

CORRELAZIONI TRA LA VELOCITA' DEGLI IMPULSI ULTRASONICI E LA
RESISTENZA A COMPRESSIONE DEL CALCESTRUZZO PRECONFEZIONATO
IMPIEGATO PER STRUTTURE IN CEMENTO ARMATO PRECOMPRESSO

Giacomo FERRARI
C.N.R. - Roma

Giovanni CONTINI
Libero professionista - Milano

CORRELAZIONI TRA LA VELOCITA' DEGLI IMPULSI ULTRASONICI E LA
RESISTENZA A COMPRESSIONE DEL CALCESTRUZZO PRECONFEZIONATO
IMPIEGATO PER STRUTTURE IN CEMENTO ARMATO PRECOMPRESSO

Giacomo FERRARI
C.N.R. - Roma

Giovanni CONTINI
Libero professionista - Milano

CORRELAZIONI TRA LA VELOCITA' DEGLI IMPULSI ULTRASONICI E LA RESISTENZA A COMPRESSIONE DEL CALCESTRUZZO PRECONFEZIONATO IMPIEGATO PER STRUTTURE IN CEMENTO ARMATO PRECOMPRESSO

Giacomo Ferrari, ingegnere tecnologo del CNR Roma
Giovanni Contini, ingegnere libero professionista in Milano

SOMMARIO

Questa memoria descrive i fondamenti della teoria del suono applicati al principale obiettivo di determinazione e di misura della velocità degli impulsi ultrasonici nel calcestruzzo per stabilire una relazione empirica tra la velocità di propagazione degli impulsi e la resistenza a compressione del calcestruzzo. La resistenza a compressione di un calcestruzzo standard è determinata con prove su campioni cilindrici ($H/D=2$) prelevati in-situ da travi, successivamente alla misura della velocità. L'informazione precedentemente disponibile è utilizzata per l'analisi statistica di regressione e per la determinazione del coefficiente di correlazione della distribuzione.

SUMMARY

This report describes the basic theory of sound applied in the main objective of determination and measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete for establish a relationship between pulse velocity and compressive strength of concrete. The compressive strength of standard concrete is determined by tests on cylindrical specimens ($H/D=2$) drawn from in-situ beams after measuring pulse velocity. The information previously available is exploited to analyse the statistical relation of regression and to determinate the correlation coefficient of distribution.

1. PREMESSA

L'impiego delle prove non distruttive, nella determinazione della resistenza del calcestruzzo di elementi in C.A o in C.A.P, trova nel metodo ultrasonico uno dei principali strumenti d'indagine attualmente disponibili; l'applicazione degli ultrasuoni infatti, tramite la misura della velocità di propagazione, è in grado di dare informazioni sul calcestruzzo di rapida acquisizione con le quali si è nella condizione di stabilire una correlazione sperimentale di tipo campionario, fra la velocità di propagazione delle onde elastiche e la resistenza a compressione, che sia atta a misurare la qualità del calcestruzzo e permetta il controllo comparativo in opera a breve e a lungo termine tramite la misura del solo dato sonico.

Il metodo di determinazione della velocità di propagazione degli ultrasuoni, sviluppato essenzialmente dal 1935 in poi, deve la sua popolarità soprattutto per l'evidente raffronto esistente fra i fenomeni che governano la propagazione delle onde e le proprietà fisico meccaniche del mezzo attraversato da tali onde. E' noto infatti che la propagazione delle onde elastiche all'interno di un mezzo omogeneo isotropo ideale a tre dimensioni, viene dedotta impostando lo studio dell'equilibrio dinamico di un cubetto elementare all'interno del corpo per giungere alla formulazione delle equazioni di moto [1]. Gli integrali generali di due soluzioni delle equazioni di moto sono corrispondenti alla esistenza di due tipi di onde che si propagano con diverse modalità, esse sono:

- le onde longitudinali o principali (di trazione-compressione in cui lo spostamento è diretto lungo la direzione di propagazione della onda stessa) con velocità di propagazione V_p espressa dalla relazione:

$$V_p = \sqrt{\frac{(1-\nu)E}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

- le onde trasversali o di taglio o secondarie, (moto trasversale rispetto al primo in cui lo spostamento giace in un piano normale alla direzione di propagazione dell'onda) con velocità di propagazione V_s espressa da:

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}}$$

dove:

- E = modulo di elasticità normale (N/mm²)
 ρ = densità del mezzo (Kg/m³)
 ν = modulo di Poisson
 $V_{p/s}$ = velocità principale o secondaria (Km/s)

Si può facilmente dimostrare che fra le due relazioni, poiché ν varia in realtà solo tra 0 ed 1/2, la velocità di propagazione delle onde longitudinali è sempre maggiore di quella trasversale ed entrambe le velocità sono indipendenti dalla frequenza di vibrazione delle onde che attraversano il mezzo elastico.

Nel caso di corpi monodimensionali [2], dove una dimensione è di gran lunga prevalente rispetto alle altre (sbarre metalliche, provini cilindri con $H \gg D$) il moto delle onde longitudinali, quando la lunghezza d'onda λ è superiore allo spessore dell'elemento, ha la possibilità di propagarsi in una sola direzione ed essendo trascurabile l'effetto dovuto alla contrazione trasversale, la velocità di propagazione delle onde longitudinali assume la formula semplificata:

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Questa velocità, se riferita ad un calcestruzzo con modulo di Poisson assunto convenzionalmente pari a $\nu = 0,24$ è un poco diversa da quella che si otterrebbe impiegando la prima formula valida per le onde longitudinali in un mezzo elastico a tre dimensioni, infatti nelle condizioni sopra ipotizzate per $\nu = 0,24$ risulta $V_{p(1)} = 0,921V_{p(3)}$, con ovvio significato della simbologia. (1)

Accanto alle relazioni precedentemente esposte, se si vuole valutare l'incidenza della forma del corpo nella determinazione della velocità di propagazione delle onde longitudinali V_p , ci si deve riferire al legame esistente tra V_p e le caratteristiche elastiche in un mezzo bidimensionale [3], in queste condizioni, per lo stesso calcestruzzo convenzionale di riferimento con modulo di Poisson $\nu = 0,24$, abbiamo: $V_{p(1)} = 0,970V_{p(2)}$.

Limitatamente alle considerazioni sovraesposte, ricavate dai legami esistenti tra velocità principale di propagazione e le caratteristiche elastiche per mezzi omogenei isotropi a uno, due, tre dimensioni, esse hanno indotto alcuni autori [4] a formulare per gli elementi in calcestruzzo, indipendentemente dalla loro forma, una relazione del tipo:

$$V_p^2 = K \frac{E}{\rho}$$

dove K è una costante che tiene conto sia del coefficiente di Poisson ν del calcestruzzo sia della forma

dell' elemento e può essere assunta pari 1,178, tale tipo di relazione è stata recepita anche in ambito normativo dalla ASTM.

