

# Sulla resistenza a fatica oligociclica del calcestruzzo strutturale

G. MANCINI \*

**SOMMARIO:** Si riferisce su prove di fatica oligociclica eseguite su campioni di calcestruzzo strutturale che simulano il fenomeno di battitura dei pali da fondazione. Si propone quindi una relazione per interpretare i risultati sperimentali.

È noto che alcuni elementi strutturali soggetti ad azioni dinamiche sono soggetti nel corso della loro vita a spettri di sollecitazione con punte talora dello stesso ordine di grandezza delle rispettive resistenze caratteristiche; si rende pertanto necessaria una verifica del comportamento dei materiali in termini di resistenza a fatica oligociclica<sup>(1)</sup> e del danneggiamento che le strutture possono subire per effetto di tali punte di tensione.

Un esempio classico di strutture in calcestruzzo sovraccaricate per brevi periodi della loro vita è quello dei pali da fondazione battuti, nei quali durante l'infissione si raggiungono punte di tensione molto prossime alla resistenza del materiale: tali punte persistono solo per qualche millisecondo e si ripetono poche centinaia di volte, appunto durante l'operazione di battitura.

Le sollecitazioni indotte in genere obbediscono:

— a criteri di ottimizzazione del sistema di battitura, in relazione alle caratteristiche elastiche del palo e alla natura del terreno;

— a criteri di sicurezza nei confronti della rottura del palo, soprattutto per le tensioni di trazione o per gli aumenti della stessa tensione di compressione, indotta in fase di battitura, che si verificano per effetto dei fenomeni di riflessione di onde durante la battitura.

A tale proposito va brevemente ricordato che la stessa energia di battitura può essere trasmessa al palo secondo impulsi di forma differente, caratterizzata cioè:

— da un elevato valore della forza trasmessa e da un breve tempo di impatto (onda corta);

— da un più modesto valore della suddetta forza e da un più lungo tempo di impatto (onda lunga).

La forma dell'onda e il valore della forza trasmessa dipendono direttamente dalle caratteristiche del sistema di battitura, ed in particolare:

— dalla mazza del maglio;

— dalla rigidità del cuscino;

— dalla velocità relativa di impatto tra maglio e palo.

A parità di ogni altra caratteristica, si può affermare che una variazione della rigidità del cuscino modifica l'impulso, nel modo seguente:

— aumento della forza indotta e riduzione del tempo di impatto se la rigidità aumenta;

— riduzione della forza e incremento del tempo di impatto se la rigidità diminuisce.

L'impiego invece di un maglio più pesante o più leggero, sempre a parità di ogni altra caratteristica, fa aumentare o diminuire rispettivamente tanto il valore della forza indotta che la durata dell'impatto.

Quando l'onda, generata dal suddetto impatto tra maglio-cuscino-palo, arriva alla punta del palo, subisce una riflessione, generando così un'onda riflessa, la cui intensità e il cui segno dipendono dalle condizioni al contorno. Nel caso ad esempio in cui la punta del palo è impedita di spostarsi, come può succedere per un palo che vada ad intestarsi in un banco roccioso, l'onda incidente di compressione viene riflessa con lo stesso segno e la sua intensità raddoppia.

\* Dott. ing. Giuseppe MANCINI - Istituto di *Scienza delle costruzioni* - Politecnico di Torino.

(1) Come noto, per resistenza a fatica oligociclica si intende la possibilità di resistenza del materiale a sollecitazioni cicliche di ampiezza molto elevata, che quindi portano a rottura in « pochi cicli ».

