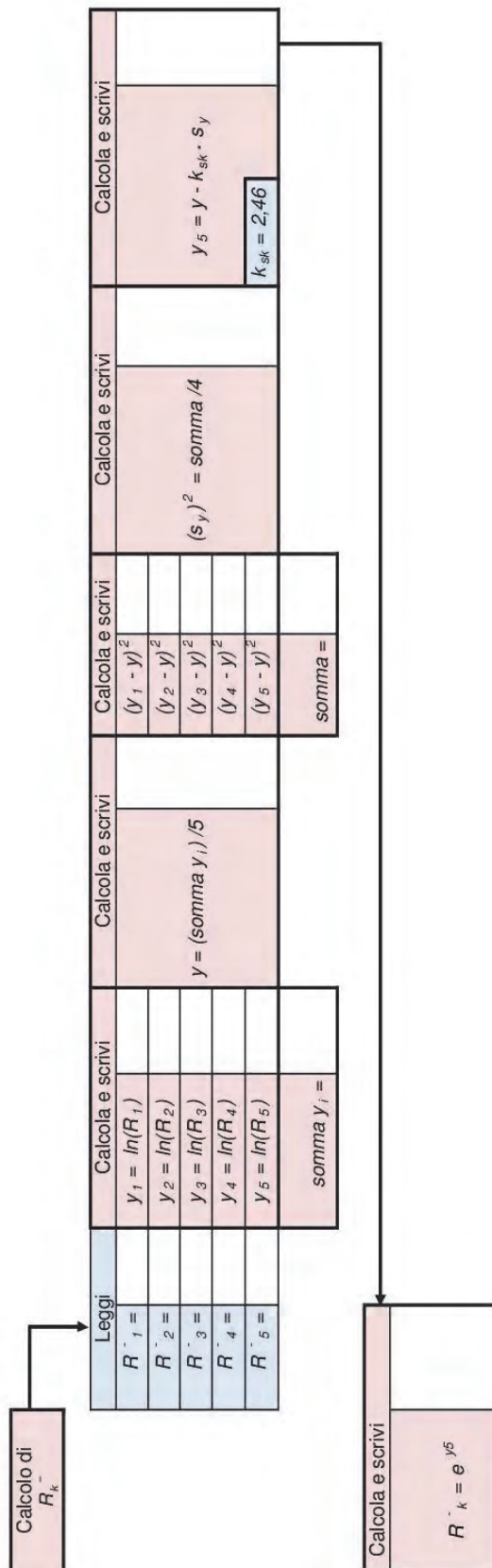


Figura 2-4 Schema per il calcolo della resistenza caratteristica. Il fattore  $k_{sk}$  è preso dal Prospetto 4 del paragrafo 8 di [2]

## 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:

$$v_{cmax} \leq \overline{v_{clim}} \quad (2.2.1-1)$$

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

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 [3]).

### 2.2.2 Diagramma di flusso per la sequenza di esecuzione delle prove di rigidezza 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 iniziale<sup>5</sup>, scelto un verso di spostamento per esempio positivo, si eseguiranno i seguenti passi (vedi il diagramma di flusso alla figura seguente):

1. Dalla condizione iniziale, eseguire tre cicli completi nel range di carico:

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

2. Tornare al carico nullo

3. Porre  $P = R_k^+$  e caricare fino al livello:

$$\left[ +1,0 \cdot \frac{R_k^+}{\gamma_M \cdot \gamma_F} + 10\% \cdot P \right] = \left[ +0,6 \cdot R_k^+ + 0,1 \cdot P \right]$$

4. Qualora sia intervenuta la rottura, registrare il carico massimo  $F_{max}^+$ , ricominciare la prova dal passo 1 fino al passo 3, ponendo  $P = F_{max}^+$ .

Qualora non sia intervenuta la rottura del dispositivo, si scarica fino al livello di carico nullo.

5. Si carica ulteriormente fino al livello:

$$\left[ +0,7 \cdot R_k^+ + 0,1 \cdot R_k^+ \right] = 0,8 \cdot R_k^+$$

6. Tornare al passo 4

7. Si carica ulteriormente fino al livello:

$$\left[ +0,8 \cdot R_k^+ + 0,1 \cdot R_k^+ \right] = +0,9 \cdot R_k^+$$

8. Tornare al passo 4

9. Si carica ulteriormente fino al livello:

$$\left[ +0,9 \cdot R_k^+ + 0,1 \cdot R_k^+ \right] = R_k^+$$

10. Qualora sia intervenuta la rottura, prima del valore  $R_k^+$ , registrare il carico massimo  $F_{max}^+$ , ricominciare la prova dal passo 1 fino al passo 3, ponendo  $P = F_{max}^+$ .

Qualora sia intervenuta la rottura, al valore  $R_k^+$  si registra il  $F_{max}^+ = R_k^+$  e la prova risulta completata e valida.

Qualora non sia intervenuta la rottura del dispositivo, si scarica fino al livello di carico nullo e si carica ulteriormente fino al livello:

$$\left[ R_k^+ + 0,1 \cdot R_k^+ \right] = 1,1 \cdot R_k^+$$

11. Qualora sia intervenuta la rottura, si registra il  $F_{max,i}^+$  e la prova risulta completata e valida

12. Qualora non sia intervenuta la rottura del dispositivo, si scarica fino al livello di carico nullo, si ricarica oltre la fase di carico precedente con incremento di carico pari a  $0,1 R_k^+$

13. Si ripete il punto 12 fino al raggiungimento della rottura del dispositivo. Si registra il carico massimo pari a  $F_{max,i}^+$  e la prova risulta completata e valida.

Devono essere eseguite 5 prove descritte ai passi dall'1 al 13.

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

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

<sup>5</sup> Si assume che la condizione iniziale sia la condizione di montaggio del dispositivo di collegamento.

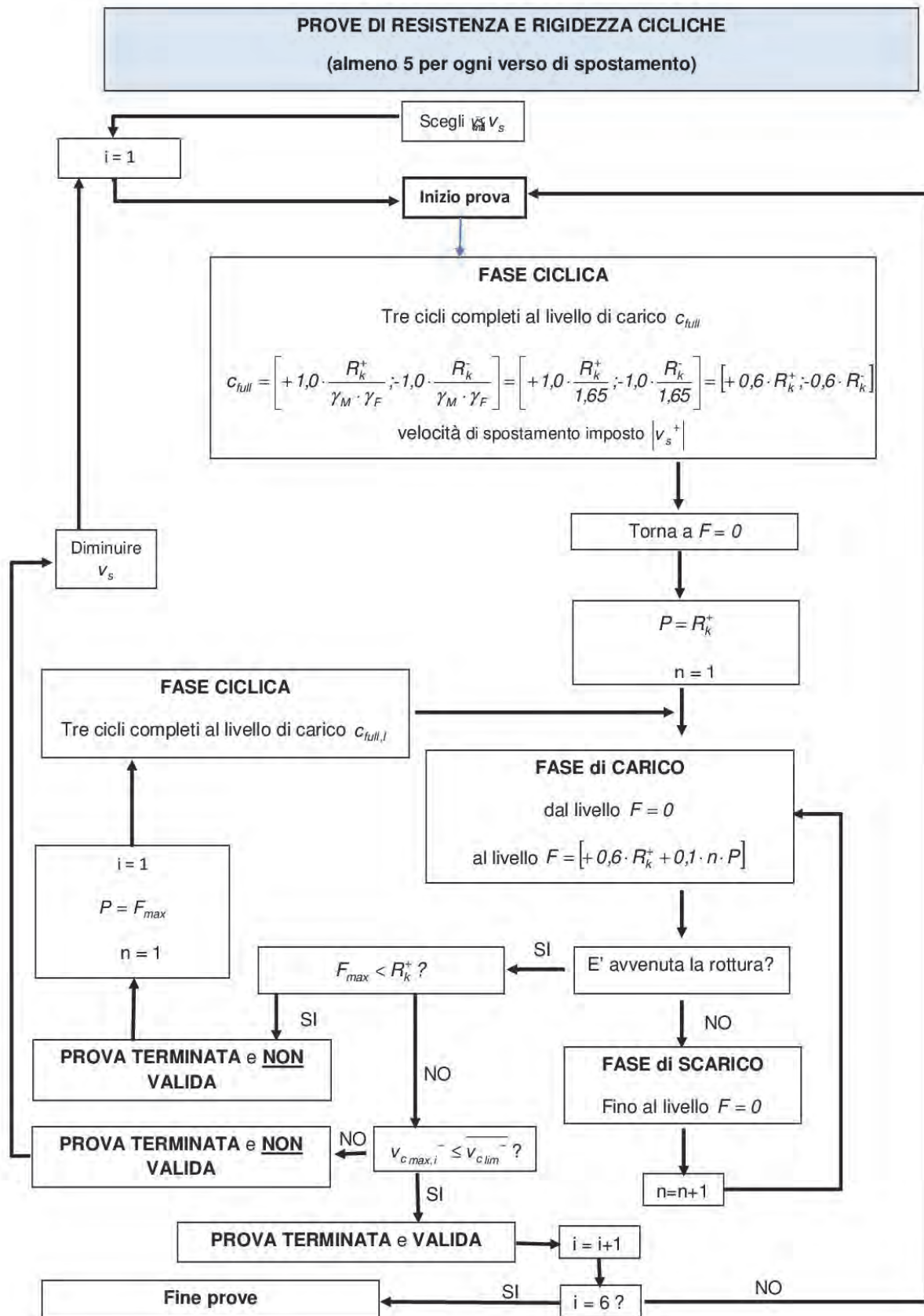


Figura 2-5 Sequenza di istruzioni per l'esecuzione delle prove di rigidezza e resistenza cicliche



### 3. Prove sperimentali

Nel triennio 2013-2015 la sperimentazione è continuata sottoponendo a prova la stessa tipologia (produttore, marca e modello) di dispositivi utilizzati nella campagna 2009-2012.

La geometria degli elementi sottoposti a prova è riportata nei disegni della figura che segue.

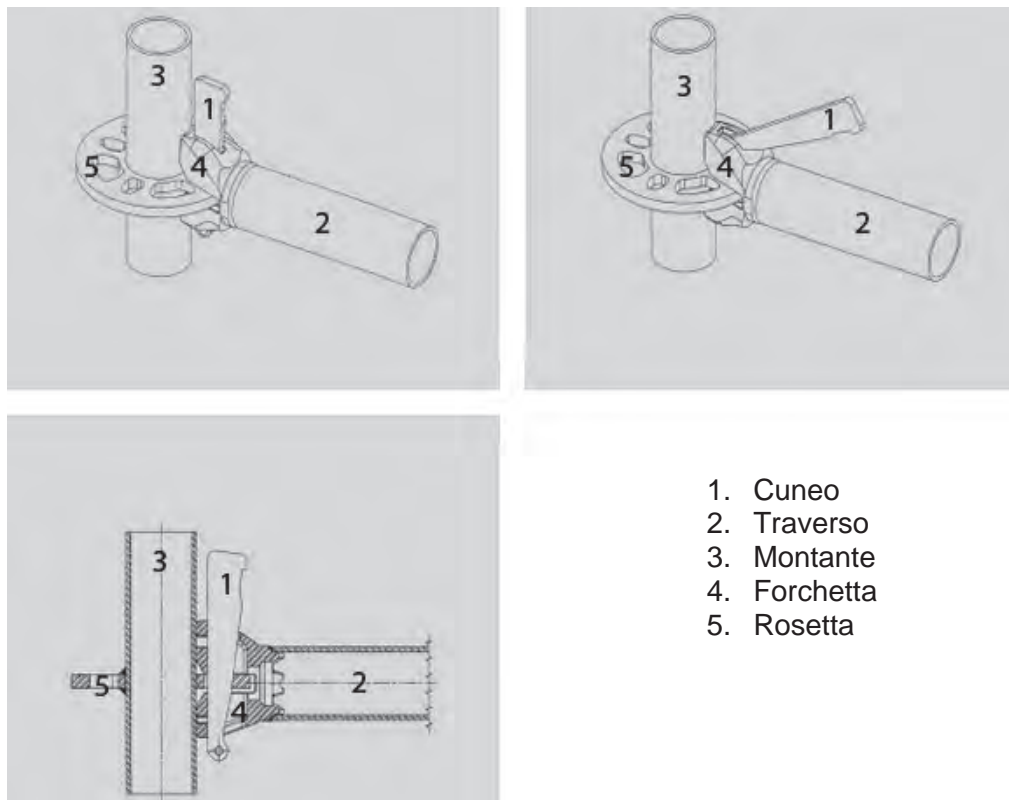


Figura 3-1 Geometria e nomenclatura degli elementi sottoposti a prova

Dopo le risultanze della campagna 2009-2012, si è deciso di considerare quale condizione di “rottura” quella che corrisponde nella diminuzione significativa di  $v_c$ , velocità di carico al minuto.

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 rigidità e resistenza cicliche.

Le prove pilota sono state effettuate in due periodi distinti, a causa della intervenuta necessità di sostituire la strumentazione di prova non più funzionante.

Le prove pilota eseguite con la vecchia strumentazione saranno nel seguito denominate “old”;

Le prove pilota eseguite con la nuova strumentazione saranno nel seguito denominate *new*.

Le prove sperimentali di rigidità e resistenza cicliche sono state eseguite con la nuova strumentazione.

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

### 3.1 Prove pilota *old*

Le prove pilota *old* sono prove di tipo monotono nello spostamento, eseguite utilizzando la strumentazione *old*.

Tale strumentazione è costituita da:

1. Macchina per prove meccaniche INSTRON (telaio 1195; elettronica 8500), con cella di carico Type 2511-316 (FS = 10000 kg<sub>f</sub>)
2. Inclinometro Sherborne Sensor LTA, Type LSI-0001-90 (range +/-90°)
3. 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)
4. Telaio rigido di contrasto
5. Sistema di acquisizione e registrazione dati (hardware LEANE PSEX C 8; software RTM 3500)

La tecnologia della macchina di prova permette l'impostazione dei seguenti valori della velocità di spostamento della traversa: 2mm/min, 5mm/min, 10mm/min, 20mm/min, 50mm/min, 100mm/min.

La velocità di spostamento della traversa della macchina è stata inizialmente imposta pari a  $v_s=5\text{mm/min}$ , valore stimato con le prove sperimentali della precedente campagna.

Successivamente è stata posta pari a  $v_s = 2\text{mm/min}$ , visto che per le prove negative la velocità di 5mm/min provocava una velocità di carico oltre il limite imposto dal punto 5 della UNI EN 12811-3:2005, calcolato in base al carico massimo registrato.

Durante ogni prova è stata calcolata la velocità di carico  $v_c(v_s)$  ad ogni minuto a partire dall'istante  $t_0$  di inizio della prova. Al raggiungimento della condizione di collasso, si è verificata la condizione (2.1.1-1).

In accordo a [3], a questo punto della sperimentazione si ritiene sufficiente eseguire solamente tre prove pilota valide (con uguale valore di  $v_s$ ) per il calcolo del carico massimo stimato. Si vedrà più avanti (vedi 3.1.3 e 3.1.4) che è opportuno eseguirne almeno 5.

Nel periodo di ricerca 2013-2014, sono state eseguite le seguenti prove sperimentali, utilizzando l'attrezzatura denominata *old* :

Prova MPPP1 (monotona positiva,  $v=5\text{mm/min}$ )  
 Prova MPPP2 (monotona positiva,  $v=5\text{mm/min}$ )  
 Prova MPPP3 (monotona positiva,  $v=5\text{mm/min}$ )

Prova MNPP1 (monotona negativa,  $v=5\text{mm/min}$ )  
 Prova MNPP2 (monotona negativa,  $v=5\text{mm/min}$ )  
 Prova MNPP3 (monotona negativa,  $v=5\text{mm/min}$ )  
 Prova MNPP4 (monotona negativa,  $v=5\text{mm/min}$ )

Prova 2MPPP1 (monotona positiva,  $v=2\text{mm/min}$ )  
 Prova 2MPPP2 (monotona positiva,  $v=2\text{mm/min}$ )  
 Prova 2MPPP3 (monotona positiva,  $v=2\text{mm/min}$ )

Prova 2MNPP1 (monotona negativa,  $v=2\text{mm/min}$ )  
 Prova 2MNPP2 (monotona negativa,  $v=2\text{mm/min}$ )  
 Prova 2MNPP3 (monotona negativa,  $v=2\text{mm/min}$ )  
 Prova 2MNPP4 (monotona negativa,  $v=2\text{mm/min}$ )  
 Prova 2MNPP5 (monotona negativa,  $v=2\text{mm/min}$ ).

### 3.1.1 Disposizione e procedimento di prova per le prove pilota *old*

Le prove sono state eseguite in controllo di spostamento, imponendo uno spostamento verticale della traversa della macchina con velocità costante pari a 5mm/min per le prove MNPP e MPPP e pari a 2 mm/min per tutte le altre prove.

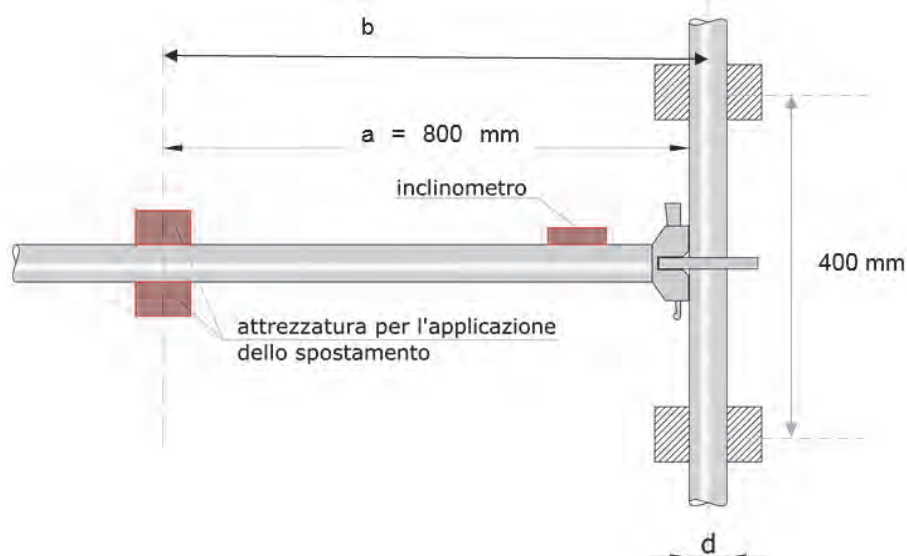


Figura 3-2 Schema di prova

Le seguenti grandezze sono state registrate ogni 5 sec:

1. Carico ( $kg_f$ ) al contatto con il traverso;
2. Inclinazione ( $^\circ$ ) del traverso in corrispondenza del collegamento al montante.

Lo spostamento controllato della traversa è stato trasferito al traverso (tubo) per mezzo dell'accessorio di Figura 3-3 che garantisce che il carico applicato al traverso rimanga sempre verticale nel piano passante per l'asse del traverso stesso.



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

La cella di carico all' interfaccia traversa-tubo ha permesso di rilevare il carico conseguente applicato al traverso.

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

$$b \text{ (mm)} = 800 + d/2 \text{ con } d \text{ diametro esterno del montante.}$$

( 3.1.1-1

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

Durante le prove sono state calcolate le velocità di carico 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:

$$v_i = F_{(i-1)} - F_i \text{ con } i=1,2..t_{fin} \text{ (min)} \quad \text{per prove monotone negative;}$$

$$v_i = F_i - F_{(i-1)} \text{ con } i=1,2..t_{fin} \text{ (min)} \quad \text{per prove monotone positive.}$$

È stato necessario realizzare in post analisi le seguenti curve, sovrapposte sull'asse del tempo, componendo opportunamente i valori del carico e del tempo rilevati dai sensori durante le prove:

1. Curva carico tempo
2. Velocità di carico media – tempo
3. Massimo carico registrato
4.  $v_{lim}$ , limite per la velocità di carico.

La verifica della condizione ( 2.1.1-1 è stata effettuata controllando che la curva 2 fosse sempre al di sotto della curva 4.

Nel caso la condizione non fosse stata soddisfatta, la prova è stata considerata non valida e sono state eseguite altre prove sperimentali diminuendo la velocità di spostamento per ottenere la verifica della condizione ( 2.1.1-1.

Per ogni prova eseguita è stata inoltre rappresentata la curva carico-inclinazione attraverso componendo opportunamente in post analisi i valori del carico e dell'inclinazione rilevati dai sensori durante le prove.

### 3.1.1.1 Prove negative

Le prove MNPP sono prove pilota monotone 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.

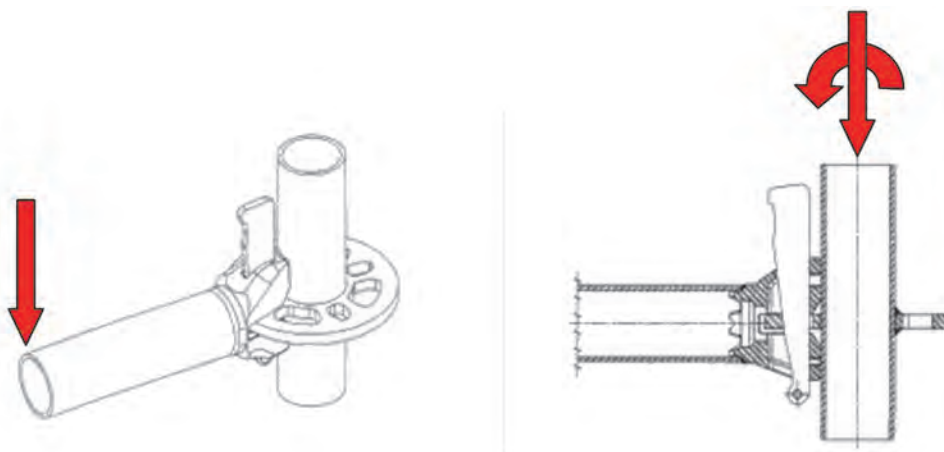


Figura 3-4 Schema di applicazione dello spostamento negativo e azioni al nodo

La velocità di spostamento è stata imposta inizialmente pari a  $v_s=5$  mm/min (prove MNPP), ed è stato registrato il carico massimo per ogni prova. A prova terminata è stato verificato se la velocità di carico statico (conseguente allo spostamento imposto) rispettasse la condizione ( 2.1.1-1

La velocità di spostamento è stata poi diminuita a  $v_s = 2$  mm/min (Prove 2MNPP).

### 3.1.1.2 Prove positive

Le prove MPPP sono prove pilota monotone 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).

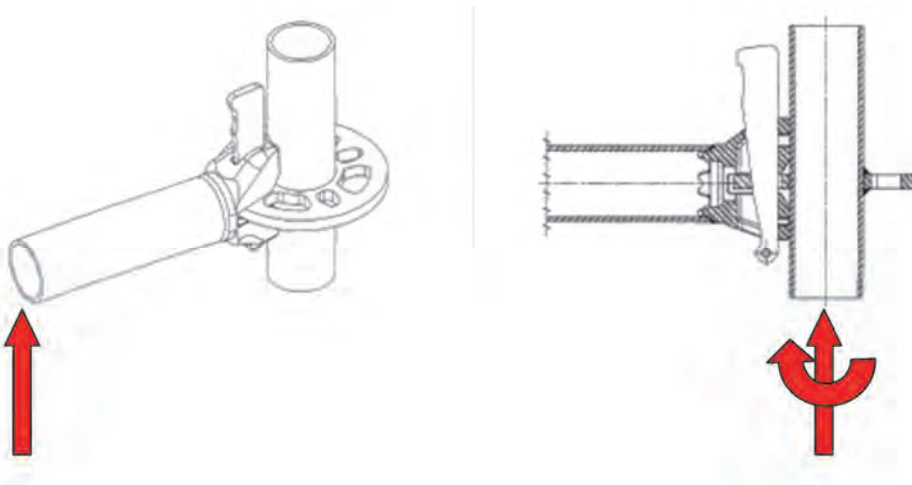


Figura 3-5 Schema di applicazione dello spostamento positivo e azioni al nodo

La velocità di spostamento di primo tentativo è stata imposta inizialmente pari a  $v_s = 5$ mm/min (prove MPPP), ed è stato registrato il carico massimo per ogni prova. A prova terminata è stato

verificato se la velocità di carico statico (conseguente allo spostamento imposto) rispettasse la condizione ( 2.1.1-1).

Tale velocità di spostamento ha soddisfatto la suddetta verifica sulla velocità di carico, ma è stata comunque diminuita a  $v_s=2\text{mm/min}$  (prove 2MPPP), come per le prove con spostamento negativo.

### 3.1.2 Risultati sperimentali per le prove pilota *old*

#### 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  $v_{c\max}$
- Velocità di carico limite  $v_{c\text{lim}}$  secondo la formula ( 2.1.1-1)
- L'esito della verifica della condizione ( 2.1.1-1)

Nome prova	Velocità di spostamento imposto	Carico massimo	Velocità di carico massima raggiunta	Velocità di carico limite	Verifica per la velocità di carico
	$v$	$F_{\max}$	$v_{c\max}$	$v_{c\text{lim}} = (0,25 F_{\max})/\text{min}$	$v_{c\max} \leq v_{c\text{lim}}$
	mm/min	kg <sub>f</sub>	kg <sub>f</sub> / min	kg <sub>f</sub> / min	
MNPP1	5	-108,01	30,16	27,00	<b>NO</b>
MNPP2	5	-83,11	22,61	20,78	<b>NO</b>
MNPP3	5	-124,78	32,12	31,20	<b>NO</b>
MNPP4	5	-102,98	32,58	25,75	<b>NO</b>
MPPP1 <sup>1</sup>	5	148,82	34,49	37,21	<b>SI</b>
MPPP2	5	121,84	37,92	30,46	<b>NO</b>
MPPP3 <sup>2</sup>	5	176,18	20,79	44,05	<b>SI</b>

Note: <sup>(1)</sup> La curva-carico tempo è molto irregolare

<sup>(2)</sup> La velocità di carico media decresce e ricresce più volte prima di annullarsi

Nome prova	Velocità di spostamento imposto	Carico massimo	Velocità di carico massima raggiunta	Velocità di carico limite	Verifica per la velocità di carico
	$v$	$F_{\max}$	$v_{c\max}$	$v_{c\text{lim}} = (0,25 F_{\max})/\text{min}$	$v_{c\max} \leq v_{c\text{lim}}$
	mm/min	kg <sub>f</sub>	kg <sub>f</sub> / min	kg <sub>f</sub> / min	
2MNPP1	2	-116,7	14,08	29,18	<b>SI</b>
2MNPP2 <sup>1</sup>	2	-66,96	15,66	16,74	<b>SI</b>
2MNPP3 <sup>2</sup>	2				
2MNPP4	2	-116,18	14,88	29,05	<b>SI</b>
2MNPP5	2	-78,34	13,45	19,59	<b>SI</b>
2MPPP1	2	147,54	15,81	36,89	<b>SI</b>
2MPPP2	2	158,61	13,20	39,65	<b>SI</b>
2MPPP3	2	147,56	15,22	36,89	<b>SI</b>

Note: <sup>(1)</sup> La curva-carico tempo è molto irregolare

<sup>(2)</sup> Prova interrotta per malfunzionamento sensori

Tabella 1 Sintesi dei risultati sperimentali per le prove pilota *old*

Di seguito vengono riportati i grafici relativi alle prove pilota negative e positive.

### 3.1.2.2 Grafici delle prove negative

#### 3.1.2.2.1 Prova MNPP1

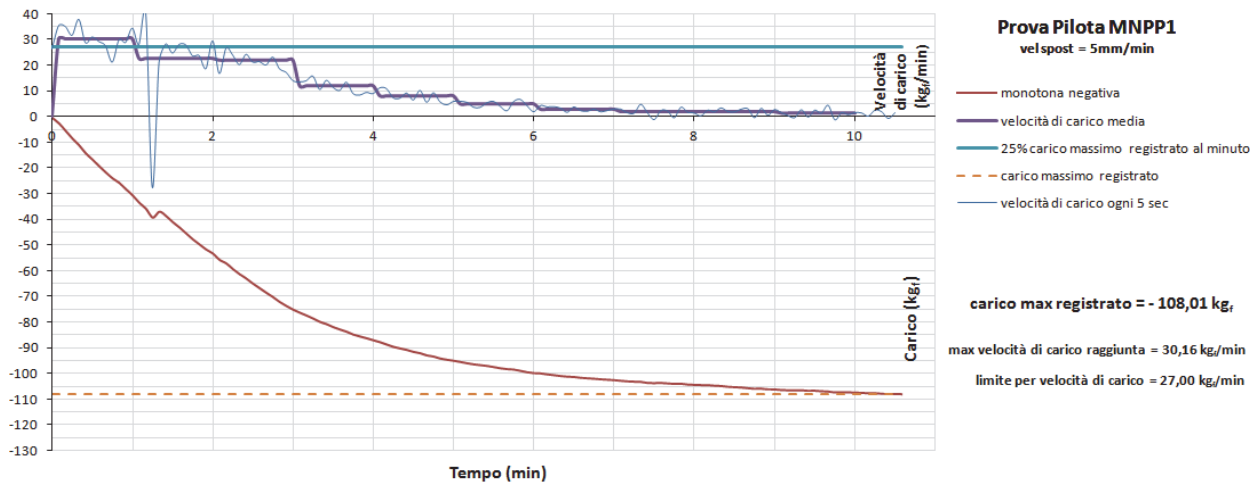


Figura 3-6 Curva carico-tempo. Velocità di carico media (kg<sub>f</sub>/min). Limite per la velocità di carico calcolato in base al massimo carico registrato

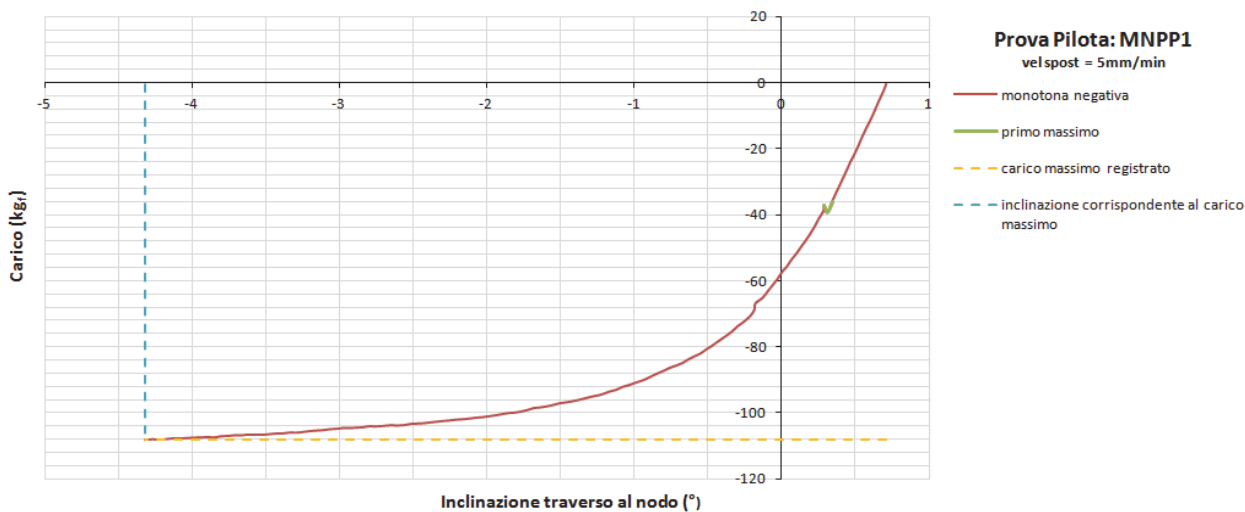


Figura 3-7 Curva carico-inclinazione del trasverso al nodo. Carico massimo registrato e inclinazione corrispondente

### 3.1.2.2.2 Prova MNPP2

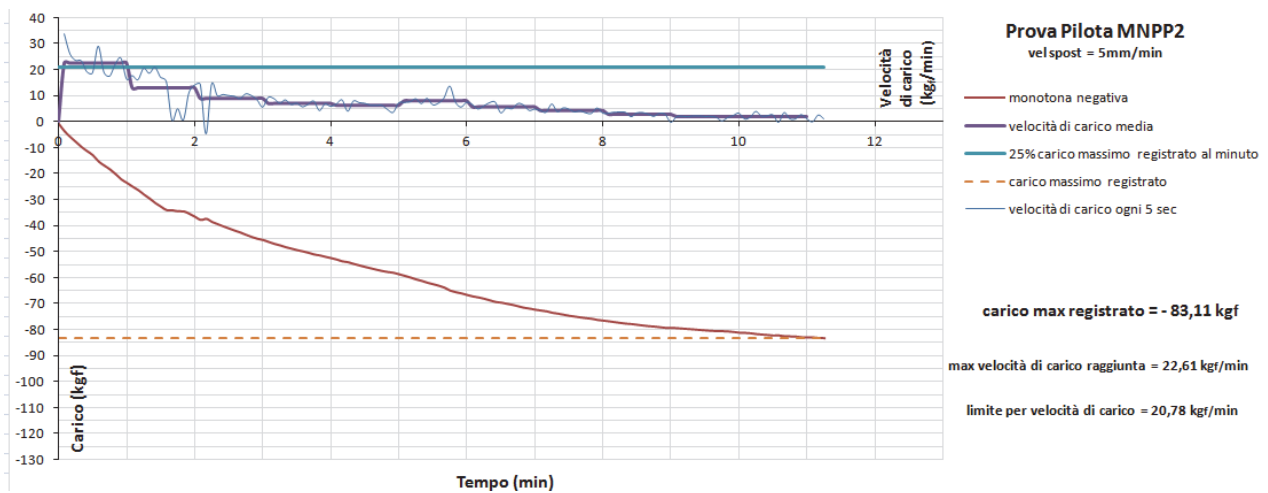


Figura 3-8 Curva carico-tempo. Velocità di carico media (kg<sub>f</sub>/min). Limite per la velocità di carico calcolato in base al massimo carico registrato

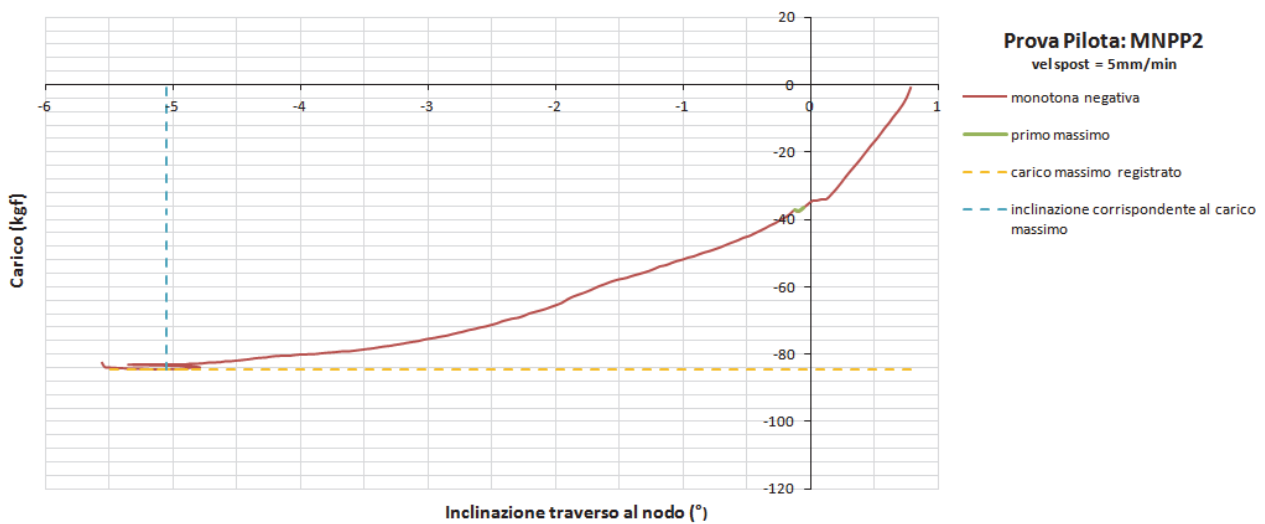


Figura 3-9 Curva carico-inclinazione del traverso al nodo. Carico massimo registrato e inclinazione corrispondente



### 3.1.2.2.3 Prova MNPP3

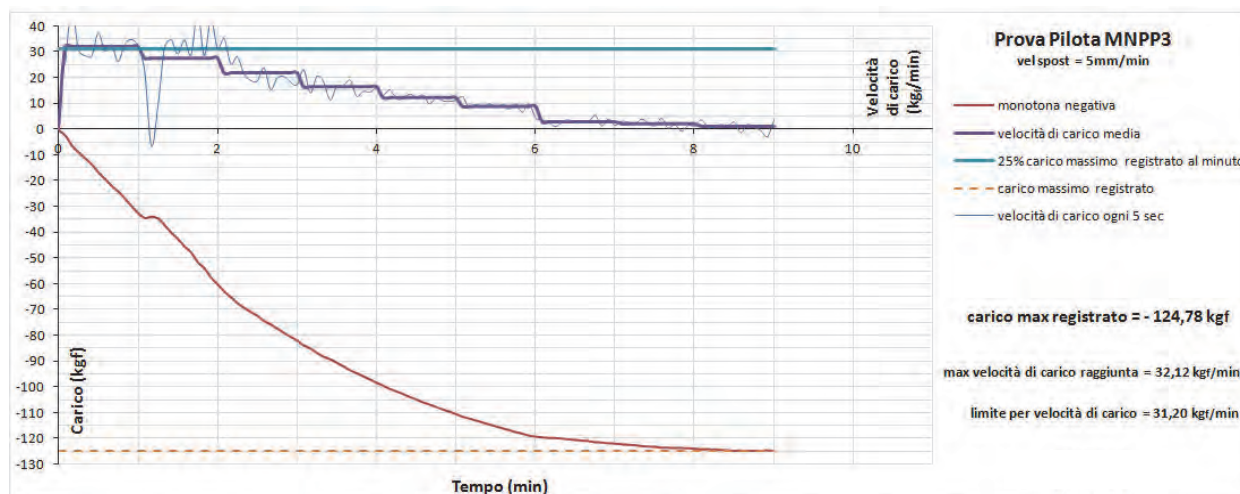


Figura 3-10 Curva carico-tempo. Velocità di carico media (kg<sub>f</sub>/min). Limite per la velocità di carico calcolato in base al massimo carico registrato

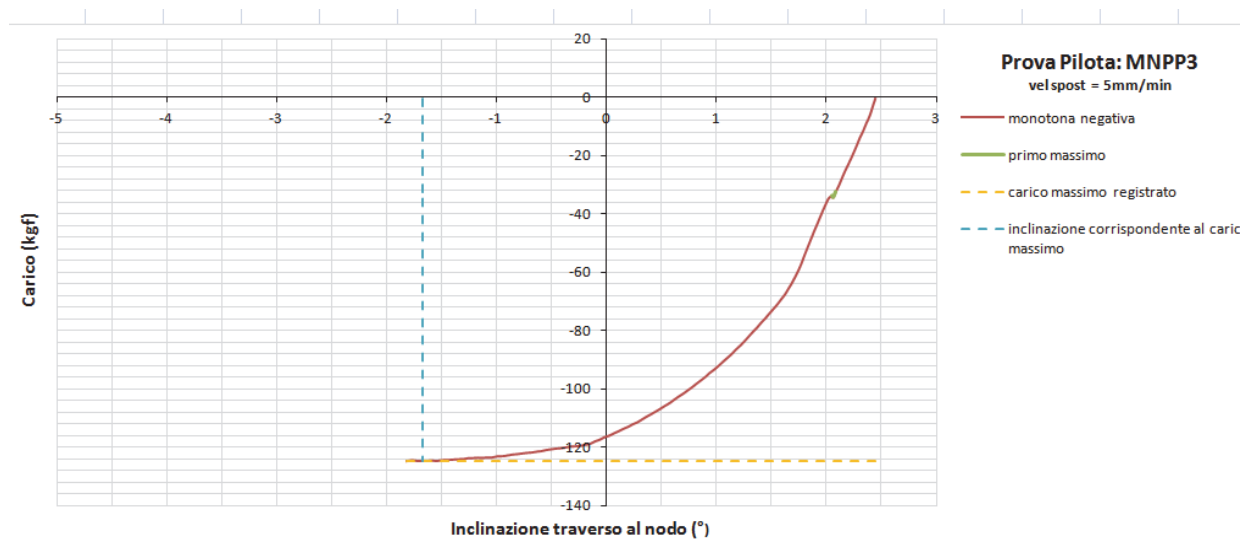


Figura 3-11 Curva carico-inclinazione del trasverso al nodo. Carico massimo registrato e inclinazione corrispondente

## 3.1.2.2.4 Prova MNPP4

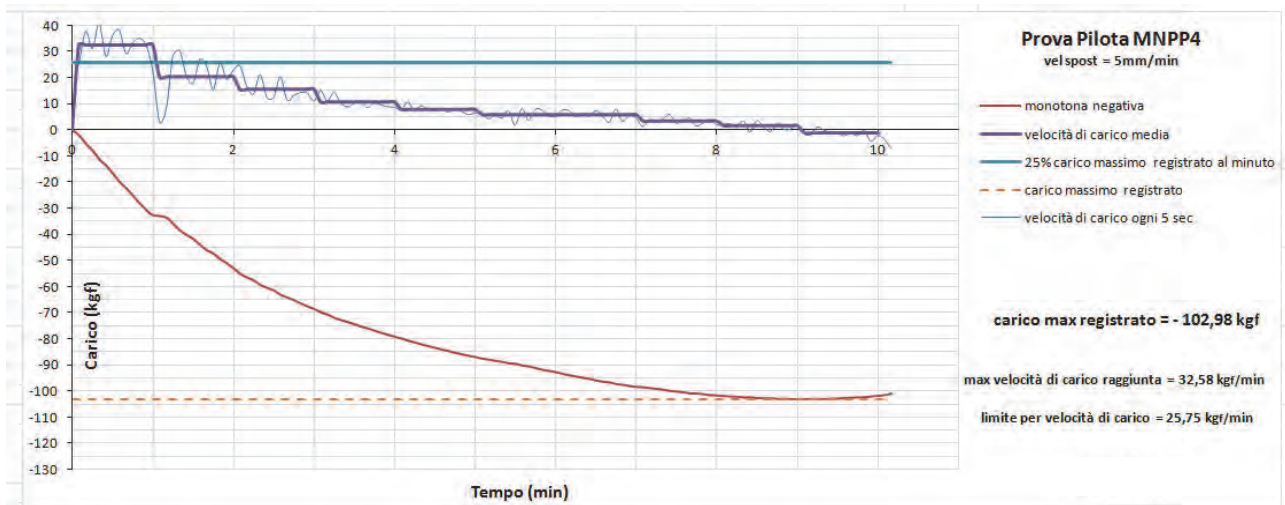


Figura 3-12 Curva carico-tempo. Velocità di carico media (kgf/min). Limite per la velocità di carico calcolato in base al massimo carico registrato

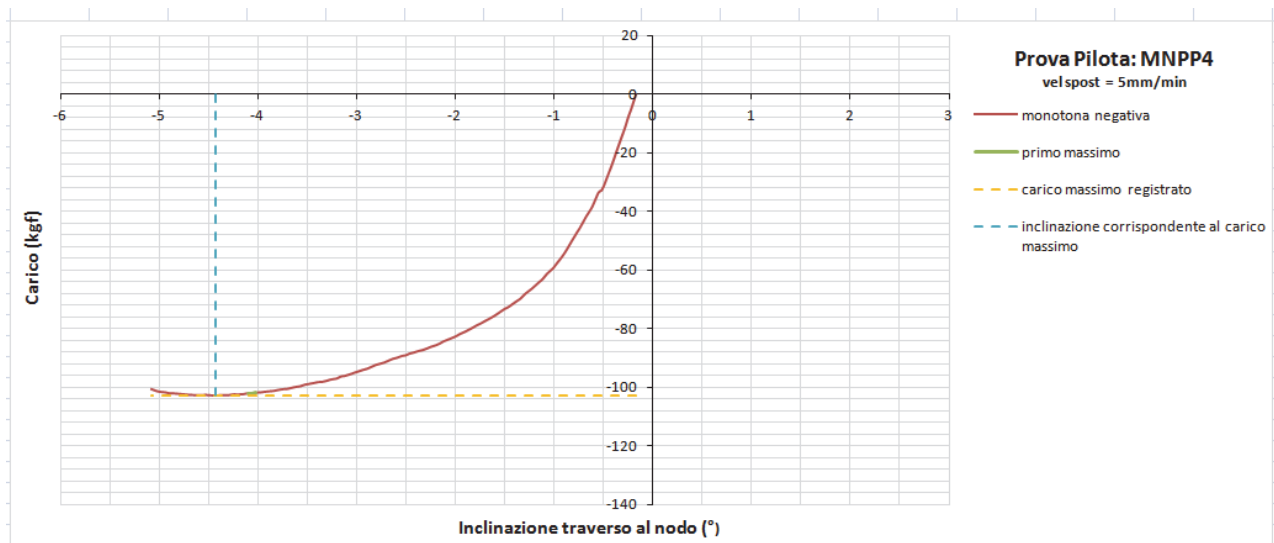


Figura 3-13 Curva carico-inclinazione del traverso al nodo. Carico massimo registrato e inclinazione corrispondente

### 3.1.2.2.5 Prova 2MNPP1

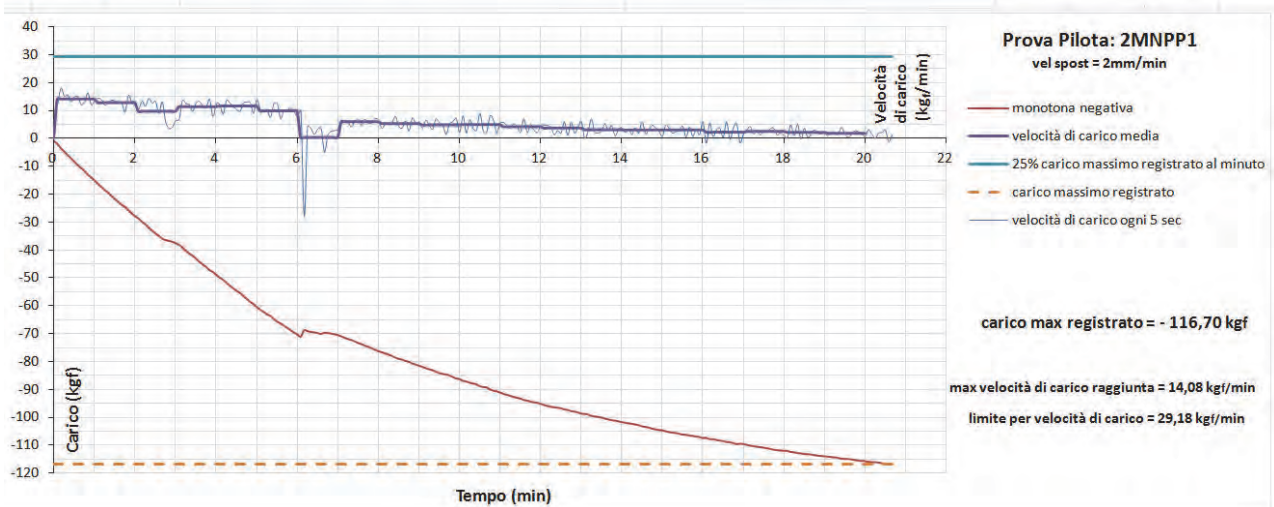


Figura 3-14 Curva carico-tempo. Velocità di carico media (kg<sub>f</sub>/min). Limite per la velocità di carico calcolato in base al massimo carico registrato

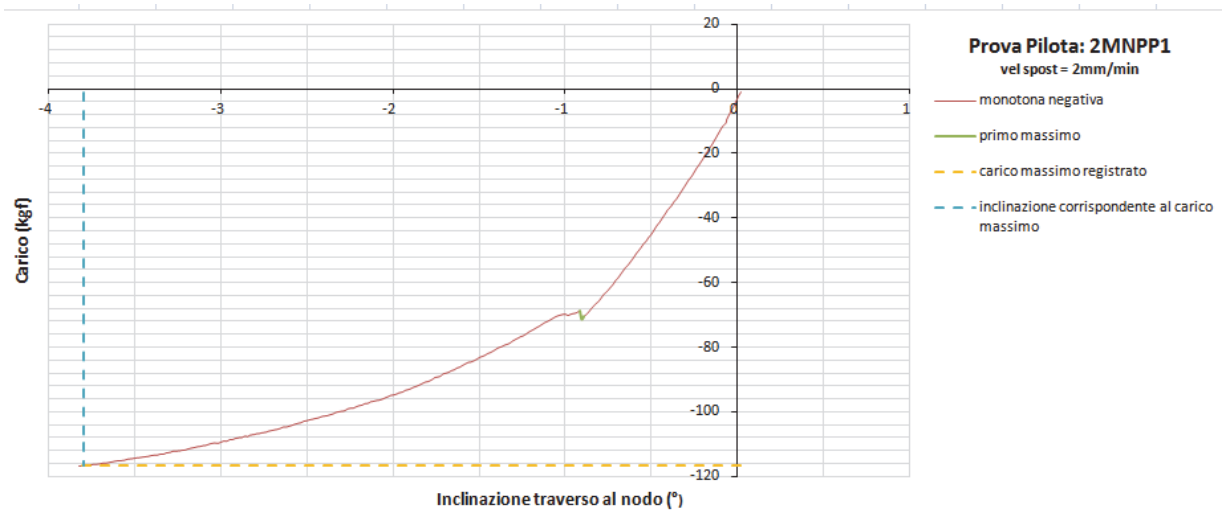


Figura 3-15 Curva carico-inclinazione del traverso al nodo. Carico massimo registrato e inclinazione corrispondente