La semplificazione introdotta rispetto all' approccio teorico e ai legami empirici esistenti tra il modulo elastico E_c e resistenza a compressione R del calcestruzzo, ci suggeriscono la possibilità di dedurre quest' ultimo valore direttamente dal dato sonico, sapendo nel contempo che non esiste una relazione funzionale univoca tra le due variabili, ma il legame tra la velocità di propagazione delle onde longitudinali e la resistenza a compressione del calcestruzzo dipende da molteplici fattori includenti l' età, le condizioni di maturazione, le condizioni di umidità, le proporzioni degli aggregati, il tipo degli aggregati, il tipo di cemento e il rapporto acqua cemento impiegato; se è richiesta una stima della resistenza sarà necessario stabilire una correlazione tra la resistenza a compressione e velocità longitudinale per quel particolare tipo di calcestruzzo in esame.

Scopo del presente lavoro è di presentare una procedura interpretativa per valutare la resistenza a compressione usufruendo della variabile velocità sonica acquisita da un particolare tipo di calcestruzzo espressamente formulato per rilevanti impieghi strutturali.

2. METODOLOGIA E STRUMENTAZIONE DI PROVA

Nel seguito vengono brevemente presentate la metodologia e la strumentazione di prova necessaria per poter compiere una indagine non distruttiva tramite l' impiego di onde ultrasonore in un intervallo di frequenze avente come estremo inferiore la frequenza di 20 KHz, corrispondente alla soglia limite di percezione umana del suono, mentre l' estremo superiore, per le indagini sul calcestruzzo, è posto a 150 KHz, limite di gran lunga inferiore al campo di frequenze normalmente impiegate per esaminare i difetti dei materiali metallici.

La misurazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici, generati da un trasduttore elettro acustico messo a contatto con una delle superfici dell' elemento in calcestruzzo, si basa fondamentalmente sulla misura del tempo impiegato dall' impulso ad attraversare la massa del campione in prova e a raggiungere la sonda ricevente; il segnale elettronicamente amplificato è convertito in una misura temporale, questa indica il tempo impiegato dall' impulso a percorrere la distanza L intercorrente tra la sonda ricevente e la sonda trasmittente. La velocità di propagazione dell' onda è calcolata dividendo L per T . In base alla posizione reciproca delle sonde rispetto alla geometria del campione, sono possibili sostanzialmente tre tecniche di rilevazione della velocità di propagazione degli ultrasuoni. Esse sono indicate come:

a) tecnica di trasmissione diretta, altrimenti detto metodo per trasparenza; con tale tecnica le sonde, ricevente e trasmittente, sono poste sulle facce opposte dell' elemento strutturale in prova in posizione tale da rendere minima la distanza fra esse; la procedura di prova è quella più sensibile perché in tali condizioni, le onde trasmesse sono sicuramente onde di tipo longitudinale (onde di tipo P) e il segnale trasmesso subisce la minima attenuazione e un' ampia percentuale dell' energia di vibrazione è captata dalla sonda ricevente;

b) tecnica di trasmissione semidiretta o diagonale, consiste nell' applicare i trasduttori su due facce adiacenti dell' elemento in prova. Solitamente l' applicazione delle sonde è fatta scegliendo due piani adiacenti ortogonali appartenenti all' elemento da caratterizzare; a questa tecnica deve ascriversi anche la configurazione diretta quando le due sonde non sono diametralmente opposte fra loro e la distanza intercorrente fra i punti di applicazione delle sonde non è più la minima;

c) tecnica di trasmissione indiretta od omeosuperficiale, entrambe le sonde vengono applicate in punti diversi appartenenti alla medesima faccia di una superficie piana delimitante l' elemento da provare. L' efficienza del metodo è notevolmente ridotta a causa della indeterminazione dei percorsi effettivi delle onde ultrasoniche. Le tecniche descritte ai punti - a, - b e - c hanno specifici campi d' applicazione dipendenti dal tipo di controllo che s' intende eseguire sul manufatto o sul provino in calcestruzzo e sono soggette alle limitazioni strutturali e ai vincoli geometrici imposti dall' elemento alla particolare realizzazione della procedura di prova prevista.

Ogni tecnica evidenzia diverse caratteristiche di trasmissione, rispetto ai fenomeni di rifrazione e

riflessione delle onde ultrasoniche incidenti sulle superfici delimitanti l'elemento in prova inserito nell'ambiente circostante facente da mezzo di separazione, in modo da risultare più idonea per alcune applicazioni particolari rispetto ad altre; il caso più evidente è il metodo omeosuperficiale quando viene utilizzato per determinare la qualità superficiale del calcestruzzo in relazione agli altri strati più interni o quando si vuole determinare la profondità di una fessura con giacitura normale alla superficie di applicazione delle sonde. Delle tre tecniche di trasmissione, quella per trasparenza è la più sensibile, poiché i risultati che si ottengono sono i più rappresentativi di tutto lo spessore del calcestruzzo esaminato; nel presente lavoro, non essendovi impedimenti di altro genere, il metodo per trasparenza è stato sistematicamente utilizzato per la misura del tempo di propagazione attraverso i campioni di calcestruzzo espressamente ricavati per la sperimentazione.