Nel caso invece in cui la punta del palo è libera, come può succedere per un palo che lavori per attrito laterale e che attraversi uno strato di terreno molle, l'onda incidente viene riflessa come onda di trazione. In entrambi i casi, la tensione risultante in ogni sezione del palo dipende dalla sovrapposizione di tali onde, che è una funzione del rapporto tra la lunghezza dell'onda e quella del palo. Ad esempio, la tensione risultante, in un palo con estremità libera, è tanto più facilmente di trazione quanto più corta è la lunghezza dell'onda rispetto a quella del palo. Si avverte perciò l'esigenza di impiegare di volta in volta delle combinazioni peso del maglio-rigidezza del cuscino-altezza di caduta, tali da realizzare, a parità di energia trasmessa, un rapporto ottimale lunghezza d'onda-lunghezza del palo [HIRSCH, 1966].

Non si può comunque, a parità di energia, ridurre il valore della forza a favore del tempo di durata, e perciò a favore della lunghezza d'onda, senza pensare che ne possa derivare uno svantaggio per l'infissione. Difatti, fino a quando il valore di picco della sollecitazione indotta non supera la resistenza del terreno, si conseguono miglioramenti nell'infissione aumentando il valore di tale sollecitazione molto più che incrementando la durata dell'impulso.

Solo quando la forza trasmessa al palo è preponderante rispetto alla resistenza del terreno, l'infissione migliora se si aumenta il tempo d'impatto [PAROLA, 1970].

In ogni caso va perciò tenuto presente come quando si voglia ottimizzare il sistema di battitura, soprattutto in presenza di pali di elevata capacità portante, sia importante poter sfruttare il materiale del palo facendolo lavorare sotto livelli di tensione elevati, molto prossimi a quelli di rottura.

Da questa particolare condizione di sollecitazione ha preso l'avvio una ricerca sperimentale sulla resistenza a fatica oligociclica di campioni cilindrici di calcestruzzo, sollecitati da carico di compressione variabile con legge sinusoidale. In effetti, come già spiegato, nei pali possono essere anche presenti sollecitazioni di trazione, per il momento però è stata limitata l'indagine a campioni semplicemente compressi; l'influenza sulla durata dell'applicazione di cicli di tensione con passaggio attraverso lo zero costituirà argomento di una prossima indagine sul tema. La ricerca è stata effettuata con l'ausilio di macchina di prova M.T.S. da 10 t posta in ambiente a temperatura (20°C) ed umidità relativa (65%) controllate.

Le variabili di cui si è valutata l'influenza sulla durata del campione sono: la frequenza del ciclo sinusoidale, l'ampiezza dell'oscillazione della tensione e la tensione minima nel ciclo, utilizzando in totale 57 campioni.

Il programma di prova consiste nel tracciamento di tre curve di fatica che a coppie presentano un parametro costante, cioè due a frequenza uguale e tensione minima diversa, due a frequenza diversa e tensione minima uguale; dieci campioni sono stati inoltre utilizzati per determinare, con una certa attendibilità, la resistenza caratteristica del materiale.

Il calcestruzzo impiegato ha la seguente composizione:

*Inerte*

|                           |                        |
|---------------------------|------------------------|
| Sabbia (65%)              | 1137 kg/m <sup>3</sup> |
| Ghiaia (35%)              | 613 kg/m <sup>3</sup>  |
| Cemento (Pozzolatico 425) | 400 kg/m <sup>3</sup>  |
| Acqua totale              | 200 kg/m <sup>3</sup>  |

I campioni sono costituiti da carote di diametro 4,28 cm ed altezza 8,55 cm ricavate a mezzo di sonda rotativa diamantata da provini cubici da 20 cm di lato.

L'esecuzione delle prove è iniziata dopo 40 giorni dal getto.

Le prove di compressione statica, eseguite a velocità di incremento del carico costante e pari a 40 kg/sec, hanno fornito i seguenti risultati

| Prova n. | R' <sub>s</sub> (kg/cm <sup>2</sup> ) |
|----------|---------------------------------------|
| 1        | 493,4                                 |
| 2        | 451,7                                 |
| 3        | 451,7                                 |
| 4        | 427,4                                 |
| 5        | 517,7                                 |
| 6        | 460,4                                 |
| 7        | 486,4                                 |
| 8        | 441,3                                 |
| 9        | 483,0                                 |
| 10       | 451,7                                 |

ne risulta  $R'_{bm} = 466.47 \text{ kg/cm}^2$  e con  $K = 1,96$  e  $\delta = 27,63 \text{ kg/cm}^2$ , la resistenza caratteristica vale

$$R'_{bk} = 412.31 \text{ kg/cm}^2$$

Le prove dinamiche sono state eseguite assegnando una legge di variazione sinusoidale del carico in funzione del tempo.