## 3.1.2.2.6 Prova 2MNPP2

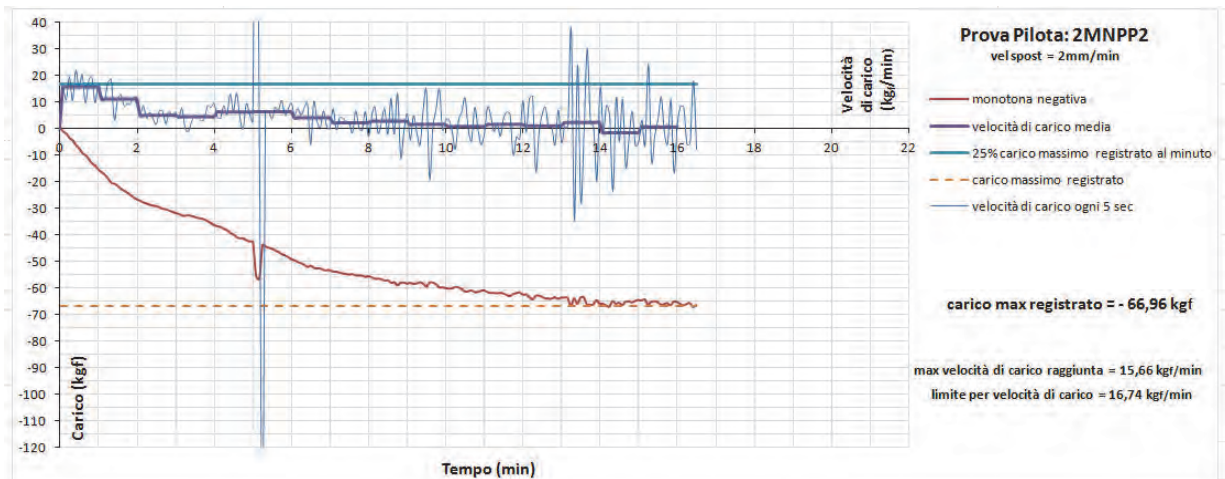


Figura 3-16 Curva carico-tempo. Velocità di carico media (kgf/min). Limite per la velocità di carico calcolato in base al massimo carico registrato

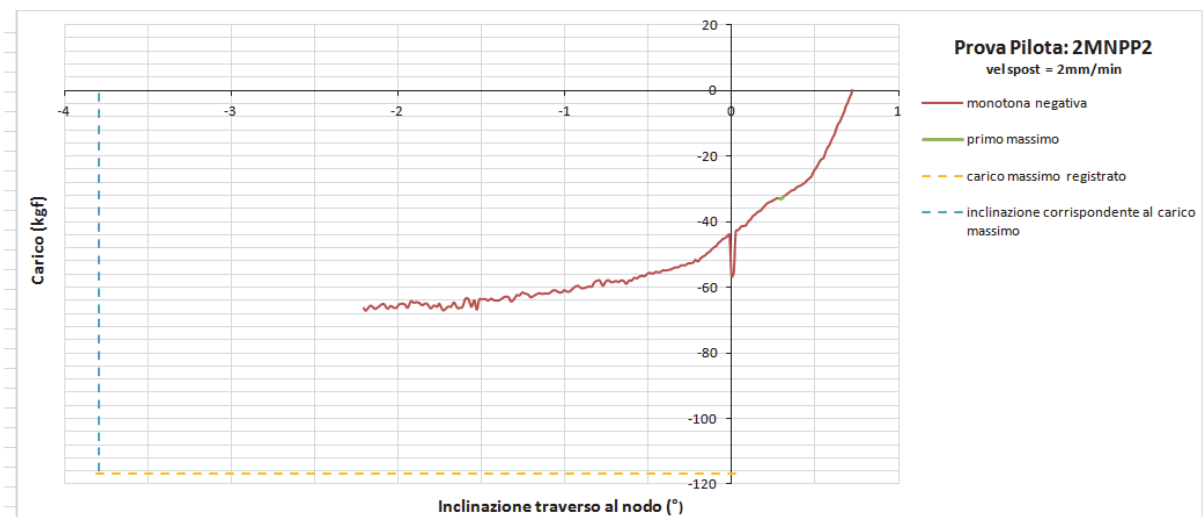


Figura 3-17 Curva carico-inclinazione del traverso al nodo. Carico massimo registrato e inclinazione corrispondente

### 3.1.2.2.7 Prova 2MNPP4

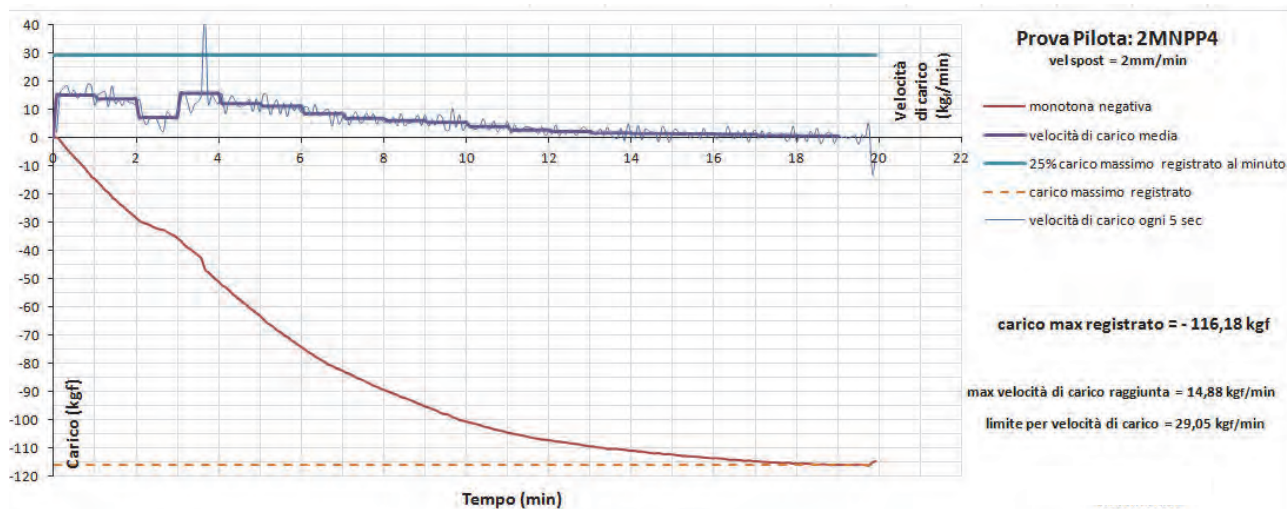


Figura 3-18 Curva carico-tempo. Velocità di carico media (kgf/min). Limite per la velocità di carico calcolato in base al massimo carico registrato

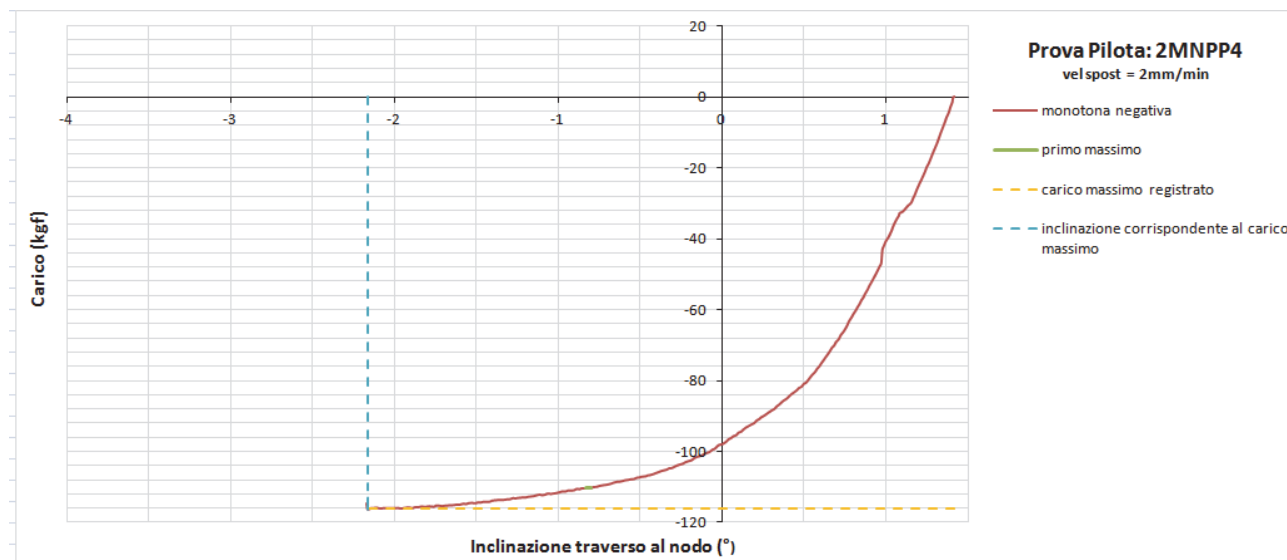


Figura 3-19 Curva carico-inclinazione del traverso al nodo. Carico massimo registrato e inclinazione corrispondente

## 3.1.2.2.8 Prova 2MNPP5

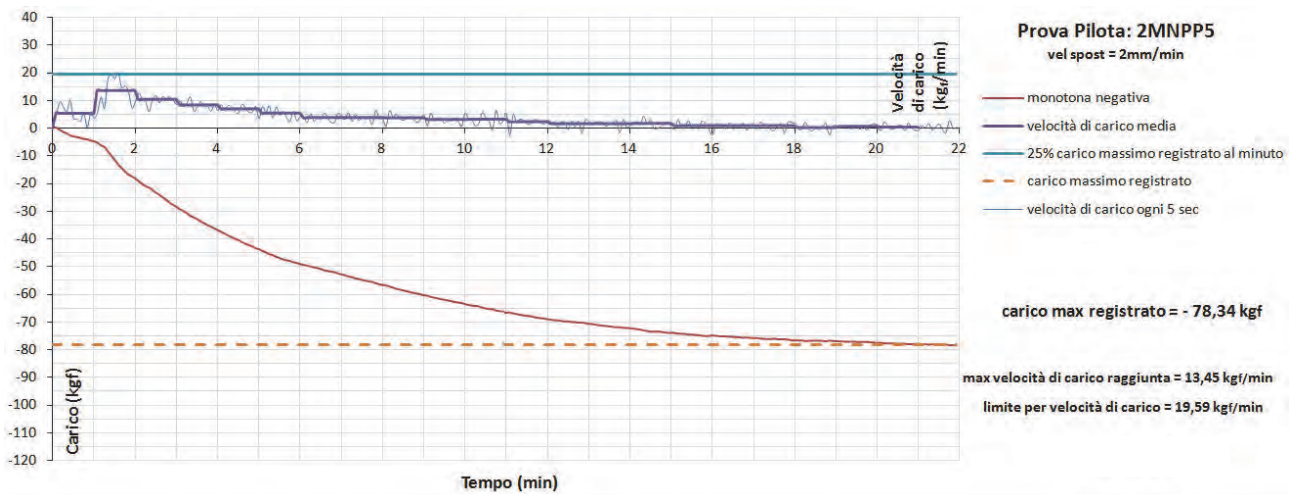


Figura 3-20 Curva carico-tempo. Velocità di carico media (kg<sub>f</sub>/min). Limite per la velocità di carico calcolato in base al massimo carico registrato

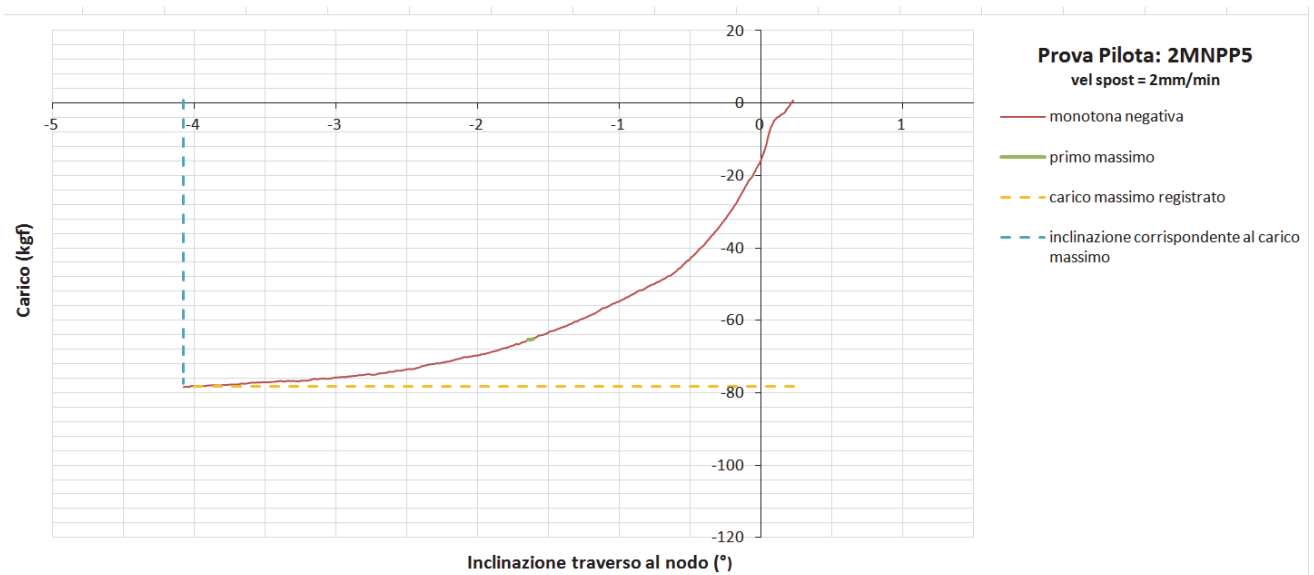


Figura 3-21 Curva carico-inclinazione del traverso al nodo. Carico massimo registrato e inclinazione corrispondente

### 3.1.2.3 Grafici delle prove positive

#### 3.1.2.3.1 Prova MPPP1

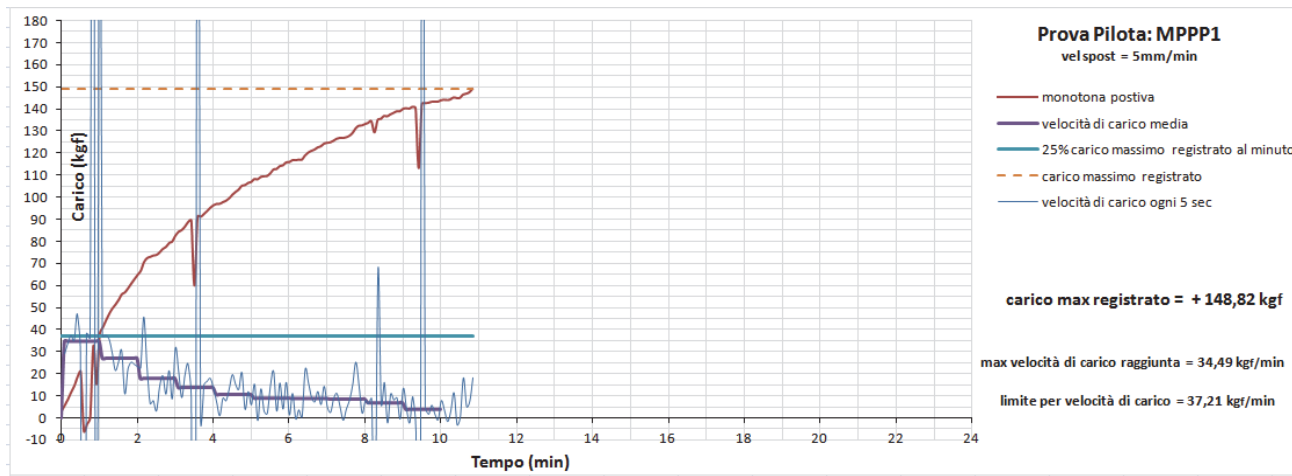


Figura 3-22 Curva carico-tempo. Velocità di carico media (kg<sub>f</sub>/min). Limite per la velocità di carico calcolato in base al massimo carico registrato

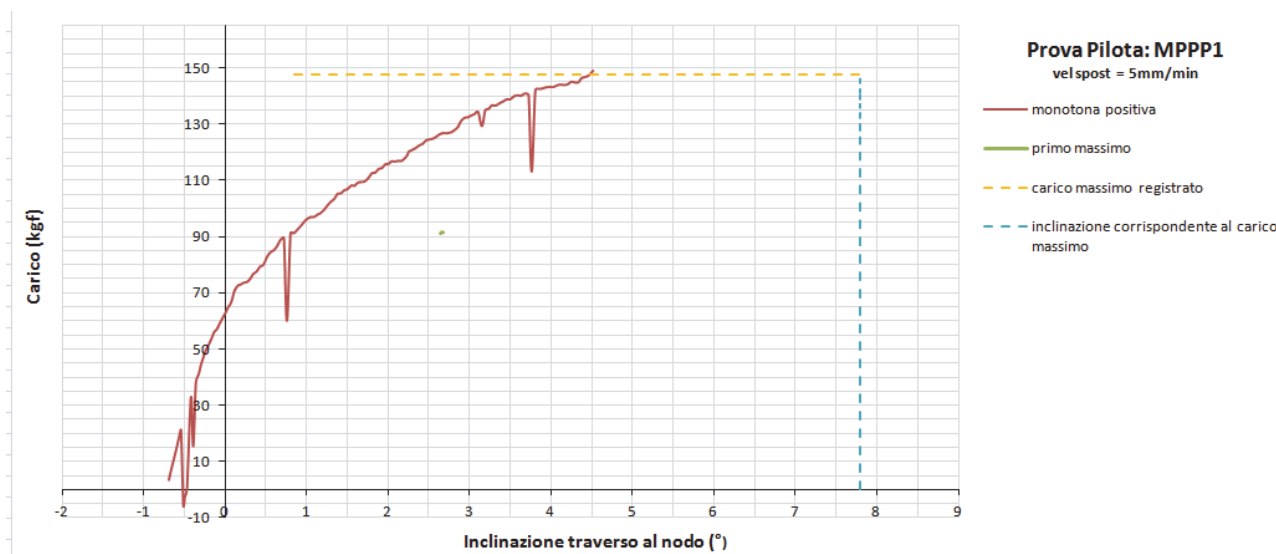


Figura 3-23 Curva carico-inclinazione del traverso al nodo. Carico massimo registrato e inclinazione corrispondente

## 3.1.2.3.2 Prova MPPP2

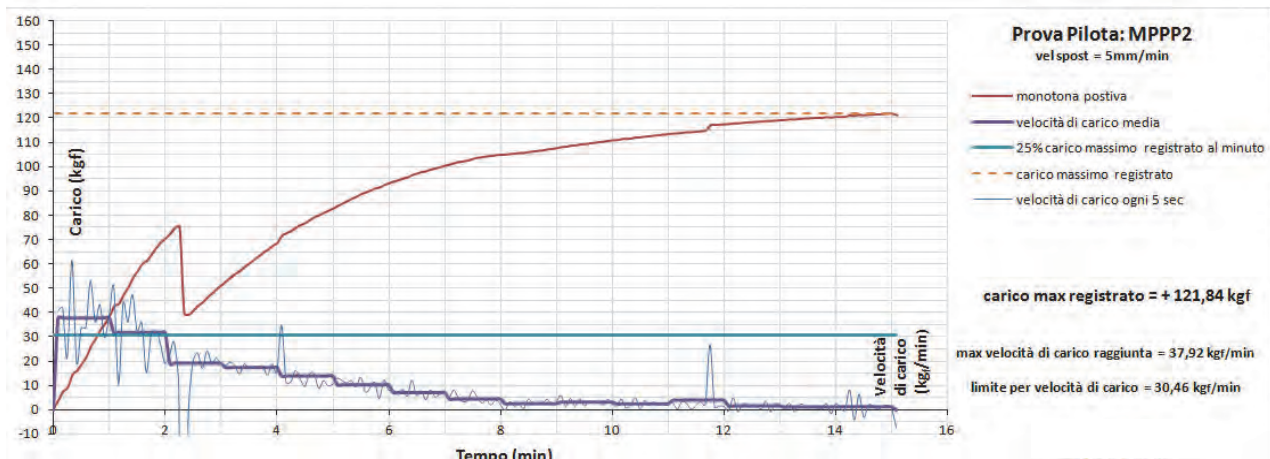


Figura 3-24 Curva carico-tempo. Velocità di carico media (kg/min). Limite per la velocità di carico calcolato in base al massimo carico registrato

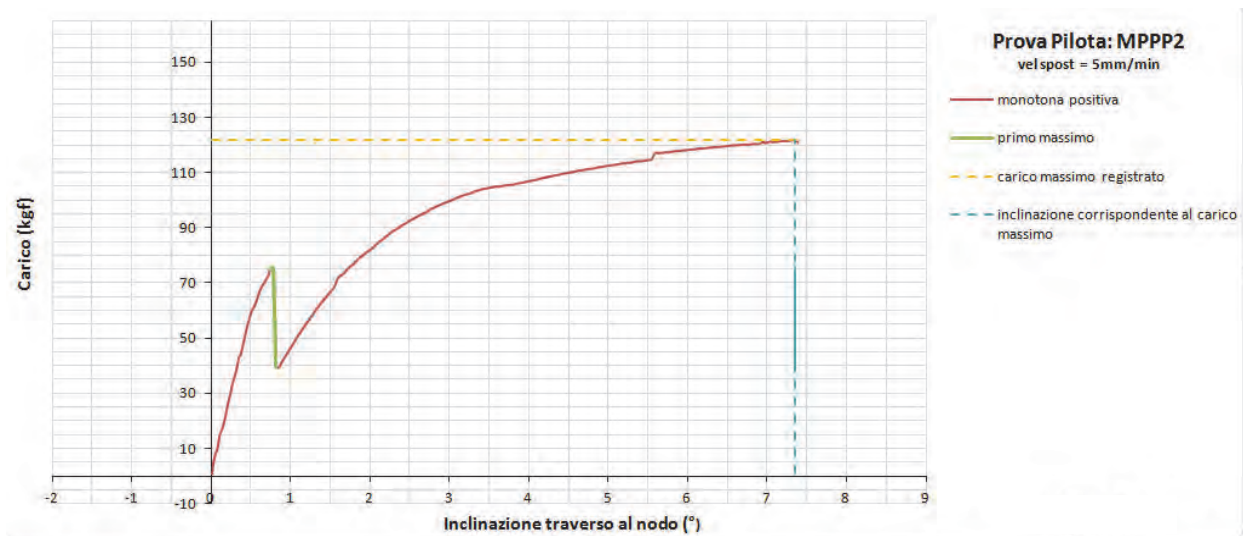


Figura 3-25 Curva carico-inclinazione del traverso al nodo. Carico massimo registrato e inclinazione corrispondente



### 3.1.2.3.3 Prova MPPP3

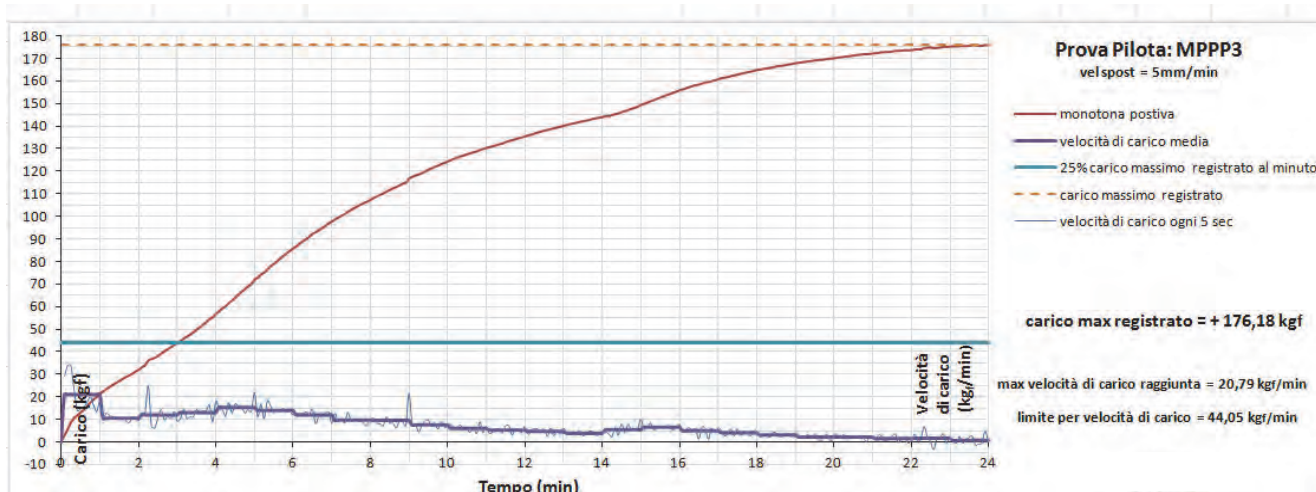


Figura 3-26 Curva carico-tempo. Velocità di carico media (kg<sub>f</sub>/min). Limite per la velocità di carico calcolato in base al massimo carico registrato

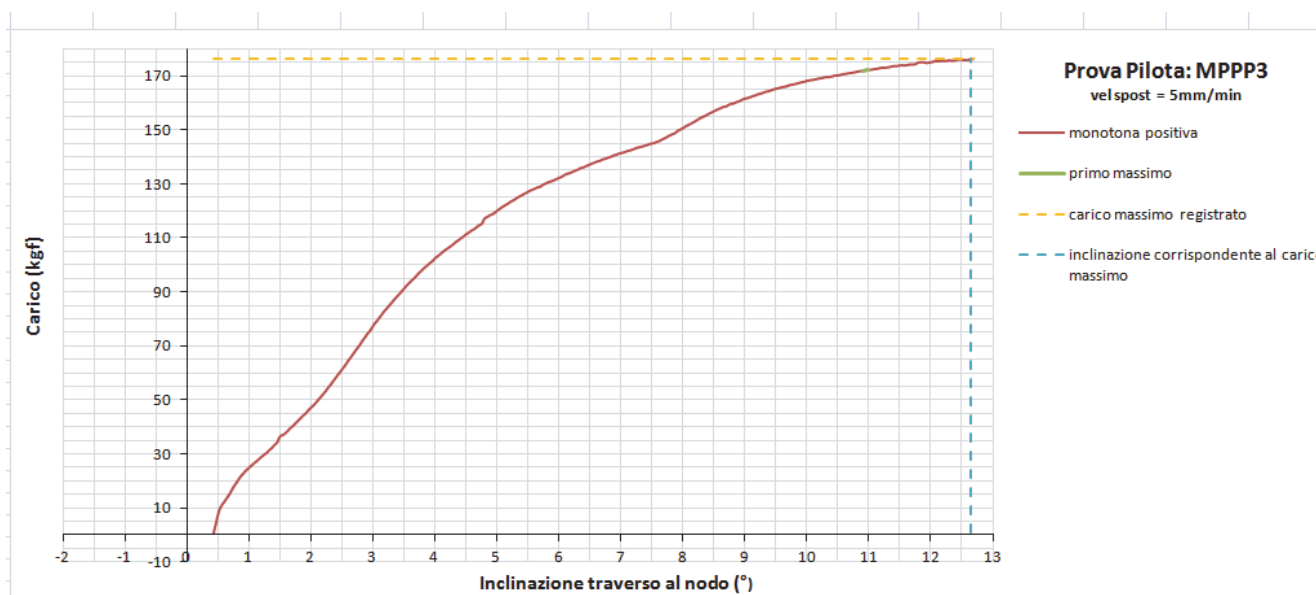


Figura 3-27 Curva carico-inclinazione del traverso al nodo. Carico massimo registrato e inclinazione corrispondente

## 3.1.2.3.4 Prova 2MPPP1

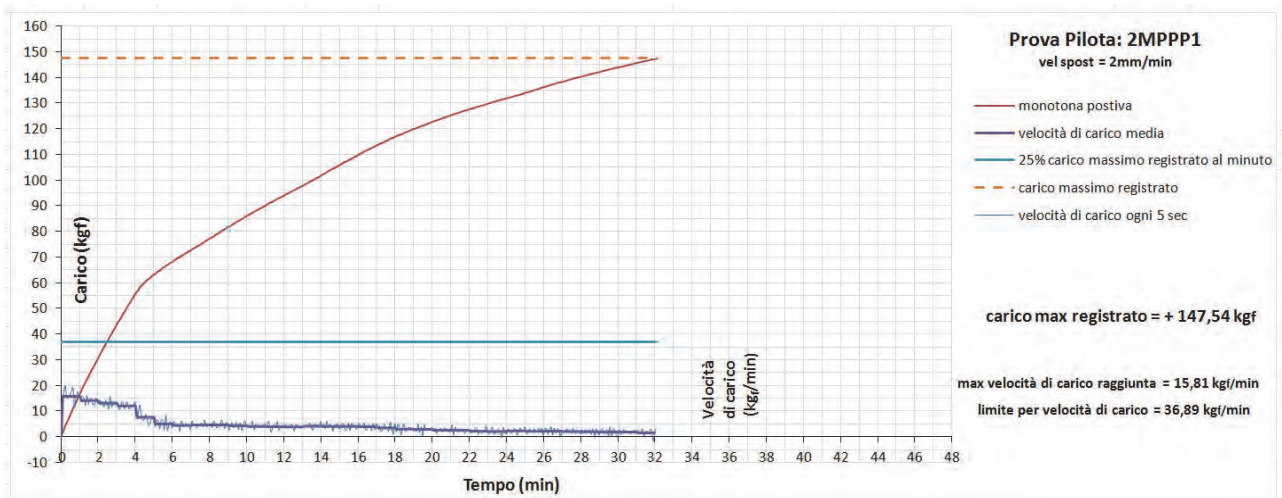


Figura 3-28 Curva carico-tempo. Velocità di carico media (kgf/min). Limite per la velocità di carico calcolato in base al massimo carico registrato

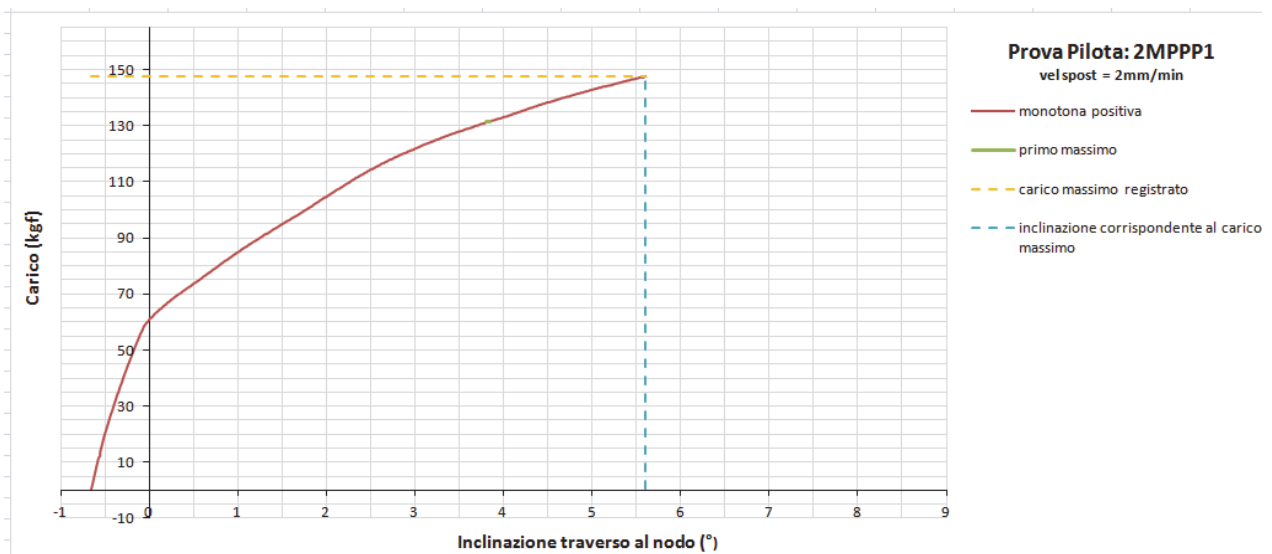


Figura 3-29 Curva carico-inclinazione del traverso al nodo. Carico massimo registrato e inclinazione corrispondente

### 3.1.2.3.5 Prova 2MPPP2

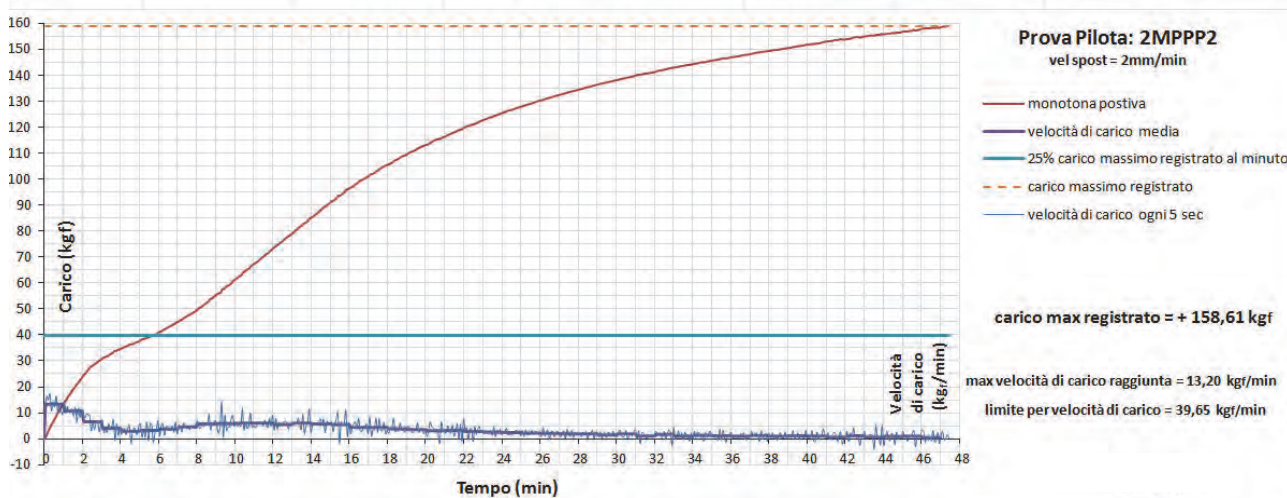


Figura 3-30 Curva carico-tempo. Velocità di carico media (kg<sub>f</sub>/min). Limite per la velocità di carico calcolato in base al massimo carico registrato

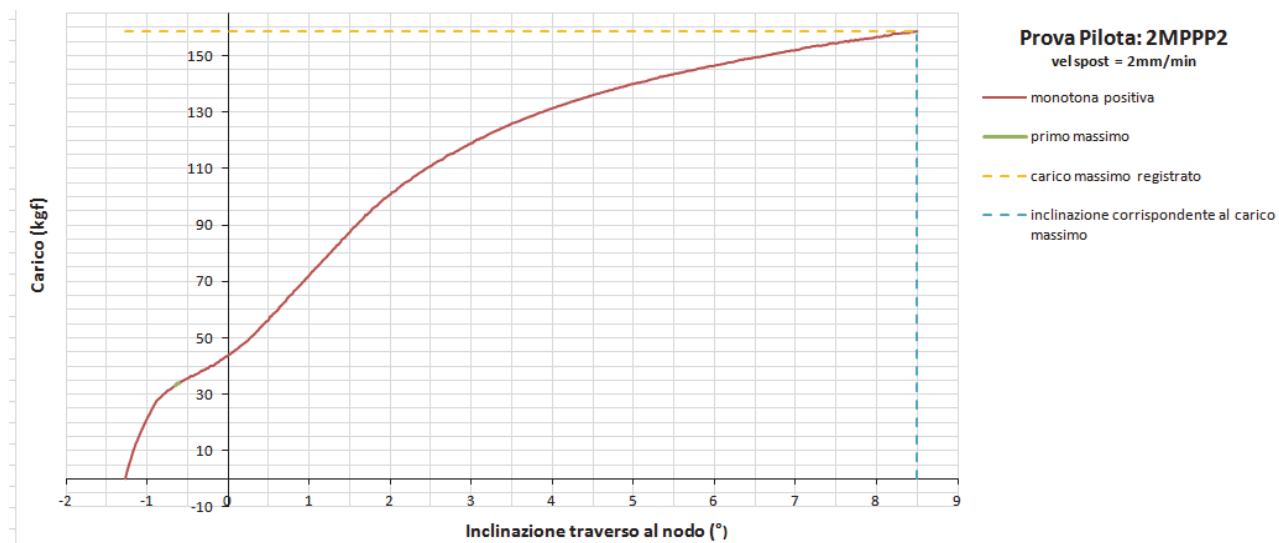


Figura 3-31 Curva carico-inclinazione del trasverso al nodo. Carico massimo registrato e inclinazione corrispondente

## 3.1.2.3.6 Prova 2MPPP3

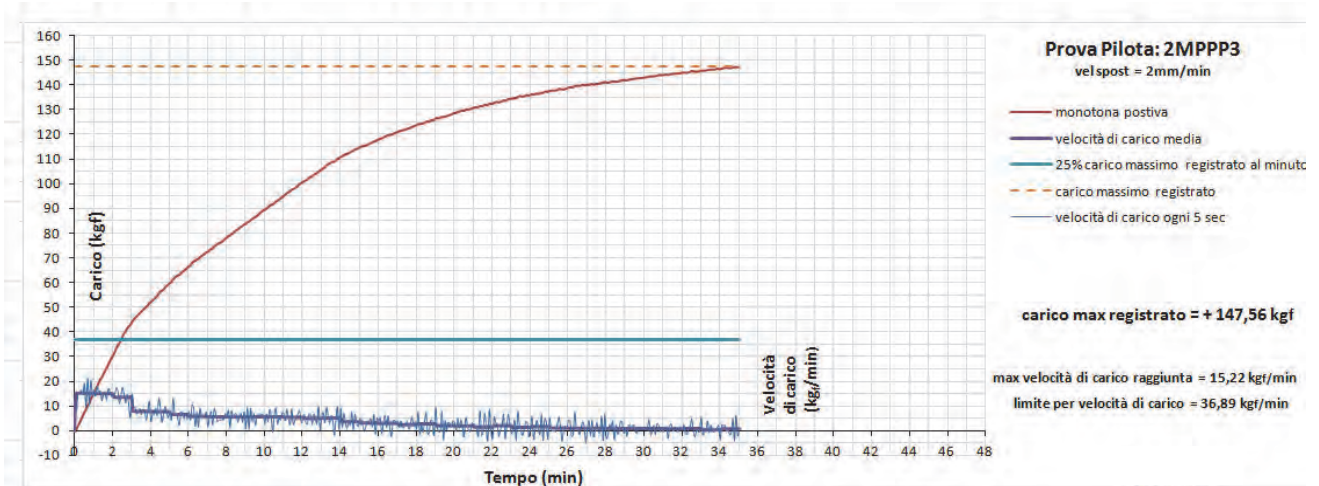


Figura 3-32 Curva carico-tempo. Velocità di carico media (kgf/min). Limite per la velocità di carico calcolato in base al massimo carico registrato

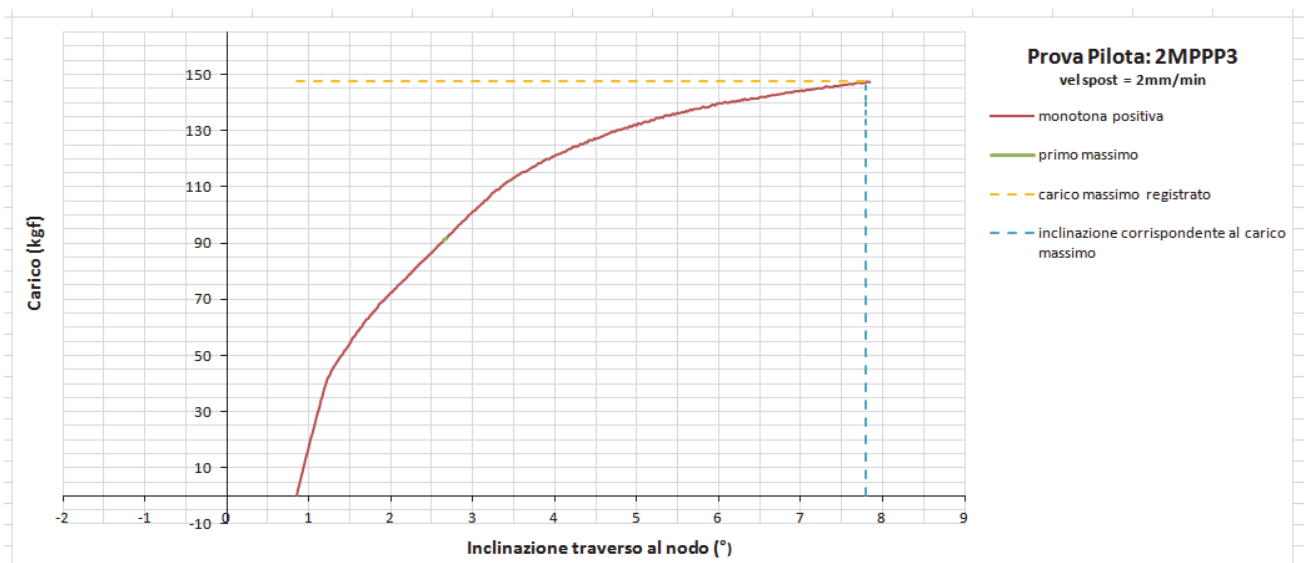


Figura 3-33 Curva carico-inclinazione del traverso al nodo. Carico massimo registrato e inclinazione corrispondente.

### 3.1.2.4 Analisi dei risultati

#### 3.1.2.4.1 Prove pilota negative

##### 3.1.2.4.1.1 Prove MNPP

Le prove pilota MNPP sono state eseguite con velocità di spostamento imposto della traversa pari a  $v_s=5\text{mm/min}$ .

Per le tre prove si ha analogo andamento della curva carico-tempo.

La rigidità iniziale, espressa in carico/min risulta essere pari a circa  $30\text{ kg}_f/\text{min}$ .

Nel primo minuto di prova non risulta soddisfatta la verifica della velocità di carico imposta dalla UNI EN 12811-3.

Per diminuire la velocità di carico iniziale occorre diminuire la velocità di spostamento della traversa.

Si eseguono quindi le prove 2MNPP, prove pilota negative con velocità di spostamento imposto della traversa pari a  $v_s=2\text{mm/min}$ .

##### 3.1.2.4.1.2 Prove 2MNPP

Le prove pilota 2MNPP sono state eseguite con velocità di spostamento imposto della traversa pari a  $v_s=2\text{mm/min}$ .

Per le prove eseguite si ha analogo andamento della curva carico-tempo.

La rigidità iniziale, espressa in carico/min, risulta essere per tutte le prove eseguite, pari a circa  $15\text{ kg}_f/\text{min}$ .

Nel primo minuto di prova risulta soddisfatta la verifica della velocità di carico imposta dalla UNI EN 12811-3.

La curva carico-tempo relativa alla prova 2MNPP2, risulta molto irregolare e quindi si decide di ritenerla non valida ai fini della stima del carico massimo stimato  $F_{\max}$  e di  $R_k$ .

Per la valutazione del carico massimo stimato  $F_{\max}$  risultano valide le prove:

2MNPP1, 2MNPP4, 2MNPP5.

#### 3.1.2.4.2 Prove pilota positive

##### 3.1.2.4.2.1 Prove MPPP

Le prove pilota MNPP sono state eseguite con velocità di spostamento imposto della traversa pari a  $v_s=5\text{mm/min}$ .

Per due fra le prove eseguite (MPPP1 e MPPP2) si ha analogo andamento della curva carico-tempo con decremento improvviso del carico intorno agli  $80\text{ kg}_f$ .

Per tali prove la rigidità iniziale, espressa in carico/min risulta essere pari a circa  $40\text{ kg}_f/\text{min}$ .

Per la terza prova (MPPP3), la rigidità iniziale risulta essere pari a circa  $20\text{ kg}_f/\text{min}$ .

Nel primo minuto di prova non risulta soddisfatta la verifica della velocità di carico imposta dalla UNI EN 12811-3 per la prova MPPP2.

Tale circostanza, oltre al fatto che per le prove negative deve essere imposta una velocità pari a  $v_s=2\text{mm/min}$ , occorre eseguire altre prove positive con velocità di spostamento della traversa pari a  $v_s=2\text{mm/min}$ .

Si eseguono quindi le prove 2MPPP, prove pilota positive con velocità di spostamento imposto della traversa pari a  $v_s=2\text{mm/min}$ .

##### 3.1.2.4.2.2 Prove 2MPPP

Le prove pilota 2MPPP sono state eseguite con velocità di spostamento imposto della traversa pari a  $v_s=2\text{mm/min}$ .

Per le prove eseguite si ha analogo andamento della curva carico-tempo.

La rigidità iniziale, espressa in carico/min, risulta essere per tutte le prove eseguite, pari a circa  $15\text{ kg}_f/\text{min}$ .

Nel primo minuto di prova risulta soddisfatta la verifica della velocità di carico imposta dalla UNI EN 12811-3.

Il carico massimo per ogni prova è risultato avere valore simile.  
Per la valutazione del carico massimo stimato  $F_{max}$  risultano valide<sup>6</sup> le prove:  
2MPPP1, 2MPPP2, 2MPPP3.

### 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  $\overline{F_{max}}$  ( $F_{max}^+$  o  $F_{max}^-$ ) il valore caratteristico quale il quantile del 5% per un livello di confidenza del 75% .

Posti  $F_{max,1}$ ,  $F_{max,2}$ ,  $F_{max,3}$ , i valori massimi per ognuna delle prove eseguite, si avrà:

prova i	1	2	3
$F_{max,i}$ (kgf)	$F_{max,1}$	$F_{max,2}$	$F_{max,3}$

$$\overline{F_{max}} = e^{y_5}$$

dove:

$$y_5 = \bar{y} - k_{sk} \cdot \sqrt{s_y^2} \quad \text{è il quantile del 5\% per il livello di confidenza del 75\%}$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad \text{è il valore medio dei valori } y_i$$

$$y_i = \ln(F_{max,i}) \quad \text{sono i valori logaritmici degli } F_{max,i}$$

$$k_{sk} = 3,15 \quad \text{è il fattore quantile}^7 \text{ (per } n=3) \text{ relativo al quantile del 5\% per un livello di confidenza del 75\%}$$

$$s_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad \text{è la varianza}$$

$$s_y \quad \text{è l'errore standard}$$

Di seguito si indicheranno con  $\overline{F_{max}^+}$  e  $\overline{F_{max}^-}$  i carichi massimi  $\overline{F_{max}}$  come appena determinati, rispettivamente nella direzione positiva e negativa dello spostamento imposto.

Per il calcolo del carico massimo stimato negativo si considerano i risultati delle tre prove 2MNPP1, 2MNPP4, 2MNPP5.

Per il calcolo del carico massimo stimato positivo si considerano i risultati delle tre prove 2MPPP1, 2MPPP2, 2MPPP3.

<sup>6</sup> Vedi nota 2

<sup>7</sup> Prospetto 4, paragrafo 8 della UNI EN 12811-3:2005

Risulta, per prove negative,  $\overline{F_{max}^-} = - 49,62 \text{ kg}_f$

numero prove valide		n = 3		k <sub>sk</sub> = 3,15			
	Carico massimo						Carico massimo stimato
Prove valide	$F_{max,i}$	$y_i = \ln(F_{max,i})$	$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$	$(y_i - \bar{y})^2$	$s_y^2$	$y_5$	$\overline{F_{max}} = e^{y_5}$
2MNPP1	116,7	4,759607		0,018047			
2MNPP5	78,34	4,361058		0,069807			
2MNPP4	116,18	4,755141		0,016867			
			4,625269		0,05236	3,904474	49,62
media	103,74						

Risulta, per prove positive,  $\overline{F_{max}^+} = + 132,53 \text{ kg}_f$

numero prove valide		n = 3		k <sub>sk</sub> = 3,15			
	Carico massimo						Carico massimo stimato
Prove valide	$F_{max,i}$	$y_i = \ln(F_{max,i})$	$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$	$(y_i - \bar{y})^2$	$s_y^2$	$y_5$	$\overline{F_{max}} = e^{y_5}$
2MPPP1	147,54	4,994099		0,000584			
2MPPP2	158,61	5,066448		0,002322			
2MPPP3	147,56	4,994235		0,000577			
			5,018261		0,00174	4,886806	132,53
media	151,24						

### 3.1.4 Osservazioni

- Eseguire dapprima le prove pilota negative visto che nel verso negativo dello spostamento il dispositivo di collegamento è meno resistente. Quindi la velocità di spostamento da imporre risulta più bassa rispetto al verso positivo.
- Per il calcolo di  $\overline{F_{max}}$  sarebbe opportuno eseguire almeno 5 prove e non 3, in linea con ciò che richiede la norma: “*Almeno 5 prove per ogni parametro*”. Per il caso negativo un risultato distante dagli altri due ottenuti, conduce ad un valore di  $\overline{F_{max}}$  molto basso e molto lontano dalla media dei tre valori registrati.
- Visto che, a questo punto della sperimentazione, la strumentazione di prova *old* risulta fuori servizio, si ritiene opportuno, con la strumentazione *new*, reiterare l'esecuzione delle prove pilota, mettendo a frutto le osservazioni 1 e 2.

In questo modo, con riferimento ai diagrammi di flusso per le prove pilota di cui al paragrafo 2.1.2, occorrerà effettuare almeno le seguenti prove pilota:

- 5, per la stima di  $\overline{F_{max}^-}$
- 5, per la stima di  $\overline{F_{max}^+}$
- 5, per la stima di  $R_k^+$ , se  $\overline{F_{max}^+}$  non può coincidere con  $R_k^+$
- 5, per la stima di  $R_k^-$ , se  $\overline{F_{max}^-}$  non può coincidere con  $R_k^-$



### 3.2 Prove pilota *new*

In considerazione del fatto che l'attrezzatura *old* è stata dismessa prima di completare il ciclo previsto, è stato ritenuto opportuno eseguire di nuovo le prove pilota.

Le prove *old* sono state comunque utili per la messa a punto della procedura, visto che hanno evidenziato per esempio che tre prove pilota per la determinazione del carico massimo stimato non sono sufficienti (vedi paragrafo 3.1.4). Hanno inoltre permesso di impostare la corretta velocità di spostamento ( $v_s = 2\text{mm/min}$ ).