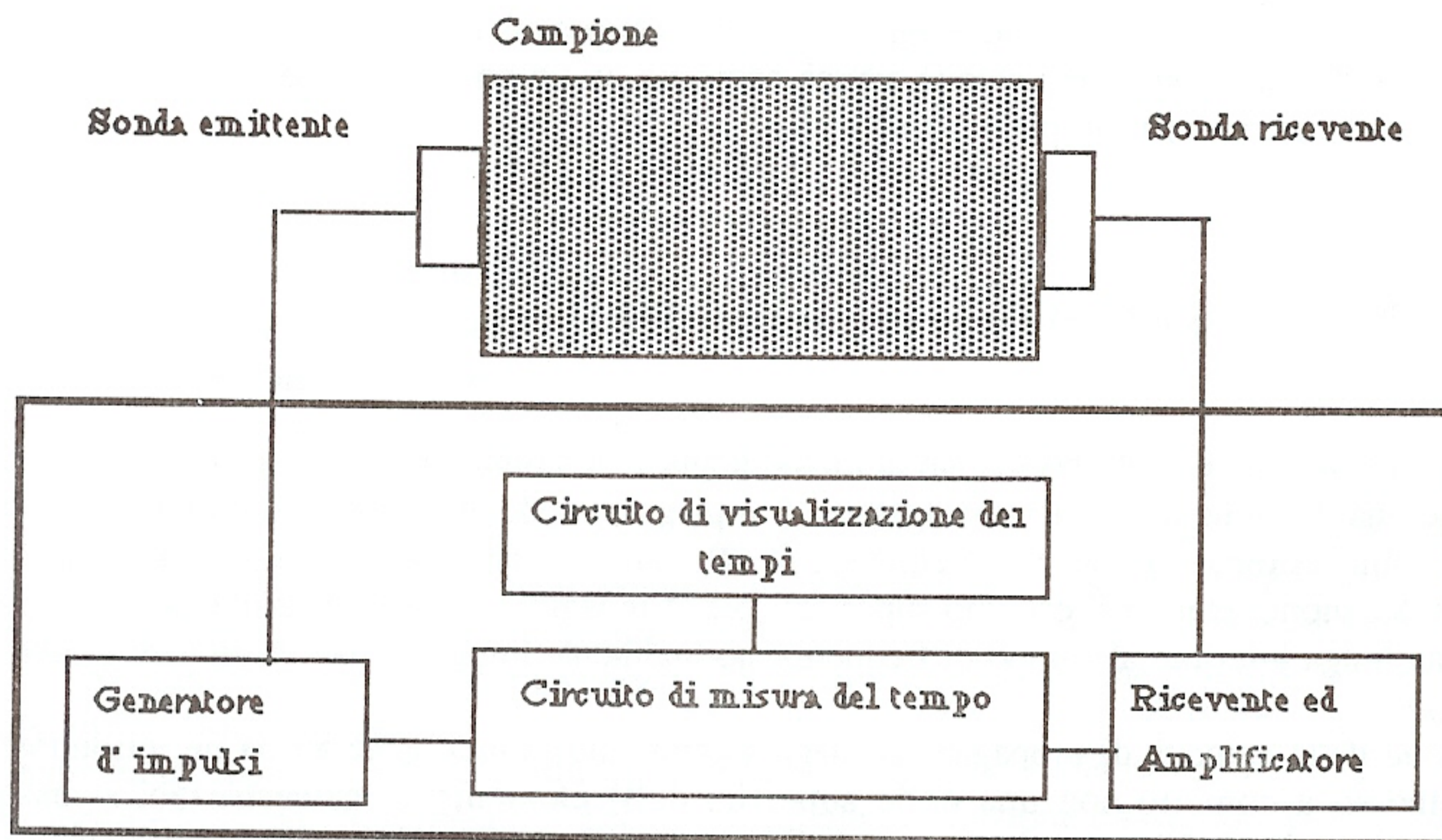


Fig. 1 - Schema a blocchi di uno strumento ad ultrasuoni per il controllo del calcestruzzo

L'apparecchio di prova impiegato è schematicamente rappresentato in fig. 1, esso si compone essenzialmente delle seguenti unità funzionali elettricamente connesse:

a - un generatore d'impulsi elettrici accoppiato alla relativa sonda di trasmissione di tipo piezoelettrico, questa trasforma gli impulsi elettrici prodotti del generatore in vibrazioni di frequenza nota. Nel caso della strumentazione effettivamente utilizzata, la caratteristica nominale di vibrazione del trasduttore risultava avere una frequenza di 54 KHz,

b - una sonda ricevente, simile alla precedente sonda trasmittente, che trasforma le vibrazioni meccaniche, captate dalla superficie a contatto con il campione, in segnali elettrici da inviare ad un dispositivo di amplificazione in sincronismo con il generatore di impulsi,

c - un circuito di misura elettronico dell'intervallo di tempo intercorso fra l'istante di emissione dell'impulso e l'istante in cui questo arriva alla sonda ricevente,

d - un circuito di visualizzazione dei tempi intercorsi, normalmente presente nelle strumentazioni disponibili sul mercato in due versioni simultaneamente attive; la prima consiste essenzialmente di un oscilloscopio nel cui tubo a raggi catodici è visualizzata l'onda trasmessa e quella ricevuta, mentre sull'asse dei tempi è possibile misurare l'intervallo di tempo intercorso fra i due segnali; la seconda versione, per l'indicazione del tempo intercorso, impiega un temporizzatore digitale con oscillatore al quarzo, il dispositivo visualizza direttamente l'intervallo temporale su un apposito visore a cristalli liquidi.

La scelta del campo di frequenze entro cui si collocano i singoli valori nominali delle sonde emittenti, da impiegarsi nelle indagini ultrasoniche sul calcestruzzo, è dettata da considerazioni energetiche relative al fenomeno della attenuazione che subisce l'onda ultrasonica nel suo moto di propagazione entro il mezzo; la lunghezza del percorso che questa può attraversare dipende dall'ampiezza iniziale dell'onda, dalla frequenza e dalla natura del mezzo. Lo smorzamento della pressione acustica in funzione della

distanza è di tipo esponenziale ed avviene tanto più rapidamente quanto più la frequenza della sonda è grande, tale ultima circostanza è intuitivamente comprensibile se si tiene presente che, essendo la velocità nel mezzo indipendente dalla frequenza rispetto a questa la velocità deve essere ritenuta costante, quindi dalla relazione $V = \lambda F$ si deduce che, essendo la velocità di propagazione nel mezzo invariante, alle alte frequenze corrispondono piccole lunghezze d'onda, ma in questo caso, per il calcestruzzo, se λ è dello stesso ordine del diametro degli inerti, aumenta la possibilità di perdita di energia perché aumenta la possibilità di diffusione dell'onda in tutte le direzioni. Tale ultima circostanza, limita per il calcestruzzo l'applicazione degli ultrasuoni con delle frequenze maggiori di 150 KHz, perché se si raggiungono frequenze di vibrazione superiori al limite indicato, l'onda non riuscirebbe a penetrare nel calcestruzzo e, a seguito della elevata attenuazione subita, sarebbe rapidamente smorzata lungo la parte iniziale del suo percorso. La scelta del tipo di sonda da utilizzare nella successiva campagna sperimentale è stata dettata da considerazioni sulle lunghezze dei percorsi da esplorare e dalle caratteristiche nominali di frequenza delle sonde fornite dai costruttori di strumentazione per indagini ultrasoniche.

3. RISULTATI DELLA SPERIMENTAZIONE

La fase sperimentale del presente lavoro, è stata condotta a valle del processo produttivo, su una serie di travi prefabbricate sulle quali, come prevalentemente avviene nei casi in cui è richiesta una indagine non distruttiva, erano sorti dubbi sulla conformità della classe di resistenza del calcestruzzo impiegato rispetto a quella prescritta in fase progettuale. La normativa italiana sull'argomento, con il D.M. n 37 del 27/7/85 attualmente in vigore, nell'allegato 2 "Controlli sul conglomerato", al punto 5.3, "Prescrizioni comuni ad entrambi i criteri di controllo", cita la seguente proposizione:

- se una prescrizione del controllo di accettazione non risulta rispettata, occorre procedere:
- ad un controllo teorico e/o sperimentale della sicurezza della struttura interessata dal quantitativo di conglomerato non conforme, sulla base della resistenza ridotta del conglomerato, ovvero a una verifica delle caratteristiche del conglomerato messo in opera mediante le prove complementari ove esistessero, o con prelievi di calcestruzzo indurito messo in opera (es. carotaggi) o con l'impiego di altri mezzi d'indagine.

La generalità espressa dalla normativa sui mezzi d'indagine, ci autorizza ad impostare il metodo ultrasonico come alternativa per l'accertamento della conformità della resistenza caratteristica su cubetto del calcestruzzo (R_{ck}) ai requisiti progettuali richiesti.

In base ai criteri precedentemente richiamati, le indagini preliminari, inerenti alle specifiche progettuali degli elementi in calcestruzzo oggetto della presente caratterizzazione sonica, conducono in ogni caso a considerare note a priori la resistenza caratteristica di progetto R_{ck} e il mix design del calcestruzzo utilizzato. Per quanto riguarda il caso in esame la miscela impiegata per i getti risultava avere la seguente composizione:

- Calcestruzzo per travi:	(Pesata 1 m ³ inerti asciutti)	
- Cemento 425 (Buzzi)		350 Kg/m ³
- Sabbia		850 Kg/m ³
- Inerte fine		140 Kg/m ³
- Inerte grosso		950 Kg/m ³
- Superfluidificante		0,8 %
- Acqua/cemento		0,45
- Slump		12 cm

Si deve richiamare il fatto che la successiva inevitabile diversa compattazione dei getti delle travi rispetto ai corrispondenti cubetti di prelievo e la sempre possibile variazione non controllata dell'acqua d'impasto sono i fattori che più sovente incidono sulla resistenza del calcestruzzo e la sottopongono a delle variazioni che non possono essere controllate e che quindi generano una imperfetta corrispondenza fra

resistenza dei cubetti e resistenza del calcestruzzo impiegato negli elementi strutturali.