Assegnando una legge in termini di carico si giungerebbe alla disintegrazione del campione; ai fini pratici interessa tuttavia seguire il progressivo danneggiamento del campione [MINER, 1945; AWARD, HILSDORF, 1974] per fatica oligociclica e definire in conseguenza lo stato limite di utilizzazione.

Occorre quindi fissare un criterio di rottura del calcestruzzo basato sulla variazione di una sua caratteristica meccanica, rilevandola con un controllo step-by-step durante la prova di fatica; dovendo tale controllo non disturbare sensibilmente l'esecuzione della prova è chiaro che conviene ricorrere ad una misura di modulo elastico. Tale misura viene fatta interrompendo periodicamente la prova di fatica, applicando dei carichi statici (sempre con velocità di 40 kg/sec) fino ad un valore massimo corrispondente a 300 kg/cm<sup>2</sup> e rilevando direttamente il diagramma carico-deformazioni (utilizzando i segnali della cella di carico della macchina e di due estensimetri elettrici tipo TOKYO PL20 disposti su generatrici opposte del campione ed alimentati direttamente dalla macchina).

Nella fig. 1 è riportata la legge di variazione del rapporto

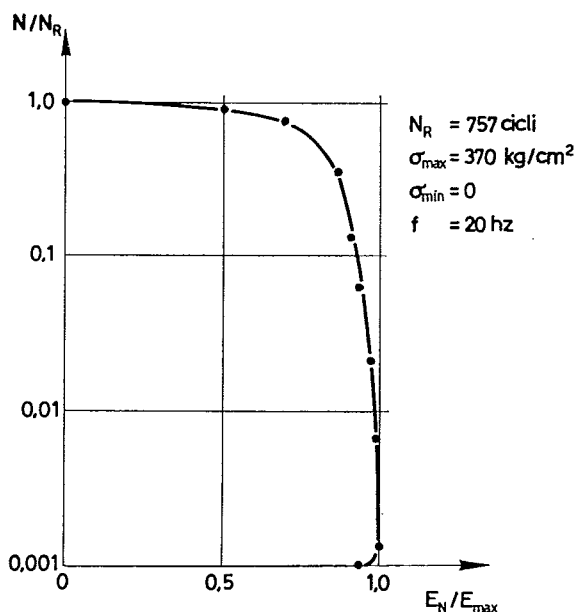


Fig. 1

$E_N$  = modulo elastico secante dopo N cicli  
 $E_{max}$  = modulo elastico secante massimo del campione

in funzione di

$$\frac{N}{N_R} = \frac{\text{Numero di cicli all'atto del rilievo del modulo}}{\text{Numero di cicli a rottura del campione}}$$

Si noti come, dopo una forte variazione nel 1° ciclo, in seguito all'assestamento del campione che è assolutamente vergine all'atto della messa in carico, la variazione di  $E_N/E_{max}$  in funzione di  $N/N_R$  sia piuttosto modesta fino al raggiungimento di un « gomito » al di là del quale il modulo elastico crolla decisamente in pochi cicli.

Data la forma di questo diagramma si deve quindi ritenere raggiunto lo stato limite ultimo del campione all'atto del raggiungimento di tale gomito, che segnala la presenza di uno stato di microfessurazione diffusa.

La ricerca del valore di viraggio del modulo può essere fatta costruendo una regressione polinomiale attorno ai punti sperimentali ed imponendo opportune condizioni alla funzione interpolante.