Le prove pilota *new* sono prove di tipo monotono nello spostamento, eseguite utilizzando la strumentazione *new*.

Tale strumentazione 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 con le prove sperimentali delle prove pilota *old*.

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  $R_k^+$ .

Nel periodo di ricerca 2014-2015, sono state eseguite le seguenti prove sperimentali, utilizzando l'attrezzatura denominata *new*:

Prova 2MNPP1 (monotona negativa,  $v_s = 2\text{mm/min}$ )  
 Prova 2MNPP2 (monotona negativa,  $v_s = 2\text{mm/min}$ )  
 Prova 2MNPP3 (monotona negativa,  $v_s = 2\text{mm/min}$ )  
 Prova 2MNPP4 (monotona negativa,  $v_s = 2\text{mm/min}$ )  
 Prova 2MNPP5 (monotona negativa,  $v_s = 2\text{mm/min}$ )  
 Prova 2MNPP6 (monotona negativa,  $v_s = 2\text{mm/min}$ )

Prova 2MPPP1 (monotona positiva,  $v_s = 2\text{mm/min}$ )  
 Prova 2MPPP2 (monotona positiva,  $v_s = 2\text{mm/min}$ )  
 Prova 2MPPP3 (monotona positiva,  $v_s = 2\text{mm/min}$ )  
 Prova 2MPPP4 (monotona positiva,  $v_s = 2\text{mm/min}$ )  
 Prova 2MPPP5 (monotona positiva,  $v_s = 2\text{mm/min}$ )

### 3.2.1 Disposizione e procedimento di prova per le prove pilota *new*

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.

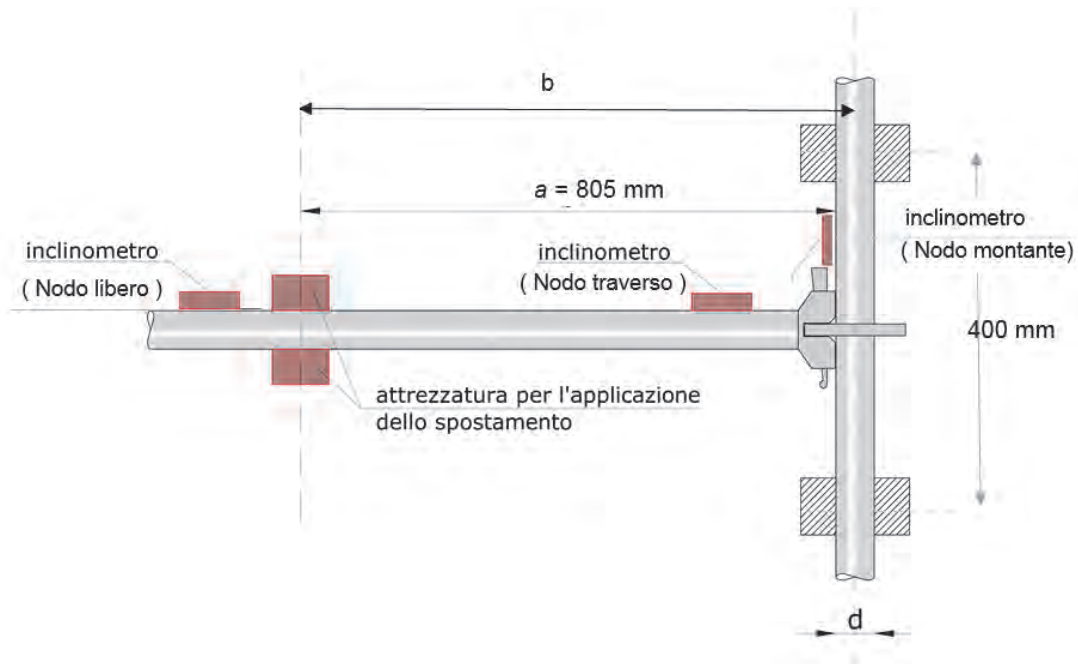


Figura 3-34 Schema di prova *new*

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

1. Carico ( $kg_f$ ) al contatto con il traverso
2. Inclinazione ( $^\circ$ ) del traverso in corrispondenza del collegamento al montante (Nodo traverso)
3. Inclinazione ( $^\circ$ ) del montante in corrispondenza del collegamento al traverso (Nodo montante)
4. 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 dello stesso accessorio utilizzato nelle prove *old*.

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):

$$b \text{ (mm)} = 805 + d/2 \quad \text{con } d \text{ diametro esterno del montante.} \quad (3.2.1-1)$$

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 nuova 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 trasverso
- 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:

$$v_i = F_{(i-1)} - F_i \quad \text{con } i=1,2,..t_{fin} \text{ (min)} \quad \text{per prove monotone negative}$$

$$v_i = F_i - F_{(i-1)} \quad \text{con } i=1,2,..t_{fin} \text{ (min)} \quad \text{per prove monotone positive}$$

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.

### 3.2.1.1 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.

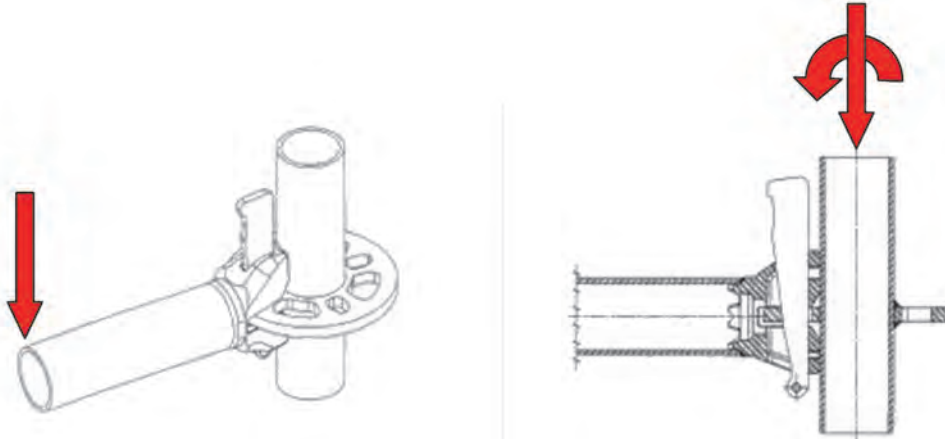


Figura 3-35 Schema di applicazione dello spostamento negativo e azioni al nodo

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  $R_k$ .

### 3.2.1.2 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).

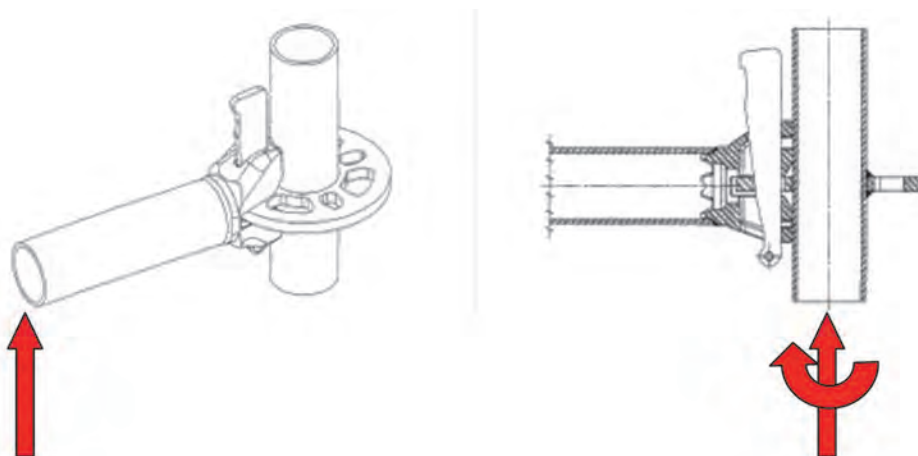


Figura 3-36 Schema di applicazione dello spostamento positivo e azioni al nodo

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  $R_k^+$ .

### 3.2.2 Risultati sperimentali per le prove pilota *new*

#### 3.2.2.1 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
- Eventuale commenti

#### Prove 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 <sub>f</sub>	kg <sub>f</sub> / min	kg <sub>f</sub> / min	
2MNPP1	2	-128,44	12,59	32,11	<b>SI</b>
2MNPP2	2	-129,47	11,66	32,37	<b>SI</b>
2MNPP3	2	-125,24	8,98	31,31	<b>SI</b>
2MNPP4 <sup>1</sup>	2	-81,51	8,33	20,38	<b>SI</b>
2MNPP5	2	-144,41	11,7	36,10	<b>SI</b>
2MNPP6	2	-144,22	14,95	36,06	<b>SI</b>

Note: <sup>(1)</sup> Prova non valida per difetto di montaggio

Tabella 2 Sintesi dei risultati sperimentali per le prove pilota *new* negative

#### Prove 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 <sub>f</sub>	kg <sub>f</sub> / min	kg <sub>f</sub> / min	
2MPPP1	2	154,07	11,85	38,52	<b>SI</b>
2MPPP2	2	140,03	11,68	35,01	<b>SI</b>
2MPPP3	2	141,43	15,23	35,36	<b>SI</b>
2MPPP4	2	149,42	12,83	37,36	<b>SI</b>
2MPPP5	2	143,99	13,09	36,00	<b>SI</b>

Tabella 3 Sintesi dei risultati sperimentali per le prove pilota *new* positive

### 3.2.2.2 Grafici delle prove pilota negative

#### 3.2.2.2.1 Prova 2MNPP1:

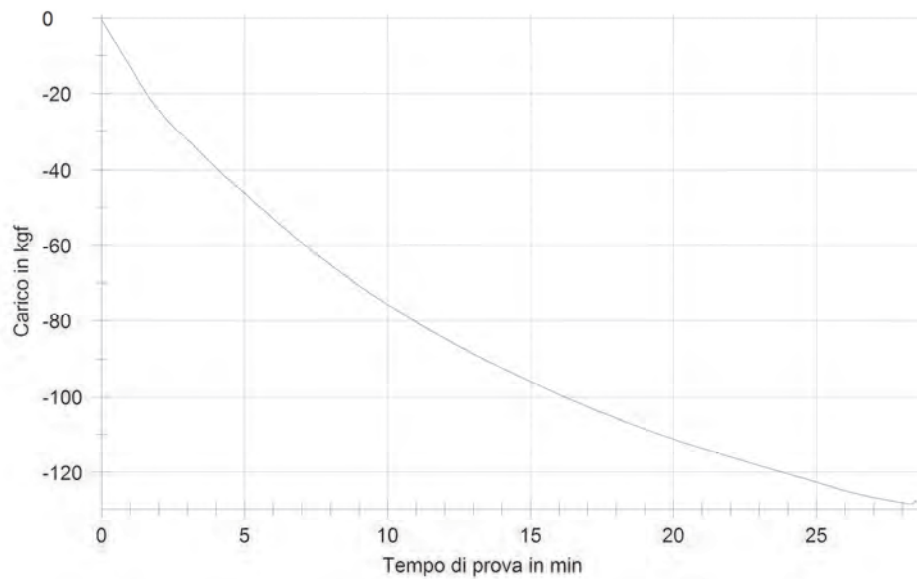


Figura 3-37 Curva carico-tempo.

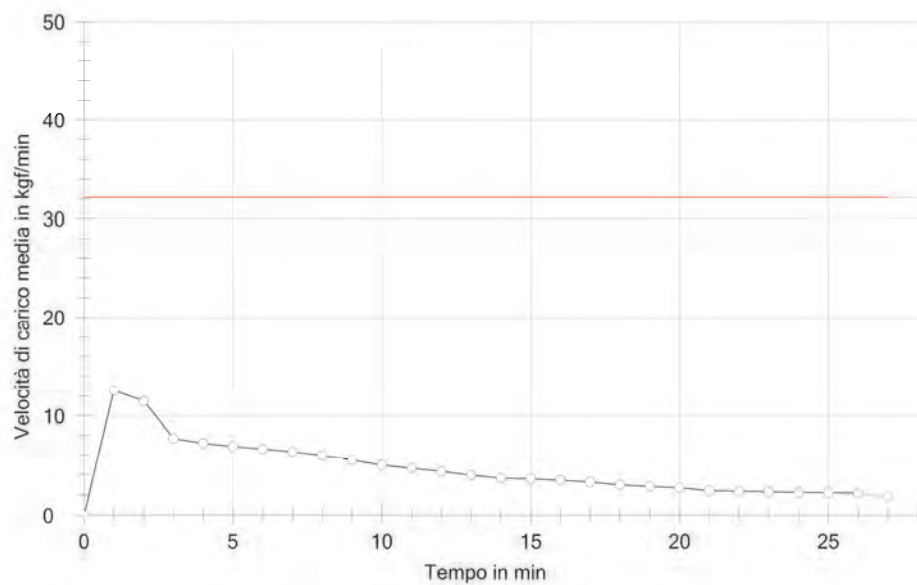


Figura 3-38 Velocità di carico media (kgf/min). Limite per la velocità di carico calcolato in base al massimo carico registrato

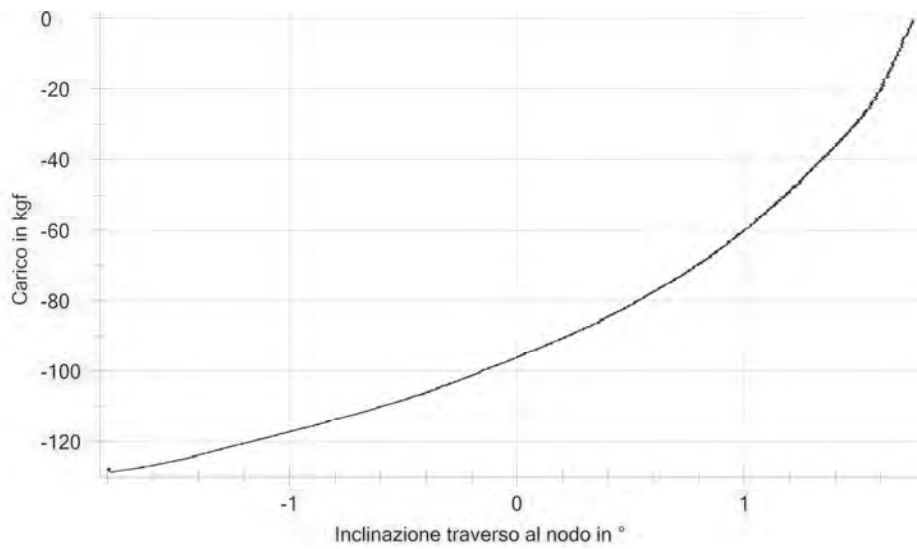


Figura 3-39 Curva carico – inclinazione trasverso al nodo

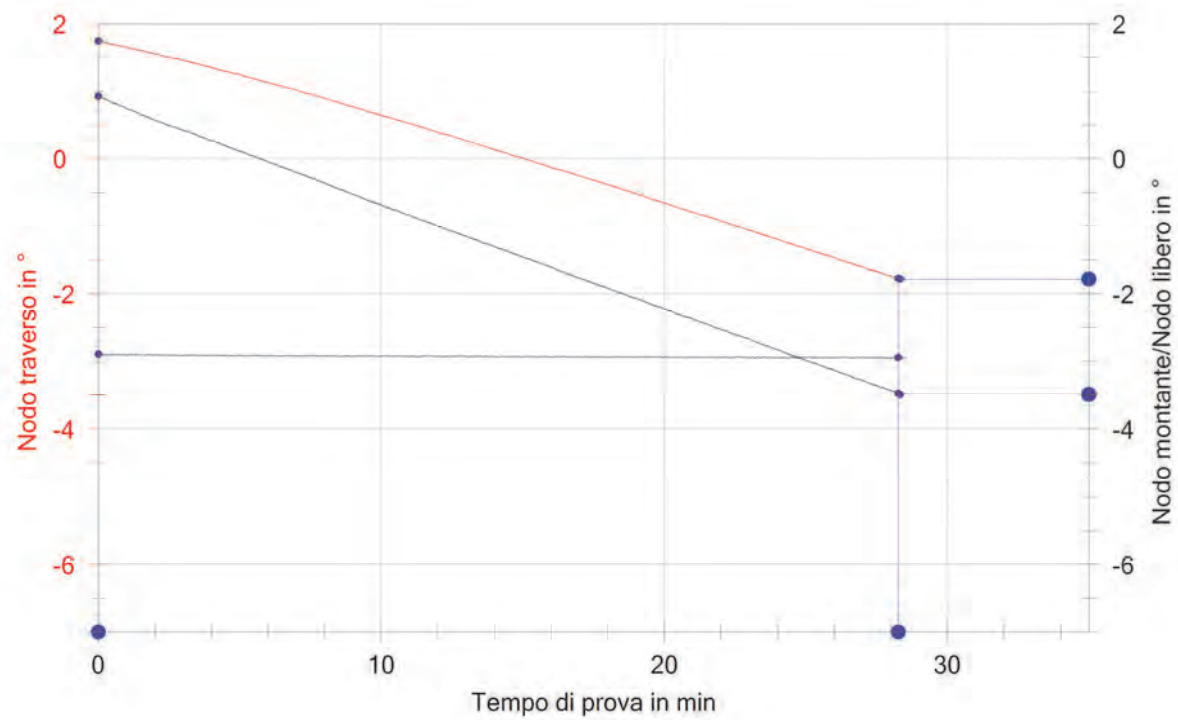


Figura 3-40 Inclinazione nodo trasverso, nodo libero e nodo montante nel tempo



Figura 3-41 Foto inizio prova



Figura 3-42 Foto fine prova



### 3.2.2.2.2 Prova 2MNPP2:

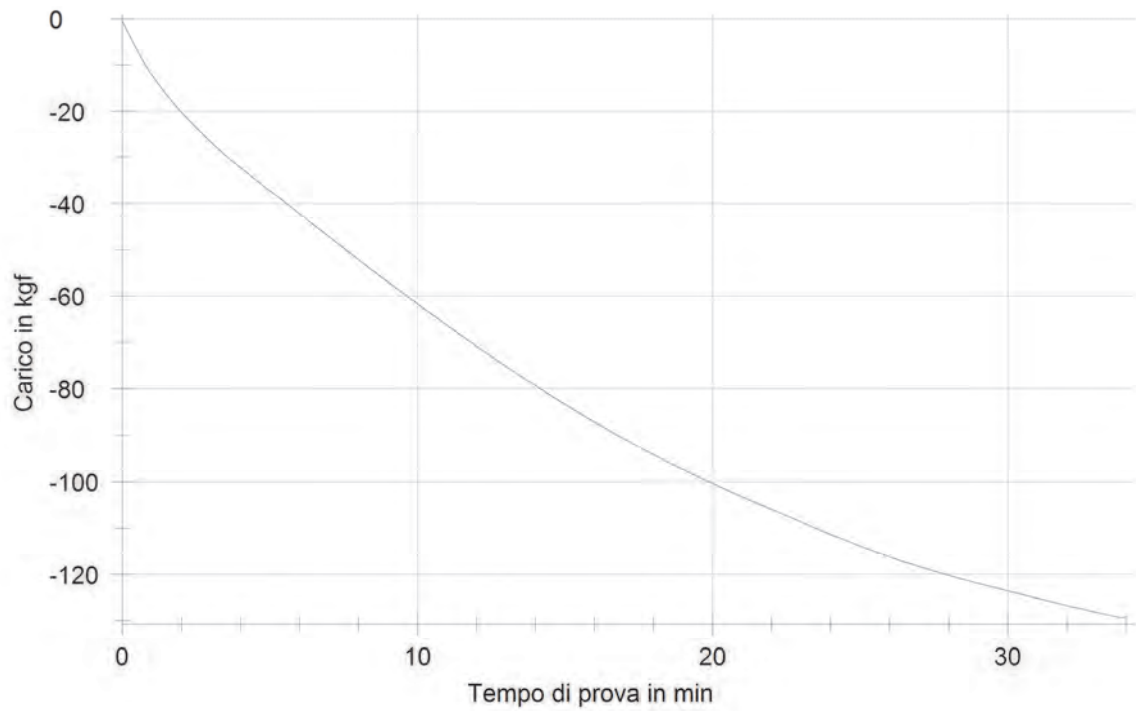


Figura 3-43 Curva carico-tempo.

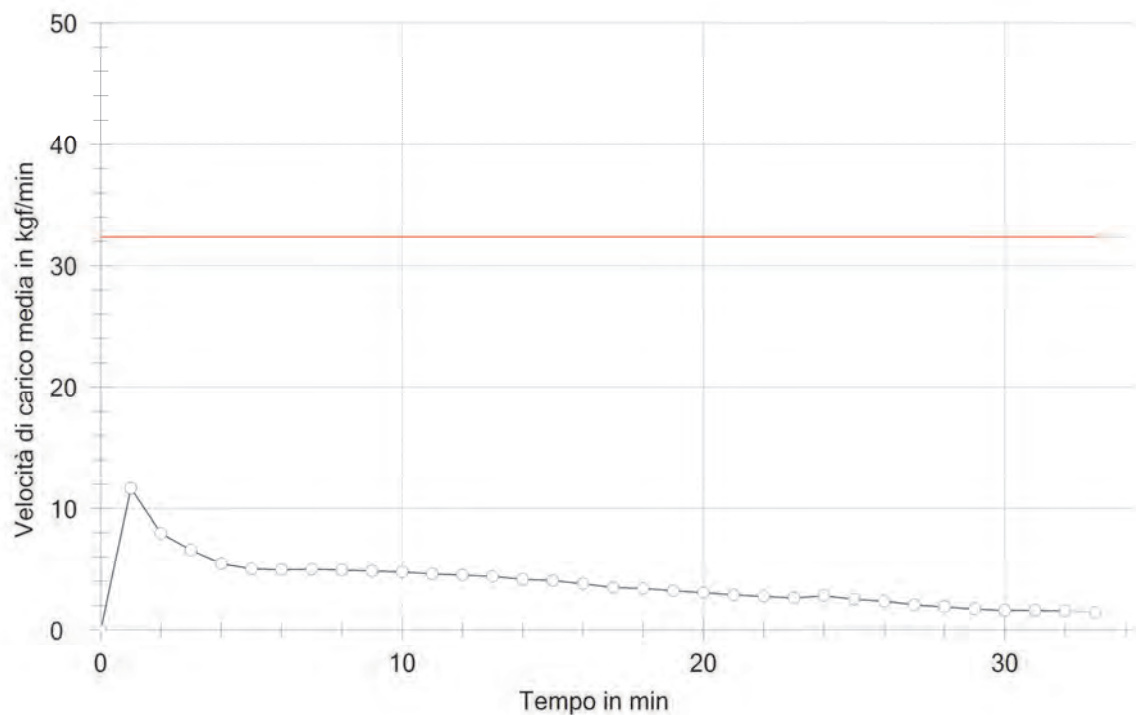


Figura 3-44 Velocità di carico media (kgf/min). Limite per la velocità di carico calcolato in base al massimo carico registrato

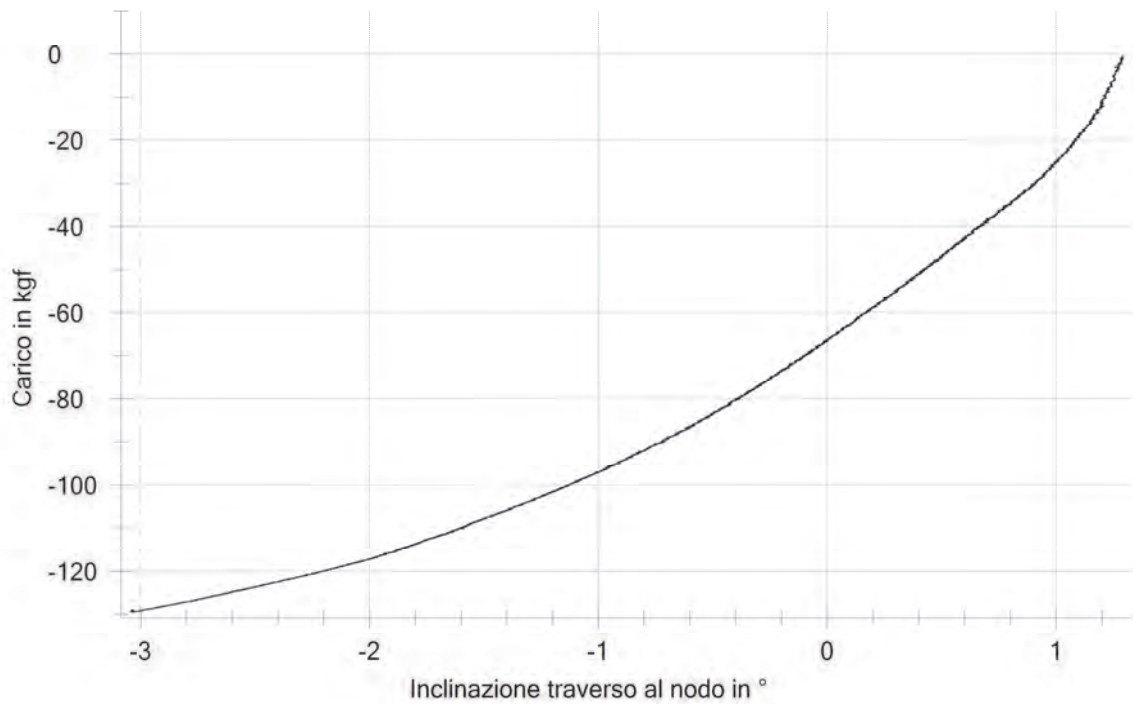


Figura 3-45 Curva carico – inclinazione trasverso al nodo

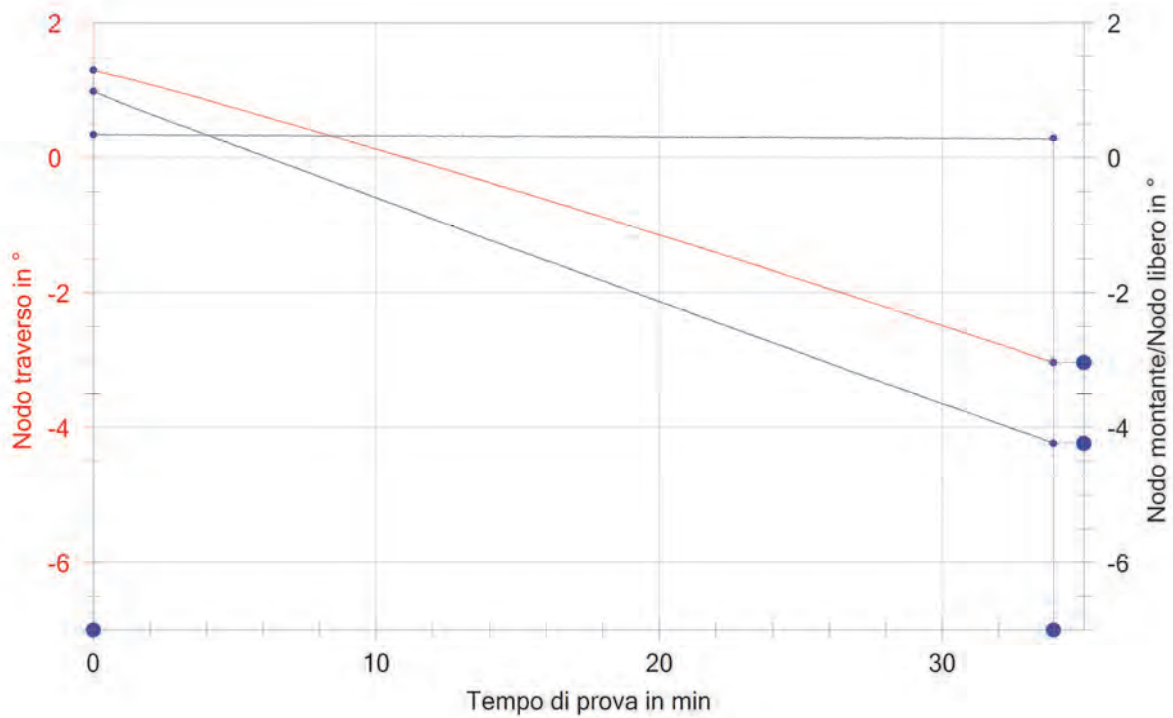


Figura 3-46 Inclinazione nodo trasverso, nodo libero e nodo montante nel tempo



Figura 3-47 Foto inizio prova



Figura 3-48 Foto fine prova

## 3.2.2.2.3 Prova 2MNPP3:

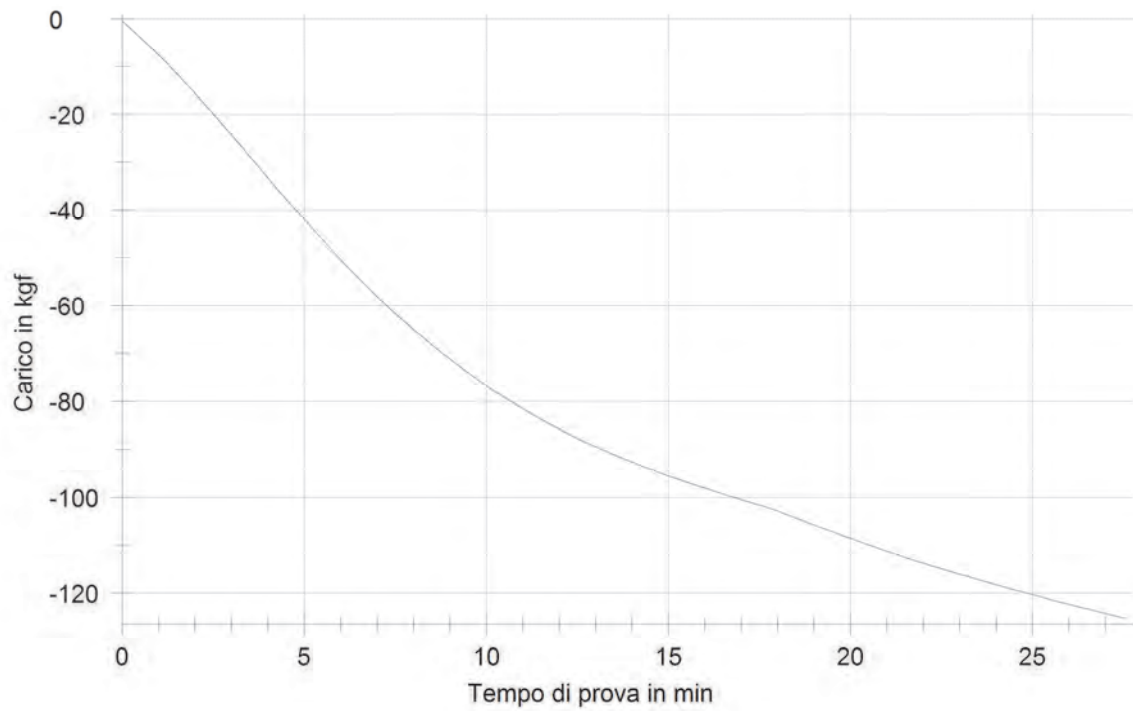


Figura 3-49 Curva carico-tempo.

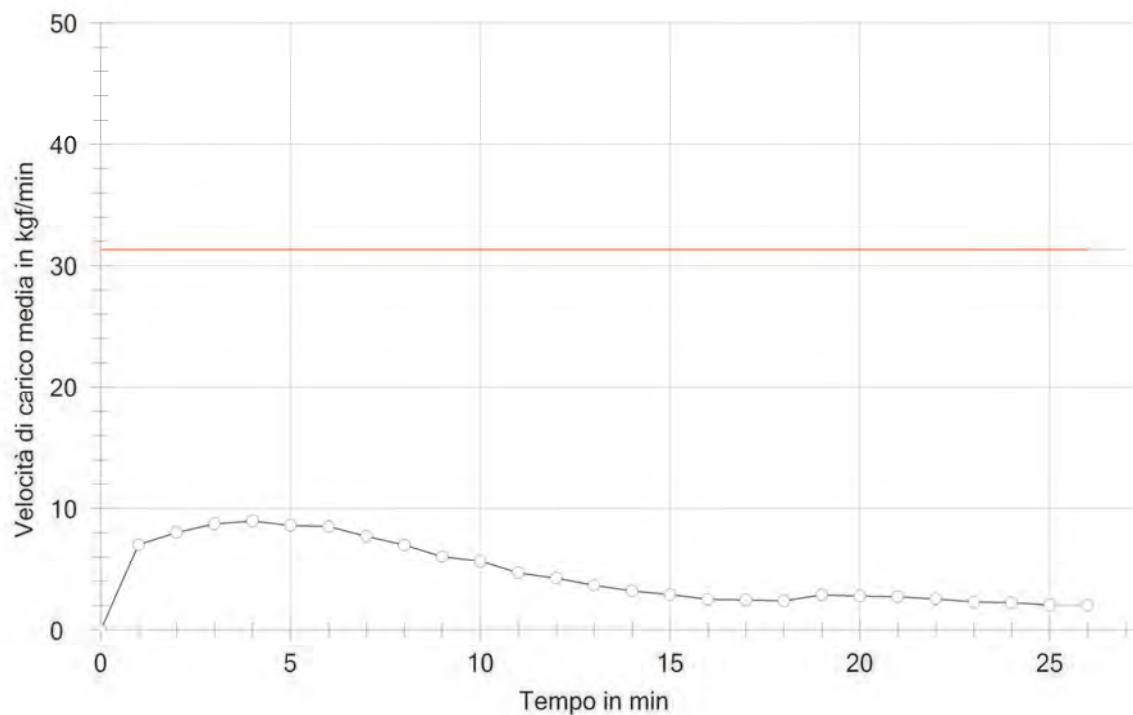


Figura 3-50 Velocità di carico media (kgf/min). Limite per la velocità di carico calcolato in base al massimo carico registrato

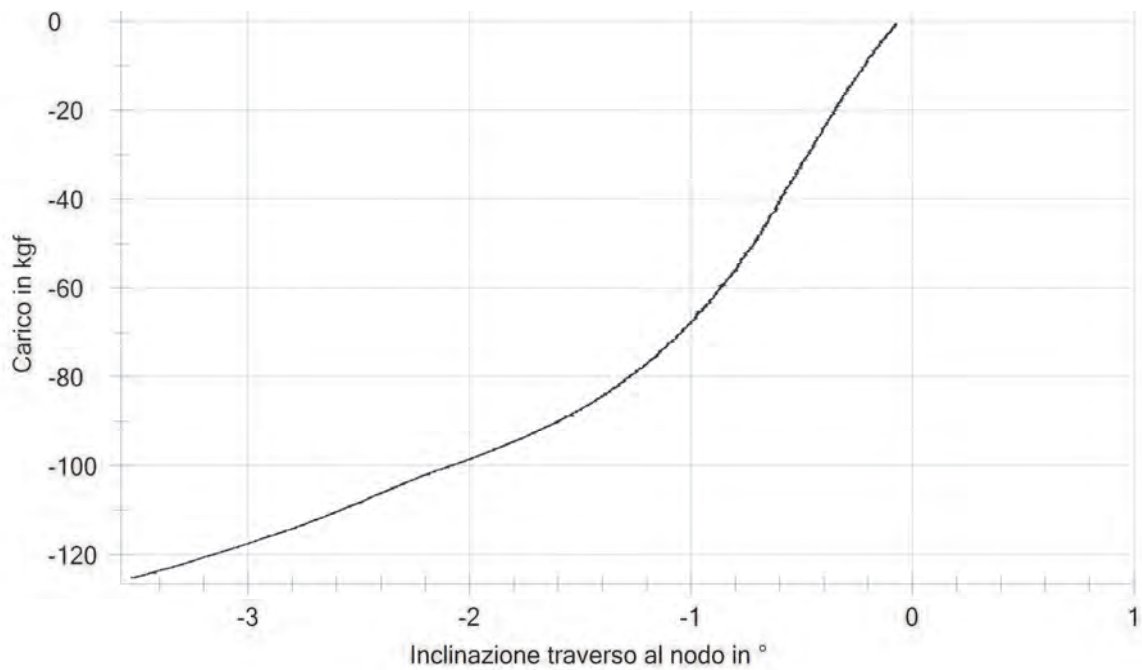


Figura 3-51 Curva carico – inclinazione trasverso al nodo

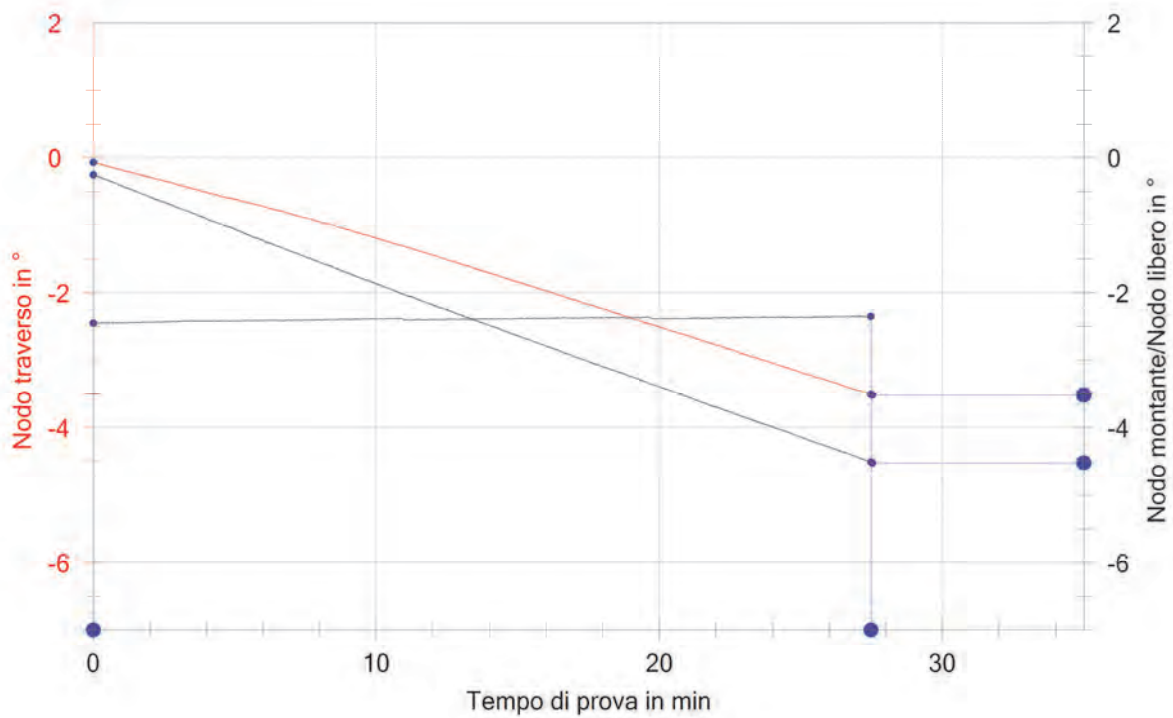


Figura 3-52 Inclinazione nodo trasverso, nodo libero e nodo montante nel tempo

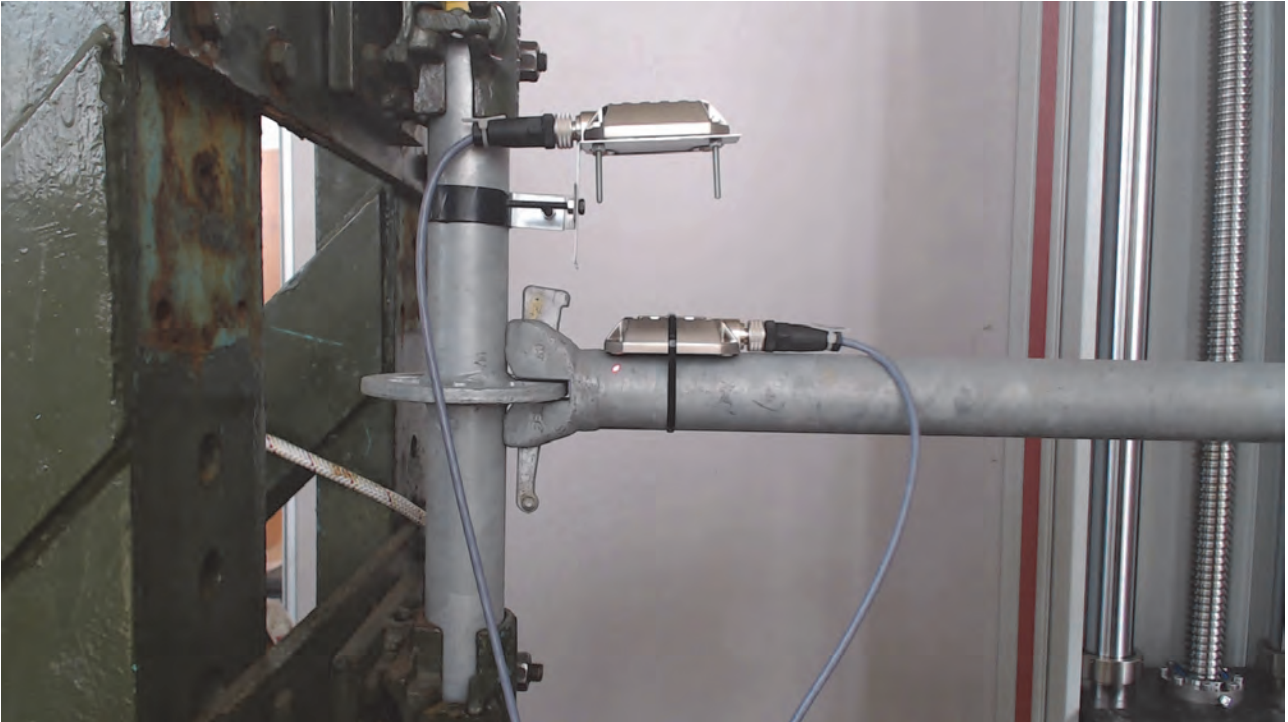


Figura 3-53 Foto inizio prova

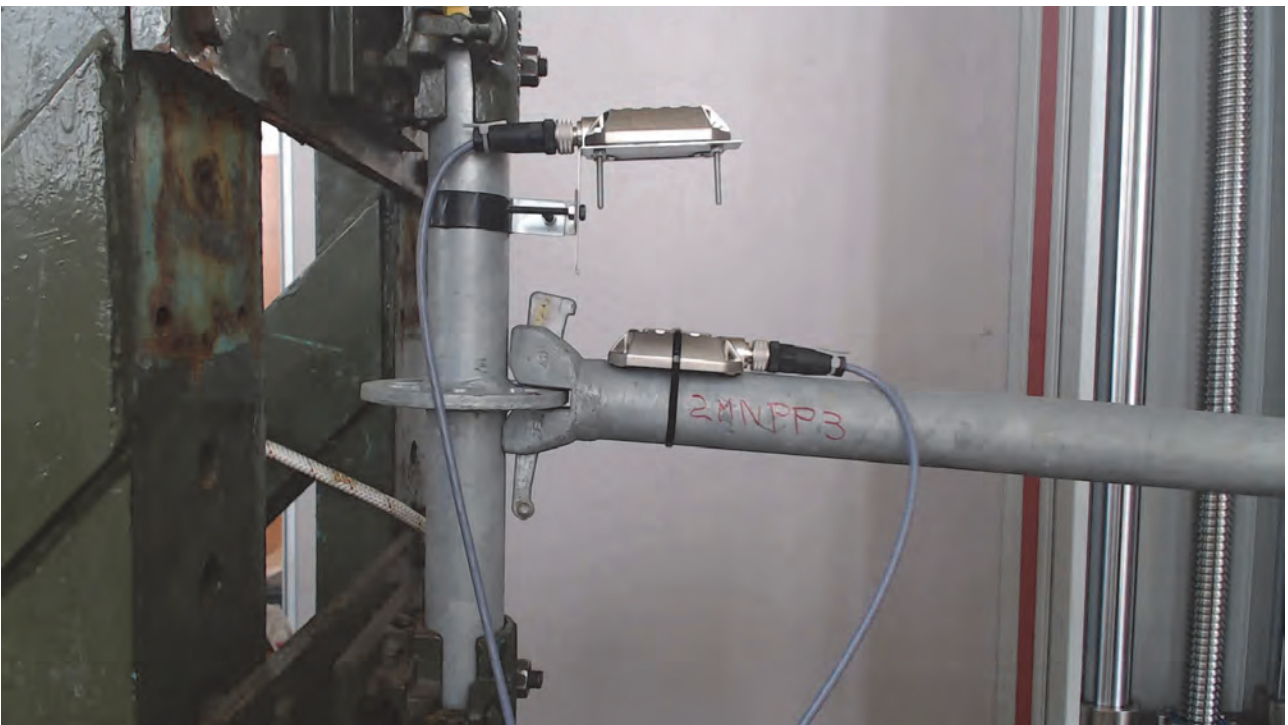


Figura 3-54 Foto fine prova

### 3.2.2.2.4 Prova 2MNPP5:

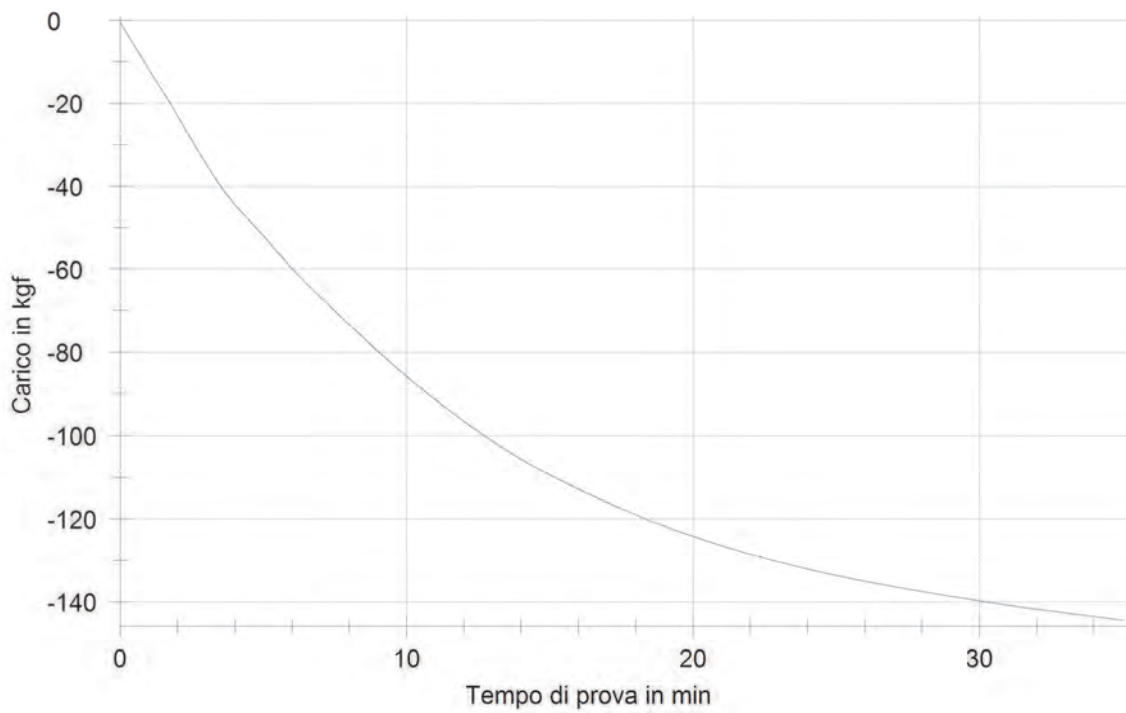


Figura 3-55 Curva carico-tempo.