Al fine di ovviare alle limitazioni precedentemente indicate, si è provveduto a compiere una campionatura del calcestruzzo impiegato per la formazione di una prima serie di travi, tramite l'estrazione di un rappresentativo campione di microcarote prelevate direttamente dagli elementi strutturali prodotti. Il prelievo, premessa indispensabile per poter stabilire una curva di taratura del tipo $R=f(V)$ tra il generico parametro non distruttivo velocità V e la resistenza del calcestruzzo in opera [5], ha condotto alla formazione di trentotto provini cilindrici con diametro nominale $\phi = 5$ cm e altezza $H = 10$ cm, ottenuti per taglio delle microcarote di riferimento precedentemente estratte e aventi altezza pari allo spessore dell'anima della trave a cui appartenevano in origine. Tutte le successive prove di laboratorio sono state condotte su provini maturati ventotto giorni in condizioni normali di temperatura e umidità e hanno avuto

N	resist cilindr N/mm ²	velocità longit. m/s	massa volumica Kg/m ³
1	37	3844	2230
2	30	3921	2210
3	34	3821	2177
4	34	3691	2218
5	28	3794	2193
6	23	3803	2201
7	30	3811	2159
8	35	3821	2154
9	33	3690	2131
10	27	3699	2170
11	32	3797	2190
12	25	3968	2346
13	27	3849	2322
14	29	3906	2308
15	35	3945	2275
16	33	4000	2353
17	42	3945	2363
18	29	3807	2257
19	29	3770	2240
20	36	4032	2252
21	36	3778	2258
22	33	3687	2241
23	31	3795	2261
24	32	3911	2325
25	36	4098	2263
26	32	3933	2246
27	34	3817	2293
28	32	3953	2303
29	35	3847	2240
30	33	3681	2290
31	29	3926	2271
32	32	3794	2254
33	31	3801	2259
34	30	3984	2273
35	32	3792	2259
36	34	3984	2275
37	35	3846	2246
38	28	3759	2246

Tabella 1 - Risultati delle determinazioni di massa volumica, velocità e resistenza

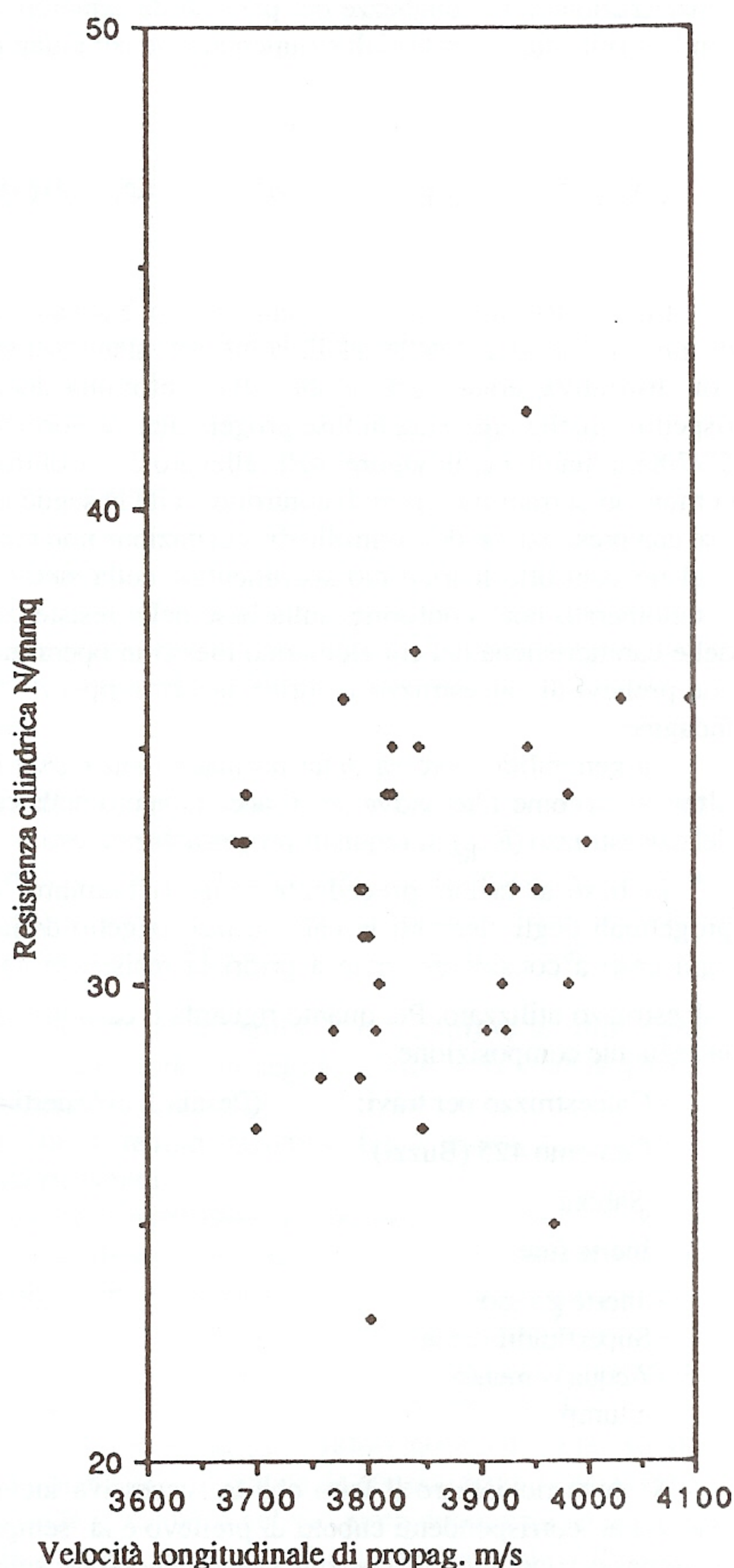


Fig. 2 Diagramma a scatter dei punti originari (V_i , R_i) ottenuti dai provini

per oggetto la determinazione della massa volumica, della velocità longitudinale di propagazione delle onde ultrasoniche e si sono concluse con la rottura dei provini per la valutazione della resistenza cilindrica a compressione f_c . La tabella 1 presenta i risultati numerici della sperimentazione per i 38 provini ottenuti tramite il microcarotaggio su una serie di produzione di quattro travi, mentre la relativa rappresentazione grafica dei punti individuati dalle due variabili casuali velocità e resistenza da correlare è riportata nel diagramma a scatter di figura 2.