Dal punto di vista del calcolo si opera utilizzando i primi cinque polinomi di Chebyshev, che, come noto [CARNAHAN *et al.*, 1969] portano alla espressione

$$y = T_0 b_1 + T_1 b_2 + \dots + T_4 b_5$$

$$\begin{aligned} \text{con } T_0 &= 1 & \text{ed } x &= E_N/E_{max} \\ T_1 &= x \\ T_2 &= 2x^2 - 1 & y &= N/N_R \\ T_3 &= 4x^3 - 3x \\ T_4 &= 8x^4 - 8x^2 + 1 \end{aligned}$$

La scelta della utilizzazione di cinque polinomi di Chebyshev ha due ragioni essenziali: da una parte occorre avere dei termini almeno di quarto grado in quanto si deve analizzare la variazione della tangente alla funzione interpolante, dall'altra occorre lasciare un adeguato numero di gradi di libertà al sistema in quanto occorre interpolare col principio dei minimi quadrati.

I coefficienti  $b_1 \div b_5$  vengono appunto ricavati risolvendo il sistema di equazioni normali

$$\begin{aligned} b_1 \sum_{i=1}^N T_0 T_j + b_2 \sum_{i=1}^N T_1 T_j + b_3 \sum_{i=1}^N T_2 T_j + \\ + b_4 \sum_{i=1}^N T_3 T_j + b_5 \sum_{i=1}^N T_4 T_j &= \sum_{i=1}^N y T_j \\ j &= 0, \dots, 4 \end{aligned}$$

Ottenuto il polinomio interpolante la posizione del gomito come già accennato, viene individuata dalla massima variazione della sua tangente, cioè dalla condizione

$$\frac{d^3y}{dx^3} = 0$$

che si traduce nell'altra

$$x = - \frac{b_4}{8b_5}$$

In corrispondenza di tale valore dell'ascissa si ricava il rapporto  $N/N_R$  che individua il raggiungimento dello stato limite ultimo del campione.

Nella tabella 1 sono riportate le durate reali, il coefficiente  $N/N_R$  limite e le corrispondenti durate corrette nelle varie condizioni di prova.

Tali durate corrette saranno quindi utilizzate come dati di partenza per tutte le successive elaborazioni.

Dall'esame della tab. 1 si può notare la presenza di « inversioni » nelle durate dei campioni, cioè la presenza di campioni che a minore tasso di sollecitazione hanno fornito durate minori di quelli maggiormente sollecitati; è questa una conseguenza tipica della dispersione nel comportamento a fatica già riscontrabile sugli acciai ed ancor più accentuata nel caso del calcestruzzo, data la sua eterogeneità che comporta una maggiore dispersione delle proprietà meccaniche.

Ulteriore fattore di dispersione è l'inevitabile piccola eccentricità dei carichi applicati.

Poiché però è noto [AWARD *et al.*, 1974; JACCARD, 1975] che il legame tra le due variabili  $N/N_R$  e  $\sigma_{\max}/R'_{bk}$  è certamente una funzione decrescente, è lecito applicare il metodo di riordinamento dei dati [GATTO, 1955] alle durate corrette prima di procedere alla ricerca di una legge rappresentativa dei risultati di prova; tale metodo, si basa sull'assunzione che tra tutte le  $N!$  possibili disposizioni dei dati, il legame tra le variabili è meglio approssimato da quella ottenuta con valori riordinati monotonicamente.

Nell'ultima colonna di tabella 1 sono appunto riportate le durate corrette e riordinate nell'ambito di ciascuna serie di prove.

Si effettua in un primo momento la ricerca di una legge rappresentativa dei risultati per

ciascun gruppo di prove utilizzando la relazione:

$$N = \frac{C}{\left( \frac{\sigma_{\max}}{R'_{bk}} \right)^a}$$

che porta a delle rette in coordinate bilogaritmiche.