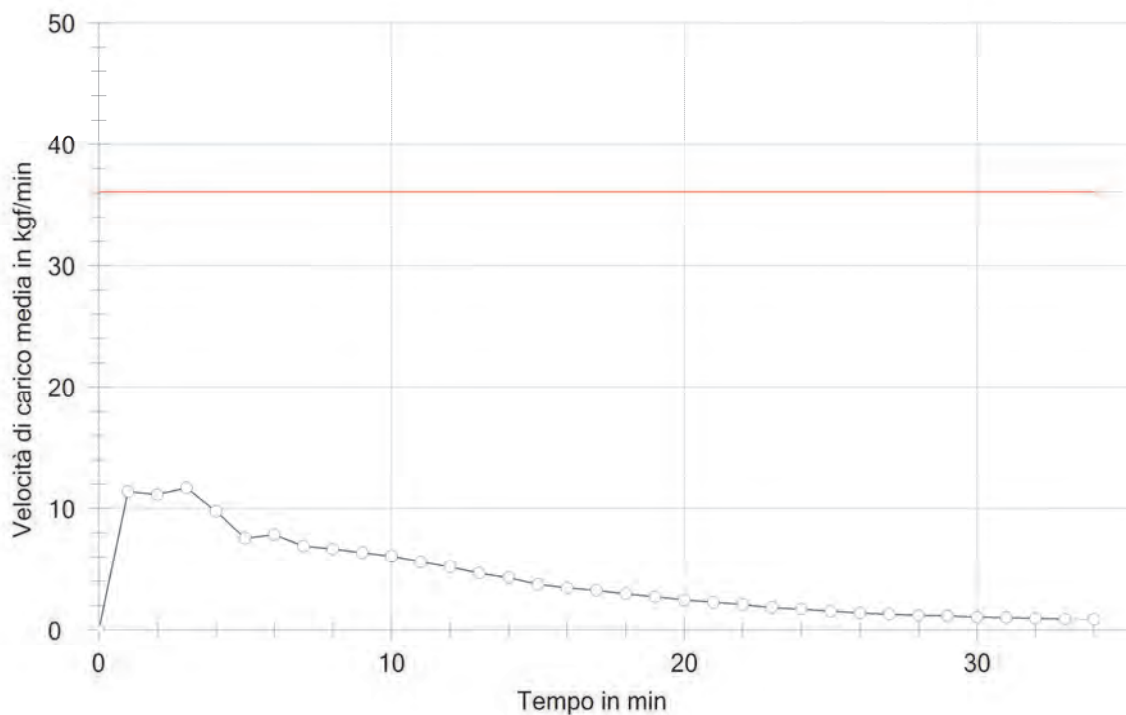


Figura 3-56 Velocità di carico media (kgf/min). Limite per la velocità di carico calcolato in base al massimo carico registrato

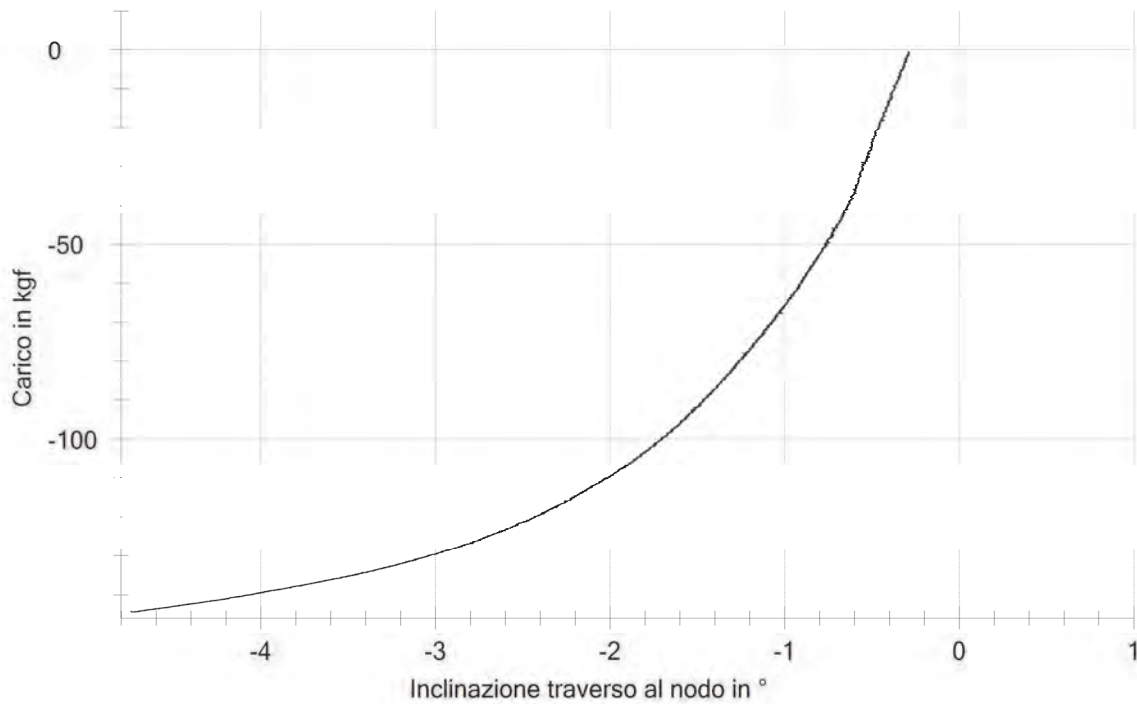


Figura 3-57 Curva carico – inclinazione trasverso al nodo

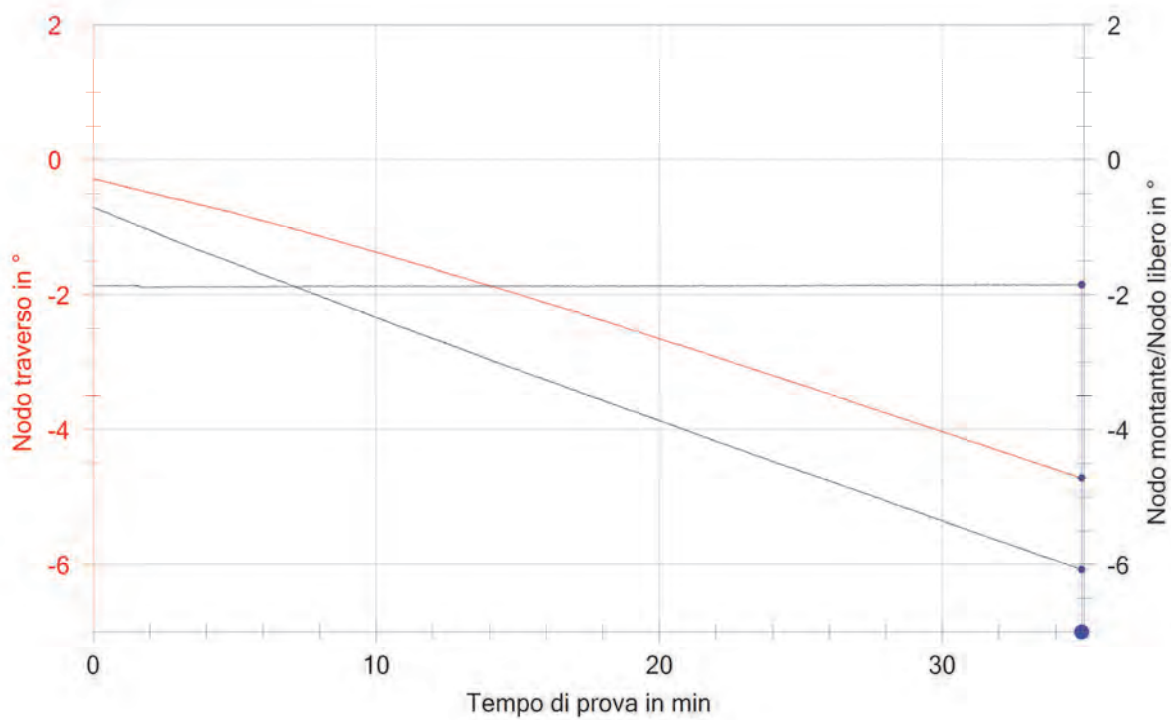


Figura 3-58 Inclinazione nodo trasverso, nodo libero e nodo montante nel tempo



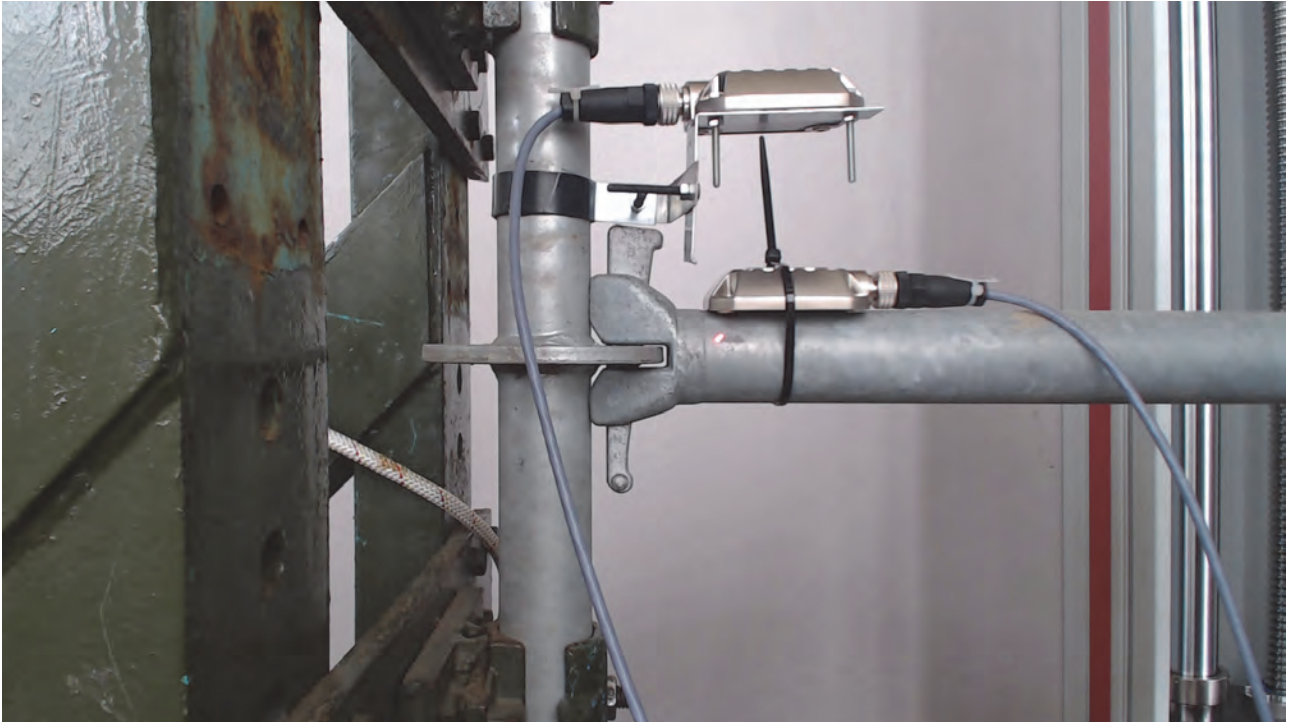


Figura 3-59 Foto inizio prova



Figura 3-60 Foto fine prova

## 3.2.2.2.5 Prova 2MNPP6:

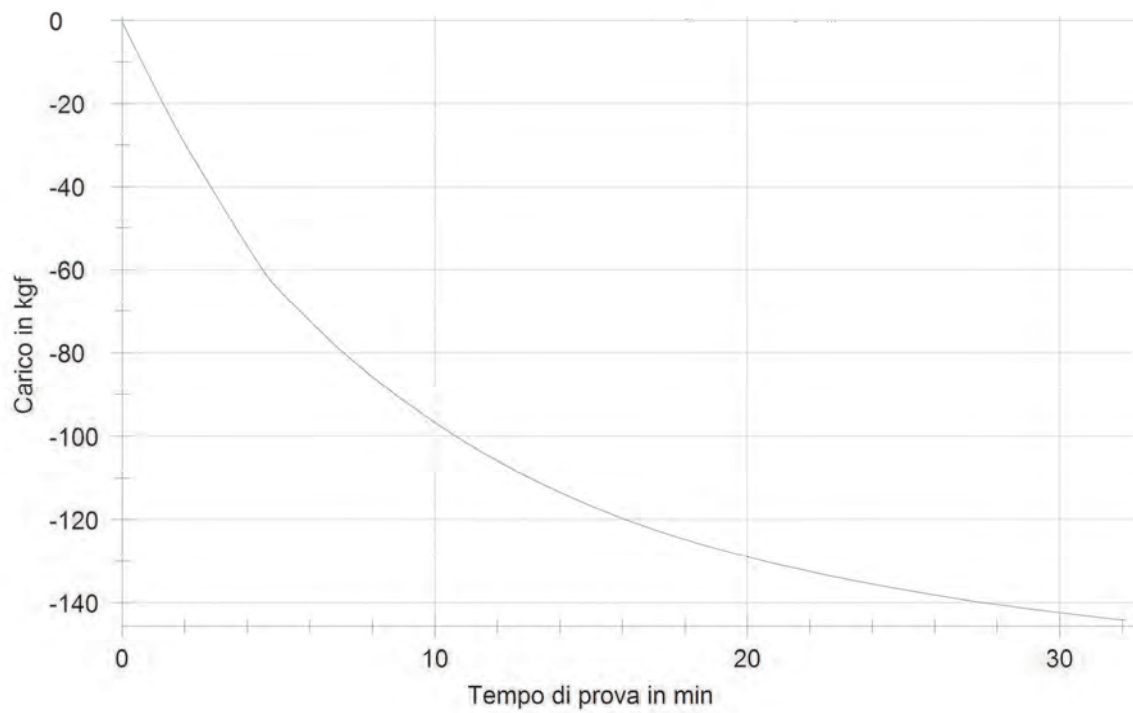


Figura 3-61 Curva carico-tempo

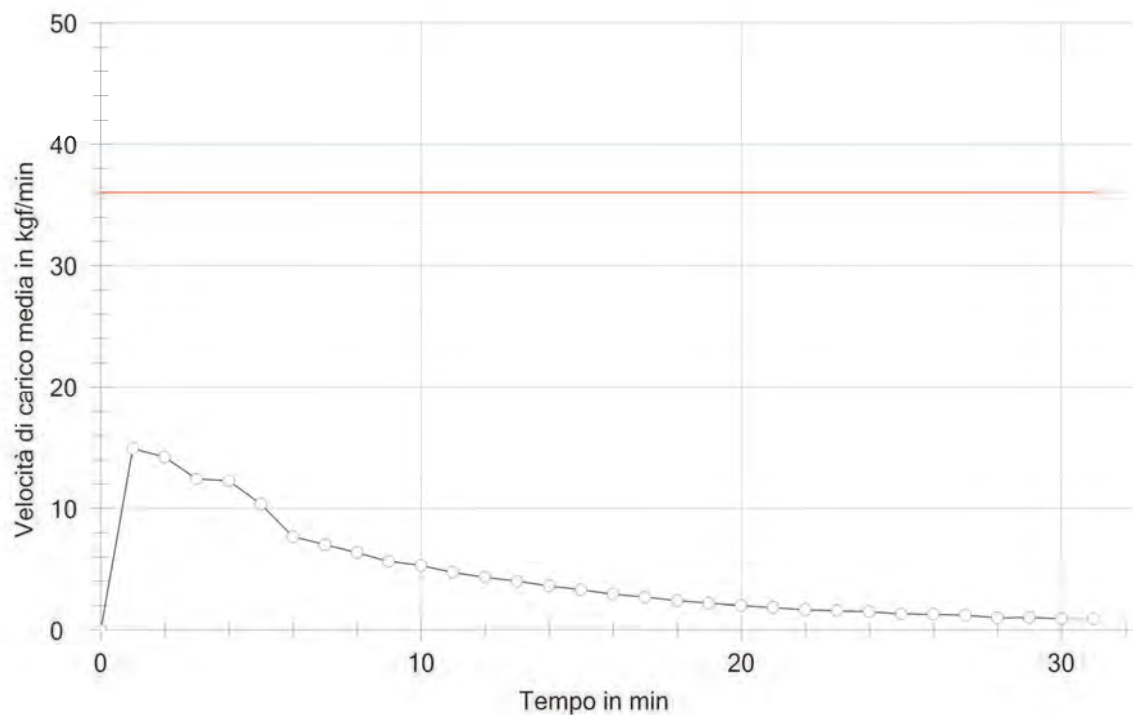


Figura 3-62 Velocità di carico media (kgf/min). Limite per la velocità di carico calcolato in base al massimo carico registrato

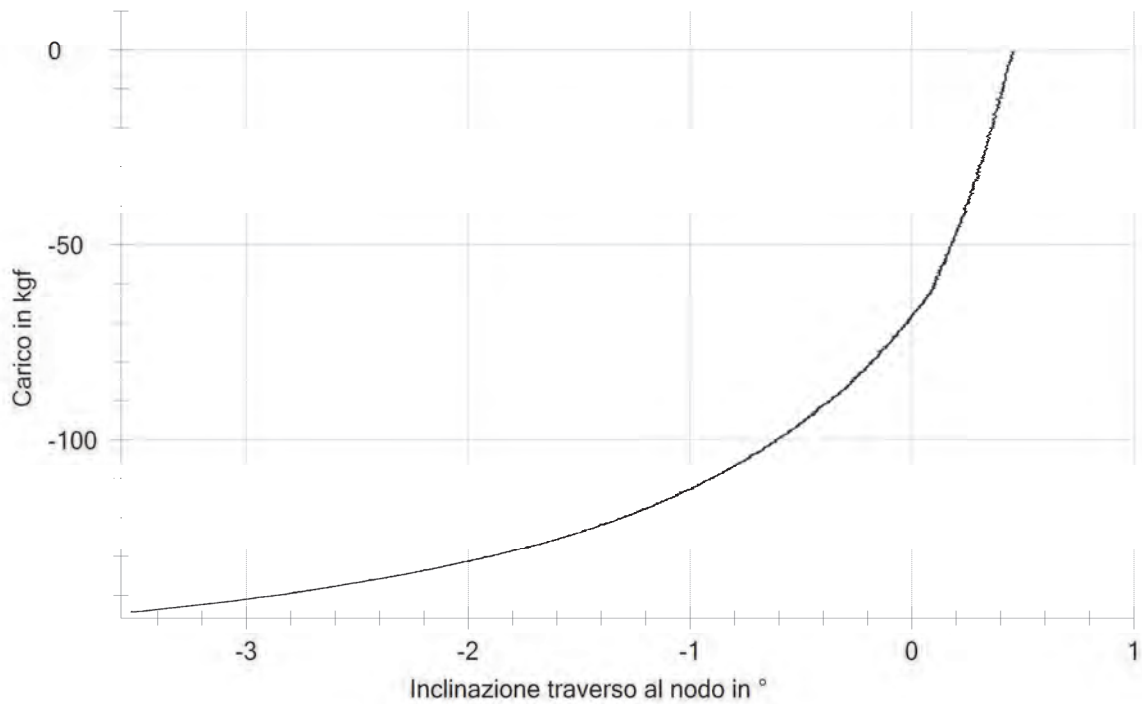


Figura 3-63 Curva carico – inclinazione trasverso al nodo

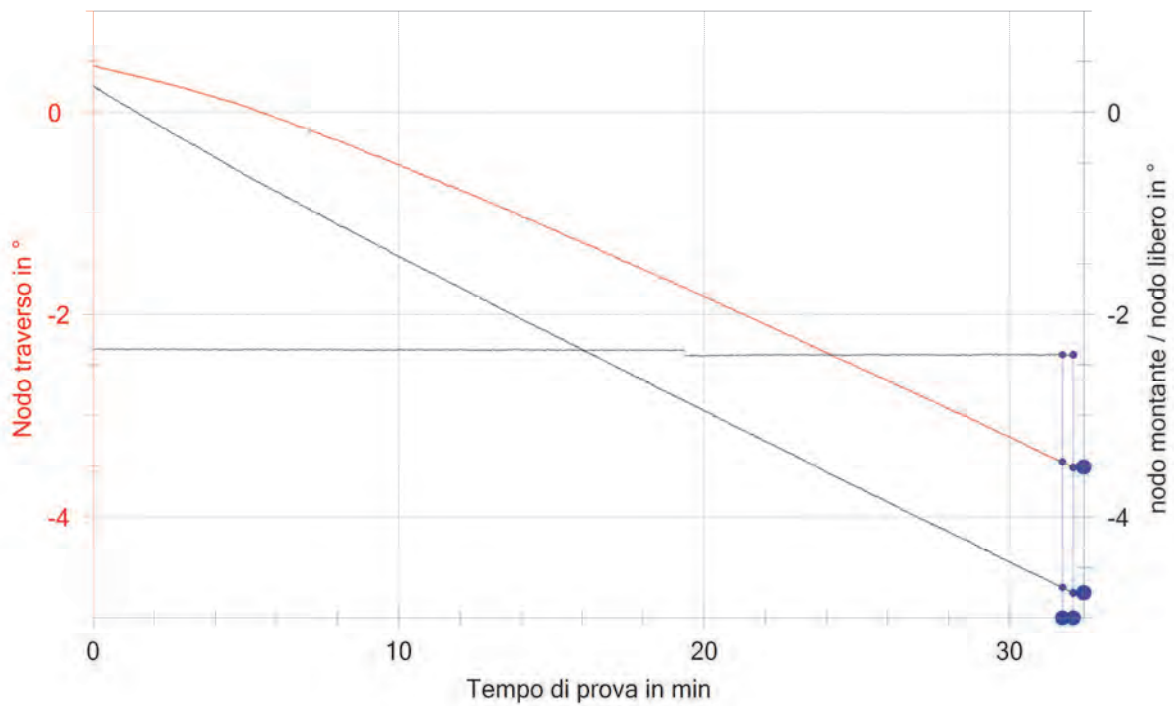


Figura 3-64 Inclinazione nodo traverso, nodo libero e nodo montante nel tempo



Figura 3-65 Foto inizio prova



Figura 3-66 Foto fine prova

### 3.2.2.3 Grafici delle prove pilota positive

#### 3.2.2.3.1 Prova 2MPPP1:

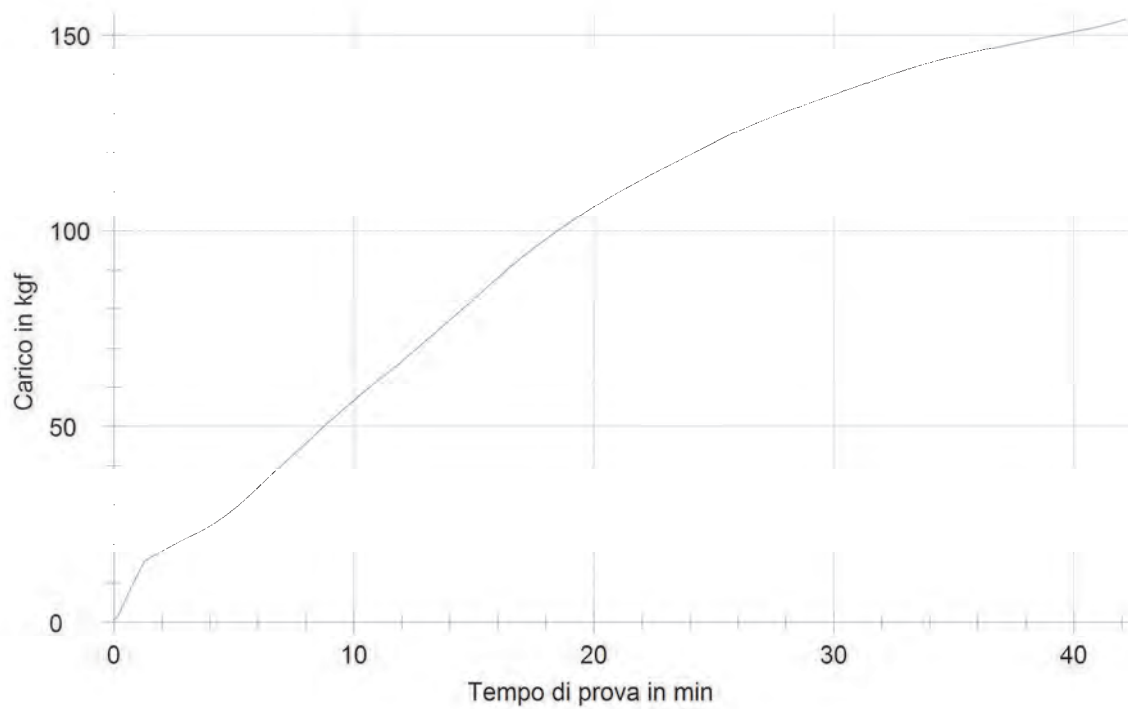


Figura 3-67 Curva carico-tempo

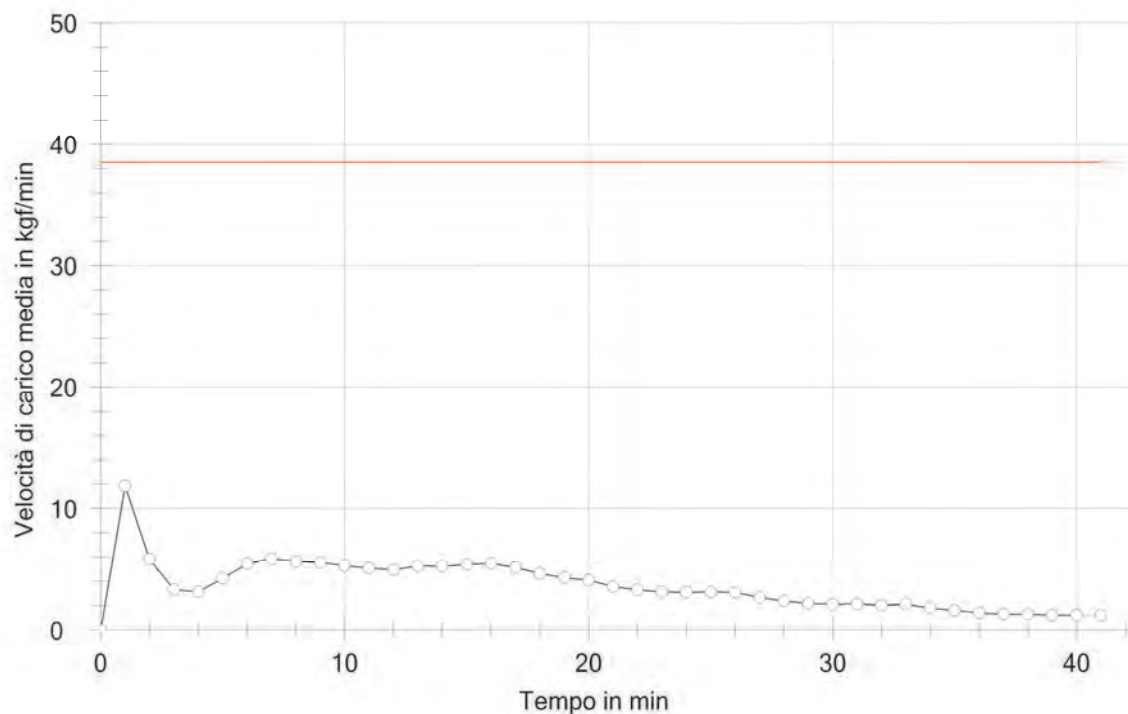


Figura 3-68 Velocità di carico media (kgf/min). Limite per la velocità di carico calcolato in base al massimo carico registrato

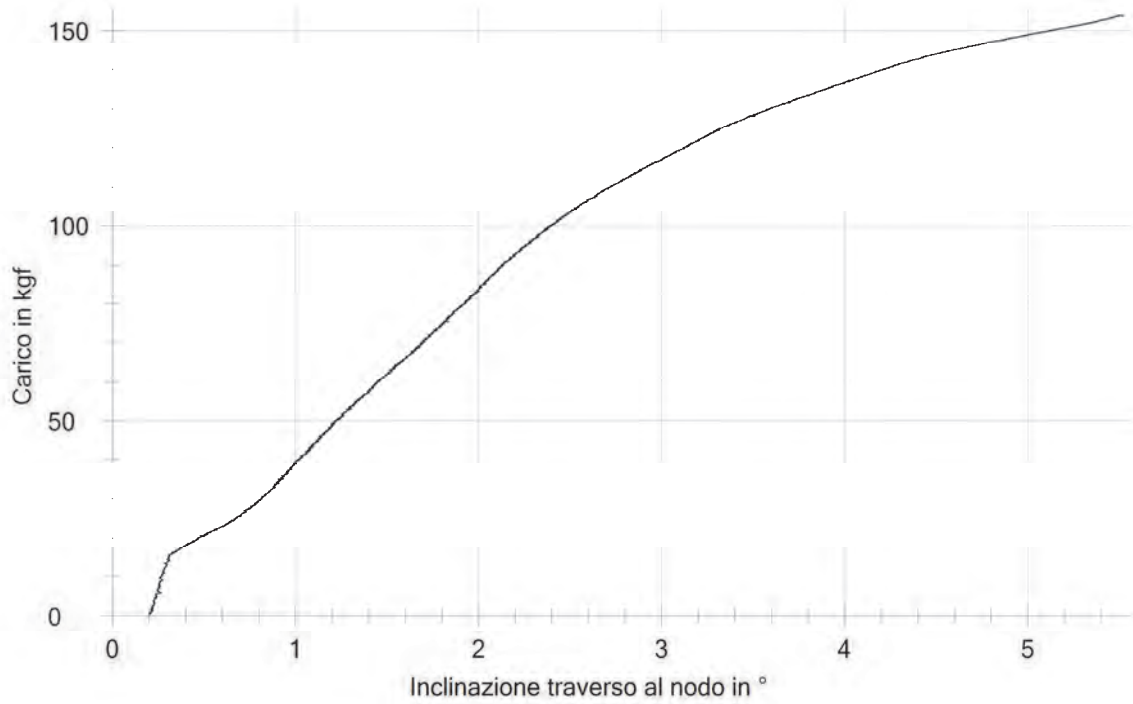


Figura 3-69 Curva carico – inclinazione trasverso al nodo

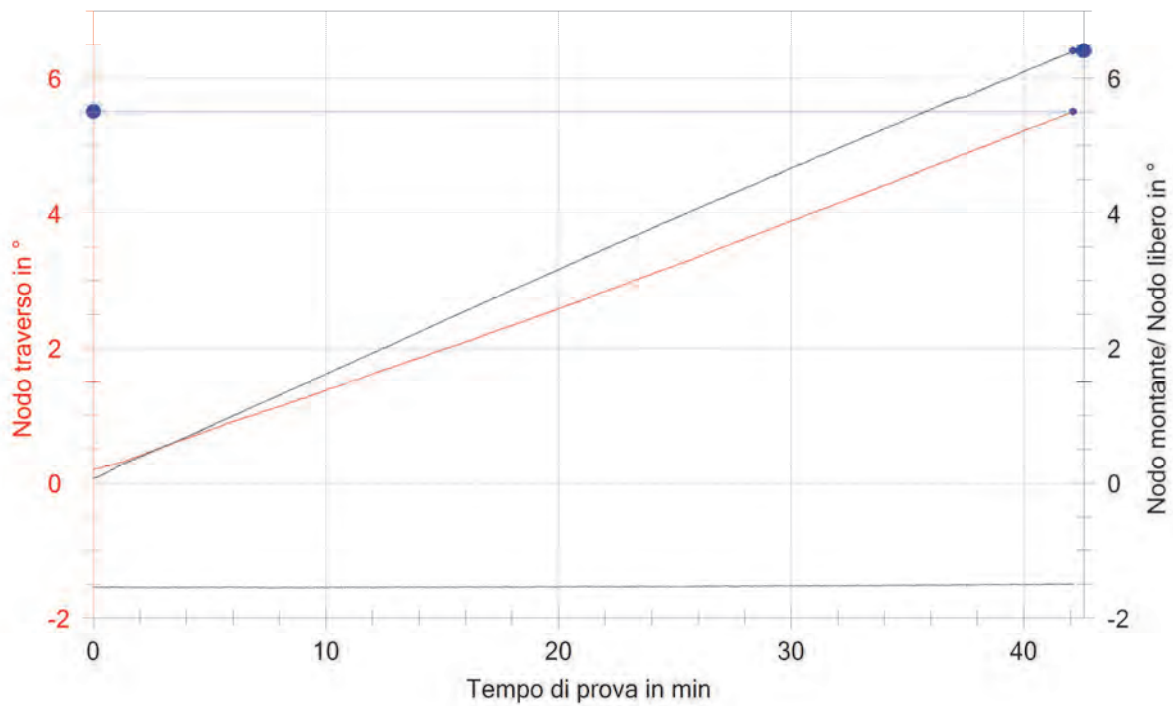


Figura 3-70 Inclinazione nodo trasverso, nodo libero e nodo montante nel tempo

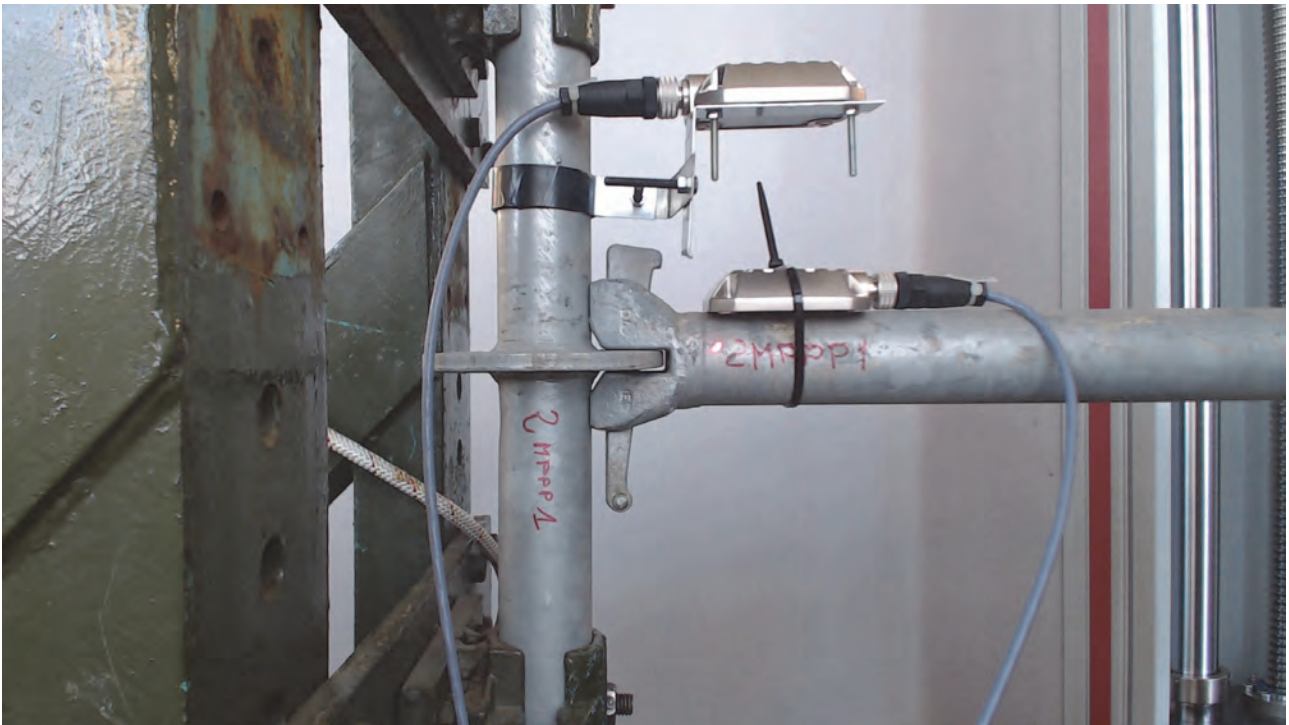


Figura 3-71 Foto inizio prova



Figura 3-72 Foto fine prova

## 3.2.2.3.2 Prova 2MPPP2:

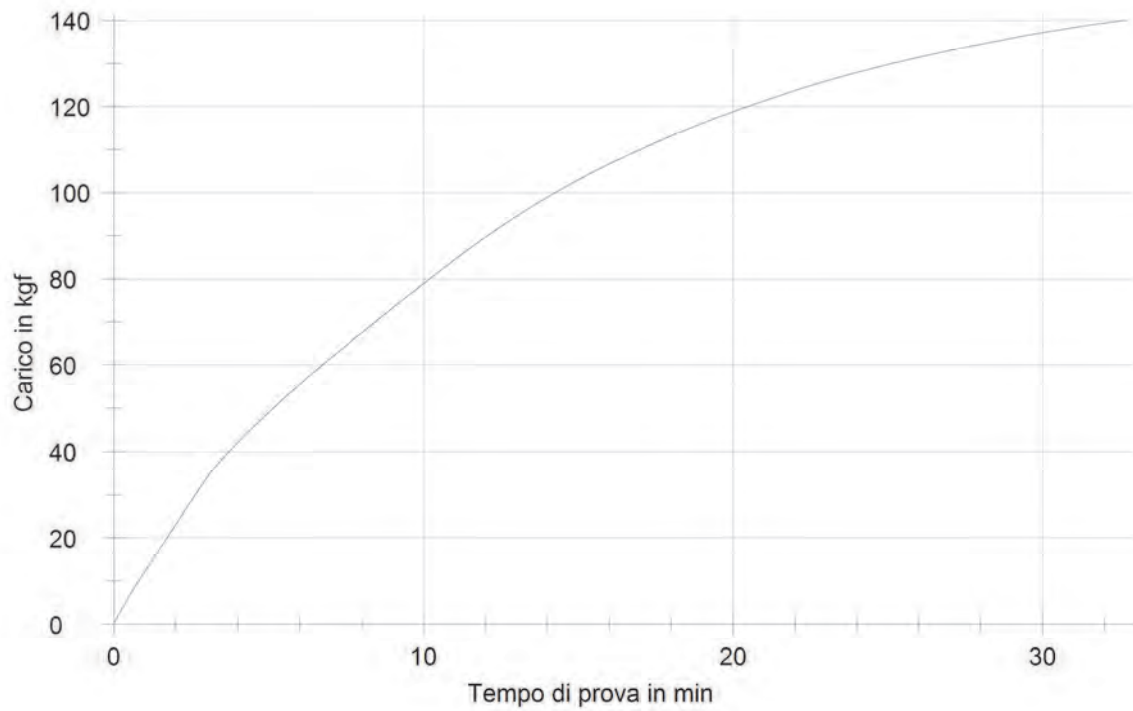


Figura 3-73 Curva carico-tempo

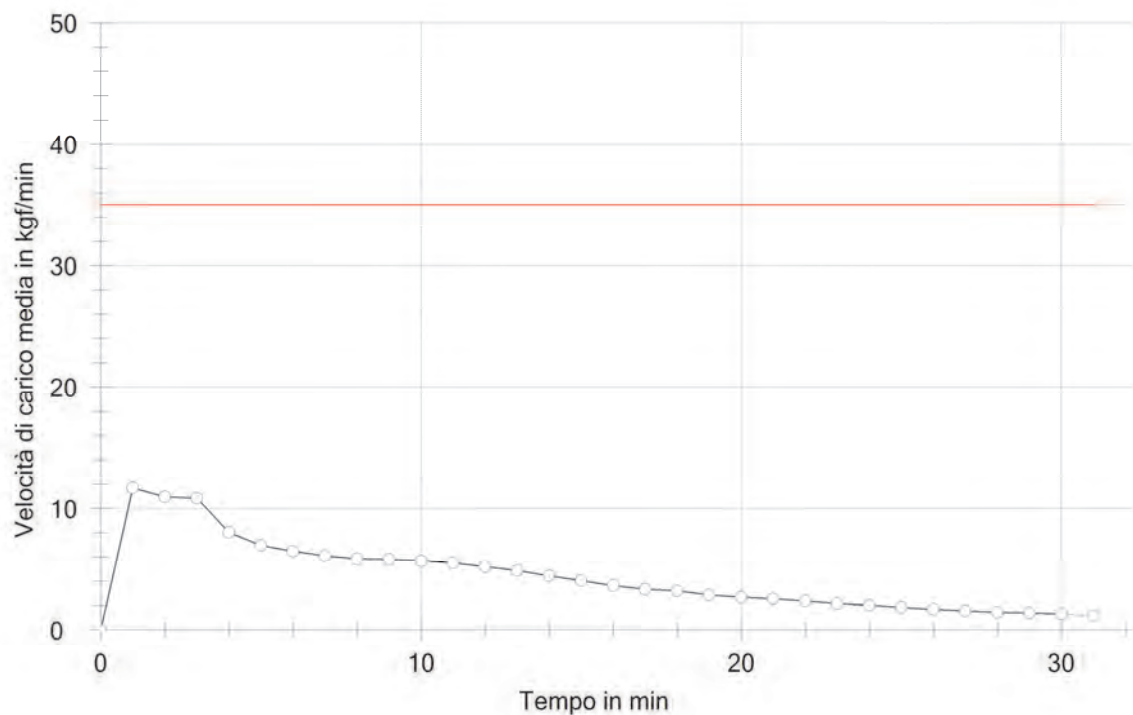


Figura 3-74 Velocità di carico media (kgf/min). Limite per la velocità di carico calcolato in base al massimo carico registrato



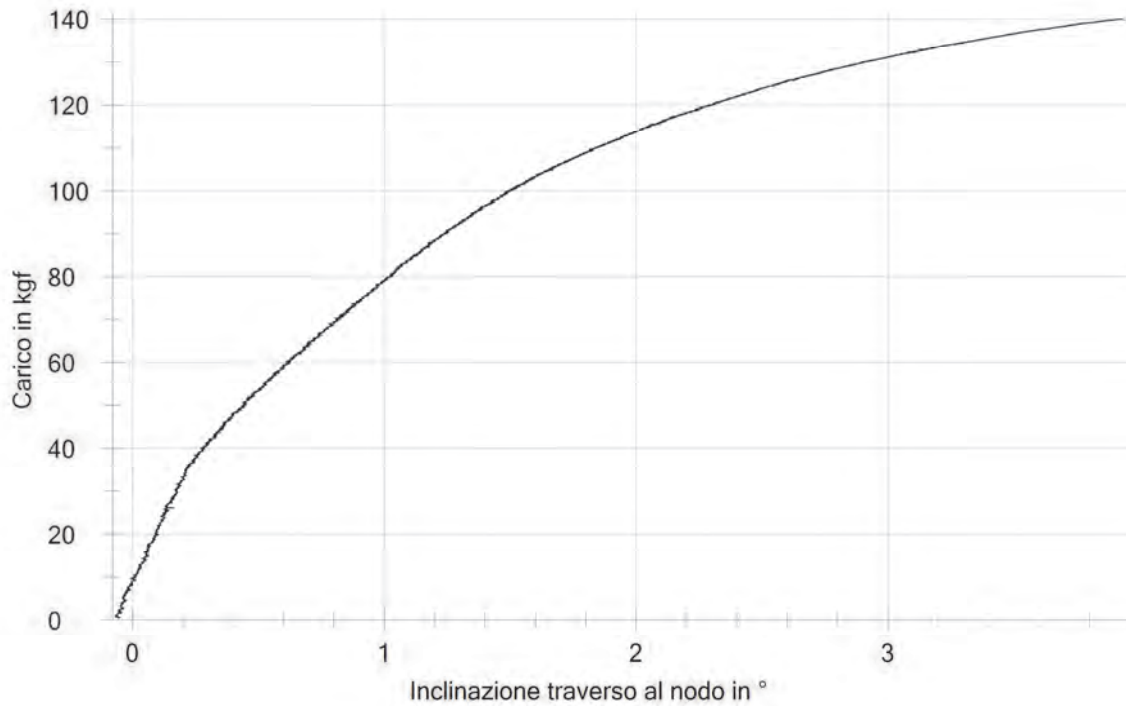


Figura 3-75 Curva carico – inclinazione traverso al nodo

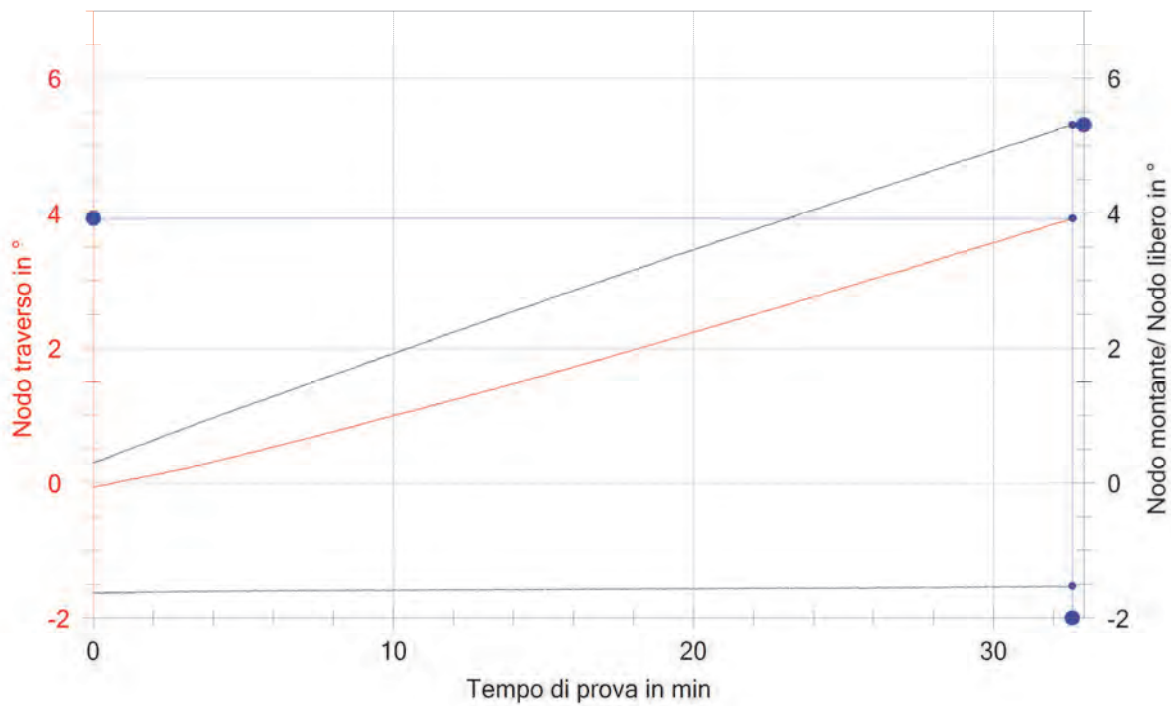


Figura 3-76 Inclinazione nodo traverso, nodo libero e nodo montante nel tempo



Figura 3-77 Foto inizio prova



Figura 3-78 Foto fine prova

### 3.2.2.3.3 Prova 2MPPP3:

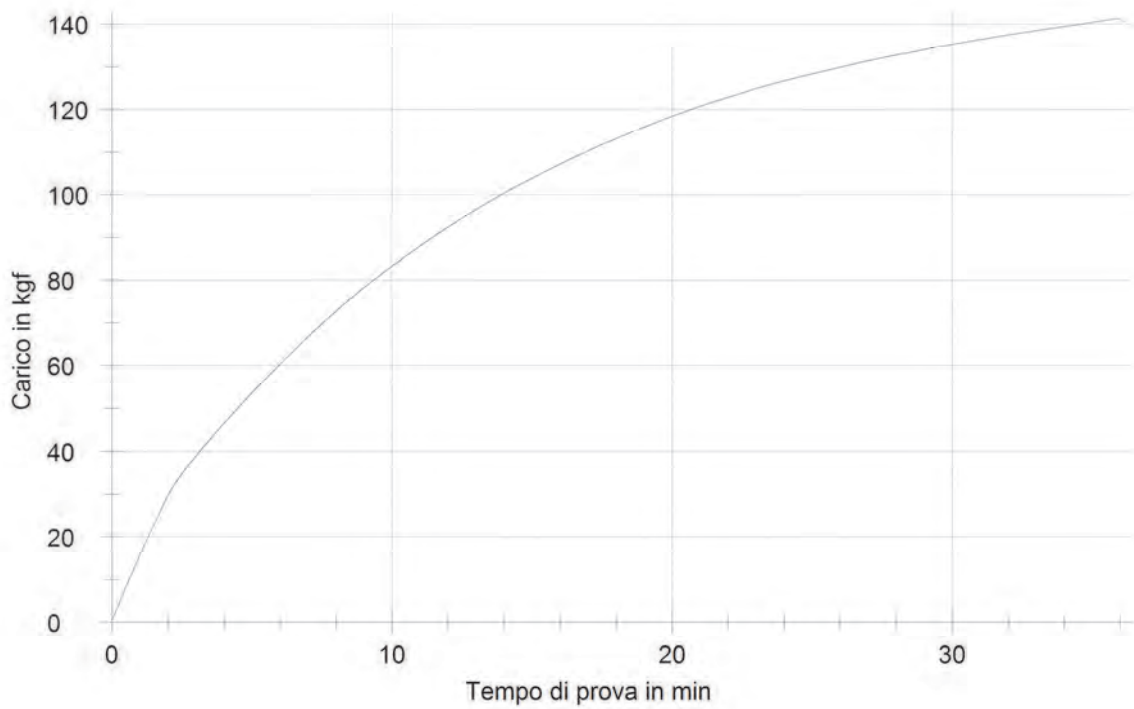


Figura 3-79 Curva carico-tempo

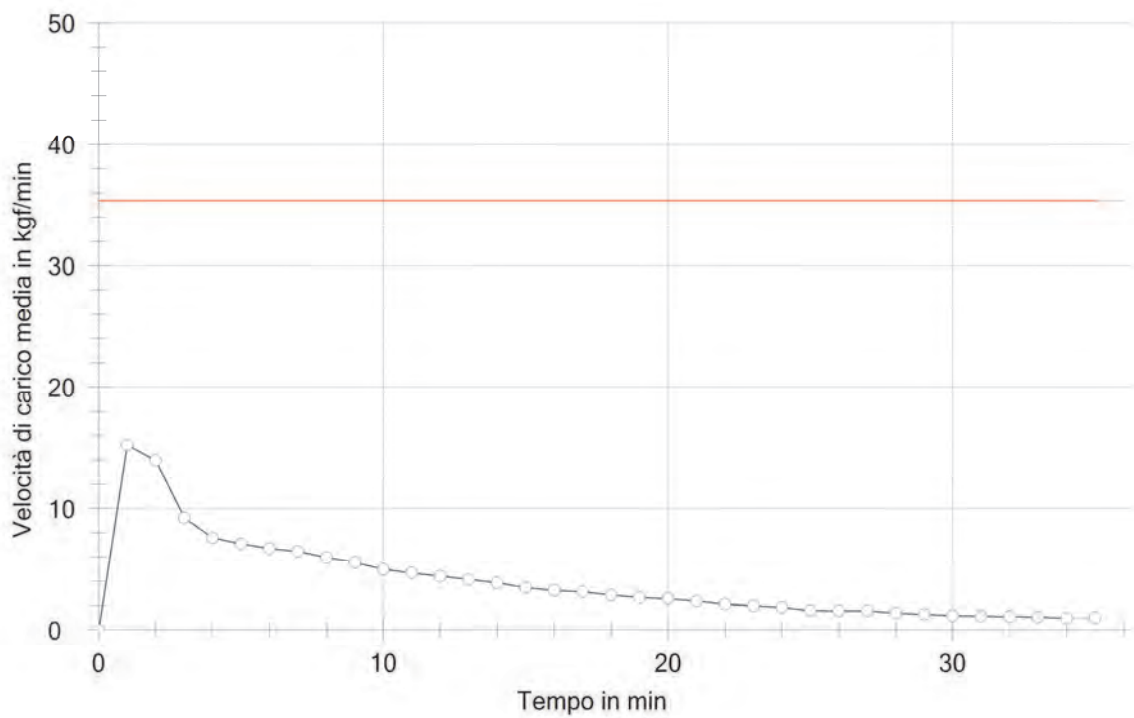


Figura 3-80 Velocità di carico media (kgf/min). Limite per la velocità di carico calcolato in base al massimo carico registrato