4. ANALISI STATISTICA DEI RISULTATI SPERIMENTALI

I valori numerici ottenuti nella sperimentazione sono stati successivamente trattati tramite i metodi dell'analisi statistica secondo fasi distinte in ragione delle diverse finalità proposte. Nella prima fase le tre variabili casuali, V_p velocità principale, f_c resistenza cilindrica a compressione e massa volumica ρ sono state considerate separatamente, per ognuno dei tre campioni estratti dalle rispettive popolazioni si è proceduto al calcolo dei più significativi indici statistici. Nella tabella 2 sono riportati i principali parametri stimati sui campioni ottenuti dalle rispettive popolazioni che si suppongono distribuite normalmente; per le singole variabili casuali ρ massa volumica, V_p velocità principale di propagazione e resistenza cilindrica a compressione f_c , la tabella riporta i valori stimati della media, della varianza, dello scarto quadratico medio, del coefficiente di variazione inteso, come rapporto percentuale tra lo scarto quadratico medio e la media, dei valori caratteristici o frattili di ordine 0,05 e indica l'ampiezza dei campioni estratti dalle rispettive popolazioni, tramite la presentazione dei valori massimi e minimi misurati. Per i risultati di più specifico interesse, ai fini delle successive elaborazione dei dati tramite le analisi di correlazione e di regressione, sono riportati per le variabili casuali V_p velocità principale e f_c resistenza cilindrica a compressione, i rispettivi istogrammi di frequenza nelle Fig 3 e Fig. 5, mentre nelle Fig. 4 e Fig 6 sono rappresentati i diagrammi di distribuzione delle rispettive frequenze cumulate relative, intendendo per frequenza cumulata relativa di ogni elemento del campione, il rapporto tra il numero d'ordine dell'elemento, a seguito della classificazione dei dati in ordine crescente e la corrispondente dimensione del campione aumentata di una unità. Le curve di frequenza cumulata rappresentano una stima approssimata delle funzioni di probabilità $P(R)$ e $P(V)$ delle rispettive variabili casuali velocità e resistenza cilindrica. La principale considerazione degna di attenzione a seguito del confronto dei parametri statistici, è la notevole diversità del coefficiente C_v assunto dalla resistenza cilindrica f_c rispetto al

	Massa volumica Kg/m ³	Velocità principale m/s	Resistenza cilindrica N/mm ²
media	2251	3850	32
varianza	3005	10679	14,36
scarto quadratico medio	54,82	103,34	3,79
coefficiente di variazione	2,43	2,68	11,69
Valore caratteristico di ordine 0,05	2161	3680	26
valore massimo	2363	4098	23
valore minimo	2131	3681	43