Il coefficiente  $a$  (pendenza della retta) e la costante  $C$  determinati col metodo dei minimi quadrati, valgono nelle tre condizioni di prova

| curva n. | $\sigma_{\min}$<br>kg/cm <sup>2</sup> | frequenza<br>(hz) | C      | a     |
|----------|---------------------------------------|-------------------|--------|-------|
| 1        | 20                                    | 20                | 852,90 | 20,50 |
| 2        | 0                                     | 20                | 160,72 | 23,53 |
| 3        | 0                                     | 5                 | 149,27 | 24,57 |

dall'esame delle costanti  $C$  si possono valutare gli effetti della frequenza e della tensione minima durante la prova:

— a parità di frequenza e di  $\sigma_{\max}$  (curve 1 e 2) le durate aumentano al crescere della tensione minima;

— a parità di tensione minima e massima (curve 2 e 3) le durate aumentano al crescere della frequenza; questo effetto d'altra parte era già stato messo in luce [AWARD *et al.*, 1974] e deriva dall'influenza del fluage sul danneggiamento totale.

In altri termini, la permanenza a livelli di sollecitazione molto alti, che sarebbe sufficiente, se protratta, a portare a rottura il campione per solo effetto di fluage, incide sul danneggiamento cumulativo con un termine additivo che è funzione del tempo di permanenza a tali livelli e quindi della frequenza di prova: frequenza più alte implicano, a parità di ciclo, una minore permanenza agli alti livelli in ciascun ciclo, quindi, abbattendo uno dei termini del danno cumulativo, aumentano la vita del campione.

L'analisi degli esponenti «  $a$  » indica che ci sono variazioni di pendenza piuttosto contenute tra le tre rette trovate e quindi conviene, sempre nel piano log-log, una rielaborazione globale dei risultati in termini di regressione lineare multipla.