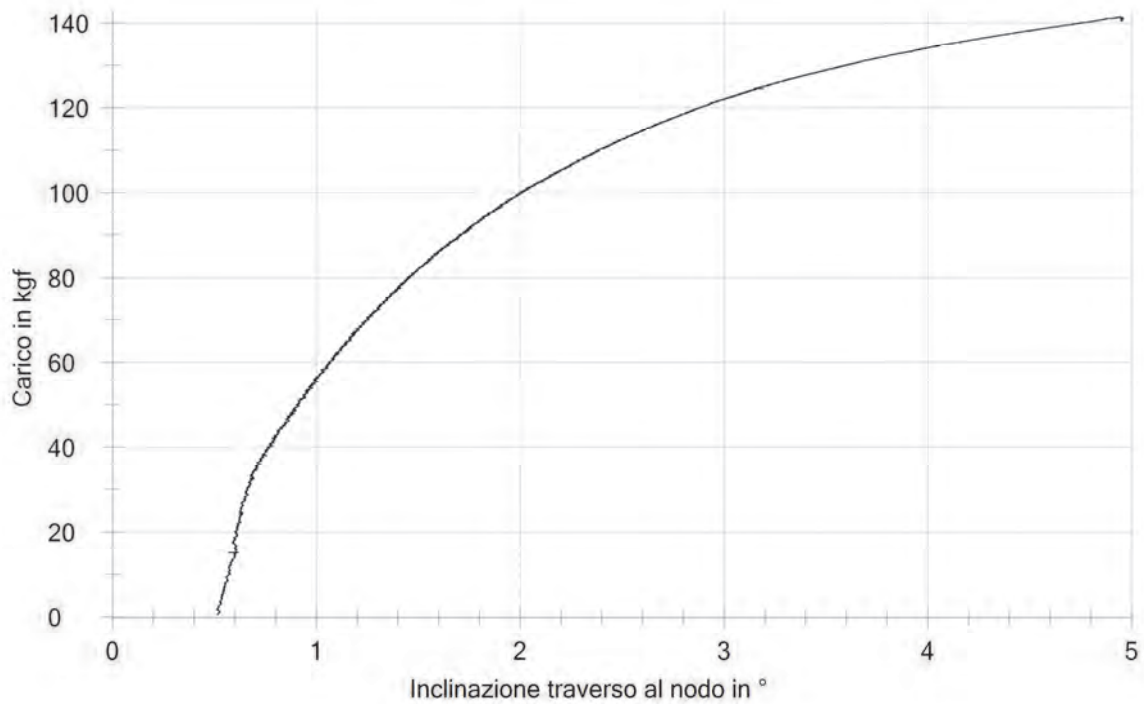


Figura 3-81 Curva carico – inclinazione trasverso al nodo

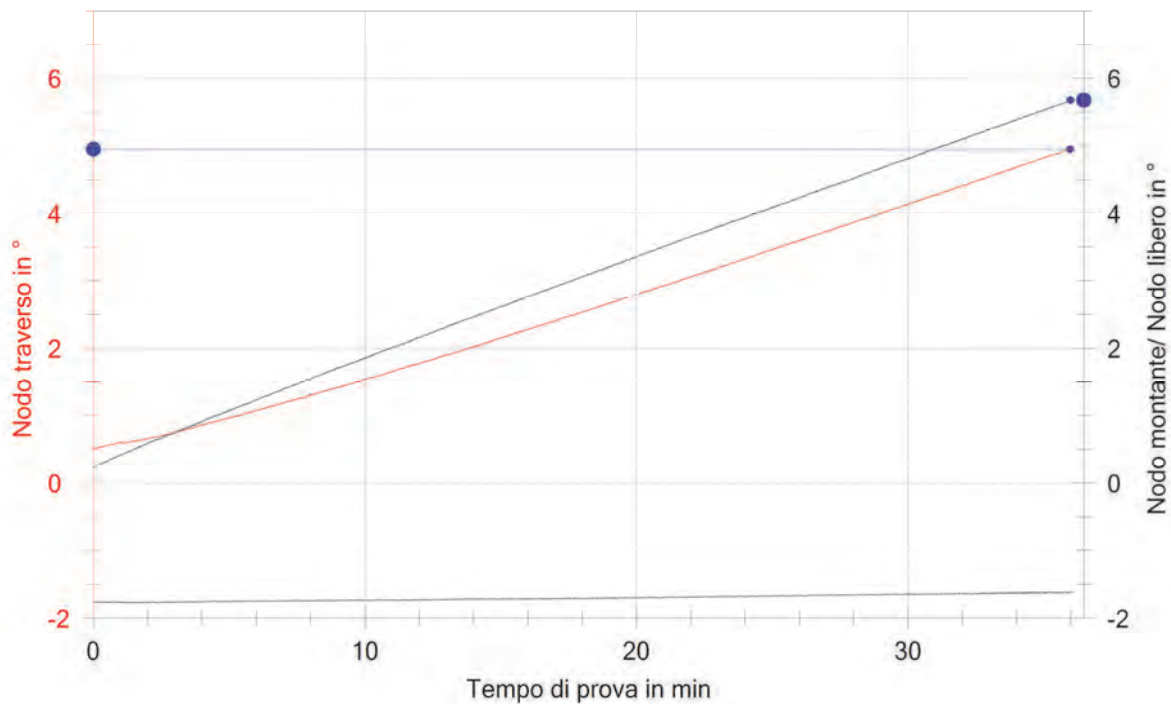


Figura 3-82 Inclinazione nodo trasverso, nodo libero e nodo montante nel tempo



Figura 3-83 Foto inizio prova



Figura 3-84 Foto fine prova

## 3.2.2.3.4 Prova 2MPPP4:

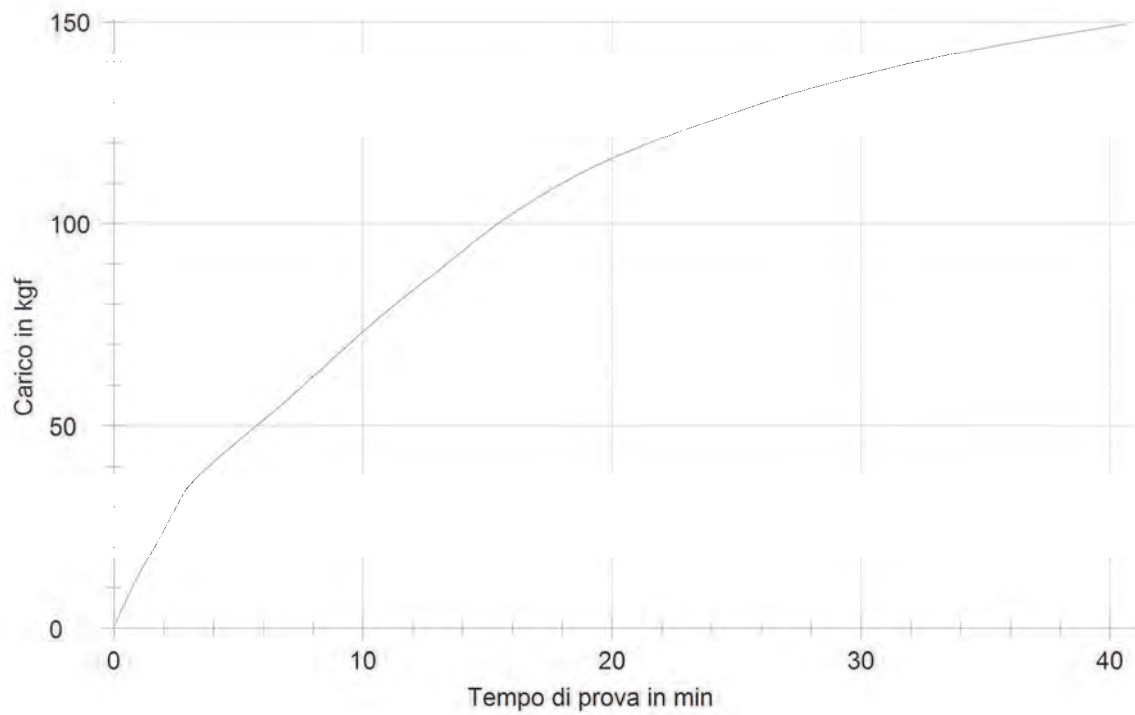


Figura 3-85 Curva carico-tempo

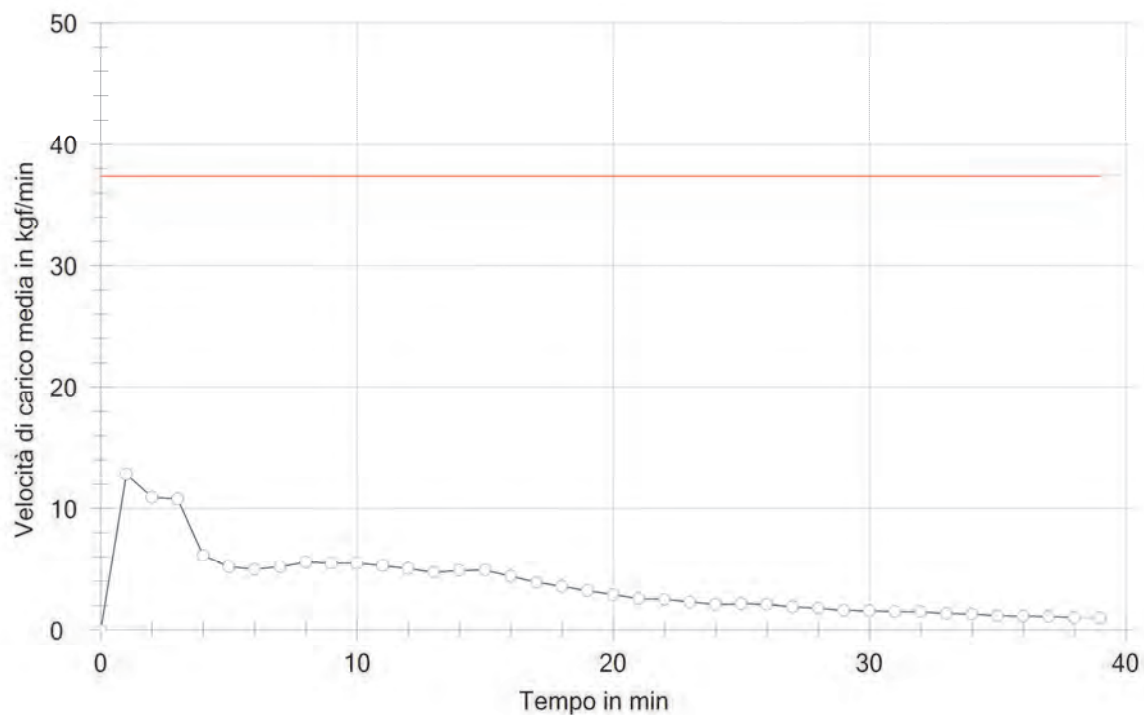


Figura 3-86 Velocità di carico media (kgf/min). Limite per la velocità di carico calcolato in base al massimo carico registrato

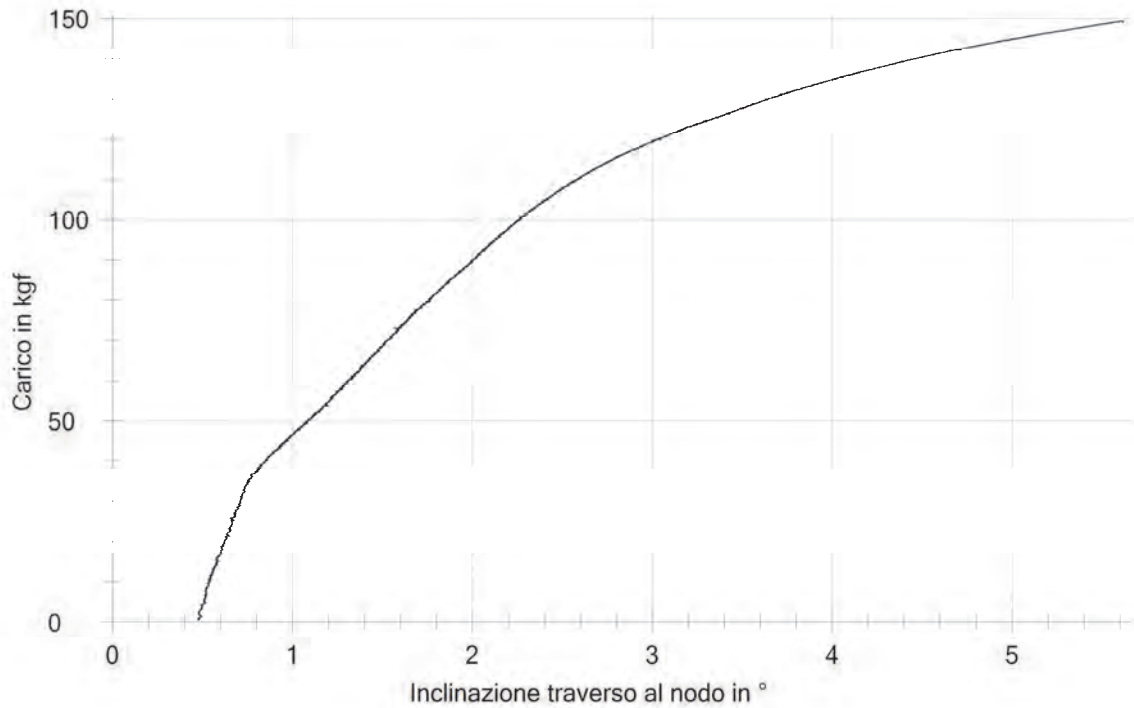


Figura 3-87 Curva carico – inclinazione trasverso al nodo

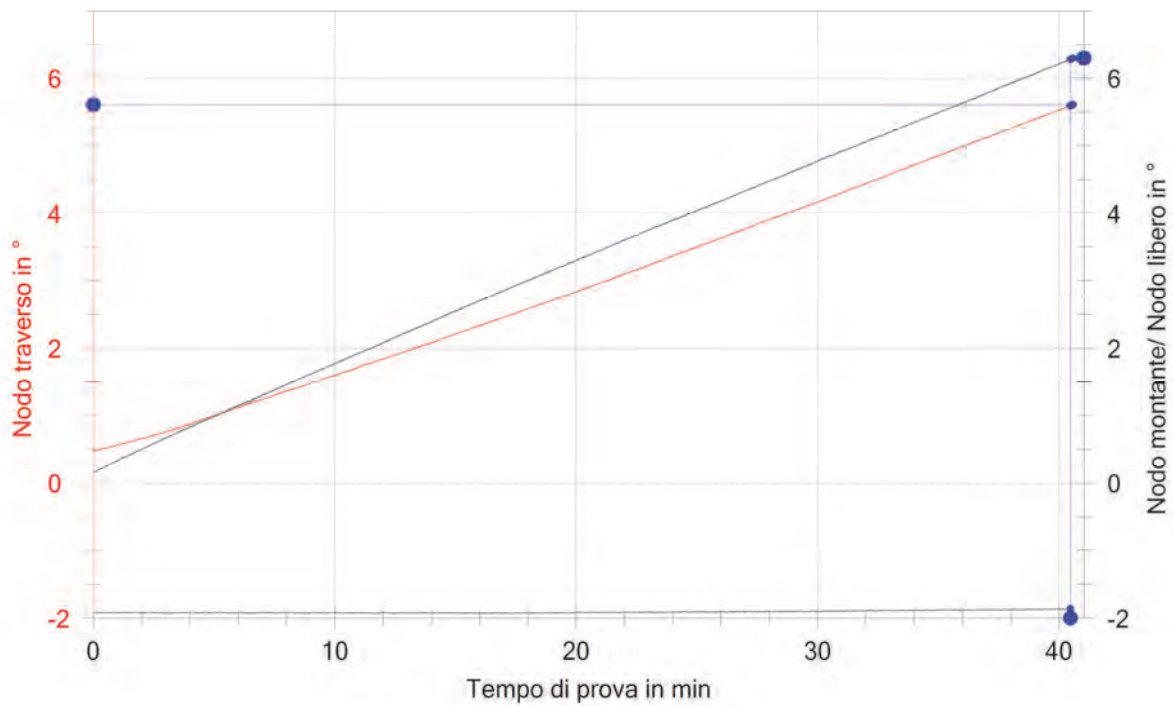


Figura 3-88 Inclinazione nodo trasverso, nodo libero e nodo montante nel tempo



Figura 3-89 Foto inizio prova



Figura 3-90 Foto fine prova



### 3.2.2.3.5 Prova 2MPPP5:

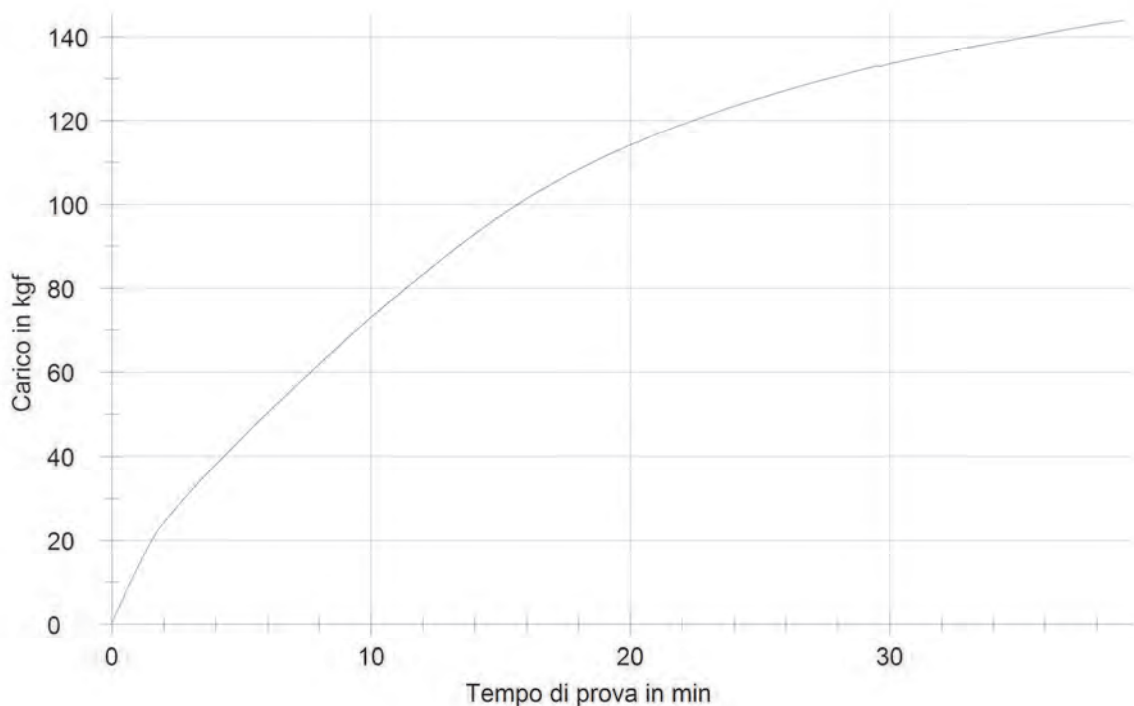


Figura 3-91 Curva carico-tempo.

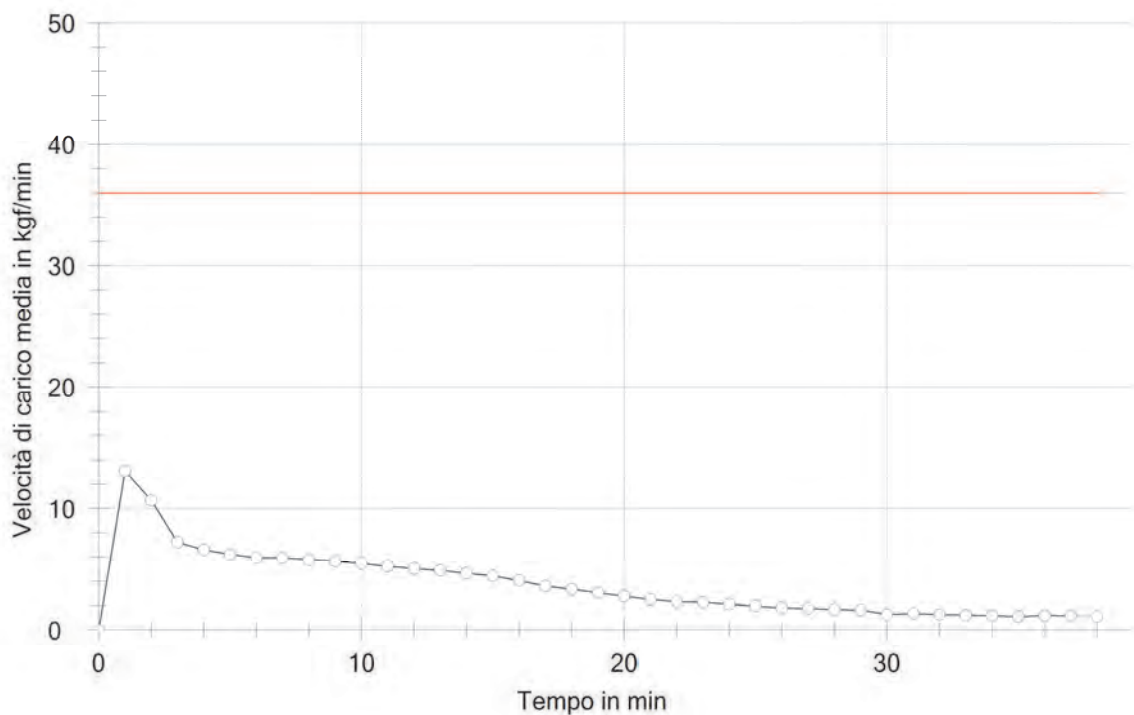


Figura 3-92 Velocità di carico media (kgf/min). Limite per la velocità di carico calcolato in base al massimo carico registrato

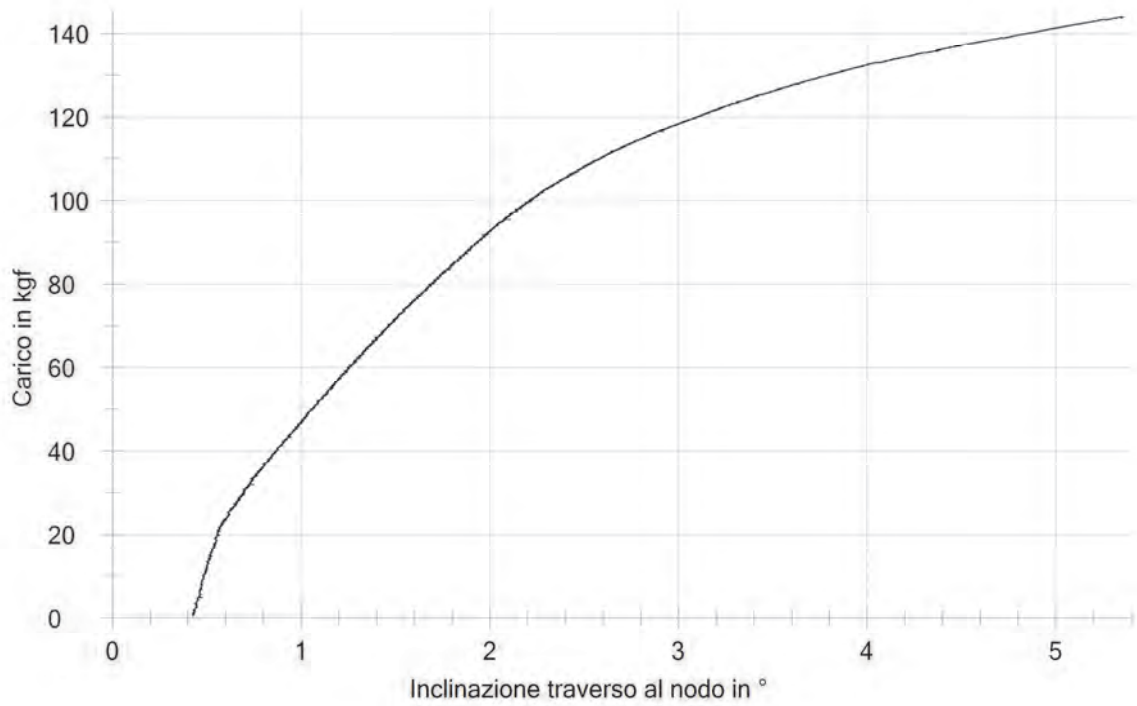


Figura 3-93 Curva carico – inclinazione trasverso al nodo

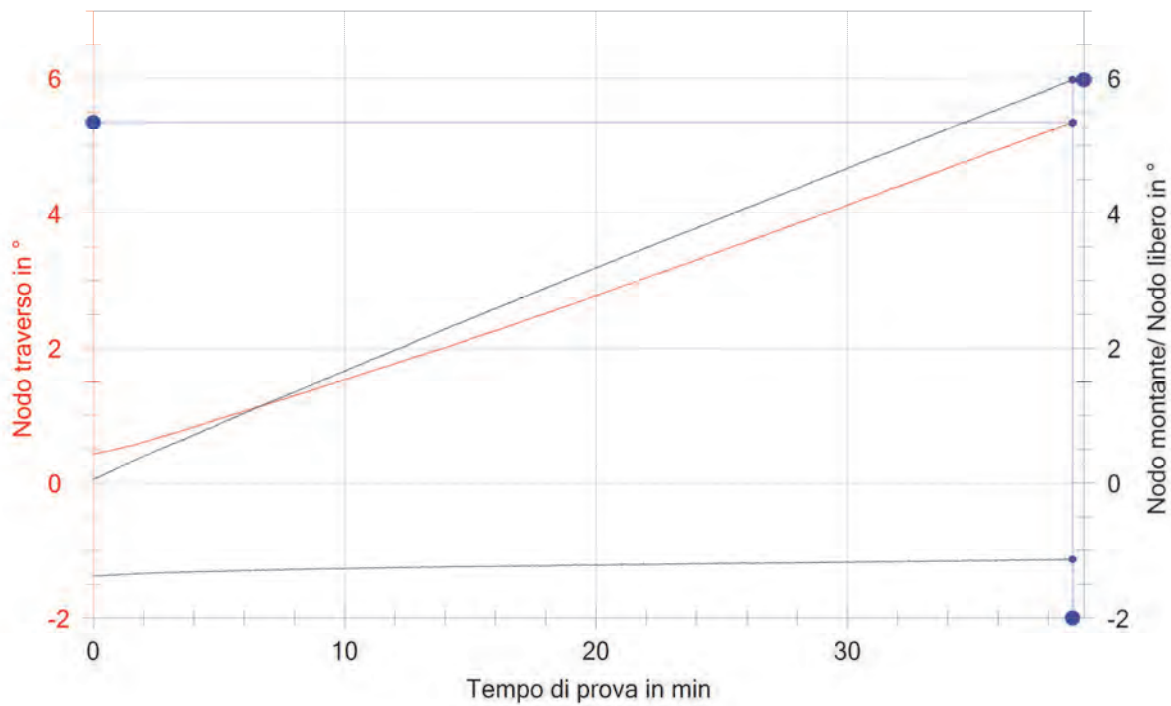


Figura 3-94 Inclinazione nodo trasverso, nodo libero e nodo montante nel tempo



Figura 3-95 Foto inizio prova



Figura 3-96 Foto fine prova

### 3.2.2.4 Analisi dei risultati

#### 3.2.2.4.1 Prove pilota negative

Le prove pilota 2MNPP sono state eseguite con velocità di spostamento imposto della traversa pari a  $v_s = 2\text{mm/min}$ .

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 tutte le prove eseguite, compresa fra 9 e 15  $\text{kg}_f/\text{min}$ .

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

La prova 2MNPP4, per motivi di montaggio non corretto, è stata ritenuta non valida ai fini della stima del carico massimo stimato  $\overline{F_{max}^-}$  e di  $R_k^-$ .

Per la valutazione del carico massimo stimato  $\overline{F_{max}^-}$  risultano valide le prove:

2MNPP1, 2MNPP2, 2MNPP3, 2MNPP5, 2MNPP6.

L'inclinazione del traverso in corrispondenza dell'innesto al montante (cd. *Nodo traverso* nei grafici delle prove pilota negative) all'inizio della prova, è risultata diversa per ogni prova, con valori compresi fra  $-0,1^\circ$  e  $1^\circ$  circa.

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 negative) e quella all'altra estremità (cd. *Nodo libero* nei grafici delle prove pilota negative) con differenza di inclinazione compresa fra  $0,2^\circ$  e  $0,6^\circ$  circa.

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.

#### 3.2.2.4.2 Prove pilota positive

Le prove pilota 2MPPP sono state eseguite con velocità di spostamento imposto della traversa pari a  $v_s = 2\text{mm/min}$ .

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 tutte le prove eseguite, compresa fra 11 e 16  $\text{kg}_f/\text{min}$ .

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:

2MPPP1, 2MPPP2, 2MPPP3, 2MPPP4, 2MPPP5.

L'inclinazione del traverso in corrispondenza dell'innesto al montante (cd. *Nodo traverso* nei grafici delle prove pilota positive) all'inizio della prova, è risultata diversa per ogni prova, con valori compresi fra 0 ° e 0,5° circa.

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 positive) e quella all'altra estremità (cd. *Nodo libero* nei grafici delle prove pilota positive) con differenza di inclinazione compresa fra 0,1 ° e 0,5° circa.

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.

### 3.2.3 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  $\overline{F_{max}}$  ( $F_{max}^+$  o  $F_{max}^-$ ) il valore caratteristico quale il quantile del 5% per un livello di confidenza del 75% .

Per il calcolo del carico massimo stimato negativo si considerano i risultati delle cinque prove 2MNPP1, 2MNPP2, 2MNPP3, 2MNPP5, 2MNPP6.

Per il calcolo del carico massimo stimato positivo si considerano i risultati delle cinque prove 2MPPP1, 2MPPP2, 2MPPP3, 2MPPP4, 2MPPP5.

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

numero prove valide		n = 5		k <sub>sk</sub> = 2,46			
Carico massimo						Carico massimo stimato	
Prove valide	$F_{max,i}$	$y_i = \ln(F_{max,i})$	$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$	$(y_i - \bar{y})^2$	$s_y^2$	$y_5$	$\overline{F_{max}} = e^{y_5}$
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 <sub>sk</sub> = 2,46			
Carico massimo						Carico massimo stimato	
Prove valide	$F_{max,i}$	$y_i = \ln(F_{max,i})$	$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$	$(y_i - \bar{y})^2$	$s_y^2$	$y_5$	$\overline{F_{max}} = e^{y_5}$
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:

$$v_c^- \leq 0,25 \cdot \frac{\overline{F_{max}^-}}{\min} = 0,25 \cdot 113,42 \frac{\text{kg}_f}{\min} = 28,36 \frac{\text{kg}_f}{\min} = v_{c,lim}^- \quad (3.2.3-1)$$

per prove positive:

$$v_c^+ \leq 0,25 \cdot \frac{\overline{F_{max}^+}}{\min} = 0,25 \cdot 132,09 \frac{\text{kg}_f}{\min} = 33,02 \frac{\text{kg}_f}{\min} = v_{c,lim}^+ \quad (3.2.3-2)$$

### 3.2.4 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 ( 3.2.3-1 e alla (3.2.3-2.  
Ne consegue (vedi diagrammi in Figura 2-1 e in Figura 2-3):

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

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

### 3.2.5 Stima di $c_{full}^-$ e di $c_{full}^+$

Risulta:

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

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

### 3.2.6 Osservazioni

La velocità di spostamento imposto  $v_s$  pari a 2mm/min ha comportato una velocità di carico massima, per ogni prova negativa e per ogni prova positiva, inferiore alla velocità di carico limite calcolata in base al carico massimo stimato (vedi ( 3.2.3-1 e ( 3.2.3-2).

Nelle prove negative, la più grande velocità di carico raggiunta è stata pari a 14,95 kg<sub>f</sub>/min nella prova 2MNPP6.

Risulta:

$$14,95 \text{ kg}_f / \text{min} < 28,36 \text{ kg}_f / \text{min}$$

Tale valore rappresenta il carico registrato dalla cella di carico dopo il primo minuto di prova.

Data la linearità dei diagrammi *carico - tempo* nei primi minuti di prova, esiste una proporzionalità lineare anche fra  $v_s$  e  $v_c$ . Aumentando  $v_s$  si ottiene l'aumento di  $v_c$ .

Al fine di ottimizzare il tempo di esecuzione delle prove di rigidità e resistenza cicliche, si può, pertanto, stimare una velocità di spostamento da imporre maggiore di  $v_s=2\text{mm/min}$  in modo che risultino comunque soddisfatte le condizioni ( 3.2.3-1 e ( 3.2.3-2.

Nella prova negativa 2MNPP6, al tempo  $t=1,75$ , si è raggiunto un carico pari a  $F=-26,34 \text{ kg}_f$  che risulta ancora inferiore al limite di  $28,36 \text{ kg}_f$ . Questo ci conduce a considerare che se la prova fosse stata condotta ad una velocità di spostamento  $v_s= 2 \times 1,75 =3,5 \text{ mm/min}$ , al primo minuto di prova il carico raggiunto sarebbe stato pari a  $F=-26,34 \text{ kg}_f$ ; il che equivarrebbe ad ottenere:

$$v_{c\max} = 26,34 \text{ kg}_f / \text{min} \leq v_{c\lim} = 28,36 \text{ kg}_f / \text{min}$$

Analogamente, per le prove positive, la più grande velocità di carico raggiunta è stata pari a 15,23 kg<sub>f</sub>/min nella prova 2MPPP3.

In tale prova, al tempo  $t=1,75$ , si è raggiunto un carico pari a  $F= 22,34 \text{ kg}_f$  che risulta ancora inferiore al limite di  $28,36 \text{ kg}_f$ . Questo ci conduce a considerare che se la prova fosse stata condotta ad una velocità di spostamento  $v_s= 2 \times 1,75 =3,5 \text{ mm/min}$ , al primo minuto di prova il carico raggiunto sarebbe stato pari a  $F=22,34 \text{ kg}_f$ ; il che equivarrebbe ad ottenere:

$$v_{c\max} = 22,34 \text{ kg}_f / \text{min} \leq v_{c\lim} = 33,02 \text{ kg}_f / \text{min} .$$

**Per le prove di rigidità e resistenza cicliche può essere assunta la velocità di spostamento  $v_s=3,5 \text{ mm/min}$ .**

### 3.3 Prove di rigidità e resistenza cicliche

Determinati i valori di  $R_k^-$  e  $R_k^+$  e stimata la corretta velocità di spostamento da imporre, sono state eseguite le prove di rigidità e resistenza cicliche.

Utilizzando l'attrezzatura denominata *new*, sono state dapprima eseguite le prove negative (3\_5Cicl N); successivamente le prove positive (3\_5Cicl P), secondo il seguente ordine cronologico:

Prova 3\_5CiclN1 (ciclica negativa,  $v=3,5$  mm/min)  
 Prova 3\_5CiclN2 (ciclica negativa,  $v=3,5$  mm/min)  
 Prova 3\_5CiclN3 (ciclica negativa,  $v=3,5$  mm/min)  
 Prova 3\_5CiclN4 (ciclica negativa,  $v=3,5$  mm/min)  
 Prova 3\_5CiclN5 (ciclica negativa,  $v=3,5$  mm/min)

Prova 3\_5CiclP3 (ciclica positiva,  $v=3,5$  mm/min)  
 Prova 3\_5CiclP4 (ciclica positiva,  $v=3,5$  mm/min)  
 Prova 3\_5CiclP5 (ciclica positiva,  $v=3,5$  mm/min)  
 Prova 3\_5CiclP7 (ciclica positiva,  $v=3,5$  mm/min)  
 Prova 3\_5CiclP8 (ciclica positiva,  $v=3,5$  mm/min)

#### 3.3.1 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  $3,5$  mm/min.

Per lo schema di prova si veda Figura 3-34

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

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

Lo spostamento controllato della traversa è stato trasferito al traverso per mezzo dello stesso accessorio utilizzato nelle prove pilota old.

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 3-34):

$$b \text{ (mm)} = 805 + d/2 \quad \text{con } d \text{ diametro esterno del montante.} \quad (3.3.1-1)$$

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 nuova 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 trasverso
- la curva momento-inclinazione trasverso
- il video della prova perfettamente sincronizzato alla strumentazione di misura.

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  $v_s = 3,5$  mm/min tutte le prove, negative e positive, sono risultate valide.

### 3.3.1.1 Prove negative

Le prove cicliche negative (3\_5CiclN) sono state eseguite partendo dalla condizione iniziale ( $t_0$ ,  $F_0$ ,  $\varphi_0$ ) e imponendo alla traversa della macchina uno spostamento iniziale verso il basso (fase di carico).

Sono stati quindi eseguiti (vedi Figura 3-98):

- 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  $10\%R_k^- = 11,34 \text{kg}_f$ .

Risultano definite le seguenti fasi di carico e scarico a zero:

1.  $[0; -80,08] \text{kg}_f$ , primo incremento di carico
2.  $[0; -91,42] \text{kg}_f$ , secondo incremento di carico
3.  $[0; -102,77] \text{kg}_f$ , terzo incremento di carico
4.  $[0; -114,11] \text{kg}_f$ , quarto incremento di carico
5.  $[0; -125,45] \text{kg}_f$ , quinto incremento di carico
6.  $[0; -136,79] \text{kg}_f$ , sesto incremento di carico
- ⋮
- ⋮
- n.  $\left[ 0; -1,0 \cdot \frac{R_k^-}{\gamma_M \cdot \gamma_F} - 0,1 \cdot n \cdot R_k^- \right] \text{kg}_f$ , n-simo incremento di carico.

La condizione di collasso è raggiunta quando si ha una diminuzione sensibile della velocità di carico  $v_c$  rispetto al valore massimo raggiunto nel primo ciclo della prova.

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

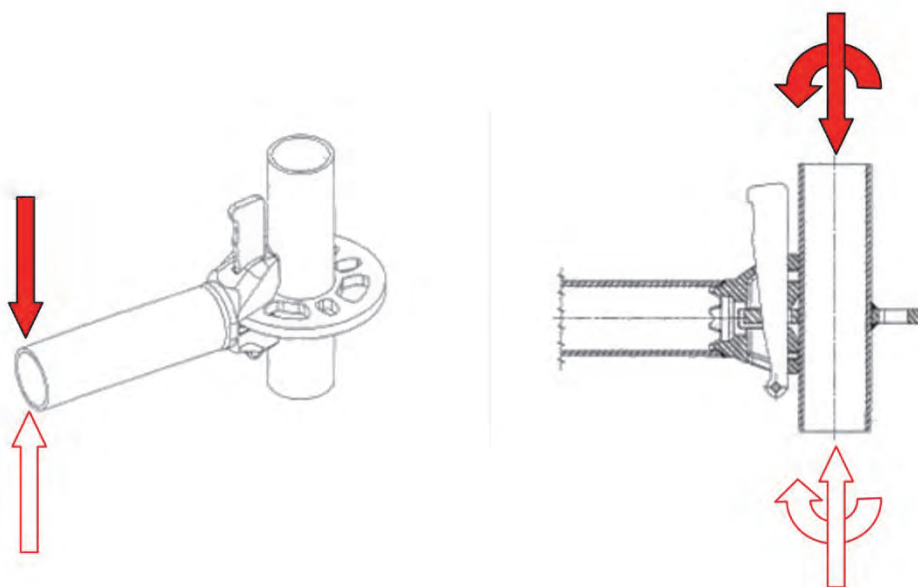


Figura 3-97 Schema di applicazione dello spostamento e azioni al nodo. La freccia piena indica la fase di carico. La freccia vuota indica la fase di scarico.

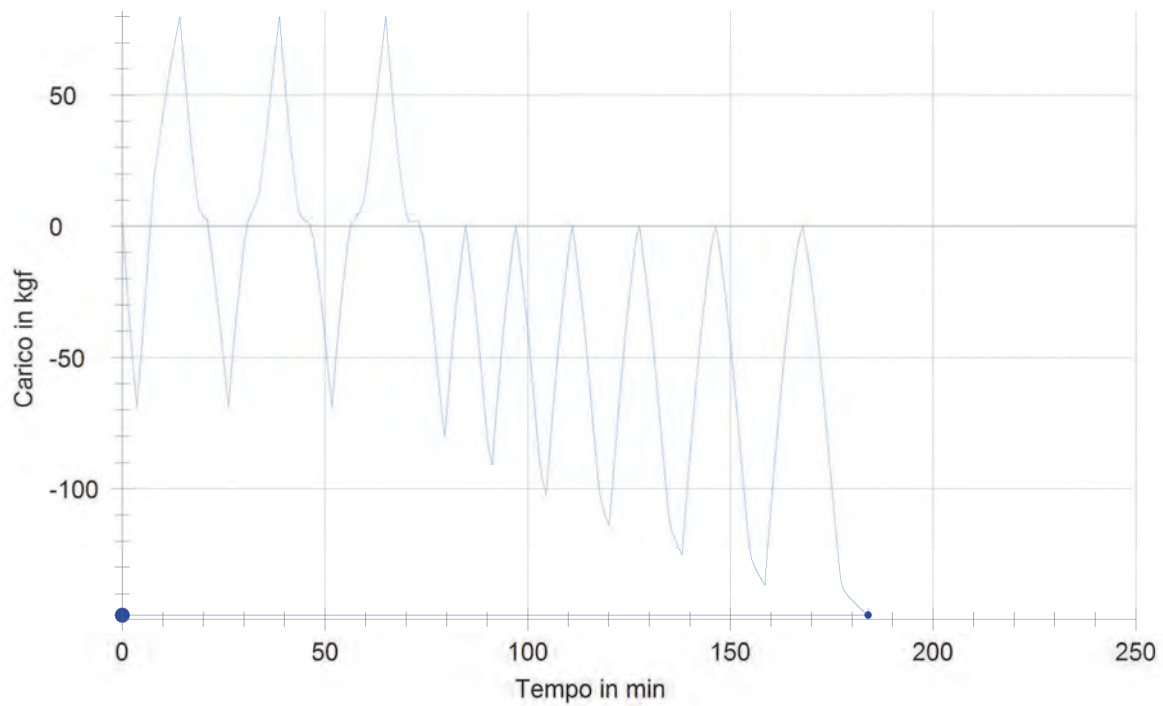


Figura 3-98 Esempio di grafico Carico – tempo in una prova di rigidità e resistenza ciclica negativa

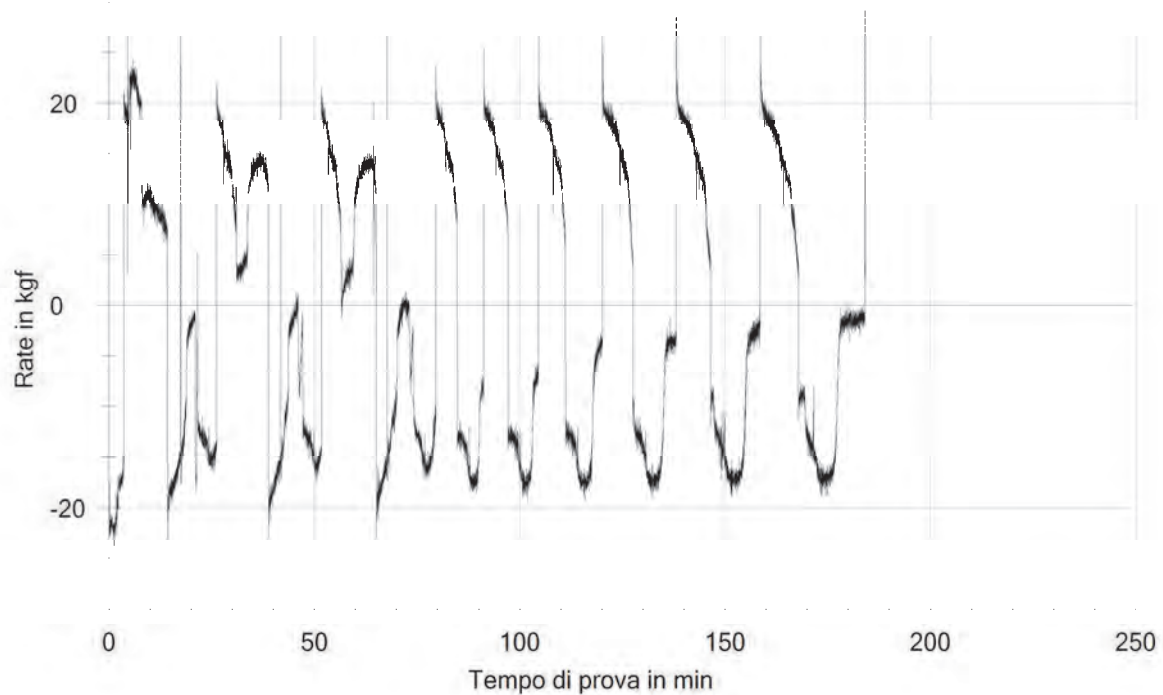


Figura 3-99 Esempio di grafico **Velocità di carico (Rate) – tempo** in una prova di rigidità e resistenza ciclica negativa. La prova viene terminata quando la velocità di carico diminuisce al valore di circa 2kg<sub>f</sub>/min . Tale valore risulta circa pari al 10% del valore massimo (circa 25 kg<sub>f</sub>/min) raggiunto nel primo ciclo di carico.

### 3.3.1.2 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 3-101):

- 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  $10\%R_k^+ = 13,21 kg_f$ .

Risultano definite le seguenti fasi di carico e scarico a zero:

1.  $[0; +93,26] kg_f$ , primo incremento di carico
2.  $[0; +106,47] kg_f$ , secondo incremento di carico
3.  $[0; +119,68] kg_f$ , terzo incremento di carico
4.  $[0; +132,89] kg_f$ , quarto incremento di carico
5.  $[0; +146,10] kg_f$ , quinto incremento di carico
6.  $[0; +159,31] kg_f$ , sesto incremento di carico
- 
- 
- n.  $\left[ 0; +1,0 \cdot \frac{R_k^+}{\gamma_M \cdot \gamma_F} - 0,1 \cdot n \cdot R_k^+ \right] kg_f$ , n-simo incremento di carico.

La condizione di collasso è raggiunta quando si ha una diminuzione sensibile della velocità di carico  $v_c$  rispetto al valore massimo raggiunto nel primo ciclo della prova.

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

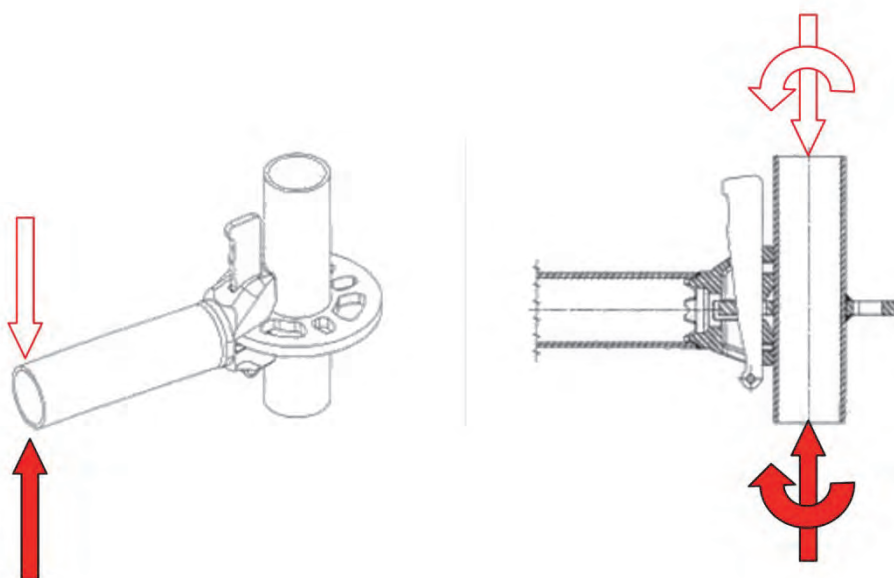


Figura 3-100 Schema di applicazione dello spostamento e azioni al nodo. La freccia piena indica la fase di carico. La freccia vuota indica la fase di scarico.