Tabella 2 - Parametri statistici relativi alle prove di laboratorio

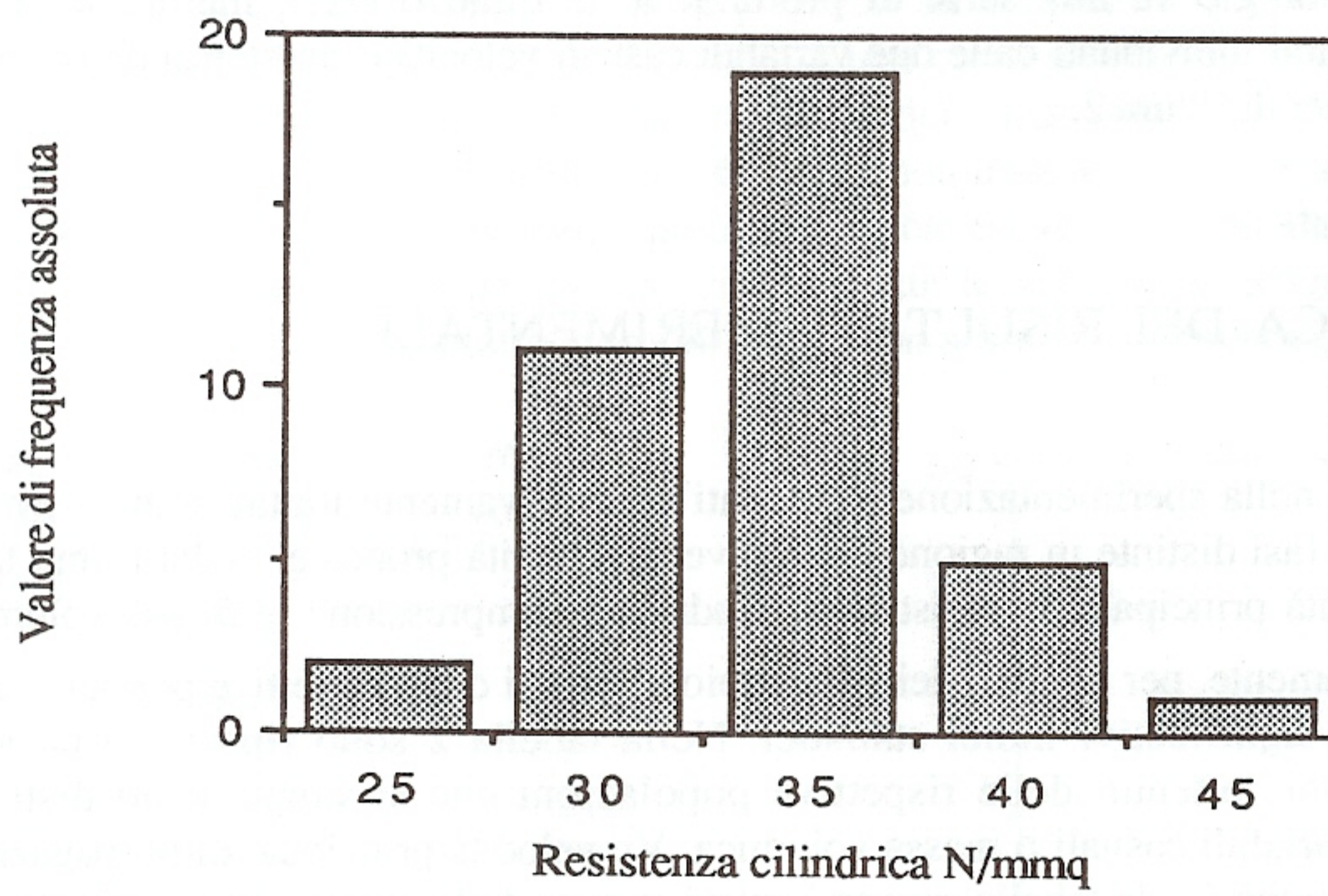


Fig. 3 - Istogramma di frequenza delle resistenze cilindriche misurate

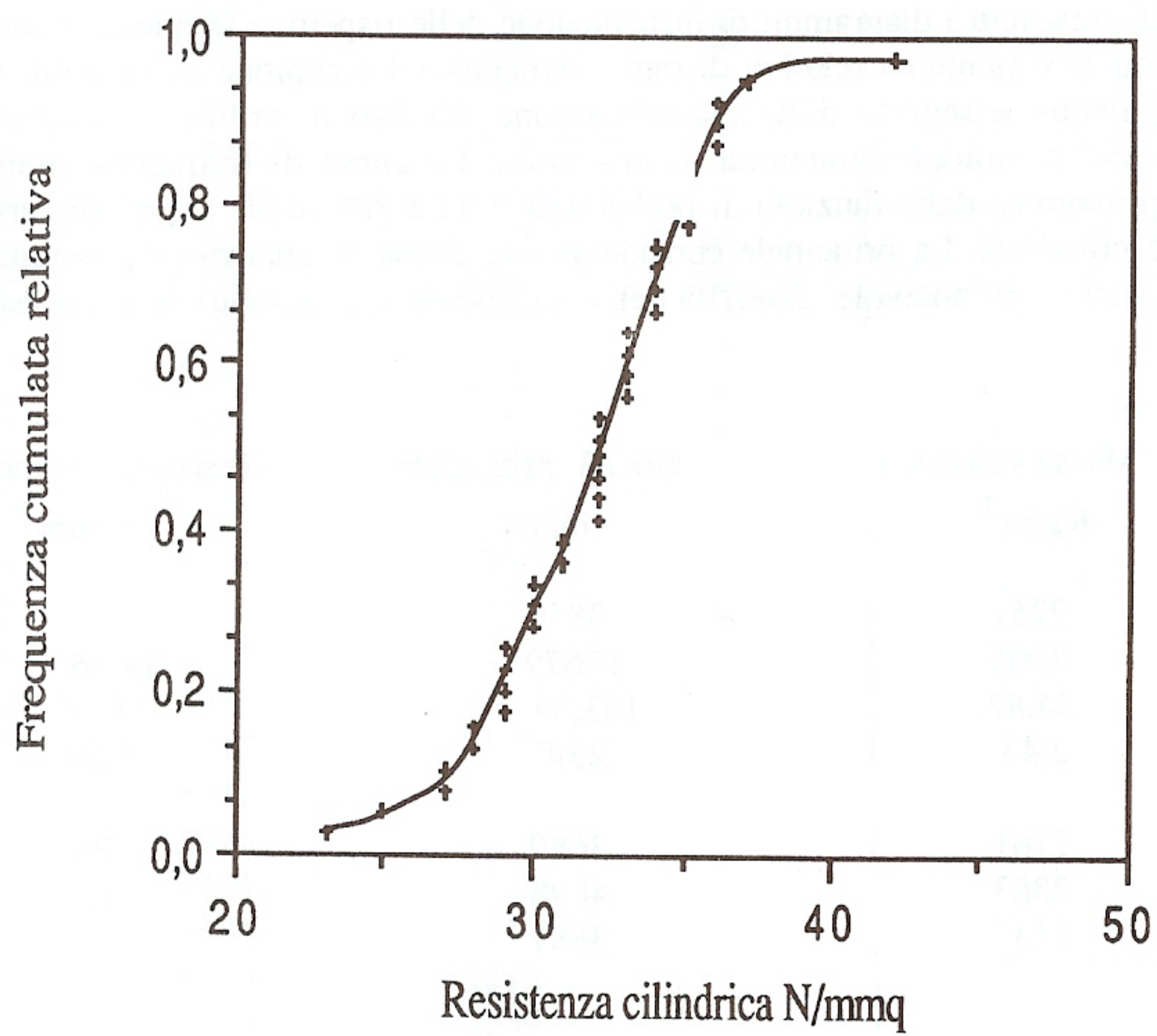


Fig. 4 - Diagramma di distribuzione cumulativo e relativa curva di frequenza dei valori di resistenza f_c

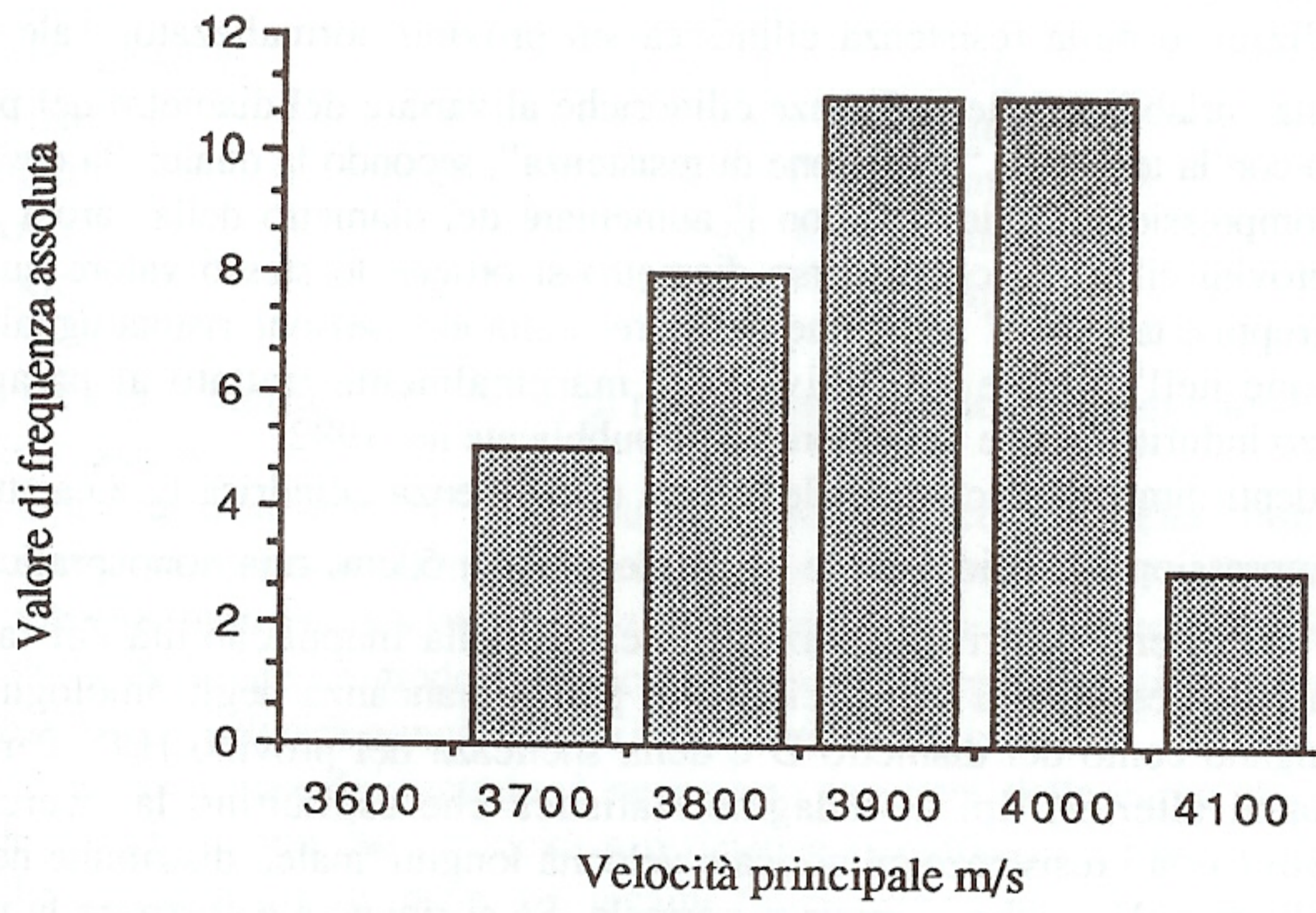
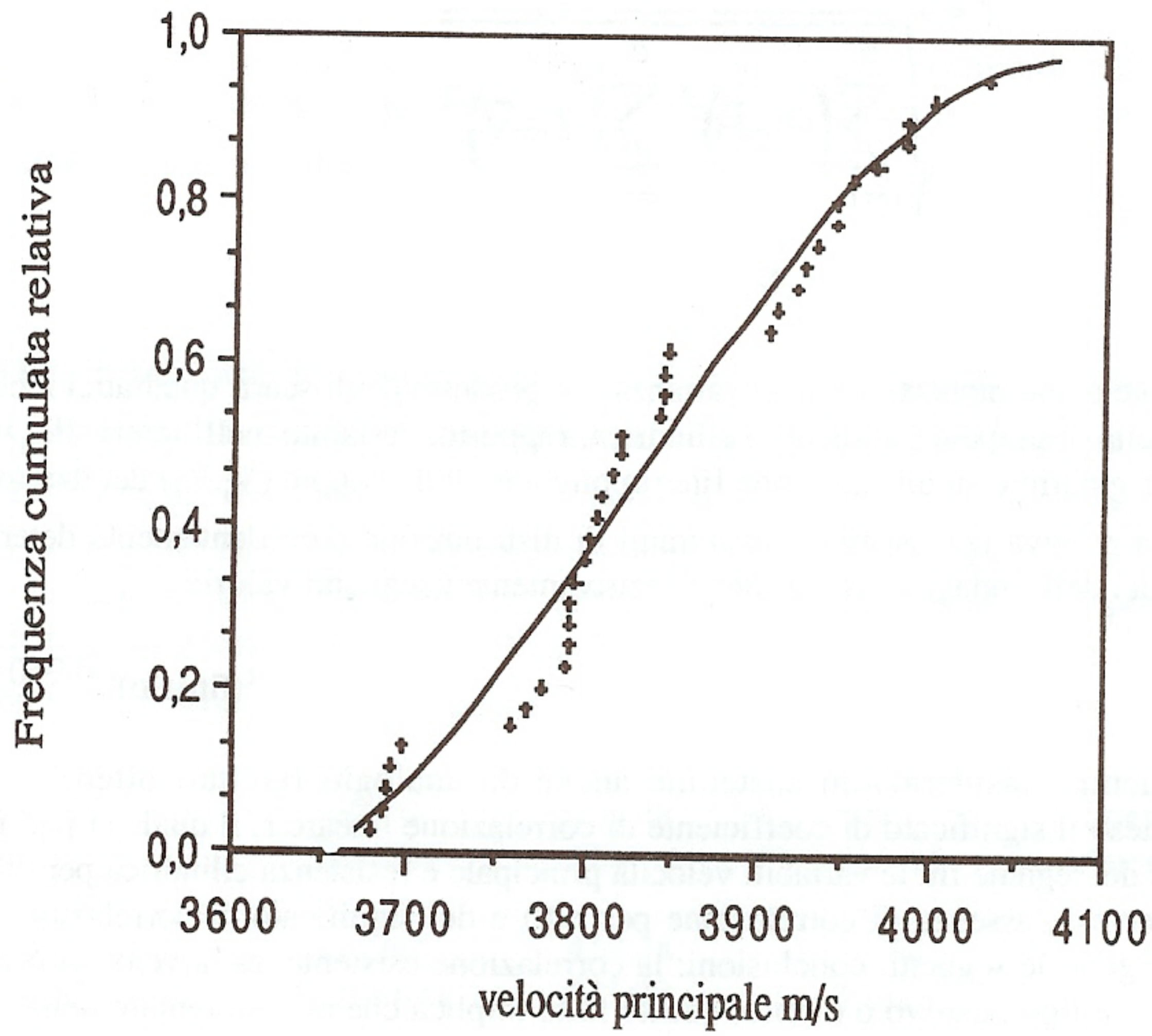