TABELLA 1

| Prova | Frequenza<br>(Hz) | $\sigma_{\min}$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | $\sigma_{\max}$<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | Durata<br>reale<br>(cicli) | Coefficiente<br>correttivo | Durata<br>corretta<br>(cicli) | $\sigma_{\max}$  | Dur. corretta<br>riordinata<br>(cicli) |
|-------|-------------------|--|--|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|------------------|--|
|       |                   |  |  |                            |                            |                               | R' <sub>bk</sub> |  |
| 1     | 20                | 20                                       | 450                                      | 849                        | 0,98                       | 832                           | 1,091            | 100                                    |
| 2     | 20                | 20                                       | 450                                      | 272                        | 0,97                       | 264                           | 1,091            | 199                                    |
| 3     | 20                | 20                                       | 450                                      | 294                        | 0,96                       | 282                           | 1,091            | 225                                    |
| 4     | 20                | 20                                       | 430                                      | 1148                       | 0,96                       | 1102                          | 1,043            | 264                                    |
| 5     | 20                | 20                                       | 430                                      | 3805                       | 0,95                       | 3615                          | 1,043            | 282                                    |
| 6     | 20                | 20                                       | 430                                      | 342                        | 0,85                       | 291                           | 1,043            | 291                                    |
| 7     | 20                | 20                                       | 430                                      | 201                        | 0,99                       | 199                           | 1,043            | 412                                    |
| 8     | 20                | 20                                       | 410                                      | 104                        | 0,96                       | 100                           | 0,994            | 832                                    |
| 9     | 20                | 20                                       | 410                                      | 2339                       | 0,88                       | 2058                          | 0,994            | 1102                                   |
| 10    | 20                | 20                                       | 410                                      | 2638                       | 0,97                       | 2559                          | 0,994            | 1295                                   |
| 11    | 20                | 20                                       | 390                                      | 434                        | 0,95                       | 412                           | 0,946            | 2058                                   |
| 12    | 20                | 20                                       | 390                                      | 1321                       | 0,98                       | 1295                          | 0,946            | 2559                                   |
| 13    | 20                | 20                                       | 390                                      | 9110                       | 0,92                       | 8381                          | 0,946            | 2607                                   |
| 14    | 20                | 20                                       | 370                                      | 317                        | 0,71                       | 225                           | 0,897            | 3615                                   |
| 15    | 20                | 20                                       | 370                                      | 28300                      | 0,96                       | 27168                         | 0,897            | 6095                                   |
| 16    | 20                | 20                                       | 370                                      | 6349                       | 0,96                       | 6095                          | 0,897            | 8381                                   |
| 17    | 20                | 20                                       | 370                                      | 2744                       | 0,95                       | 2607                          | 0,897            | 27168                                  |
| 18    | 20                | 0  | 450                                      | 13                         | 0,77                       | 10                            | 1,091            | 10                                     |
| 19    | 20                | 0  | 450                                      | 248                        | 0,86                       | 213                           | 1,091            | 10                                     |
| 20    | 20                | 0  | 450                                      | 100                        | 0,95                       | 95                            | 1,091            | 18                                     |
| 21    | 20                | 0  | 430                                      | 12                         | 0,83                       | 10                            | 1,043            | 70                                     |
| 22    | 20                | 0  | 430                                      | 382                        | 0,71                       | 271                           | 1,043            | 95                                     |
| 23    | 20                | 0  | 430                                      | 99                         | 0,70                       | 70                            | 1,043            | 122                                    |
| 24    | 20                | 0  | 410                                      | 727                        | 0,96                       | 698                           | 0,994            | 213                                    |
| 25    | 20                | 0  | 410                                      | 19                         | 0,97                       | 18                            | 0,994            | 271                                    |
| 26    | 20                | 0  | 410                                      | 541                        | 0,96                       | 519                           | 0,994            | 281                                    |
| 27    | 20                | 0  | 390                                      | 800                        | 0,99                       | 792                           | 0,946            | 519                                    |
| 28    | 20                | 0  | 390                                      | 2587                       | 0,98                       | 2535                          | 0,946            | 619                                    |
| 29    | 20                | 0  | 390                                      | 144                        | 0,85                       | 122                           | 0,946            | 749                                    |
| 30    | 20                | 0  | 370                                      | 1750                       | 0,99                       | 1732                          | 0,897            | 792                                    |
| 31    | 20                | 0  | 370                                      | 287                        | 0,98                       | 281                           | 0,897            | 1732                                   |
| 32    | 20                | 0  | 370                                      | 757                        | 0,99                       | 749                           | 0,897            | 2535                                   |
| 33    | 5                 | 0  | 450                                      | 32                         | 0,71                       | 23                            | 1,091            | 9                                      |
| 34    | 5                 | 0  | 450                                      | 55                         | 0,70                       | 39                            | 1,091            | 23                                     |
| 35    | 5                 | 0  | 450                                      | 43                         | 0,94                       | 40                            | 1,091            | 39                                     |
| 36    | 5                 | 0  | 430                                      | 75                         | 0,86                       | 65                            | 1,043            | 40                                     |
| 37    | 5                 | 0  | 430                                      | 69                         | 0,98                       | 68                            | 1,043            | 55                                     |
| 38    | 5                 | 0  | 430                                      | 128                        | 0,99                       | 127                           | 1,043            | 65                                     |
| 39    | 5                 | 0  | 410                                      | 57                         | 0,96                       | 55                            | 0,994            | 68                                     |
| 40    | 5                 | 0  | 410                                      | 1432                       | 0,95                       | 1360                          | 0,994            | 127                                    |
| 41    | 5                 | 0  | 410                                      | 13                         | 0,72                       | 9                             | 0,994            | 182                                    |
| 42    | 5                 | 0  | 390                                      | 186                        | 0,98                       | 182                           | 0,946            | 446                                    |
| 43    | 5                 | 0  | 390                                      | 2450                       | 0,70                       | 1715                          | 0,946            | 859                                    |
| 44    | 5                 | 0  | 390                                      | 3628                       | 0,78                       | 2830                          | 0,946            | 1360                                   |
| 45    | 5                 | 0  | 370                                      | 877                        | 0,98                       | 859                           | 0,897            | 1715                                   |
| 46    | 5                 | 0  | 370                                      | 460                        | 0,97                       | 446                           | 0,897            | 1825                                   |
| 47    | 5                 | 0  | 370                                      | 2433                       | 0,75                       | 1825                          | 0,897            | 2830                                   |