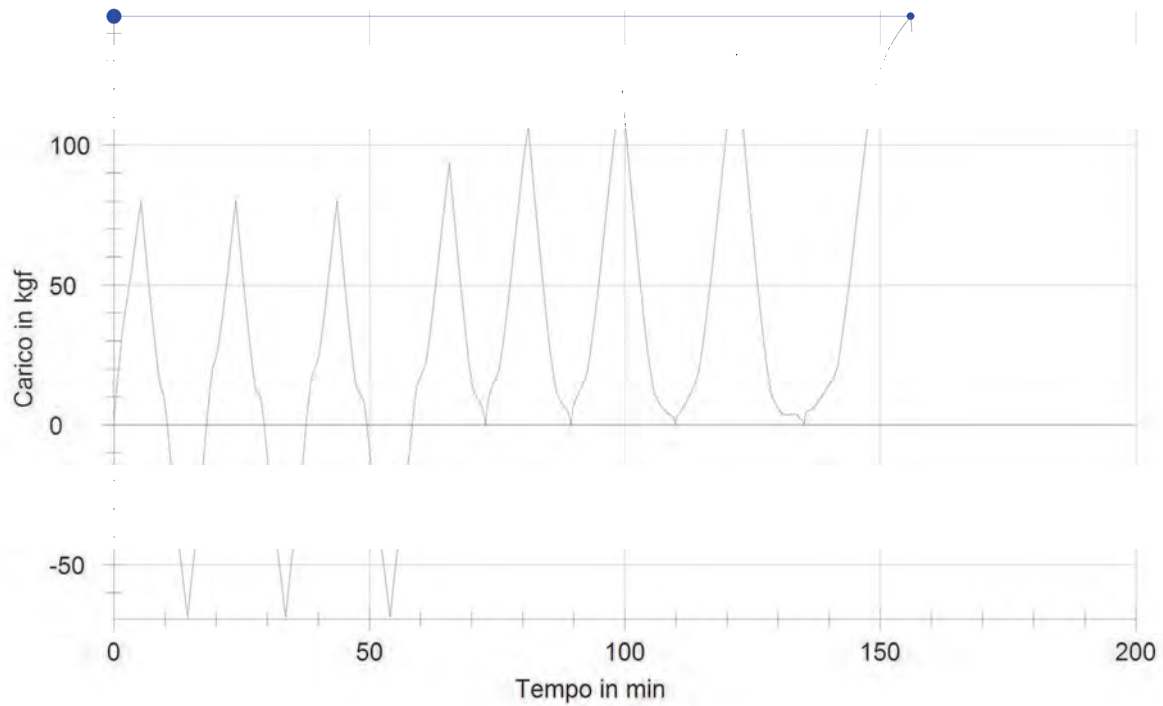


Figura 3-101 Esempio di grafico Carico – tempo in una prova di rigidezza e resistenza ciclica positiva

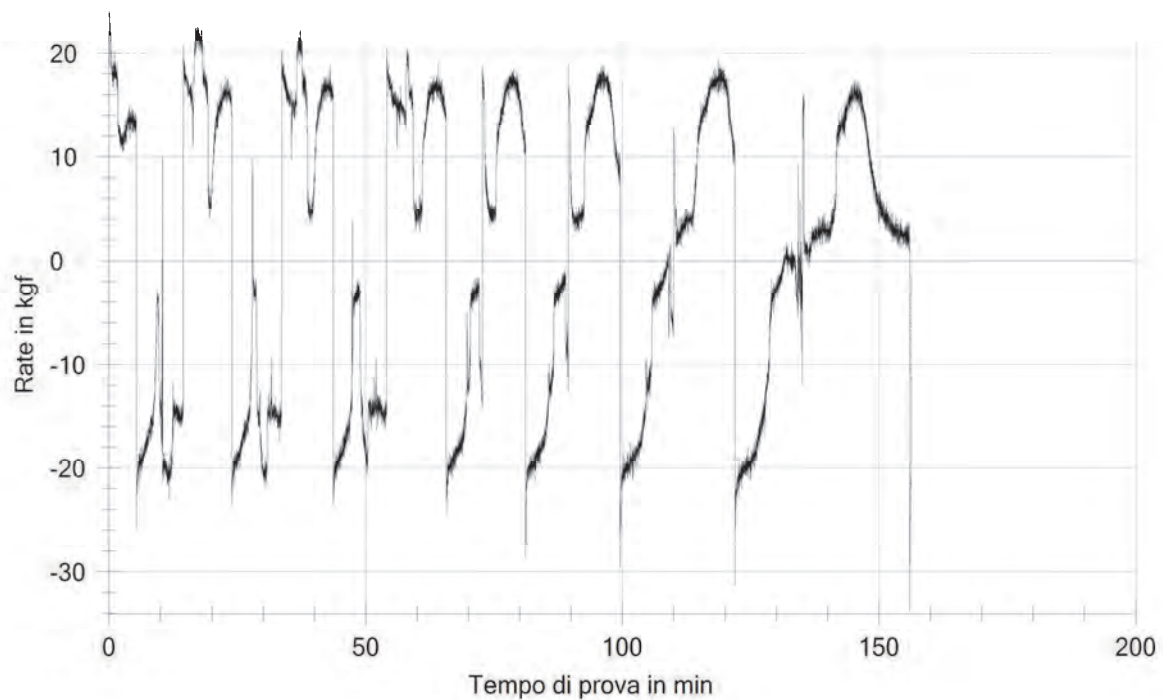


Figura 3-102 Esempio di grafico **Velocità di carico (Rate) – tempo** in una prova di rigidezza e resistenza ciclica positiva. La prova viene terminata quando la velocità di carico diminuisce al valore di circa 2kg<sub>f</sub>/min. Tale valore risulta circa pari al 10% del valore massimo (circa 25 kg<sub>f</sub>/min) raggiunto nel primo ciclo di carico.

### 3.3.2 Risultati sperimentali

#### 3.3.2.1 Sintesi dei risultati

Nelle tabelle seguenti 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  $v_{clim}$  in base al carico massimo
- Velocità di carico limite  $v_{c\lim}$  in base al carico massimo stimato
- 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
			kgF m	kNm					$V_{clim} = (0,25 F_{max})/min$	$V_{clim} = (0,25 F_{max})/min$	
a = 805 mm	$b = a + d/2$	$F_{max}$	$F_{max}$	$M_{max}$	$V_{cmax}$	$V_{clim} = (0,25 F_{max})/min$	$V_{cmax} \leq V_{clim}$	$F_{max}$	$V_{clim} = (0,25 F_{max})/min$	$V_{cmax} \leq V_{clim}$	
$V_s = 3.5$ mm/min	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	36.67	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 rigidità e resistenza cicliche negative vedi file: allegato1 report ponteggi

d = 48.3 mm	Braccio	Carico massimo	Momento massimo		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
			kgF m	kNm					$V_{clim} = (0,25 F_{max})/min$	$V_{clim} = (0,25 F_{max})/min$	
a = 805 mm	$b = a + d/2$	$F_{max}$	$F_{max}$	$M_{max}$	$V_{cmax}$	$V_{clim} = (0,25 F_{max})/min$	$V_{cmax} \leq V_{clim}$	$F_{max}$	$V_{clim} = (0,25 F_{max})/min$	$V_{cmax} \leq V_{clim}$	
$V_s = 3.5$ mm/min	mm	kgF	kgF m	kNm	kgF / min	kgF / min		kgF	kgF / min		
Nome prova											
3.5 CicIP3	829.15	155.68	129.082	1.27	27.81	38.92	SI	132.09	33.02	SI	
3.5 CicIP4	829.15	146.02	121.072	1.19	22.67	36.51	SI			SI	
3.5 CicIP5	829.15	152.59	126.52	1.24	28.81	38.15	SI			SI	
3.5 CicIP7	829.15	172.48	143.012	1.40	28.71	43.12	SI			SI	
3.5 CicIP8	829.15	159.25	132.04	1.30	27.72	39.81	SI			SI	

Tabella 5. Sintesi dei risultati sperimentali per le prove di rigidità e resistenza cicliche positive vedi file: allegato1 report ponteggi

## Grafici delle prove negative

## 3.3.2.1.1 Prova 3\_5CicIN1

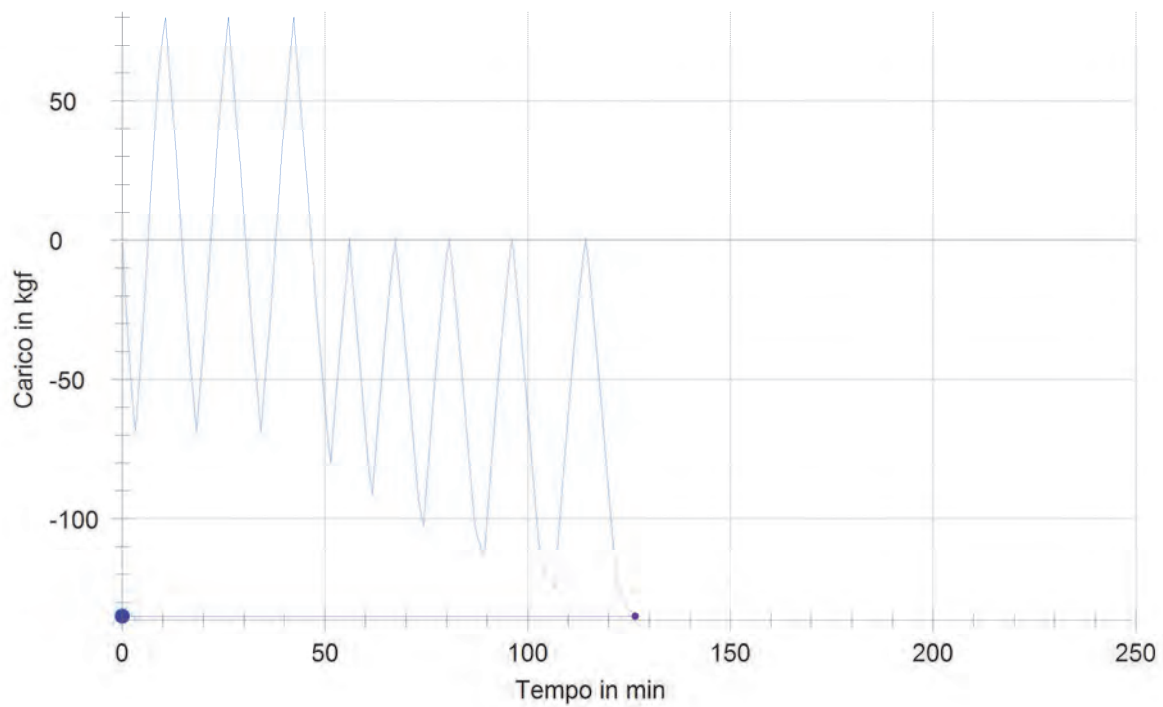
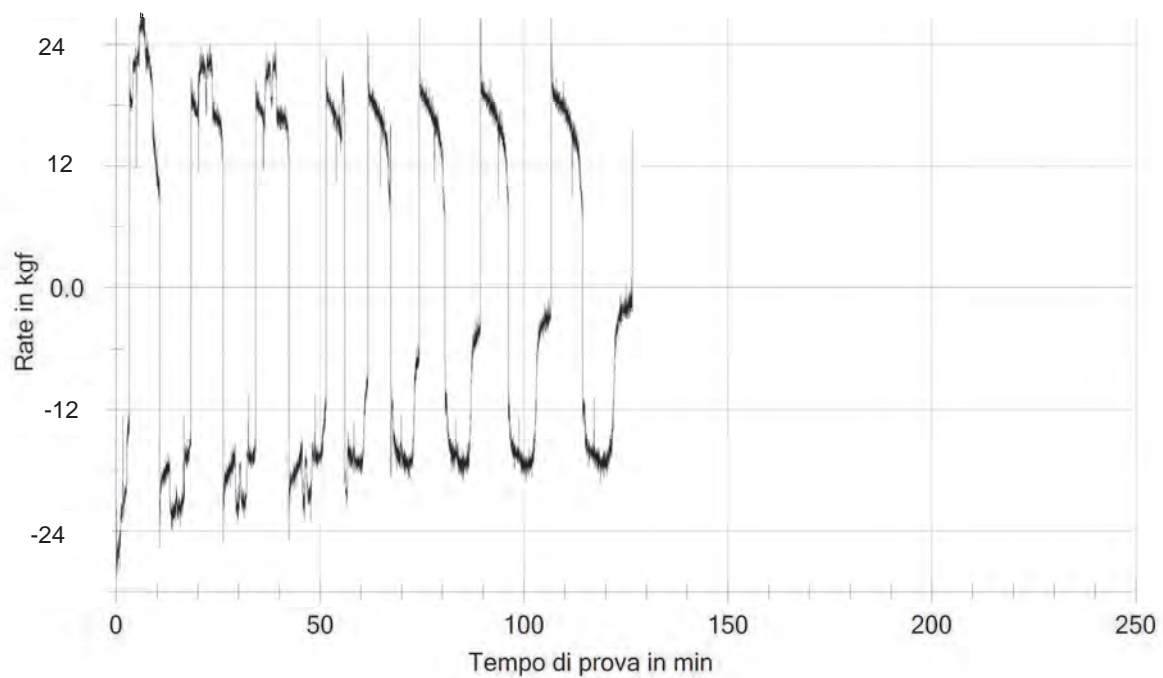


Figura 3-103 Curva carico-tempo.

Figura 3-104 Velocità di carico istantanea (kg<sub>f</sub>/min) nel tempo



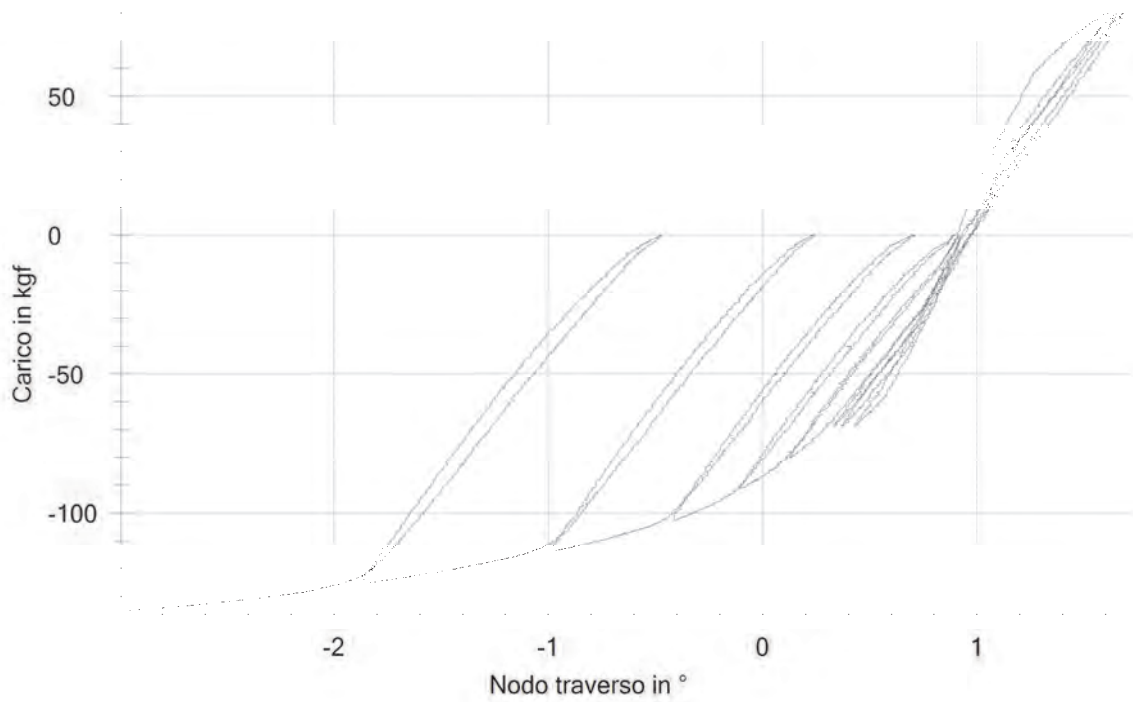


Figura 3-105 Curva carico – inclinazione trasverso al nodo

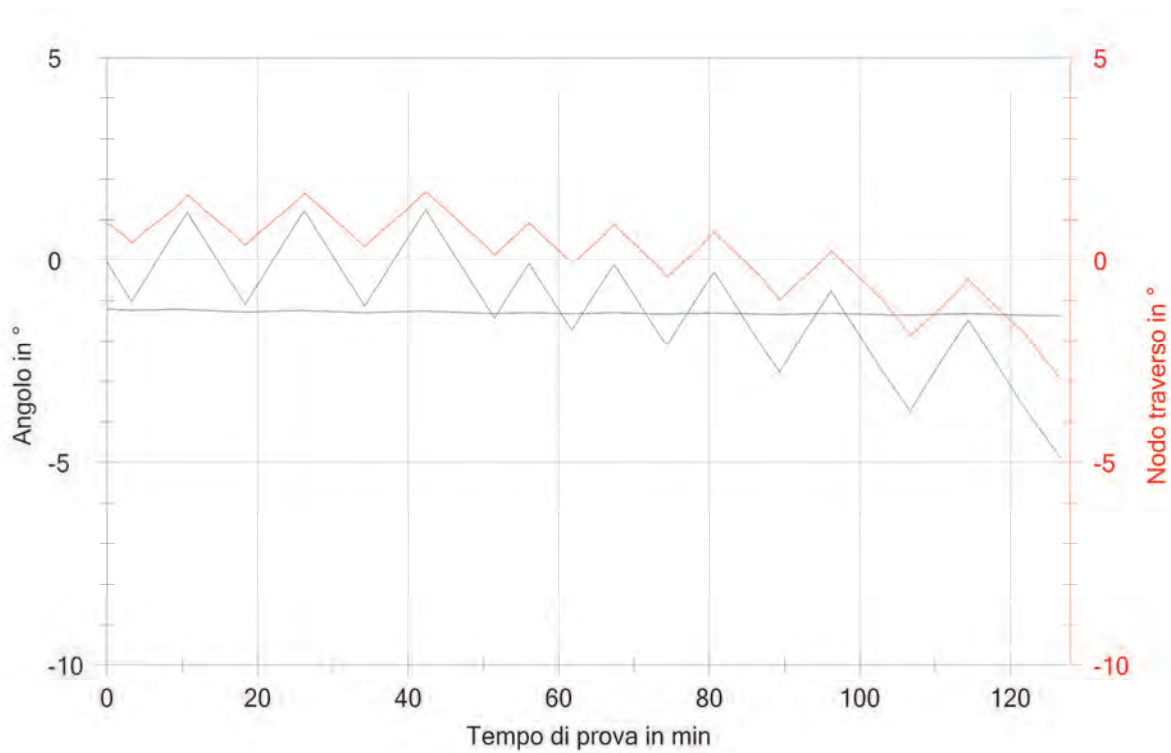


Figura 3-106 Inclinazione nodo trasverso, nodo libero e nodo montante nel tempo

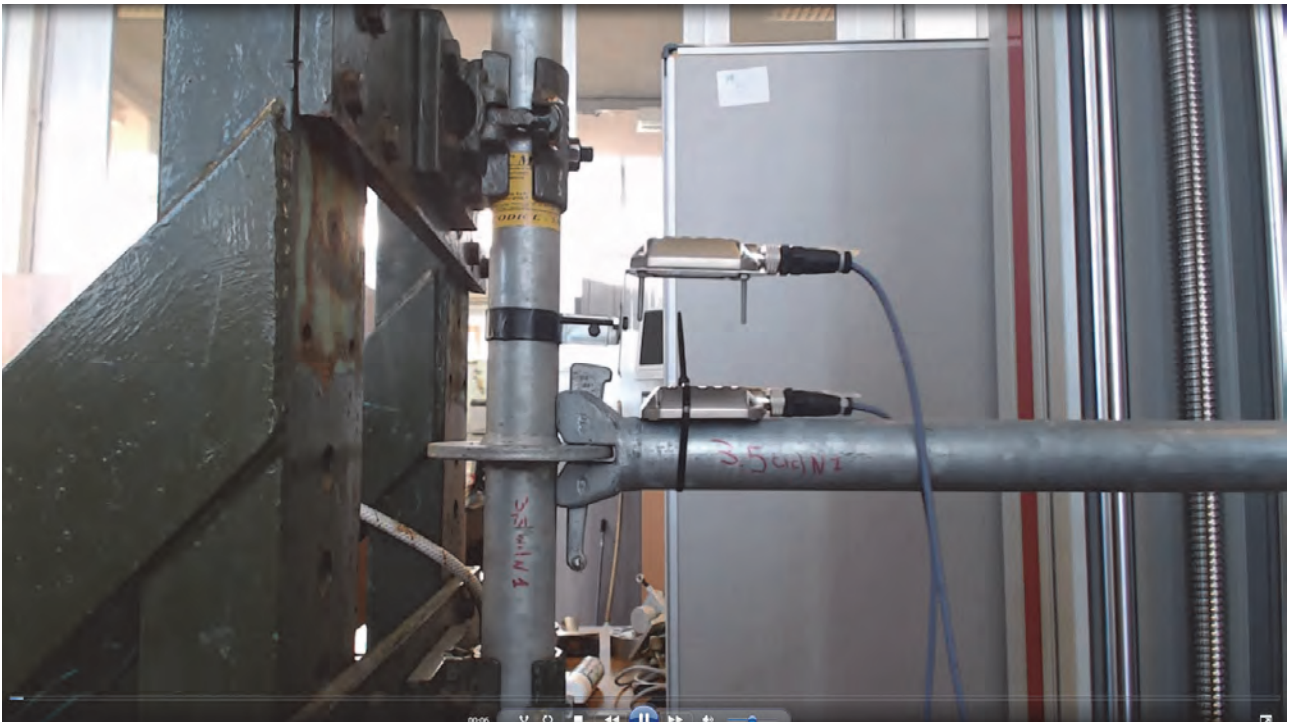


Figura 3-107 Foto inizio prova



Figura 3-108 Foto fine prova

### 3.3.2.1.2 Prova 3\_5CicIN2:

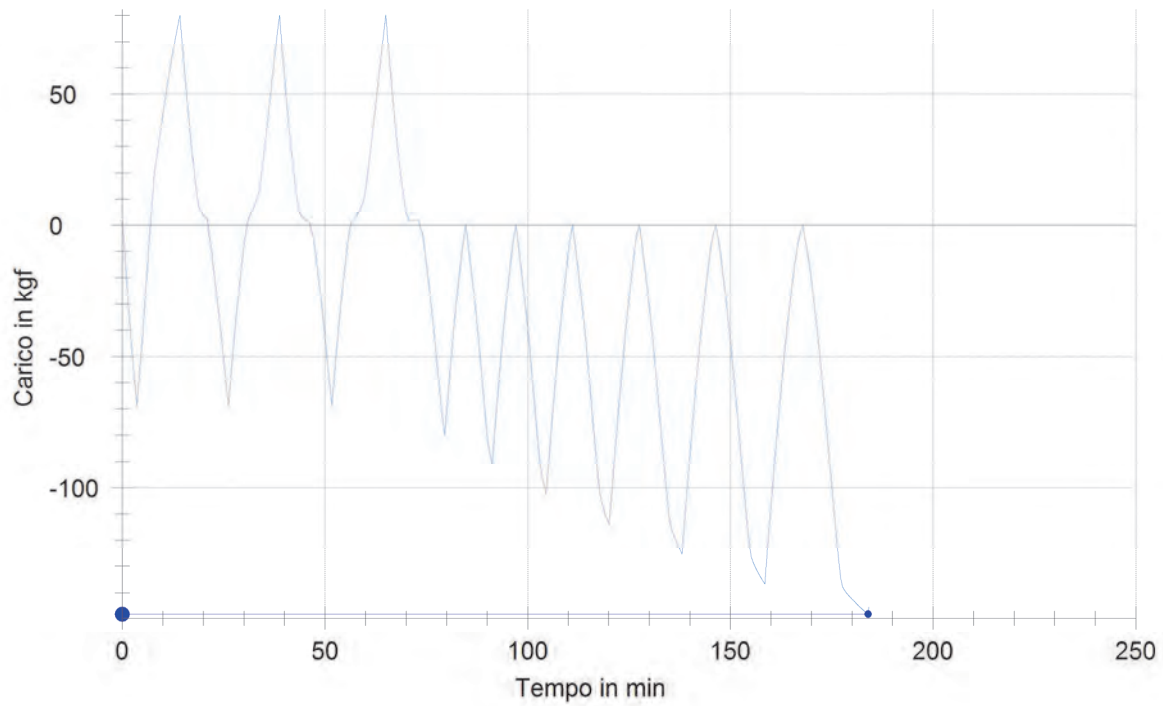


Figura 3-109 Curva carico-tempo.

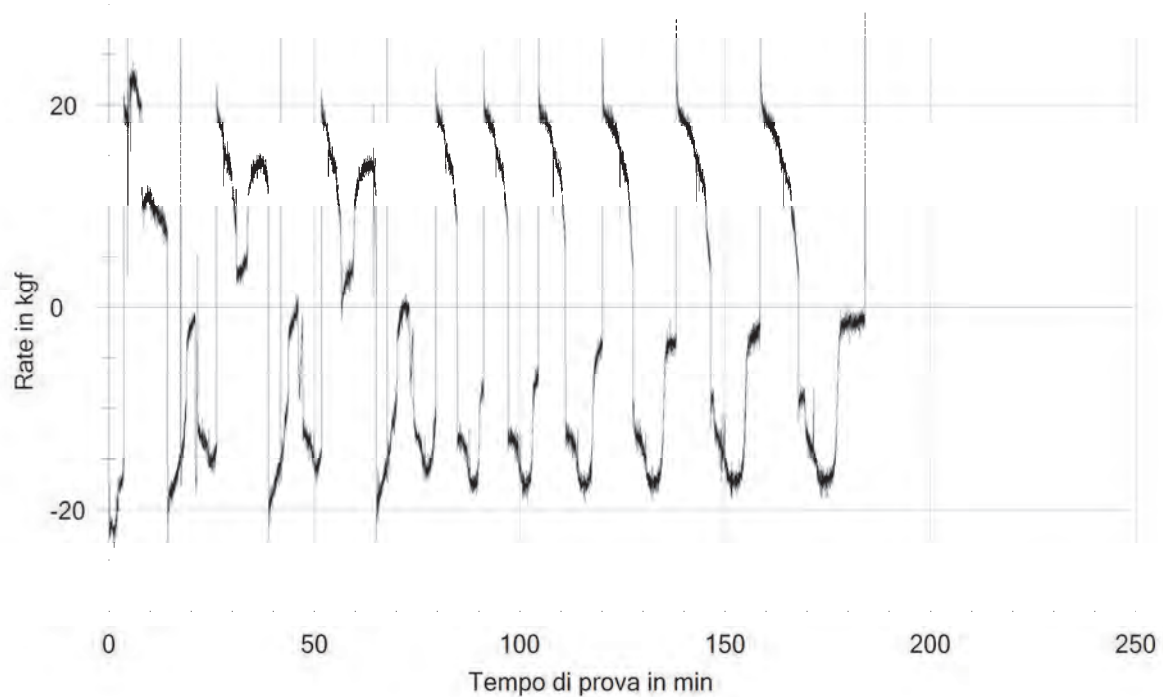


Figura 3-110 Velocità di carico istantanea (kg<sub>f</sub>/min).

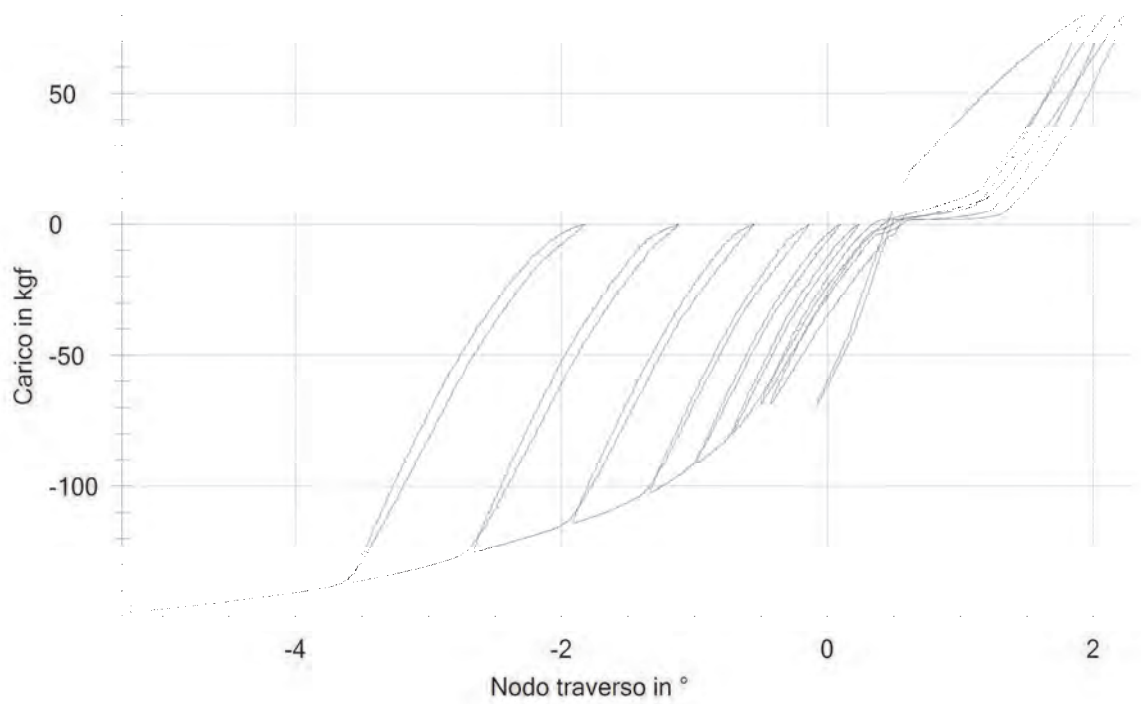


Figura 3-111 Curva carico – inclinazione trasverso al nodo

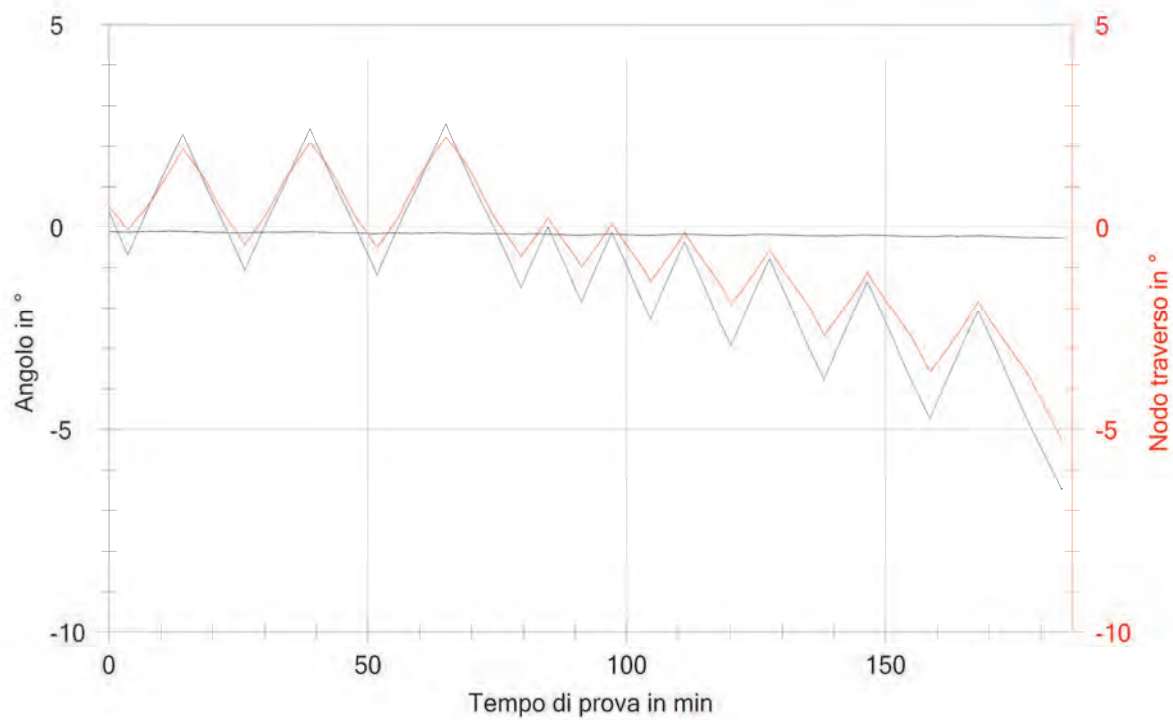


Figura 3-112 Inclinazione nodo trasverso, nodo libero e nodo montante nel tempo



Figura 3-113 Foto inizio prova

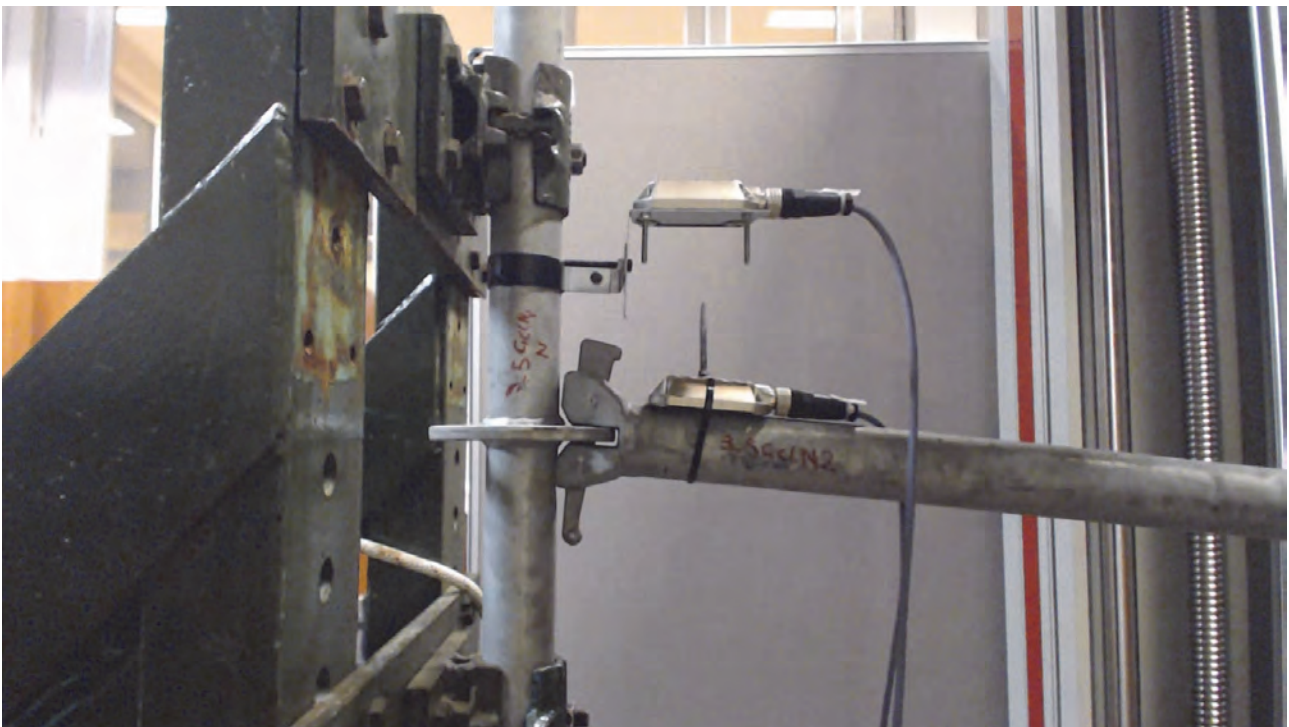


Figura 3-114 Foto fine prova

## 3.3.2.1.3 Prova 3\_5CicIN3:

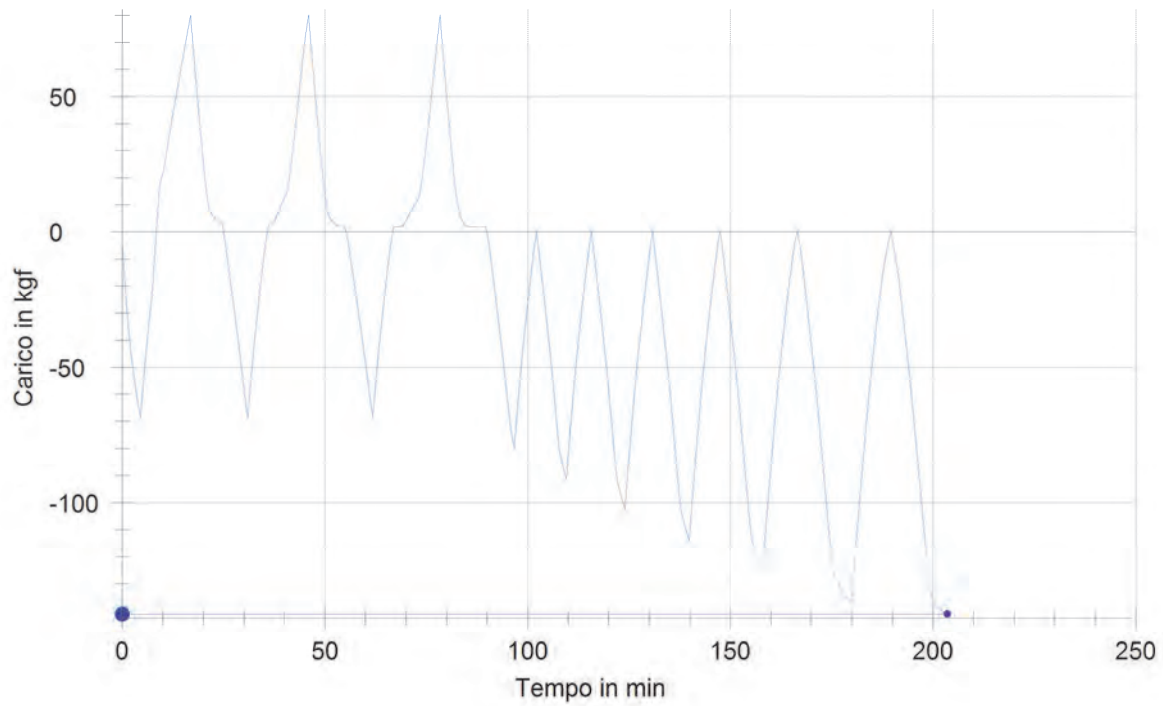
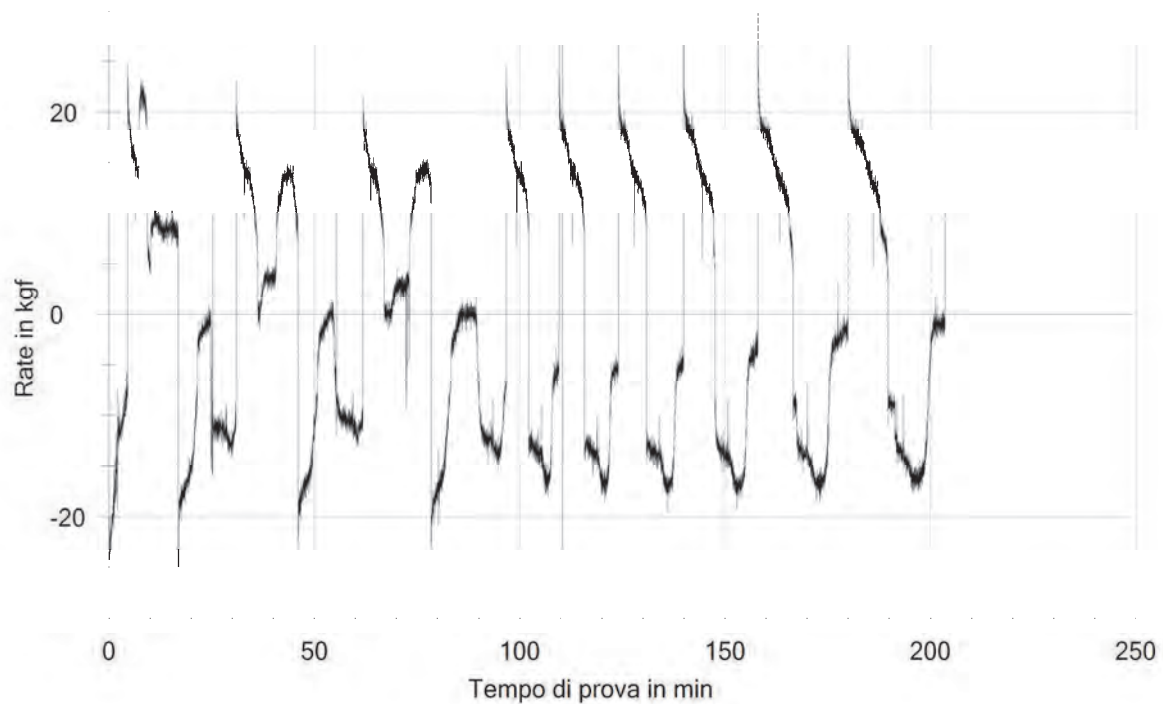


Figura 3-115 Curva carico-tempo.

Figura 3-116 Velocità di carico istantanea (kg<sub>f</sub>/min).

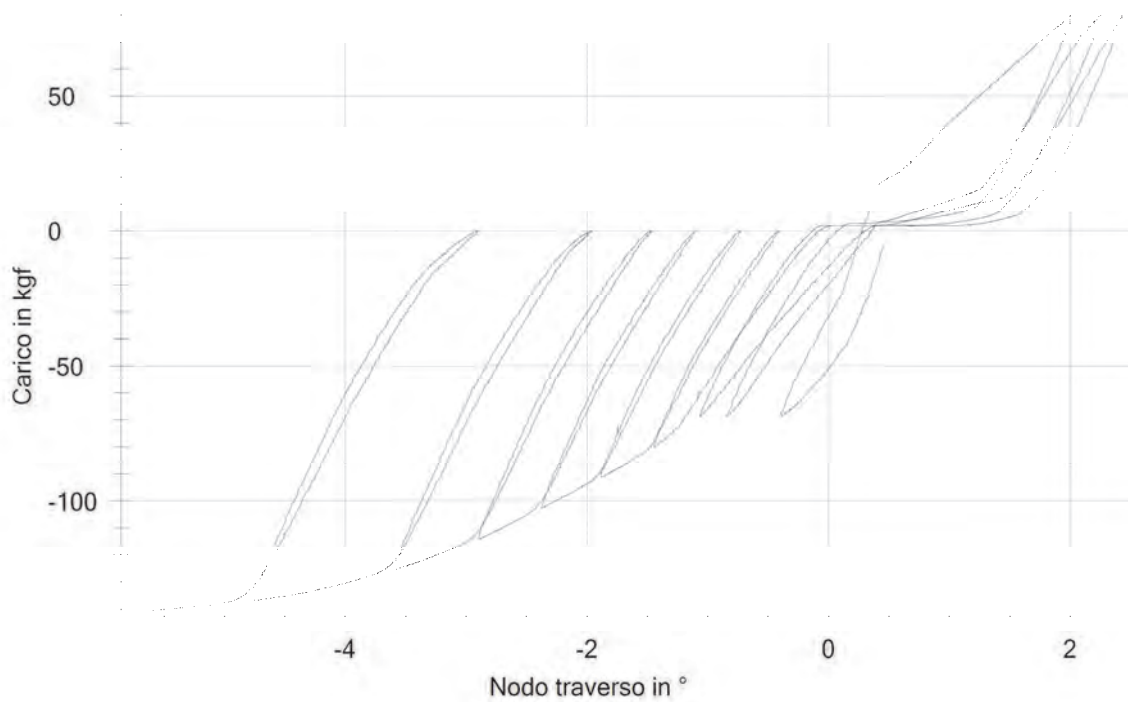


Figura 3-117 Curva carico – inclinazione trasverso al nodo

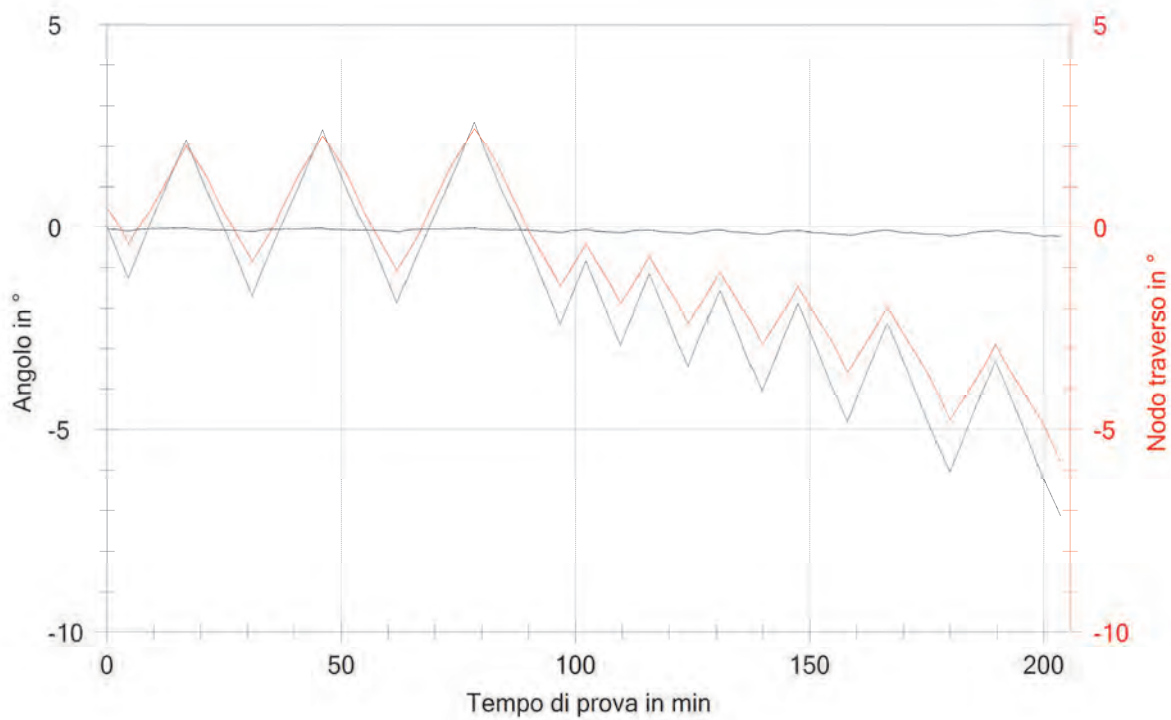


Figura 3-118 Inclinazione nodo trasverso, nodo libero e nodo montante nel tempo



Figura 3-119 Foto inizio prova



Figura 3-120 Foto fine prova



### 3.3.2.1.4 Prova 3\_5CicIN4:

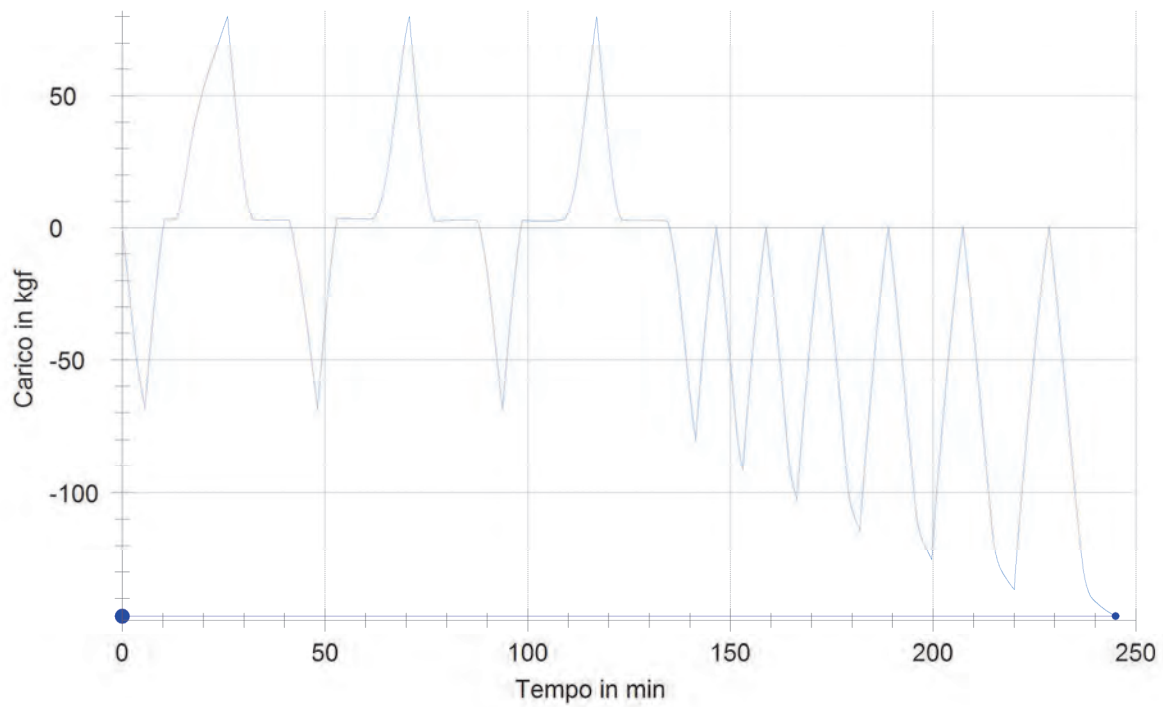


Figura 3-121 Curva carico-tempo.

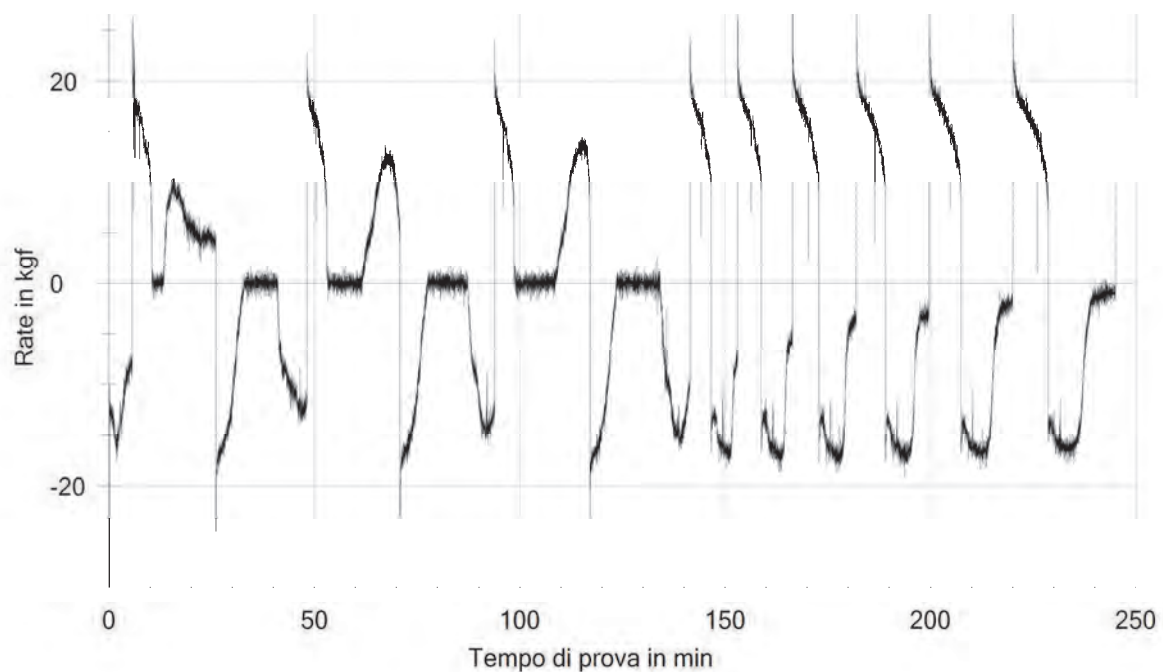


Figura 3-122 Velocità di carico media (kg<sub>f</sub>/min).