Fig. 5 - Istogramma di frequenza delle velocità principali misurate



AAA

Fig.6 - Diagramma di distribuzione cumulativo e relativa curva di frequenza dei valori della velocità

medesimo parametro stimato sulle altre variabili casuali velocità e massa volumica del campione statistico, ma più in generale rispetto ai valori normalmente presenti nelle determinazioni della resistenza cubica R_c su cubetti normalizzati o della resistenza cilindrica sul provino normalizzato. Tale effetto, consistente nell' aumento della variabilità delle resistenze cilindriche al variare del diametro del provino, anche se noto [6] e spiegato con la teoria di " addizione di resistenza", secondo la quale: "la deviazione standard della resistenza a compressione diminuisce con l' aumentare del diametro della carota e, se si confrontano due gruppi di provini cilindrici con diverso diametro si ottiene lo stesso valore quando il numero dei provini dei due gruppi è tale che l' addizione delle aree della loro sezione risulta uguale", non trova una idonea collocazione nell' attuale normativa ed è marginalmente trattato al paragrafo " Caratteristiche del calcestruzzo indurito" delle Istruzioni CNR pubblicate nel 1982.

Le considerazioni precedenti dimostrano che le sole misure di resistenza cilindrica f_c e caratteristica f_{ck} ottenute da prove di compressione su microcarote di diametro $\Phi = 5$ cm, non sono praticamente utilizzabili per ottenere gli equivalenti valori normalizzati, a causa della inapplicabilità dei fattori di conversione fra resistenze a compressione di cubi / cilindri e per la mancanza degli omologhi indici applicabili ai cilindri che tengano conto del diametro D e della snellezza del provino H/D . Pertanto l' analisi precedente necessita di ulteriori tipi di indagine statistica che esplicitino la ricerca della connessione tra le due variabili casuali resistenza cilindrica e velocità longitudinale, distribuite nel piano V,R con densità di probabilità $w=w(V,R)$ che si ipotizza normale. Se si rinuncia a costruire la statistica delle due variabili casuali V e R , ma ci si limita al calcolo e alla interpretazione del coefficiente di correlazione di Pearson:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})(V_i - \bar{V})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2 \sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}}$$

definito adimensionalmente come rapporto tra la covarianza e il prodotto degli scarti quadratici medi delle due variabili casuali velocità principale e resistenza cilindrica; rapporto, variabile nell' intervallo $-1 \leq r \leq 1$, calcolato sul campione originario e su un campione fittizio ottenuto dalle coppie (V_i, R_i) dei dati aventi la stessa frequenza cumulata relativa nei rispettivi diagrammi di distribuzione precedentemente determinati, che per i campioni statistici dell' indagine ha assunto rispettivamente i seguenti valori:

$$r_{(\text{originario})} = 0,194$$

$$r_{(\text{fittizio})} = 0,960$$

si possono fare le seguenti considerazioni sostenute anche da analoghi risultati ottenuti in altre sperimentazioni [7]; atteso il significato di coefficiente di correlazione lineare r , il quale si può ritenere una misura della linearità del legame fra le variabili velocità principale e resistenza cilindrica per $0 \leq r \leq 1$, (rigorosamente lineare per $r=1$, assenza di correlazione per $r=0$) e del significato di correlazione diretta positiva per $r > 0$, si traggono le seguenti conclusioni: la correlazione esistente tra la velocità principale e la resistenza cilindrica è di tipo positivo o diretto, questo fatto implica che all' aumentare della velocità statisticamente aumenti la resistenza cilindrica.