Si propone la relazione

$$N = \frac{f^c \left( \frac{\sigma_{\max}}{R'_{bk}} \right)^a}{\left( \frac{\Delta \sigma}{R'_{bk}} \right)^b} \cdot K \quad (1)$$

che porta, agli effetti della variabile « frequenza », a rappresentare i risultati di prova con rette parallele nel piano bilogaritmico (fig. 2).

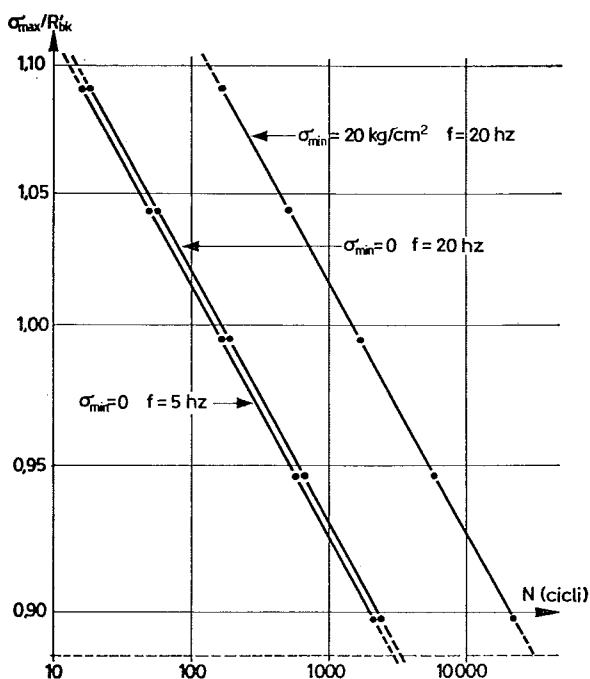


Fig. 2

I coefficienti a, b, c, K, ricavati col metodo dei minimi quadrati, valgono

$$\begin{aligned} a &= 15,70 \\ b &= 40,70 \\ c &= 0,0437 \\ K &= 138,70 \end{aligned}$$

I coefficienti di correlazione parziale  $S_{j,y}$  e multipla R e l'errore standard della stima valgono

$$f \left( y, \frac{\sigma_{\max}}{R'_{bk}} \right) = -0,790$$

$$f \left( y, \frac{\Delta \sigma}{R'_{bk}} \right) = -0,890$$

$$f(y, f) = 0,241$$

$$R \left( y, \frac{\sigma_{\max}}{R'_{bk}}, \frac{\Delta \sigma}{R'_{bk}} \right) = 0,962$$

$$S \left( y, \frac{\sigma_{\max}}{R'_{bk}}, \frac{\Delta \sigma}{R'_{bk}}, f \right) = 1,04$$

inoltre l'analisi della varianza fornisce un valore del numero di Fisher

$$F = 62,449$$

Con i tre gradi di libertà forniti dai 3 coefficienti di regressione ed i 43 gradi di libertà negli scarti della funzione di regressione, dalle tabelle del numero di Fisher [SNEDECOR, 1946; MILLS, 1955] si ha che l'1% dei valori di F è  $4,27 \ll 62,449$ .

Si conclude che il coefficiente di correlazione multipla è chiaramente significativo della rispondenza della legge proposta.

In definitiva, ritenendo come limite pratico di convenienza economica una battitura che non superi i 1500 colpi, con tensioni minime nel ciclo corrispondente a ciascun impulso molto prossime allo zero e che l'onda di tensione susseguente all'impulso sia applicata con frequenza di 20 hz, la (1) porta ad un rapporto  $\sigma_{\max}/R'_{bk}$

$$\left( \frac{\sigma_{\max}}{R'_{bk}} \right) = \left( \frac{20^{0,0437} \cdot 138,7}{1500} \right)^{0,04} = 0,914$$

superiore al 90% della resistenza caratteristica.