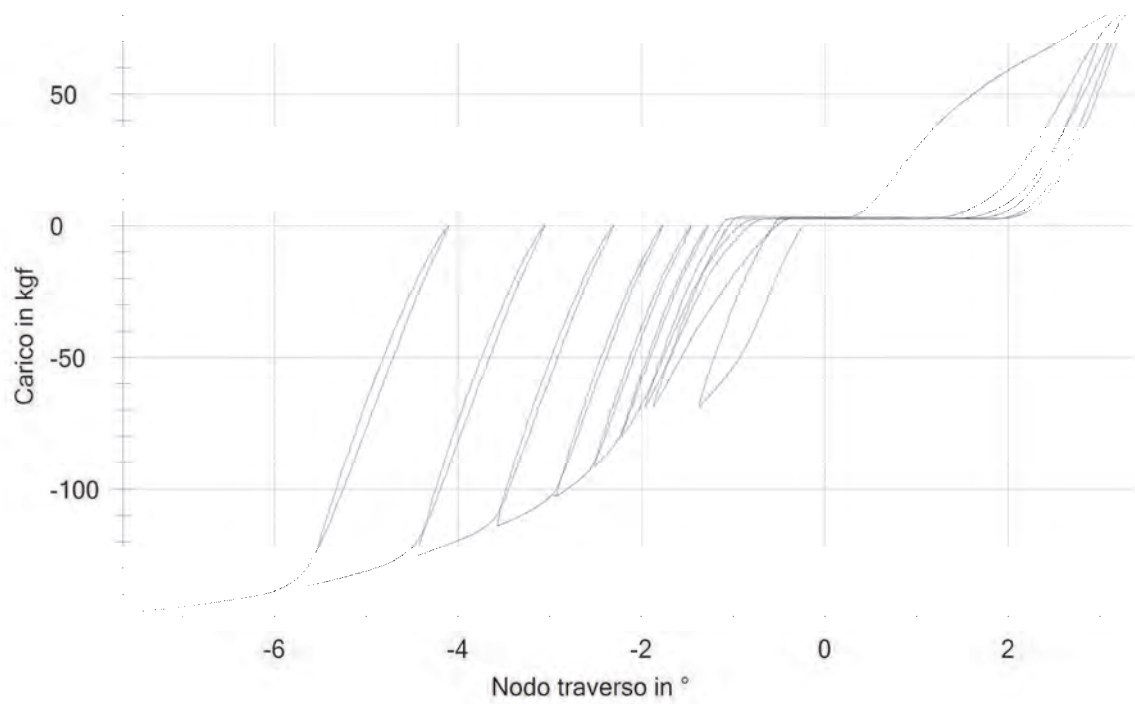


Figura 3-123 Curva carico – inclinazione traverso al nodo

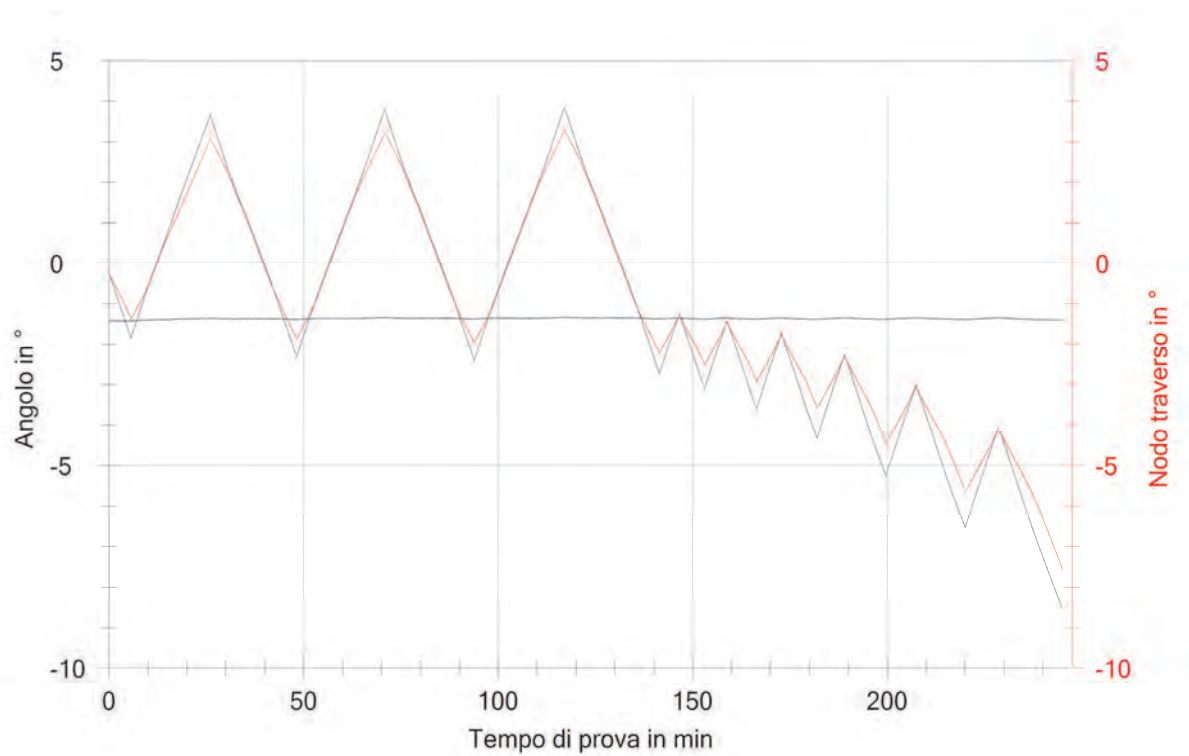


Figura 3-124 Inclinazione nodo traverso, nodo libero e nodo montante nel tempo

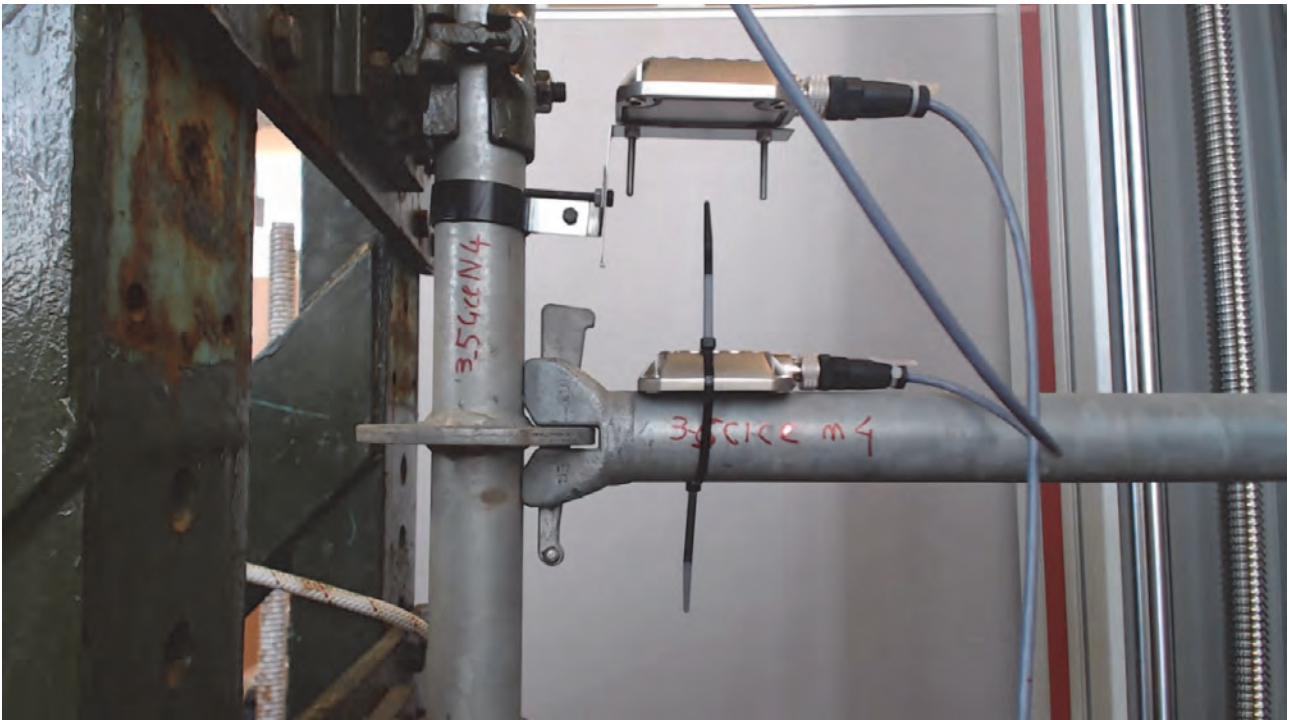


Figura 3-125 Foto inizio prova



Figura 3-126 Foto fine prova

## 3.3.2.1.5 Prova 3\_5CicIN5:

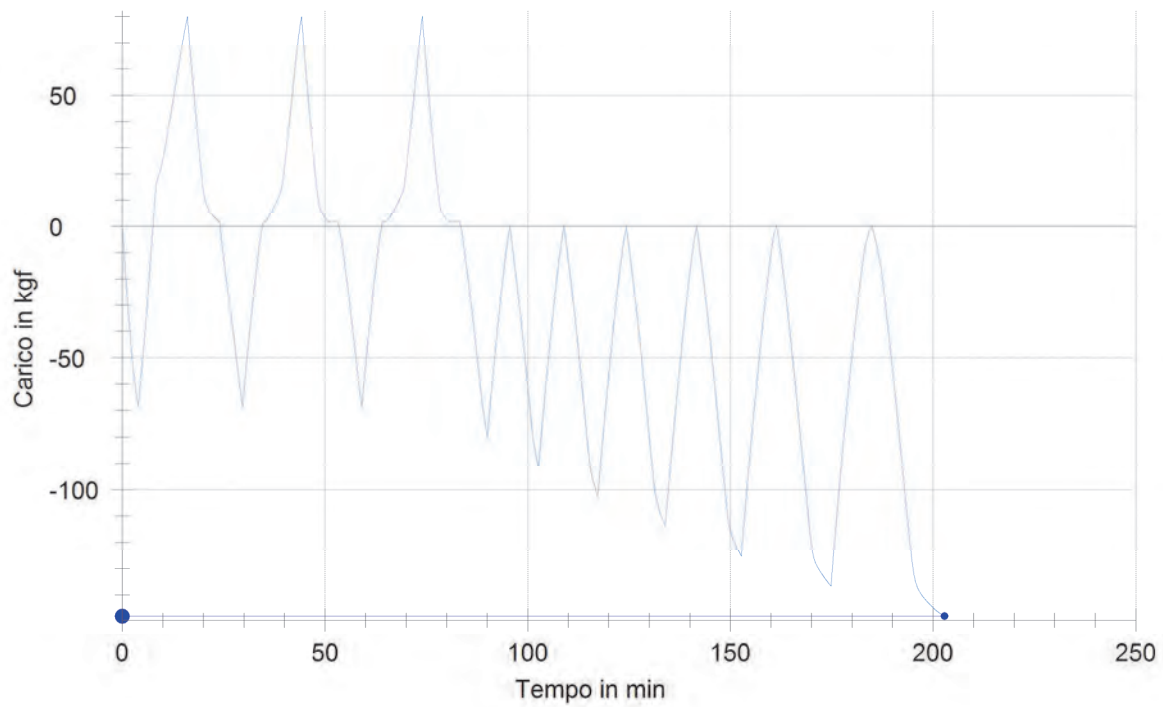
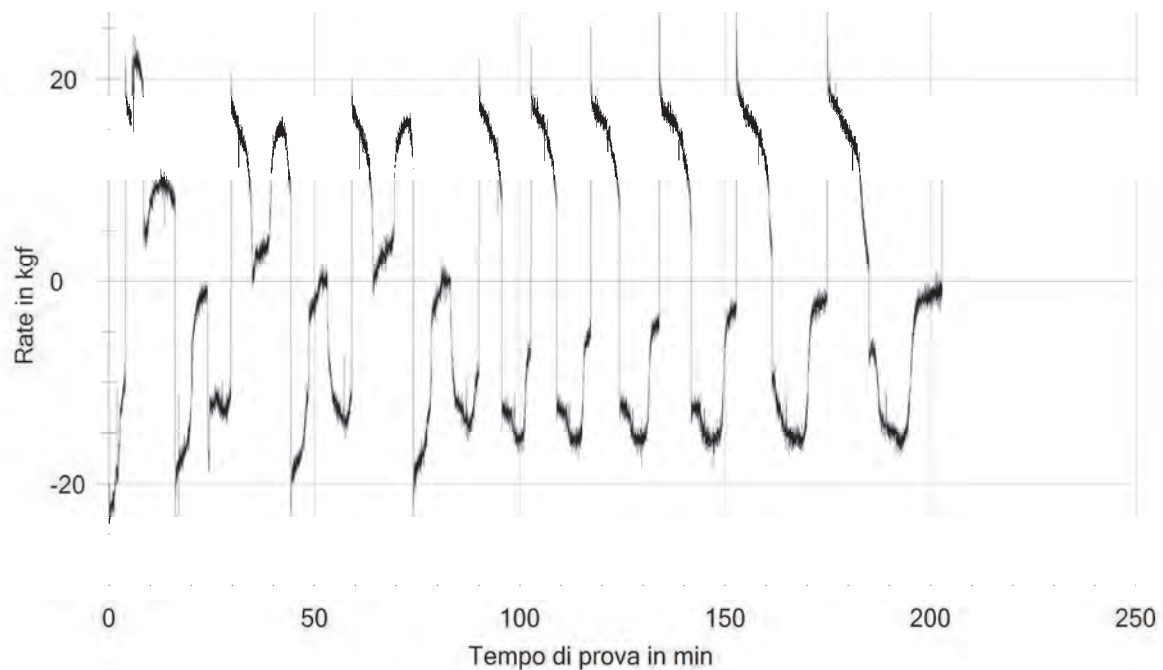


Figura 3-127 Curva carico-tempo

Figura 3-128 Velocità di carico istantanea (kg<sub>f</sub>/min)

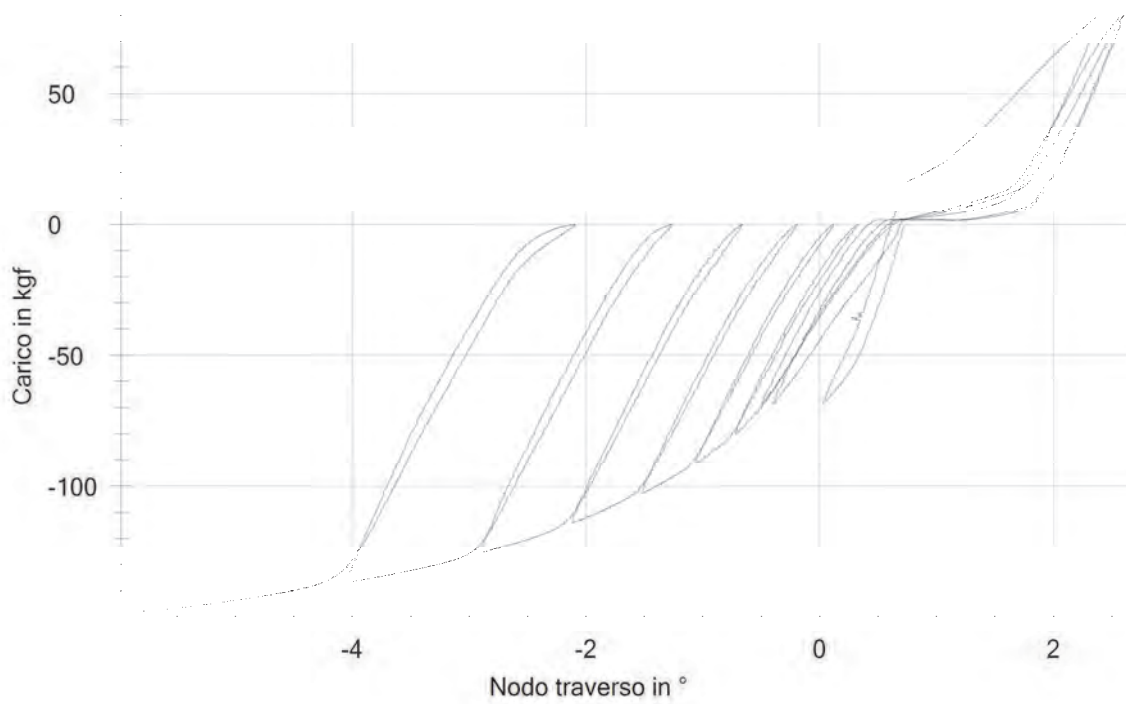


Figura 3-129 Curva carico – inclinazione trasverso al nodo

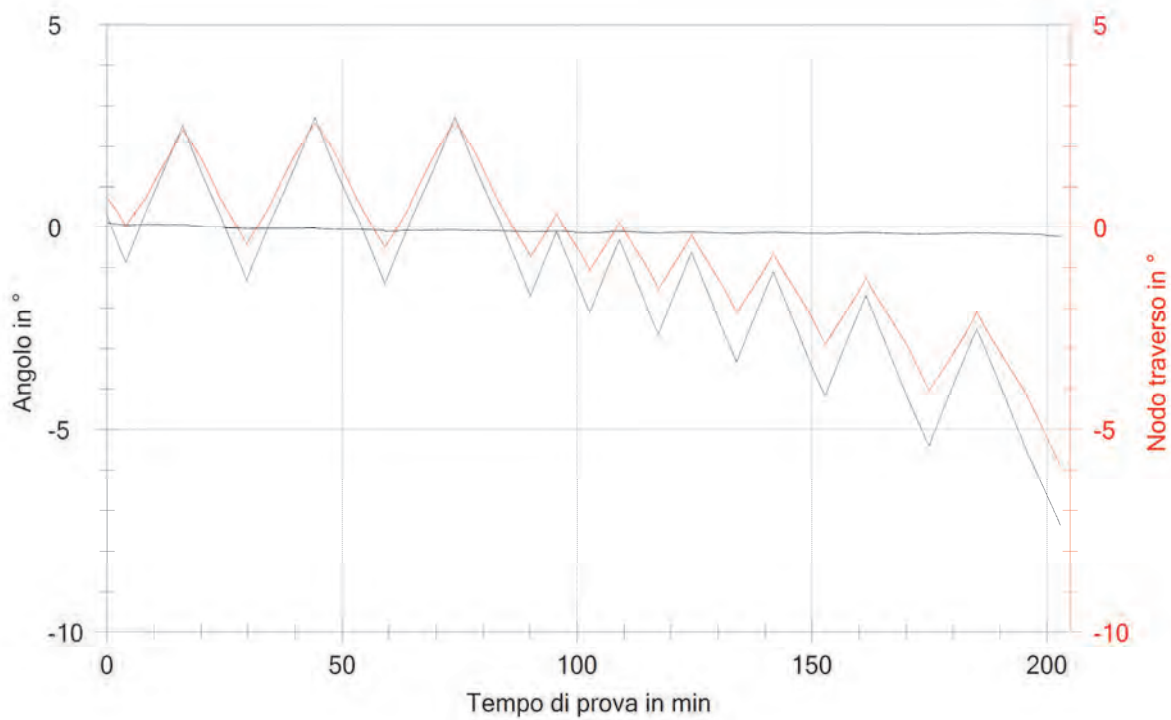


Figura 3-130 Inclinazione nodo traverso, nodo libero e nodo montante nel tempo

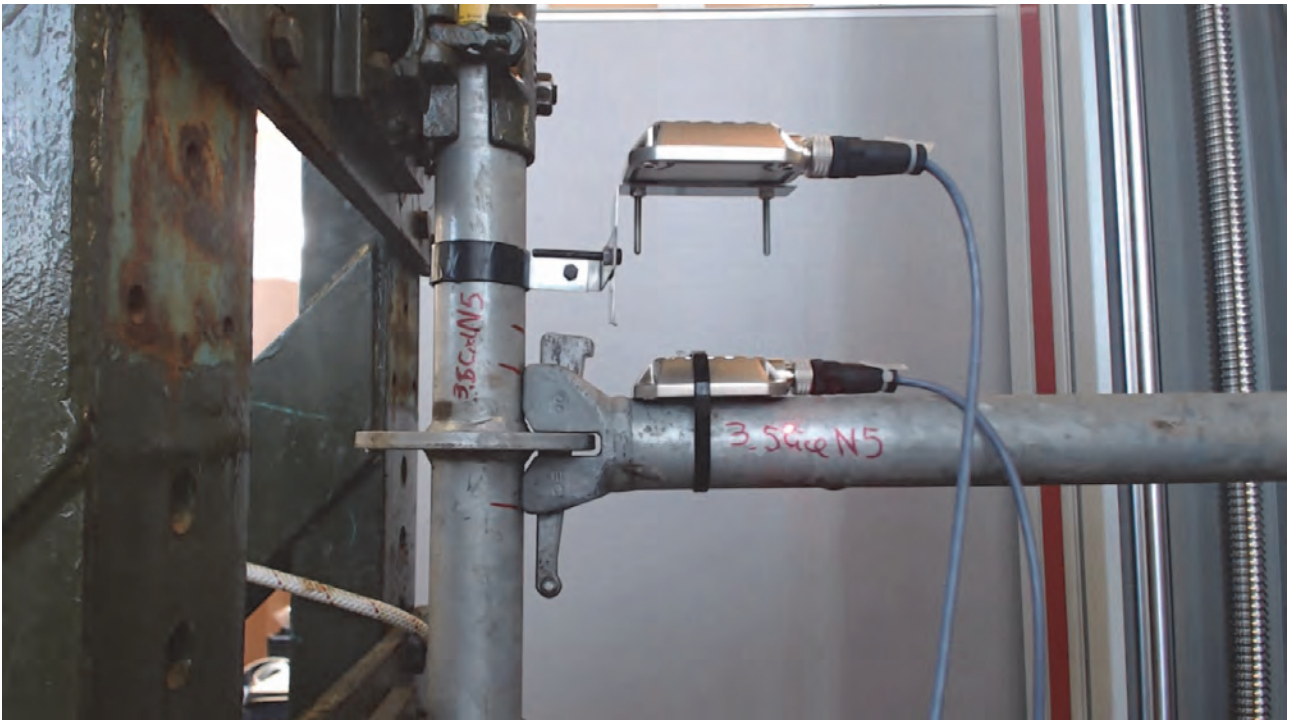


Figura 3-131 Foto inizio prova



Figura 3-132 Foto fine prova

### 3.3.2.2 Grafici delle prove positive

#### 3.3.2.2.1 Prova 3\_5CicIP3:

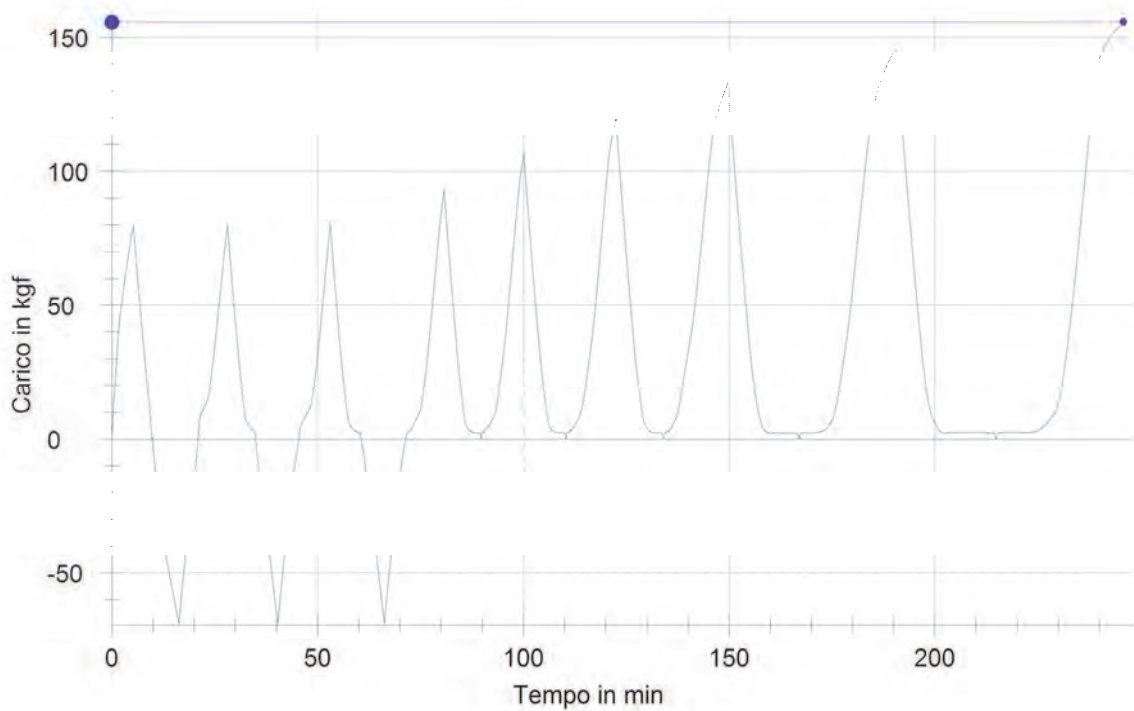


Figura 3-133 Curva carico-tempo

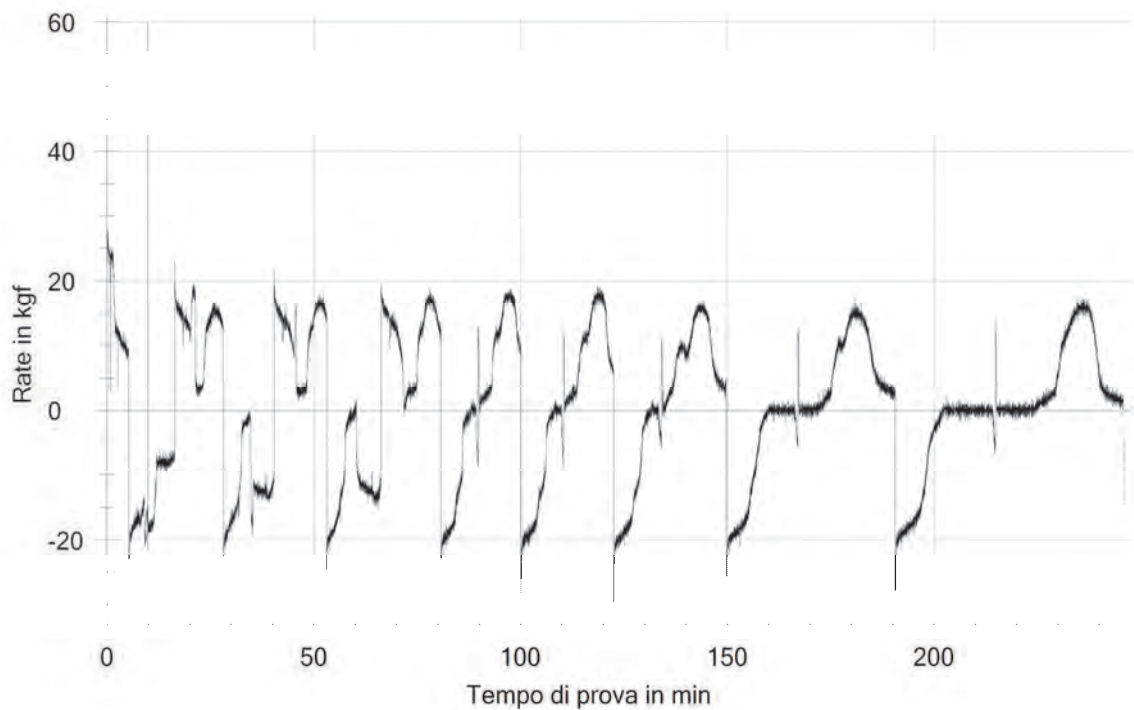


Figura 3-134 Velocità di carico istantanea (kg<sub>f</sub>/min)

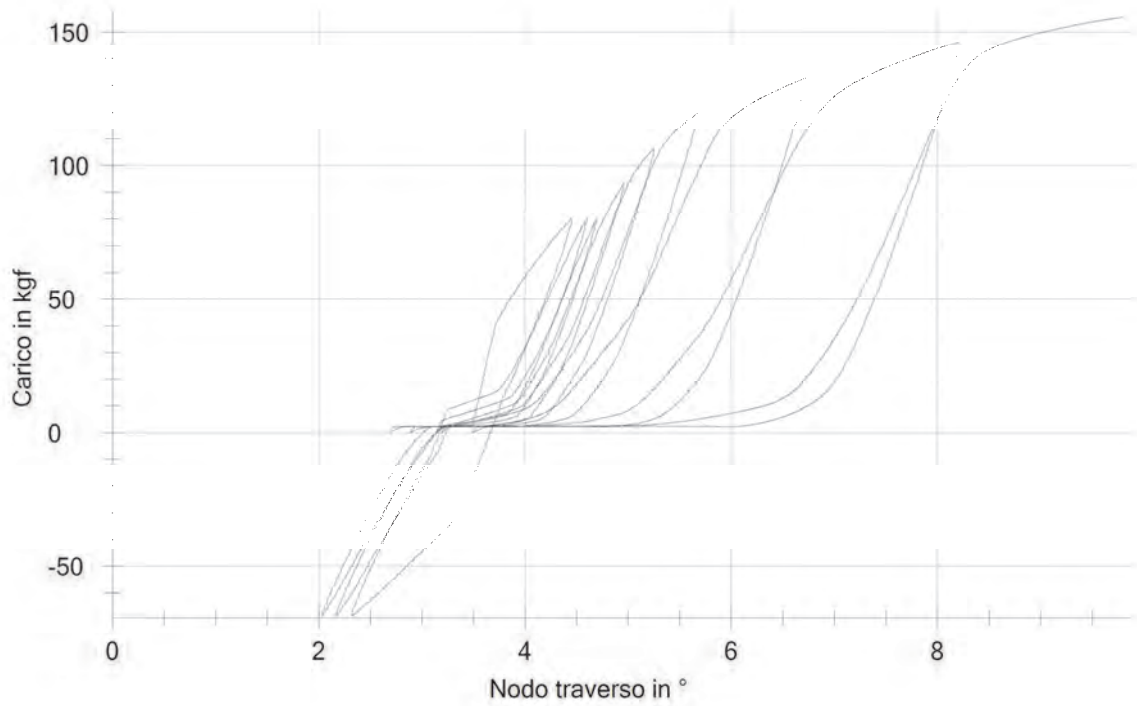


Figura 3-135 Curva carico – inclinazione traverso al nodo

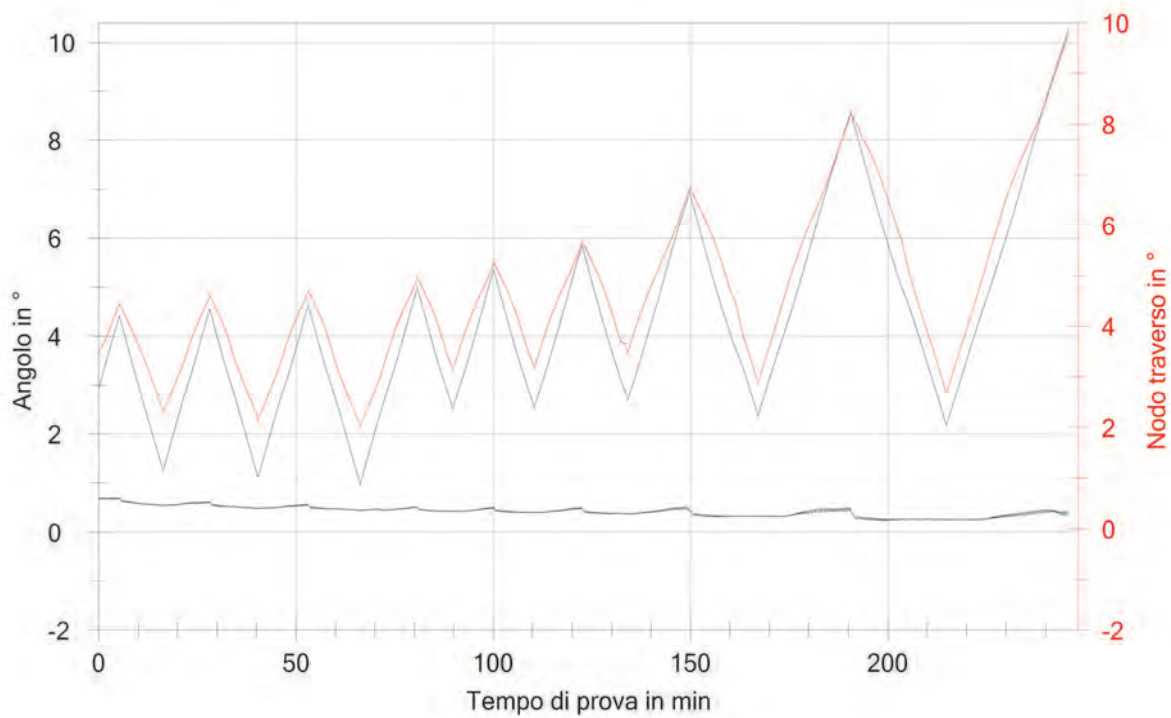


Figura 3-136 Inclinazione nodo traverso, nodo libero e nodo montante nel tempo





Figura 3-137 Foto inizio prova



Figura 3-138 Foto fine prova

## 3.3.2.2 Prova 3\_5CicIP4:

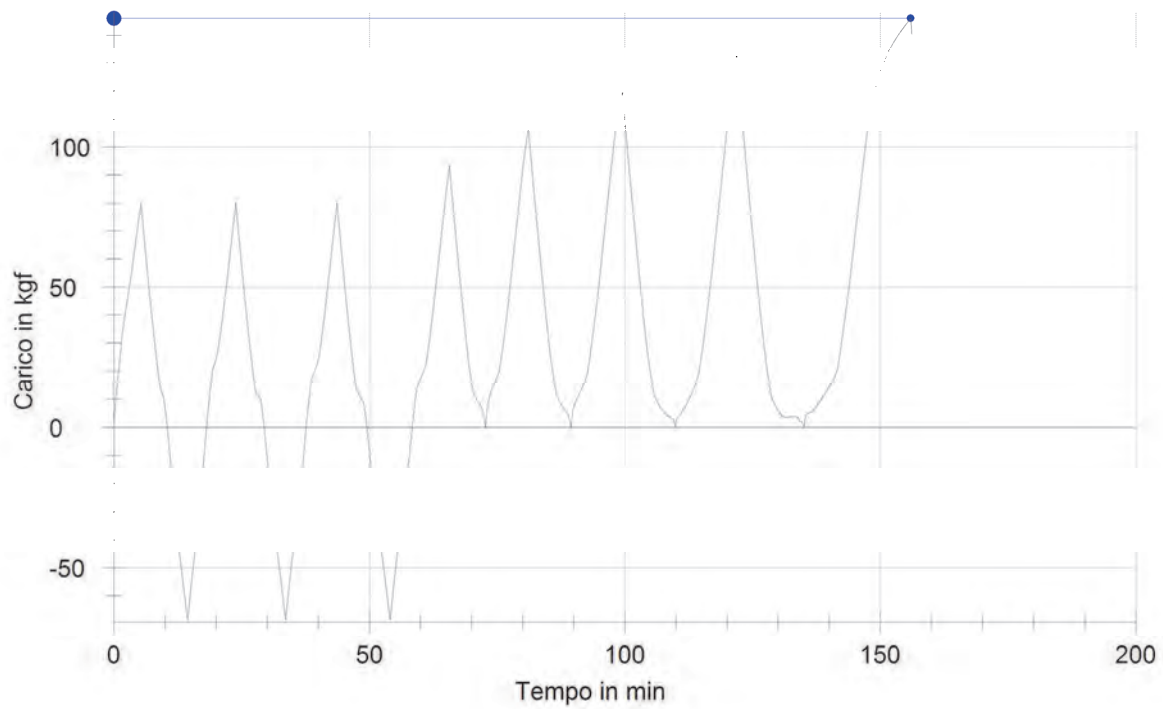
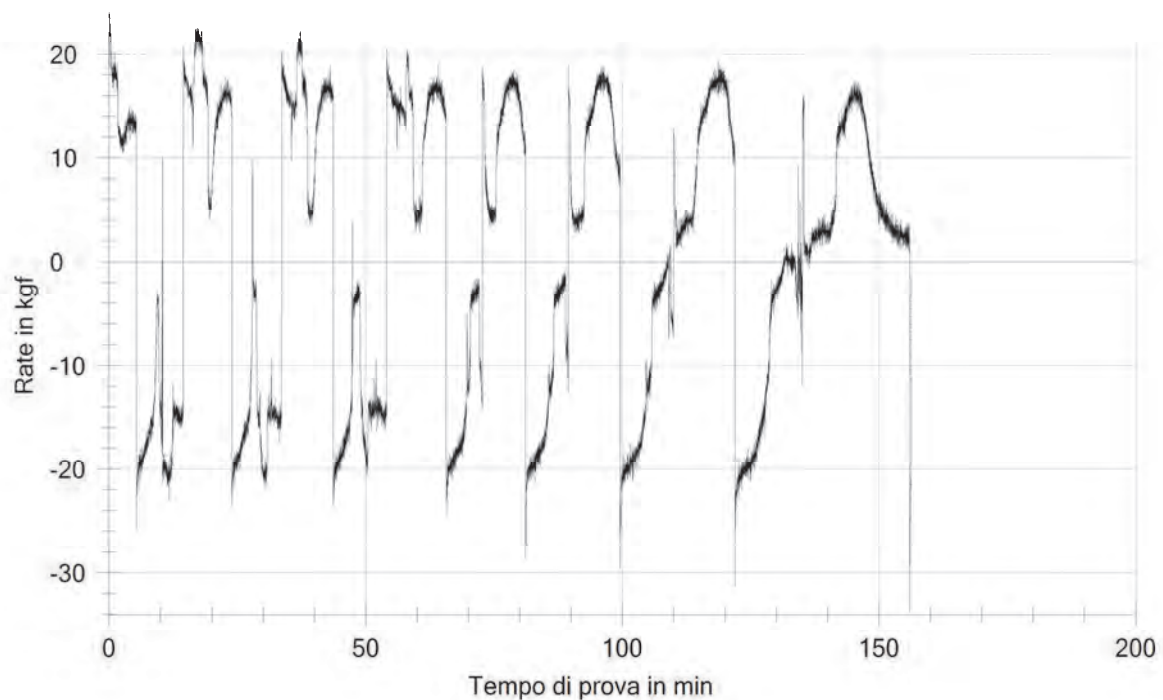


Figura 3-139 Curva carico-tempo

Figura 3-140 Velocità di carico istantanea (kg<sub>f</sub>/min)

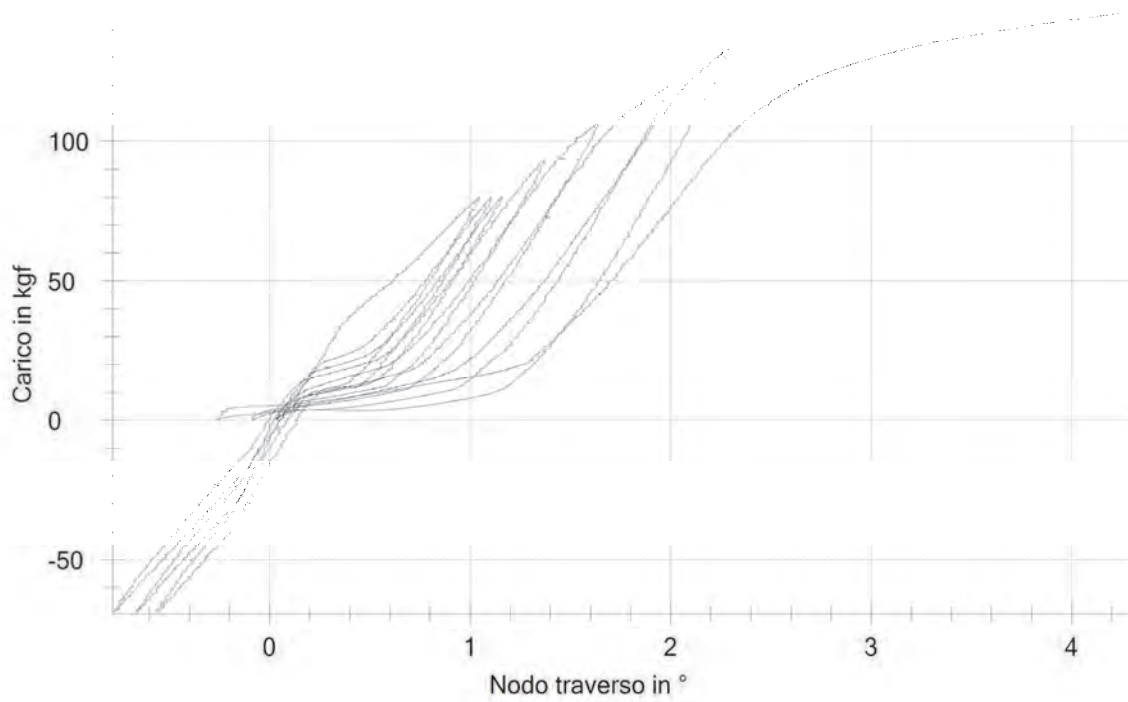


Figura 3-141 Curva carico – inclinazione traverso al nodo

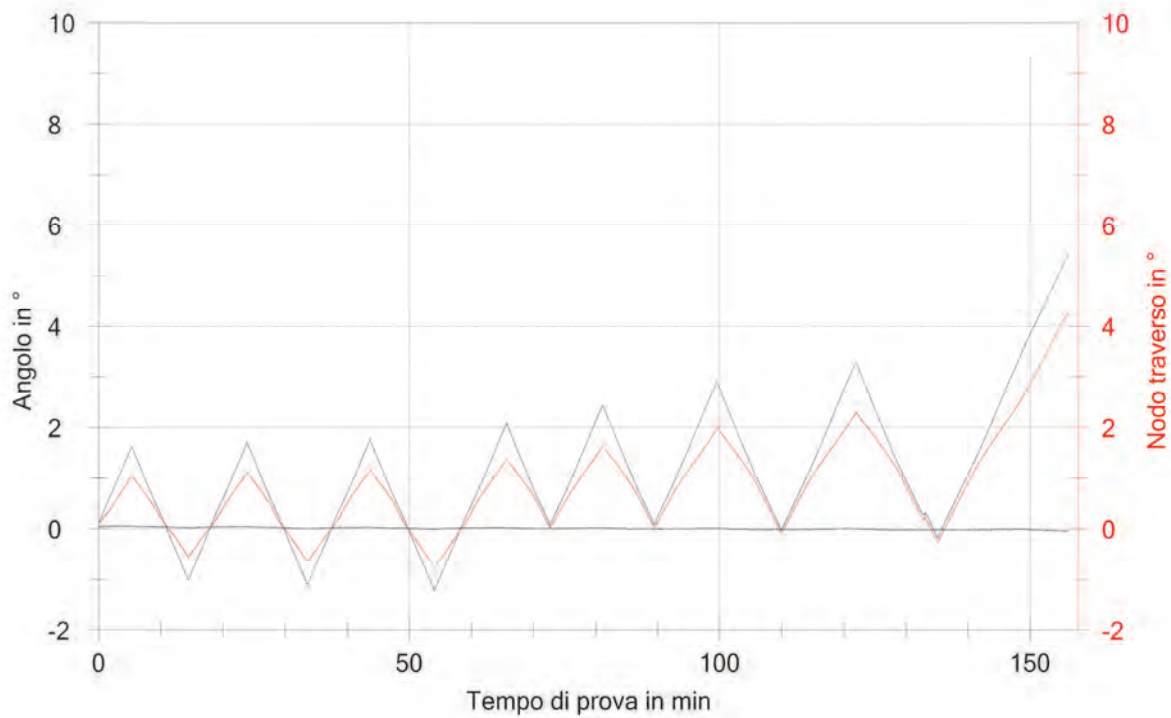


Figura 3-142 Inclinazione nodo traverso, nodo libero e nodo montante nel tempo

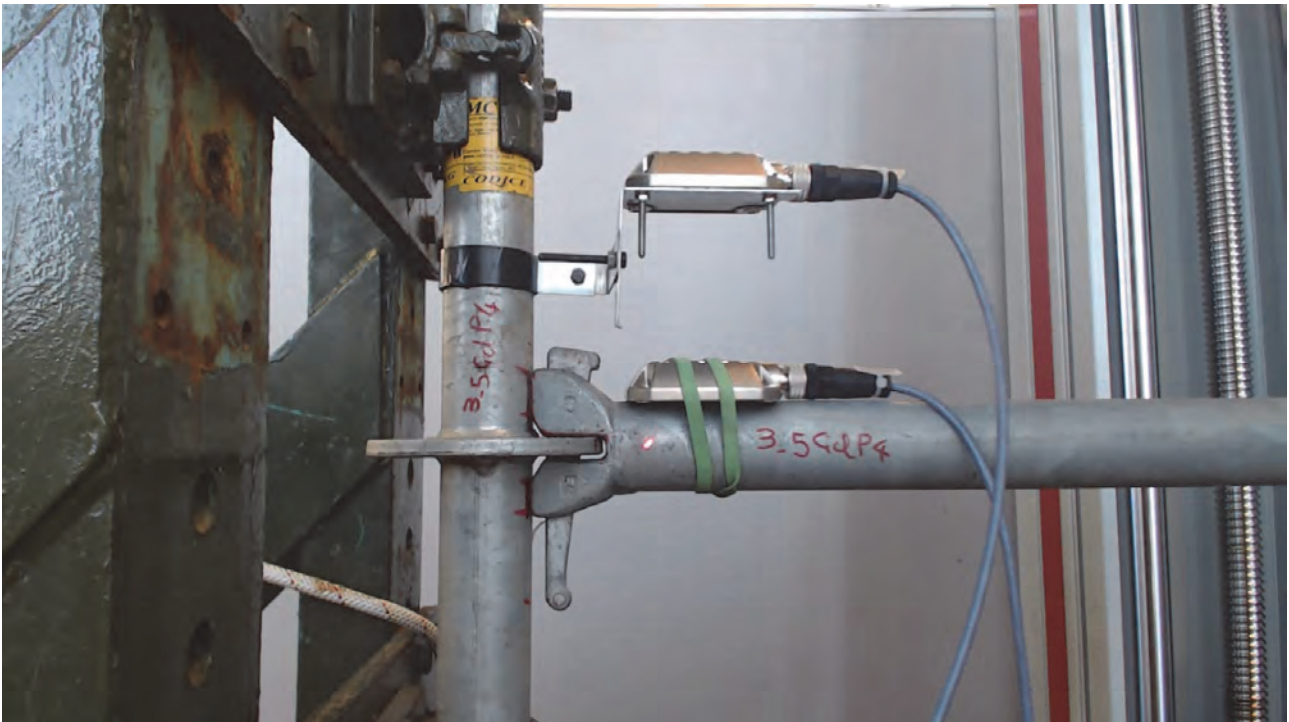


Figura 3-143 Foto inizio prova

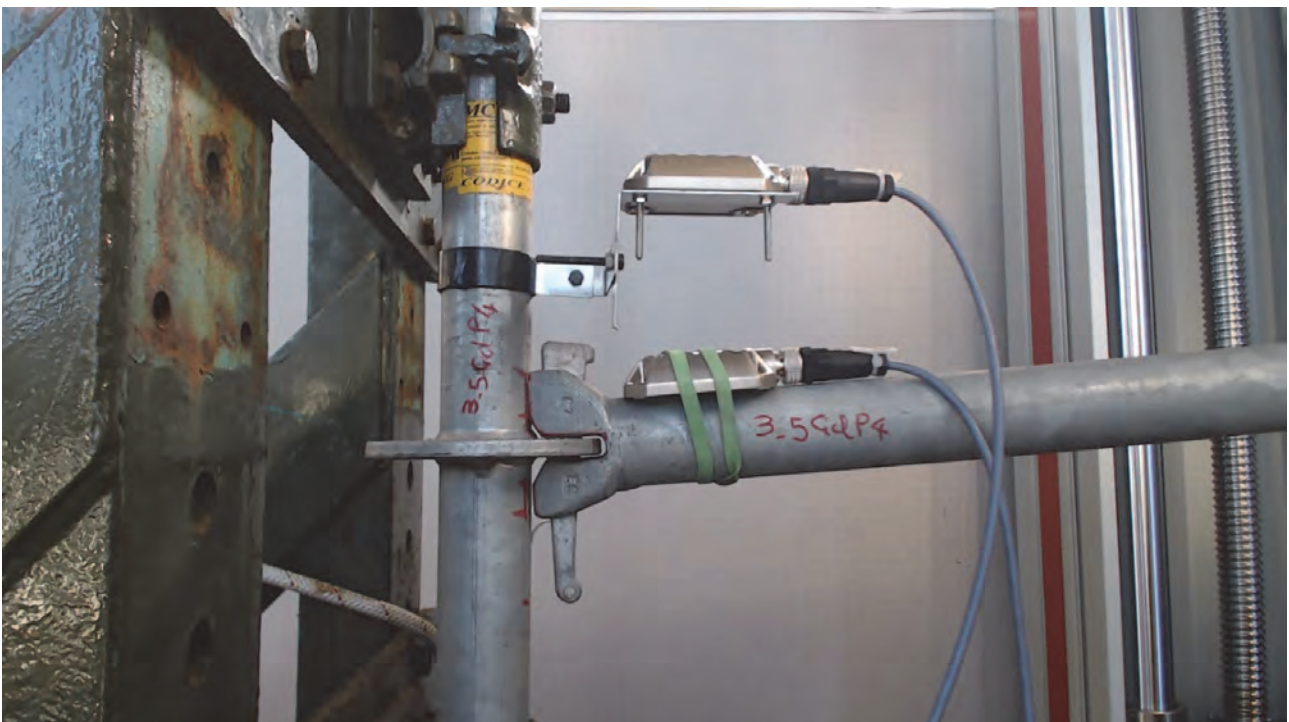


Figura 3-144 Foto fine prova

### 3.3.2.2.3 Prova 3\_5CicIP5

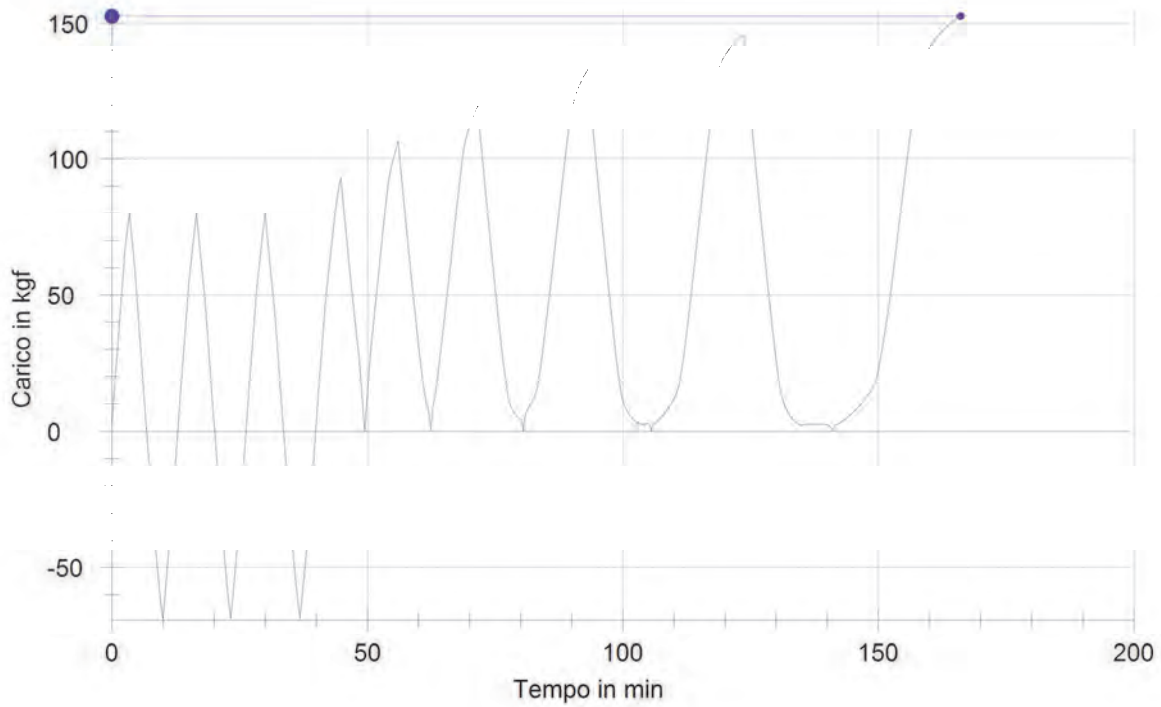


Figura 3-145 Curva carico-tempo

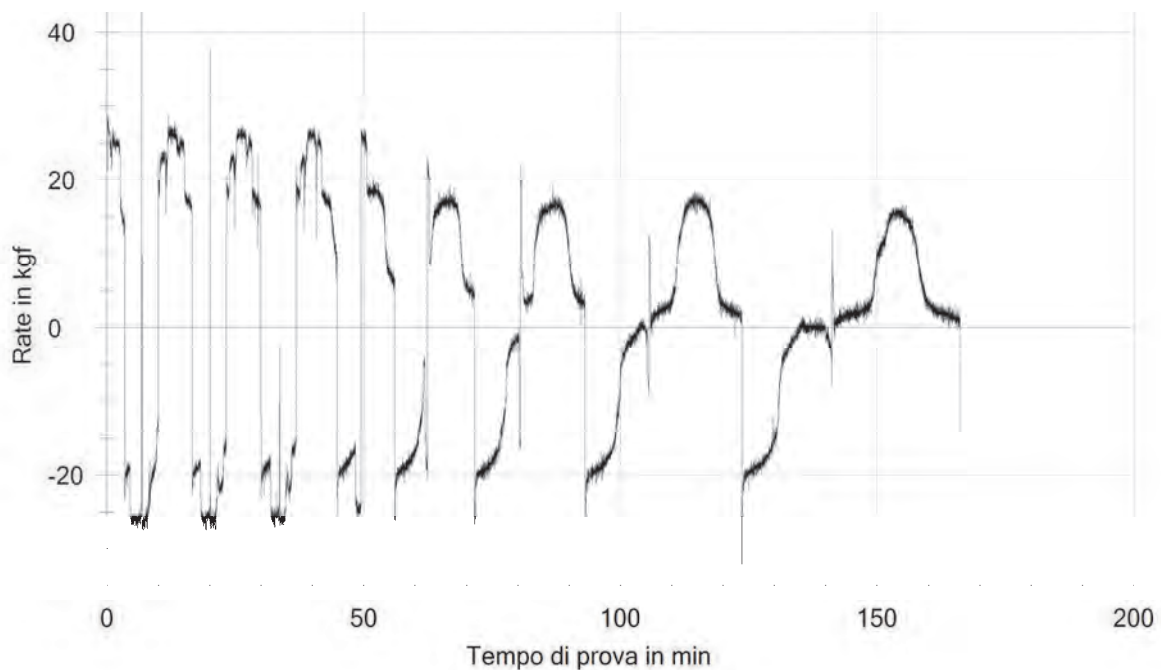


Figura 3-146 Velocità di carico istantanea (kg<sub>f</sub>/min)