Misure effettuate su pali strumentati in calcestruzzo hanno messo in luce che l'onda di tensione si propaga con frequenze variabili da 25 a 35 hz, quindi dello stesso ordine di grandezza di quelle raggiungibili durante la prova. Per pali in acciaio questi valori di frequenza sono da due a tre volte superiori.

Elenco e significato dei simboli:

$R'_b$  = Tensione di rottura del calcestruzzo ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$R'_{bm}$  = Tensione media di rottura del calcestruzzo ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$\delta$  = Scarto quadratico medio

$R'_{bk}$  = Resistenza caratteristica del calcestruzzo ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$E_N$  = Modulo elastico secante dopo N cicli ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

$E_{\max}$  = Modulo elastico secante massimo del campione ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

N = Numero di cicli

|                 |   |   |
|-----------------|---|---|
| $N_R$           | = | Numero di cicli a rottura                           |
| $T_0 \dots T_4$ | = | Polinomi di Chebyshev                               |
| $b_1 \dots b_5$ | = | Coefficienti dei polinomi di Chebyshev              |
| $\sigma_{min}$  | = | Tensione minima nel ciclo (kg/cm <sup>2</sup> )     |
| $\sigma_{max}$  | = | Tensione massima nel ciclo (kg/cm <sup>2</sup> )    |
| $\Delta \sigma$ | = | $\sigma_{max} - \sigma_{min}$ (kg/cm <sup>2</sup> ) |
| $f$             | = | frequenza del ciclo sinusoidale (hz)                |
| $f_{y, j}$      | = | coefficiente di correlazione parziale               |
| $R$             | = | coefficiente di correlazione multipla               |
| $S$             | = | errore standard della stima                         |
| $F$             | = | numero di Fisher                                    |

#### BIBLIOGRAFIA

- AWARD M. E., HILSDORF H. K. (1974) - *Strength and deformation characteristics of plain concrete subjected to high repeated and sustained loads*. Abeles symposium ACI Publ. SP 41.
- CARNAHAN B., LUTHER H. A., WILKES J. O. (1969) - *Applied numerical methods*. Wiley and Sons.
- GATTO F. (1955) - *New statistical methods applied to the*

*analysis of fatigue data*. Colloquium on Fatigue. Stockholm, maggio.

- HIRSCH T. J. (1966) - *Fundamental design and driving considerations for concrete piles*. Highway Research Board n. 147.
- JACCARD R. (1975) - *Fatigue response of structures subjected to repeated loads*. Colloque inter-associations AIPC-FIP-CEB-RILEM-IASS 4-6 giugno 1975 - Tomo I.
- JAMIOLKOWSKI M., LALLI D., MARCHETTI S. (1970) - *L'analisi della battitura dei pali a mezzo dell'equazione dell'onda d'urto*. Associazione Geotecnica Italiana - X Congresso.
- LANCELLOTTA R. - *Studio dei fenomeni che avvengono nei pali durante la battitura per mezzo dell'equazione dell'onda d'urto*. VI Ciclo di Conferenze dedicato ai problemi di Meccanica dei terreni e Ingegneria delle Fondazioni - Politecnico di Torino.
- MILLS F. C. (1955) - *Statistical methods*. Henry Hot and Company - New York.
- MINER M. A. (1945) - *Cumulative damage in fatigue* - *Transactions*. Am. Soc. Mech. Engrs. Vol. 67.
- PAROLA J. F. (1970) - *Mechanics of impact pile driving*. University of Illinois - Ph. D.
- SNEDECOR G. W. (1946) - *Statistical Methods*. Iowa State College Press.

#### SUMMARY

Here an illustration about low-cycle fatigue tests executed on structural concrete samples to simulate the pile driving. We propose then an analytical formula to analyze experimental data.