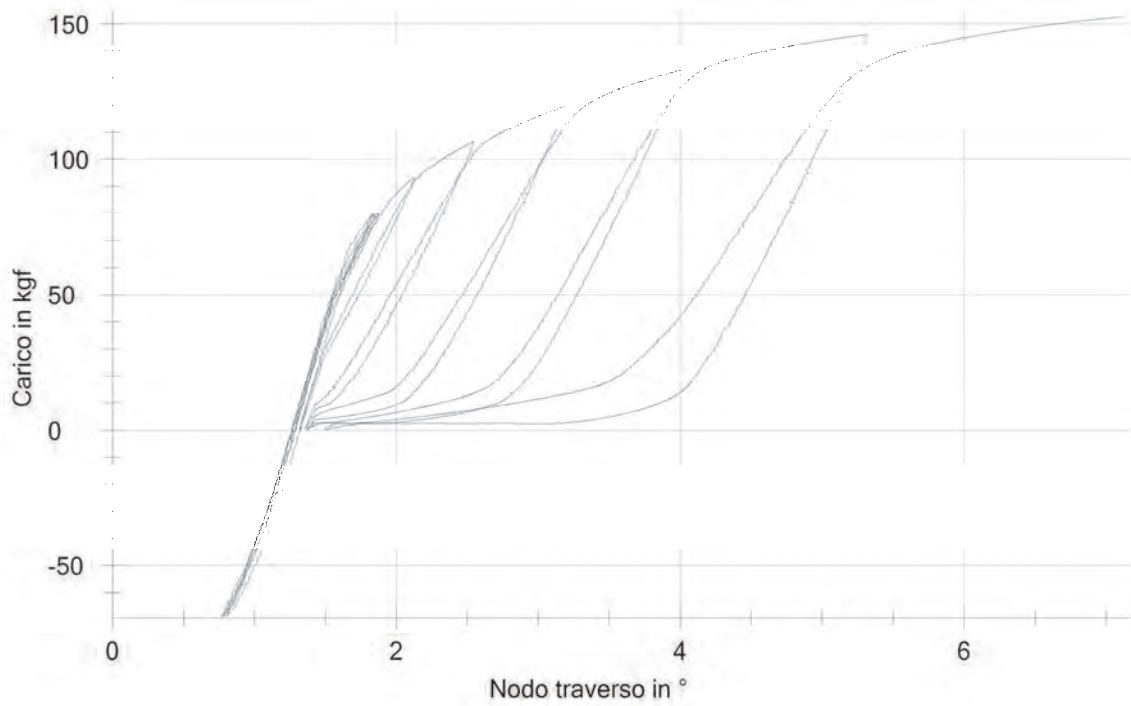


Figura 3-147 Curva carico – inclinazione trasverso al nodo

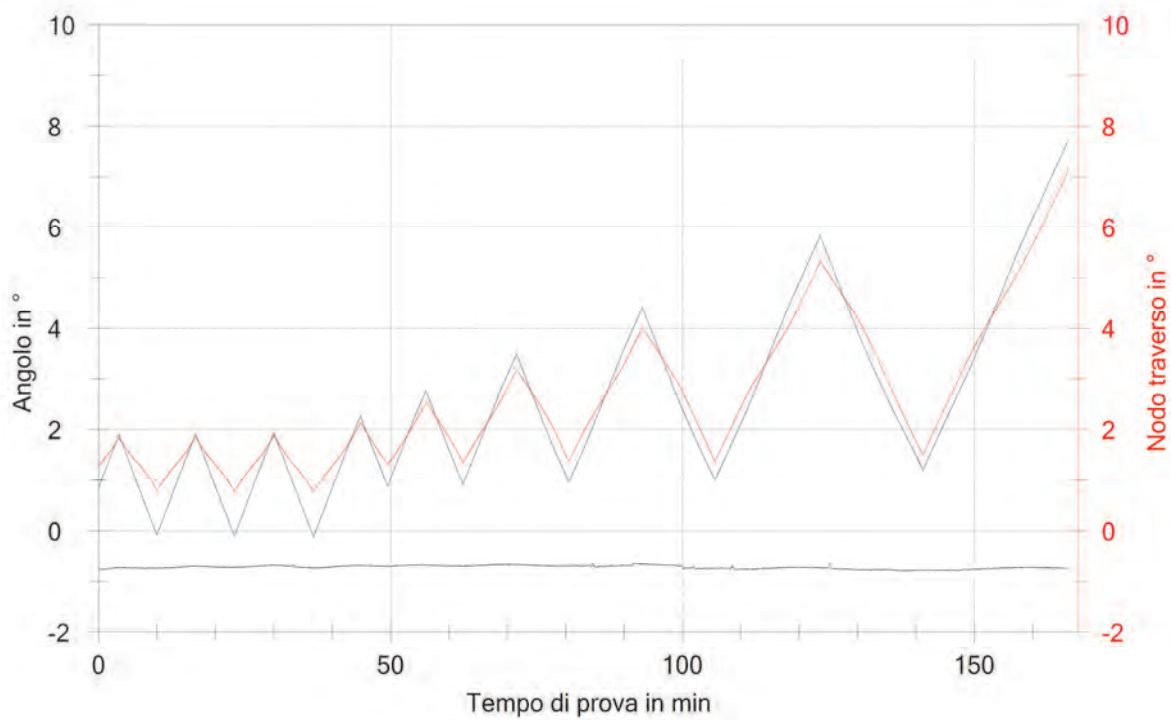


Figura 3-148 Inclinazione nodo trasverso, nodo libero e nodo montante nel tempo

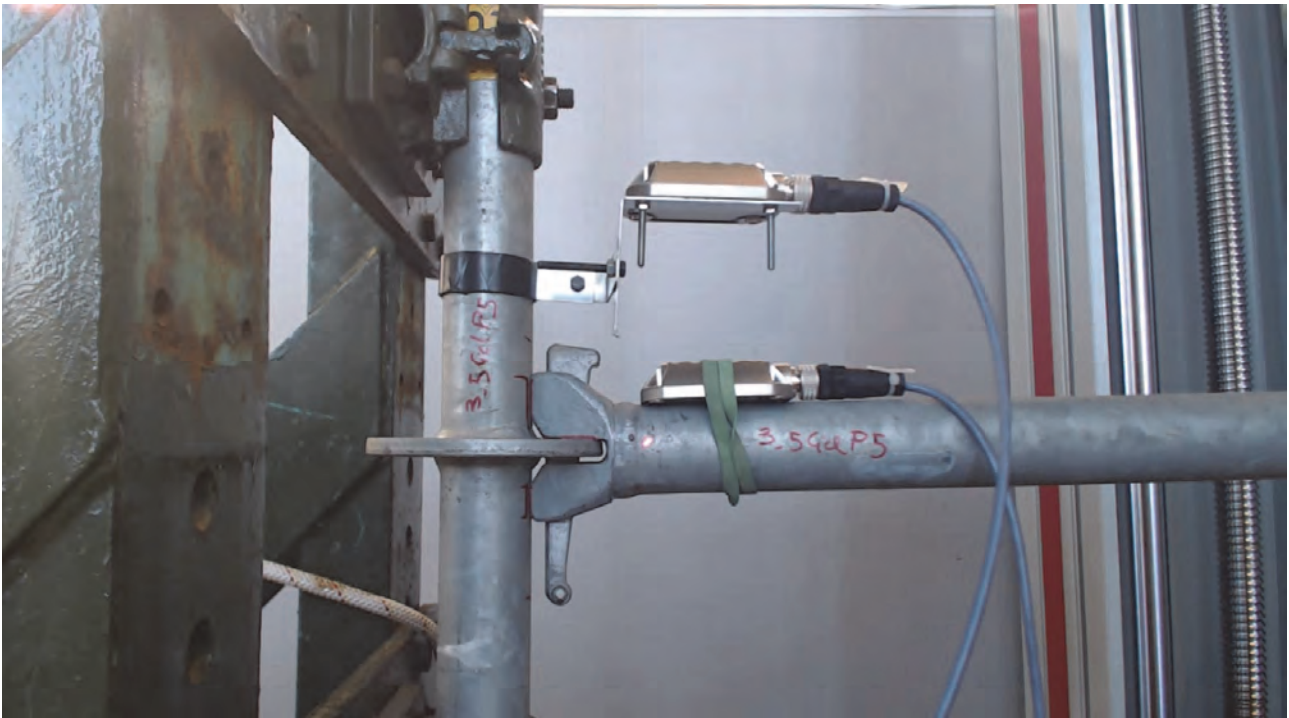


Figura 3-149 Foto inizio prova



Figura 3-150 Foto fine prova

## 3.3.2.2.4 Prova 3\_5CicIP7

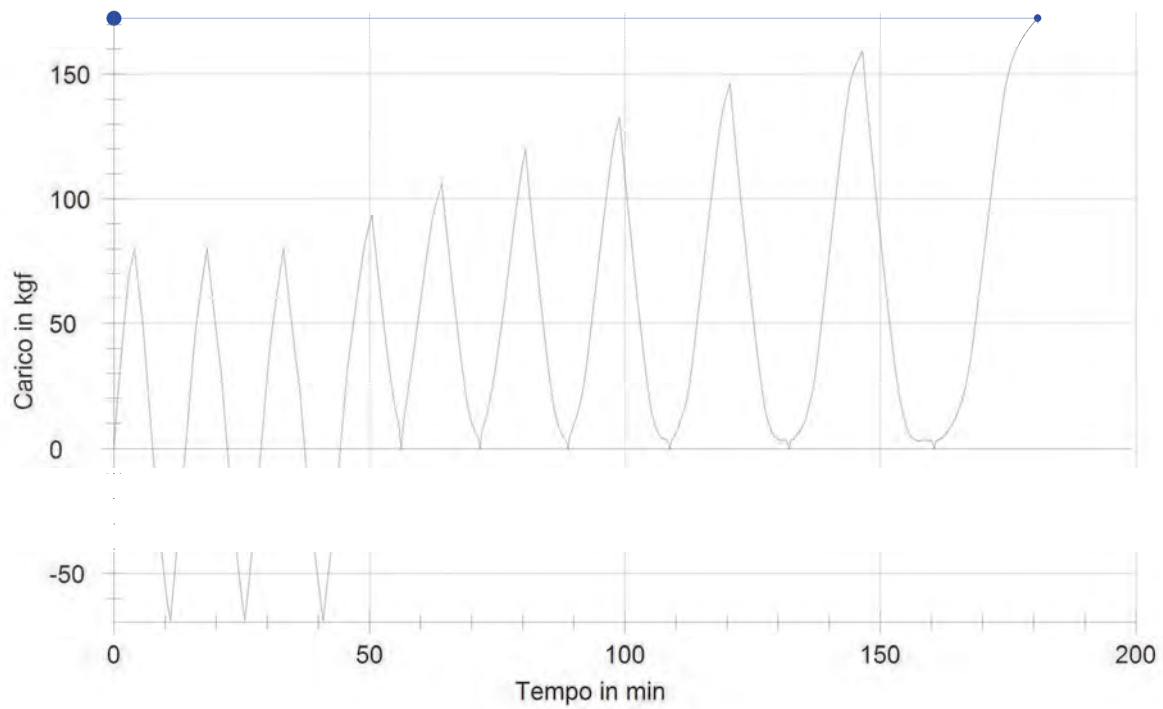
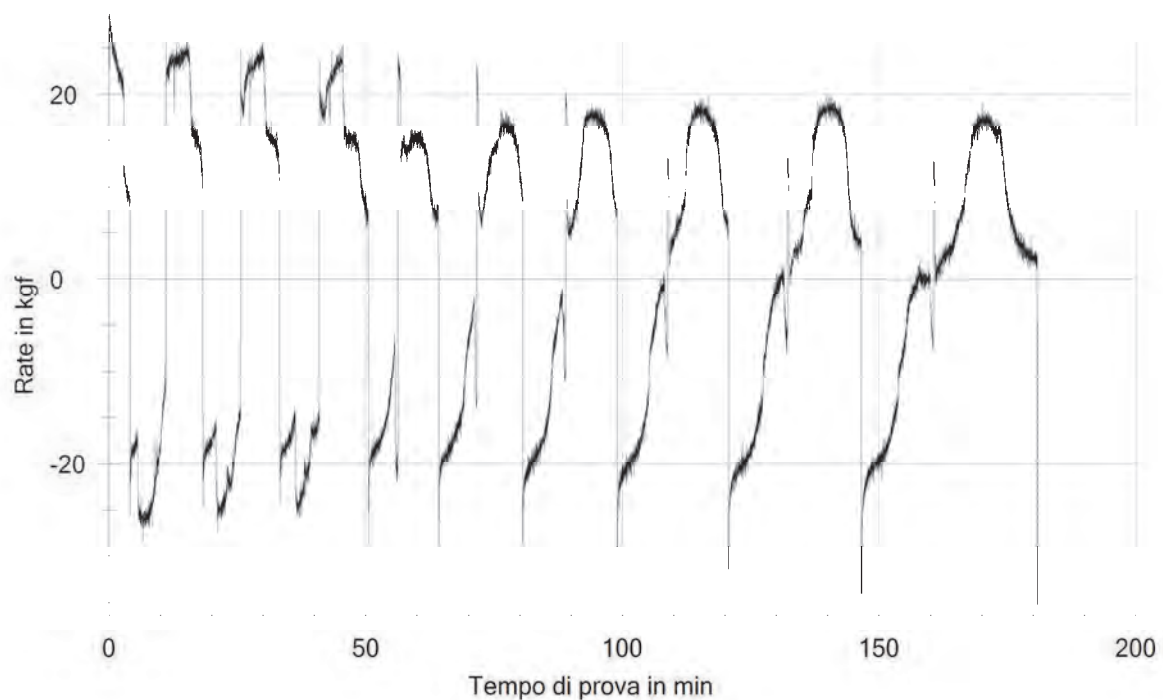


Figura 3-151 Curva carico-tempo

Figura 3-152 Velocità di carico istantanea (kg<sub>f</sub>/min)



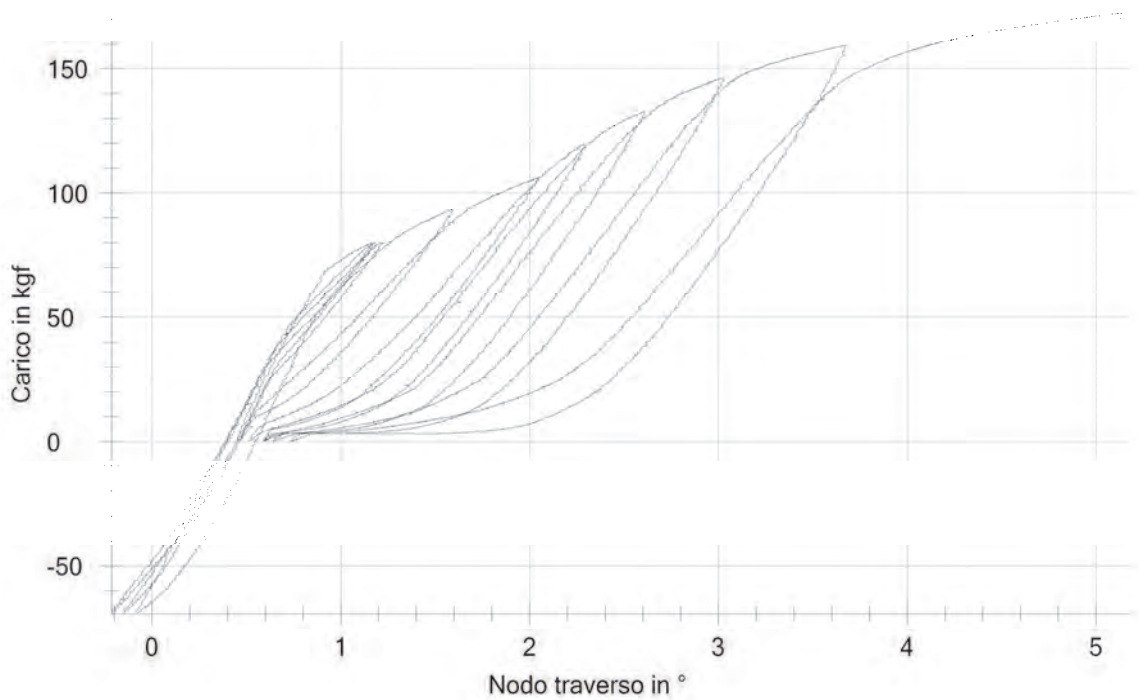


Figura 3-153 Curva carico – inclinazione traverso al nodo

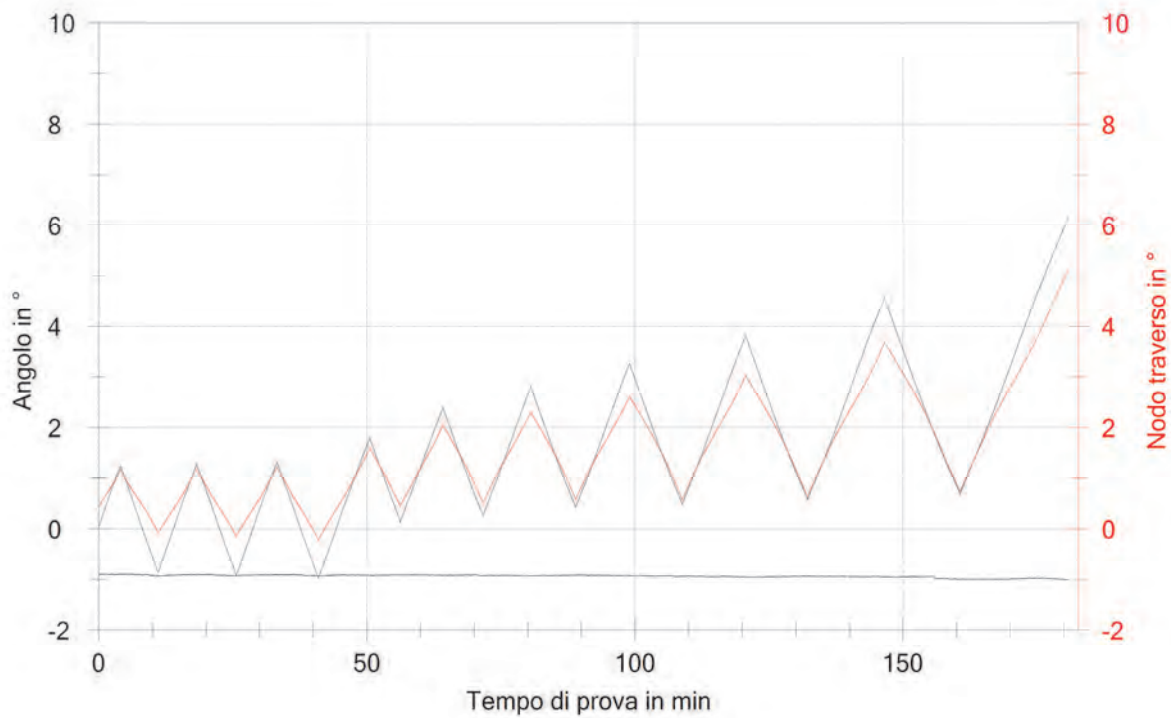


Figura 3-154 Inclinazione nodo traverso, nodo libero e nodo montante nel tempo



Figura 3-155 Foto inizio prova

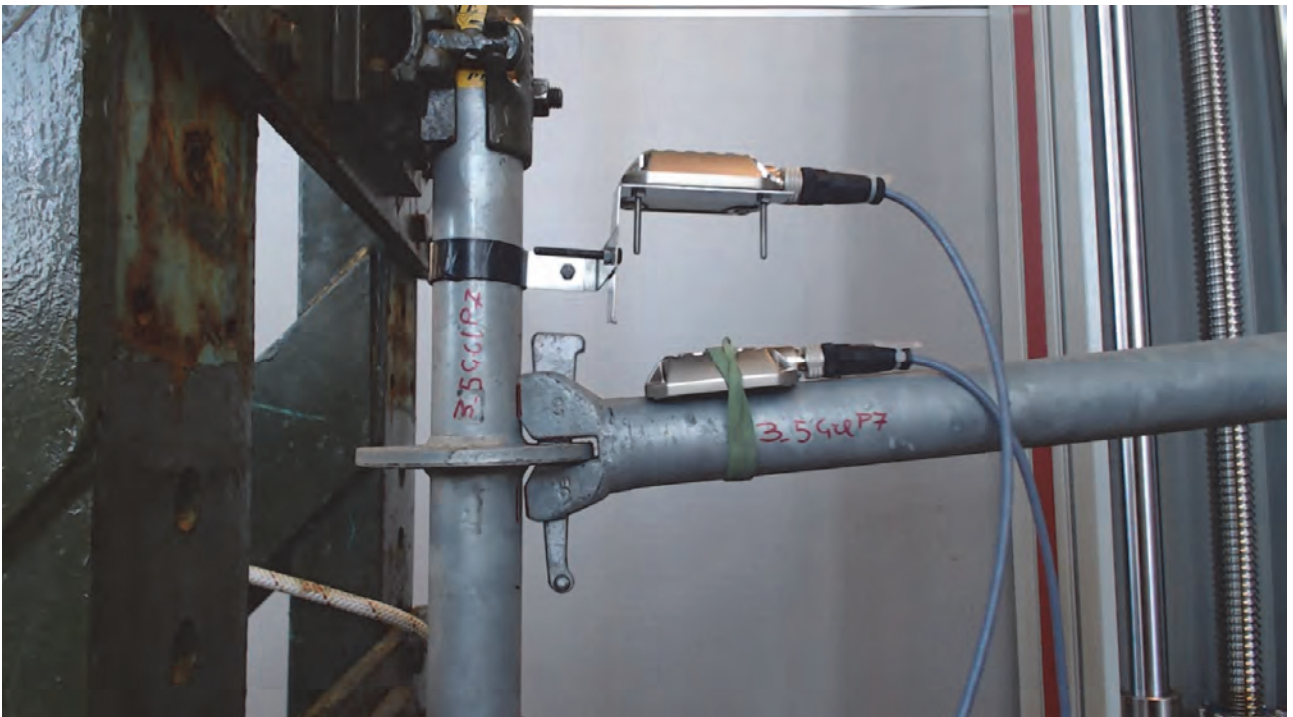


Figura 3-156 Foto fine prova

### 3.3.2.2.5 Prova 3\_5CicIP8

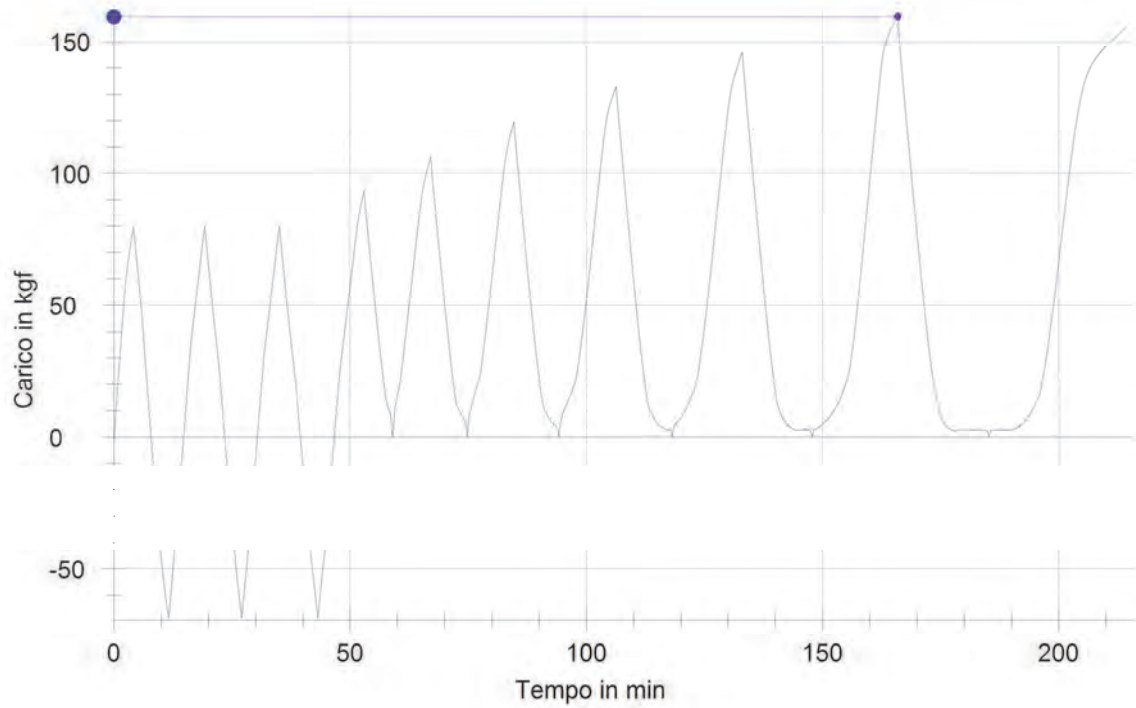


Figura 3-157 Curva carico-tempo

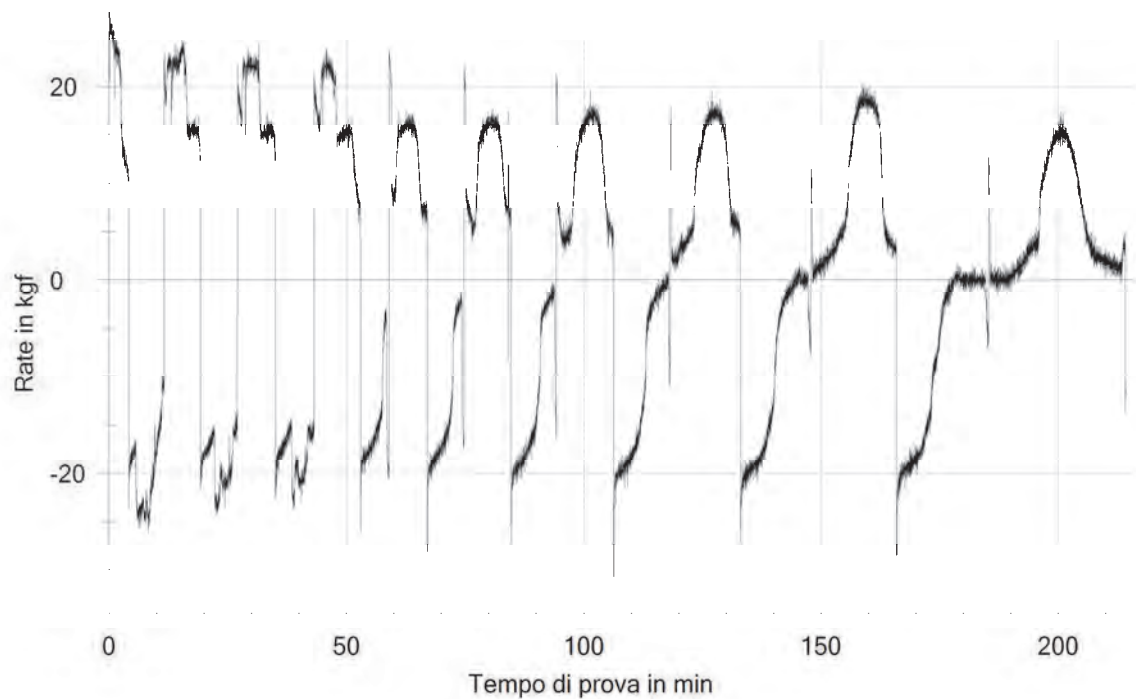


Figura 3-158 Velocità di carico istantanea (kg<sub>f</sub>/min)

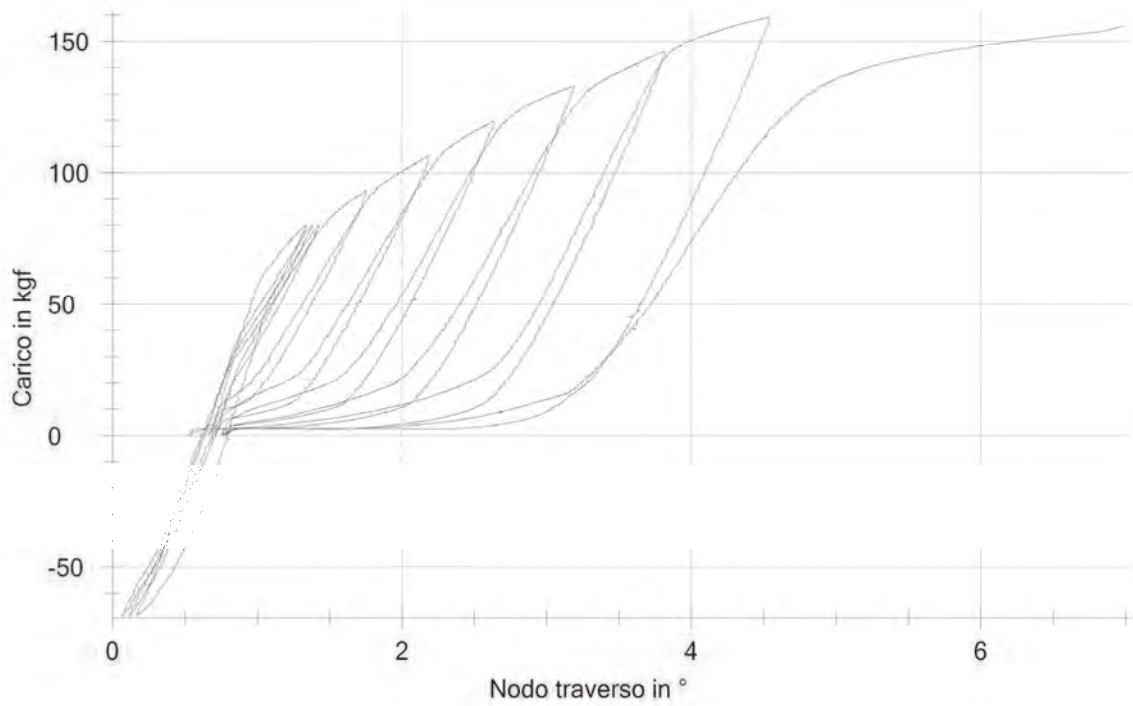


Figura 3-159 Curva carico – inclinazione traverso al nodo

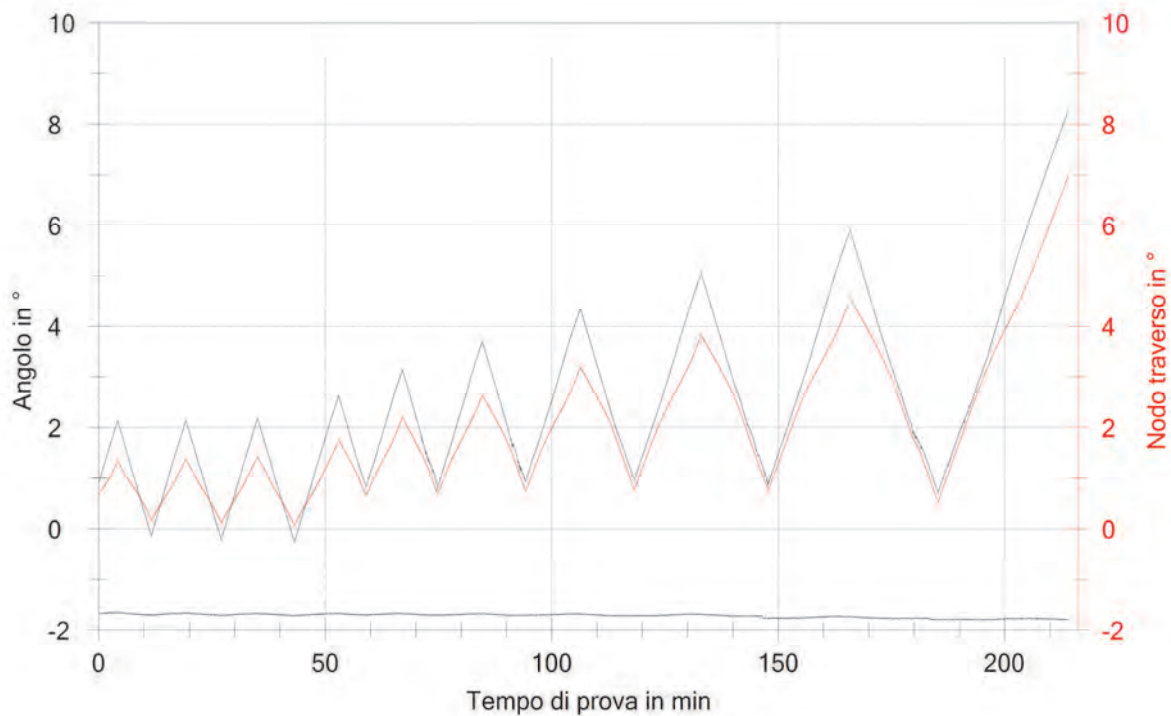


Figura 3-160 Inclinazione nodo traverso, nodo libero e nodo montante nel tempo

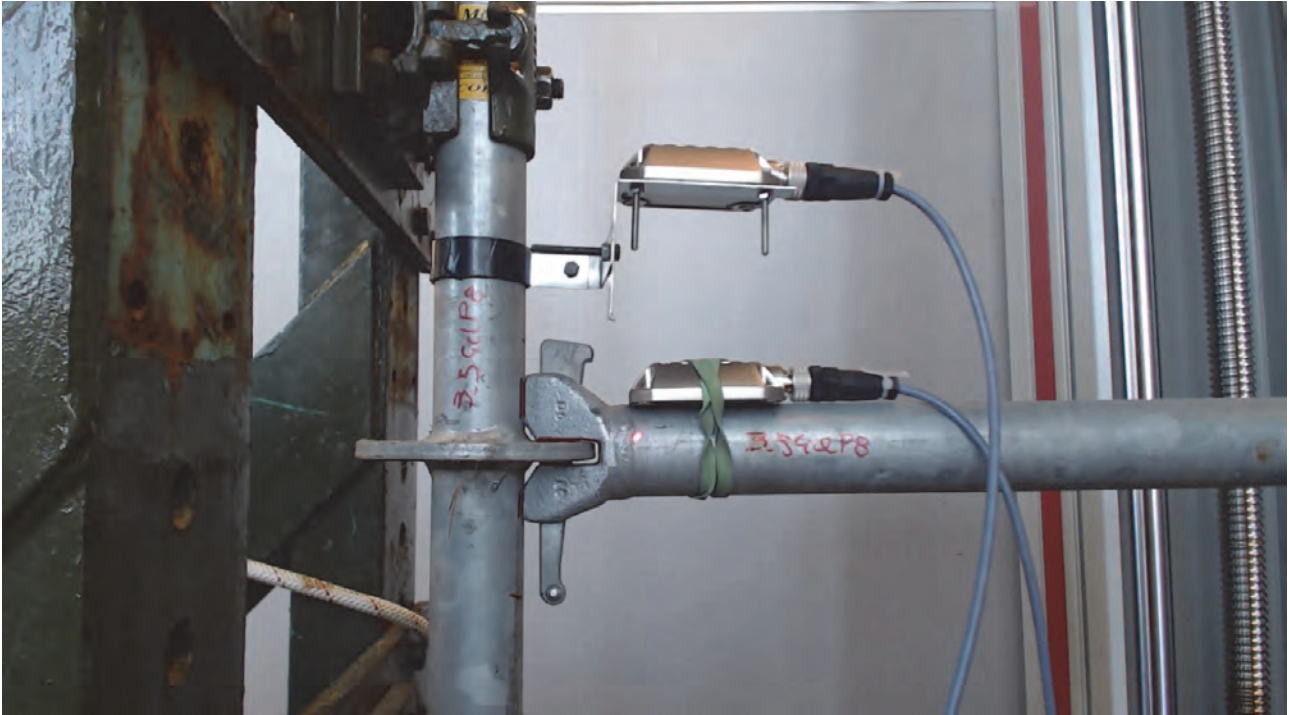


Figura 3-161 Foto inizio prova

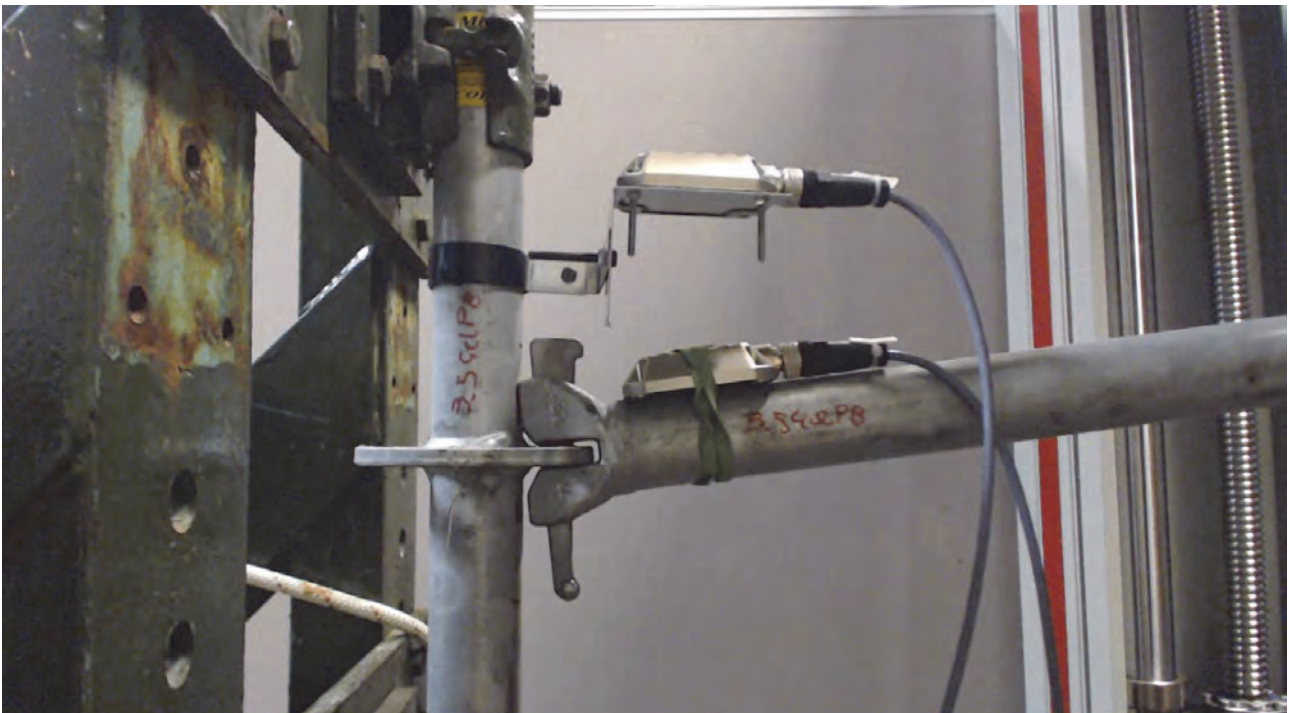


Figura 3-162 Foto fine prova

### 3.3.3 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 3-163).

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 3-164), tale fenomeno è presente anche oltre la fase ciclica, e amplificato per effetto della maggiore entità dello spostamento in direzione positiva (verso l'alto).

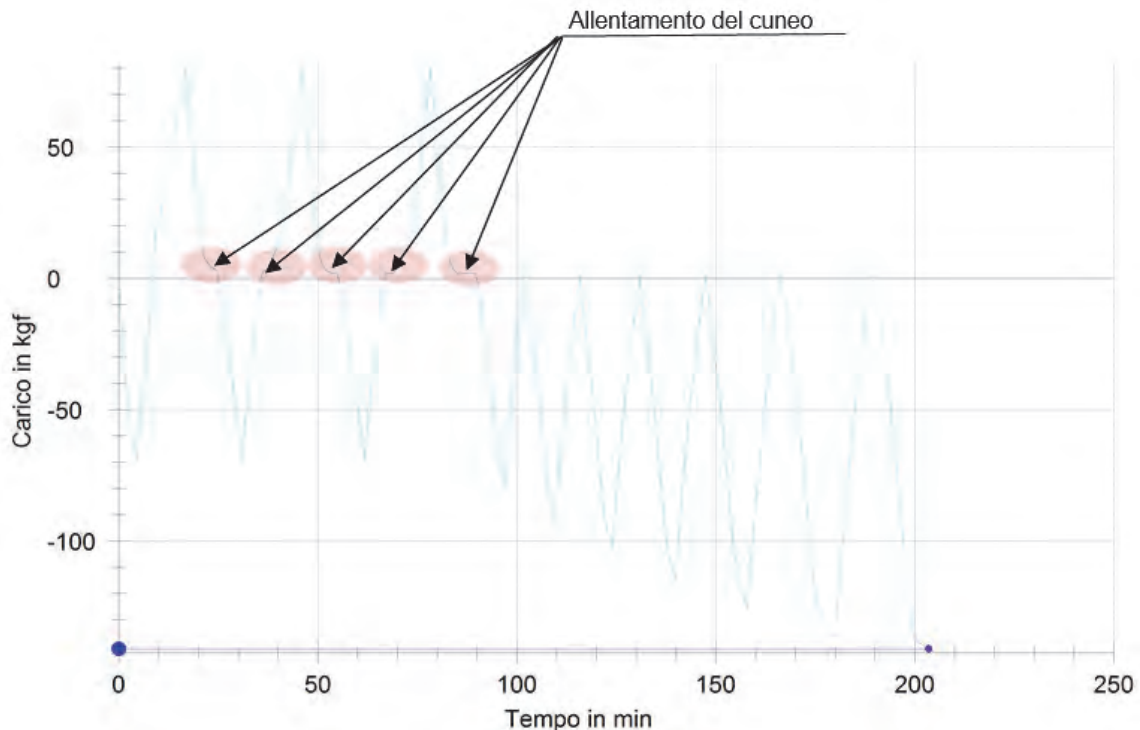


Figura 3-163 Curva carico tempo in una prova di rigidità e resistenza ciclica negativa. Individuazione delle zone in cui la curva si appiattisce. Ciò corrisponde all' allentamento del cuneo

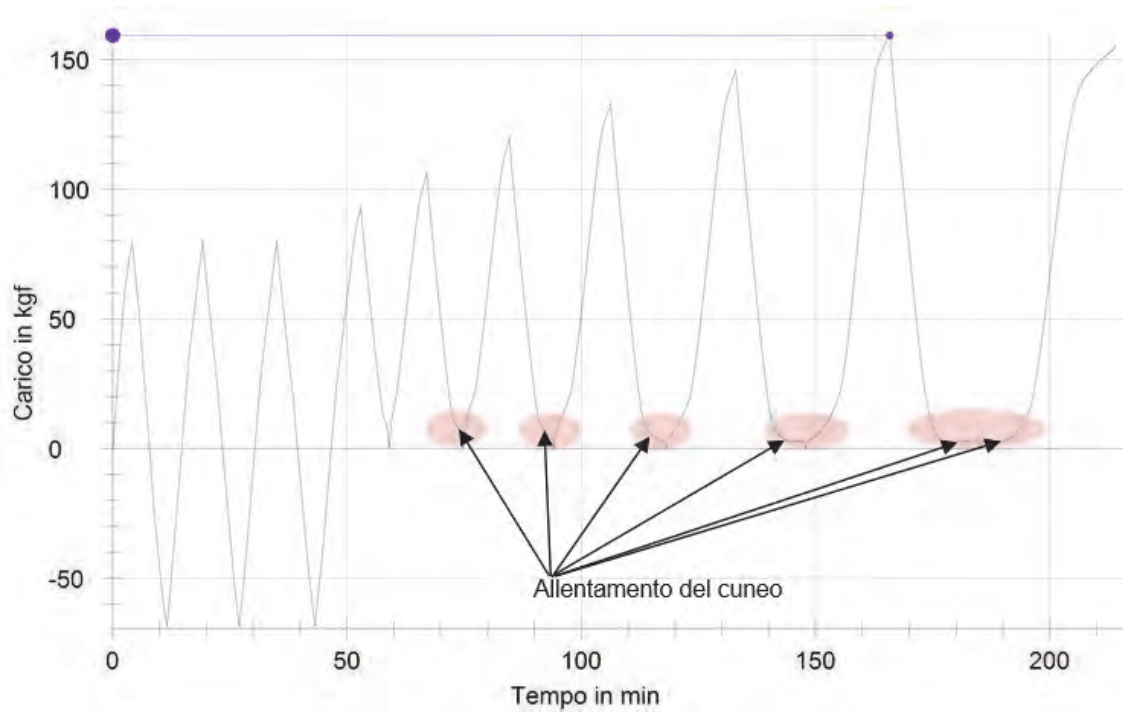


Figura 3-164 Curva carico tempo in una prova di rigidezza e resistenza ciclica positiva. Individuazione delle zone in cui la curva si appiattisce. Ciò corrisponde all' allentamento del cuneo

## 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 ipotizzata 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 che ha avuto lo scopo di acquisire elementi utili per la messa a punto della metodologia proposta.

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*  $\overline{F_{max}}$ .

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 ( $v_c \leq 10\% v_{cmax}$ ) rispetto al massimo valore raggiunto durante la prova (nella prima fase di carico della prova).

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 della ricerca finora condotta 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.



## Bibliografia e riferimenti normativi

[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] 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 – Ed. 2015

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

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