Il risultato anche se qualitativamente valido non trova una pratica applicabilità nei casi concreti, a meno di riferirlo a condizioni generali del livello di qualità del calcestruzzo da stabilirsi di volta in volta

su una definita produzione di calcestruzzo, come presentato da alcuni autori [8] tramite una classificazione del materiale del tipo:

molto scadente	$V < 2135$	m/s
scadente	$2135 + 3050$	m/s
discreto	$3050 + 3660$	m/s
buono	$3660 + 4575$	m/s
ottimo	$V > 4575$	m/s

ottenuta da una valutazione dei valori di resistenza e velocità misurati e mediati in una vasta campagna d'indagine conoscitiva.

La tappa successiva per l'interpretazione dei dati acquisiti nella fase di campionamento consiste nell'analisi di regressione. Il metodo della regressione è impiegato, nelle distribuzioni a due dimensioni, quando interessa non tanto adattare alle osservazioni una legge probabilistica ma quando si vuole più facilmente determinare in modo semplice e pratico un legame statistico tra due variabili casuali come risultano essere la velocità principale e la resistenza cilindrica.

Per l'applicazione del metodo, è necessario scegliere delle curve che si adattino bene ai dati, ma poiché le variabili sono due, velocità e resistenza cilindrica, sarà preliminarmente necessario stabilire quale delle due variabili assumerà, nel legame funzionale empirico, il significato di variabile indipendente e quale quello di dipendente, o detto in termini equivalenti quale tipo di regressione (R su V) e curva di regressione si intende adottare. Il metodo implica a priori la scelta del tipo di curva di regressione, quelle adottate per i due campioni statistici esaminati sono le seguenti famiglie di funzioni:

lineare	$R=C_0 + C_1 V$
potenza	$R=C_0 V^{c1}$

dove R e V sono rispettivamente la resistenza cilindrica e la velocità principale, mentre i singoli coefficienti C_0 e C_1 , di ogni singola curva, sono da determinarsi per ognuna di esse, con il metodo dei minimi quadrati minimizzando la somma

$$S = \sum (R_i - R_{is})^2$$

dei quadrati degli scarti tra i valori osservati della variabile resistenza cilindrica R_i ed i corrispondenti valori R_{is} che, a parità di valore della velocità principale V, si leggono sulla curva di regressione.

Dopo il calcolo delle costanti C_0 , C_1 per le quattro curve, riportate analiticamente e graficamente nelle fig. 7, 8, 9, 10, rappresentative rispettivamente del campione statistico originario e di quello fittizio ottenuto dai dati di velocità e resistenza, ordinati in modo da rappresentare punti (R_i, V_i) con lo stesso valore di frequenza cumulata relativa, l'analisi si è conclusa con il calcolo dei principali parametri di stima degli errori campionari, sintetizzati dalla devianza residua, $d_r = \sum (R_i - R_{is})^2$, dove R_i sono le

	Tipo di funzione	Devianza residua	Errore standard	Coefficiente di determinazione
Campione originario	lineare	457,38	3,564	0,038
	potenza	473,98	3,628	0,032
Campione fittizio	lineare	36,98	1,013	0,922
	potenza	42,00	1,080	0,901

Tabella 3 - Parametri statistici dell'analisi di regressione.

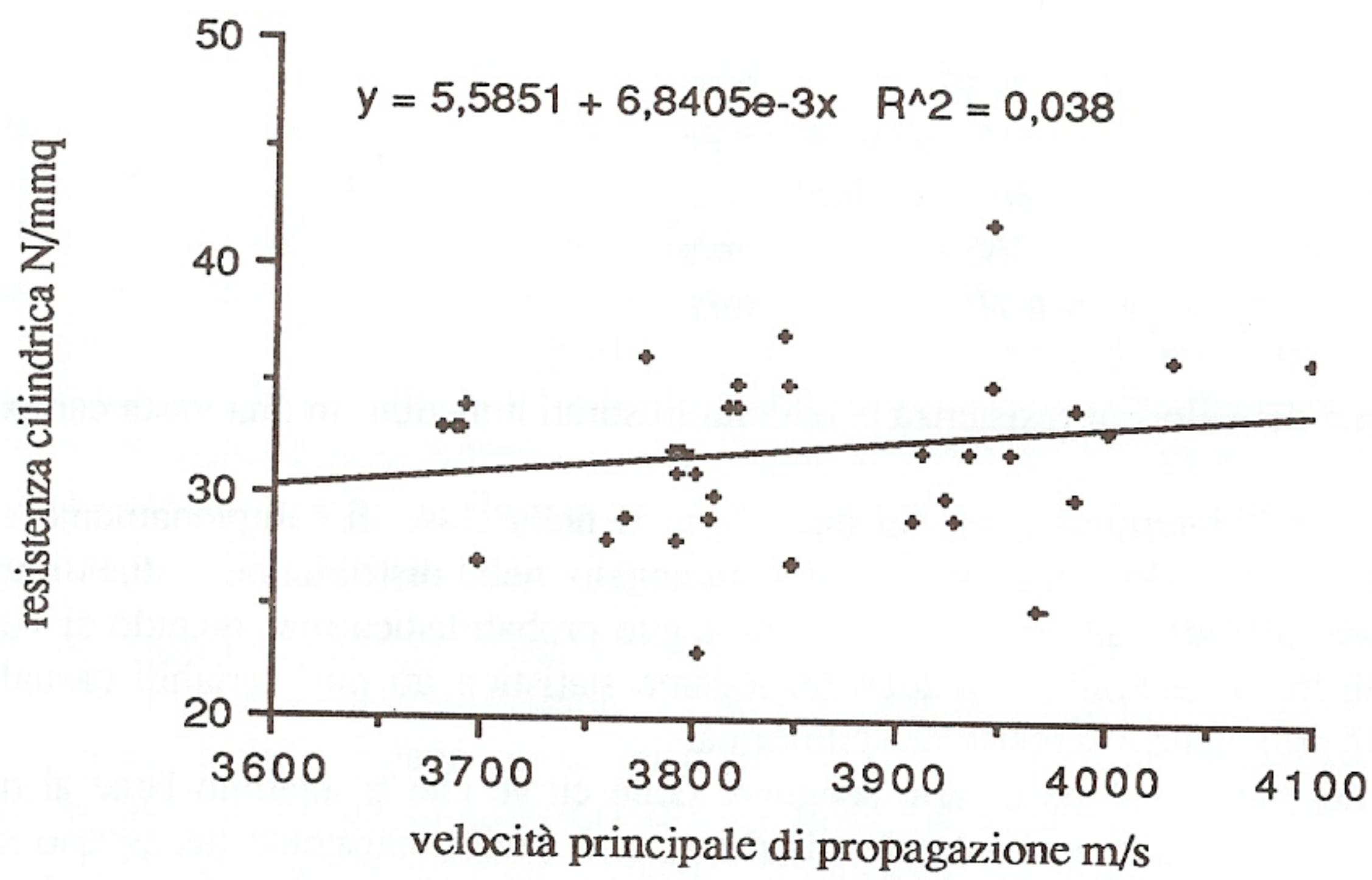


Fig. 7 - Curva di regressione lineare di R su V del tipo $R=C_0+C_1V$ ottenuta dai dati originari

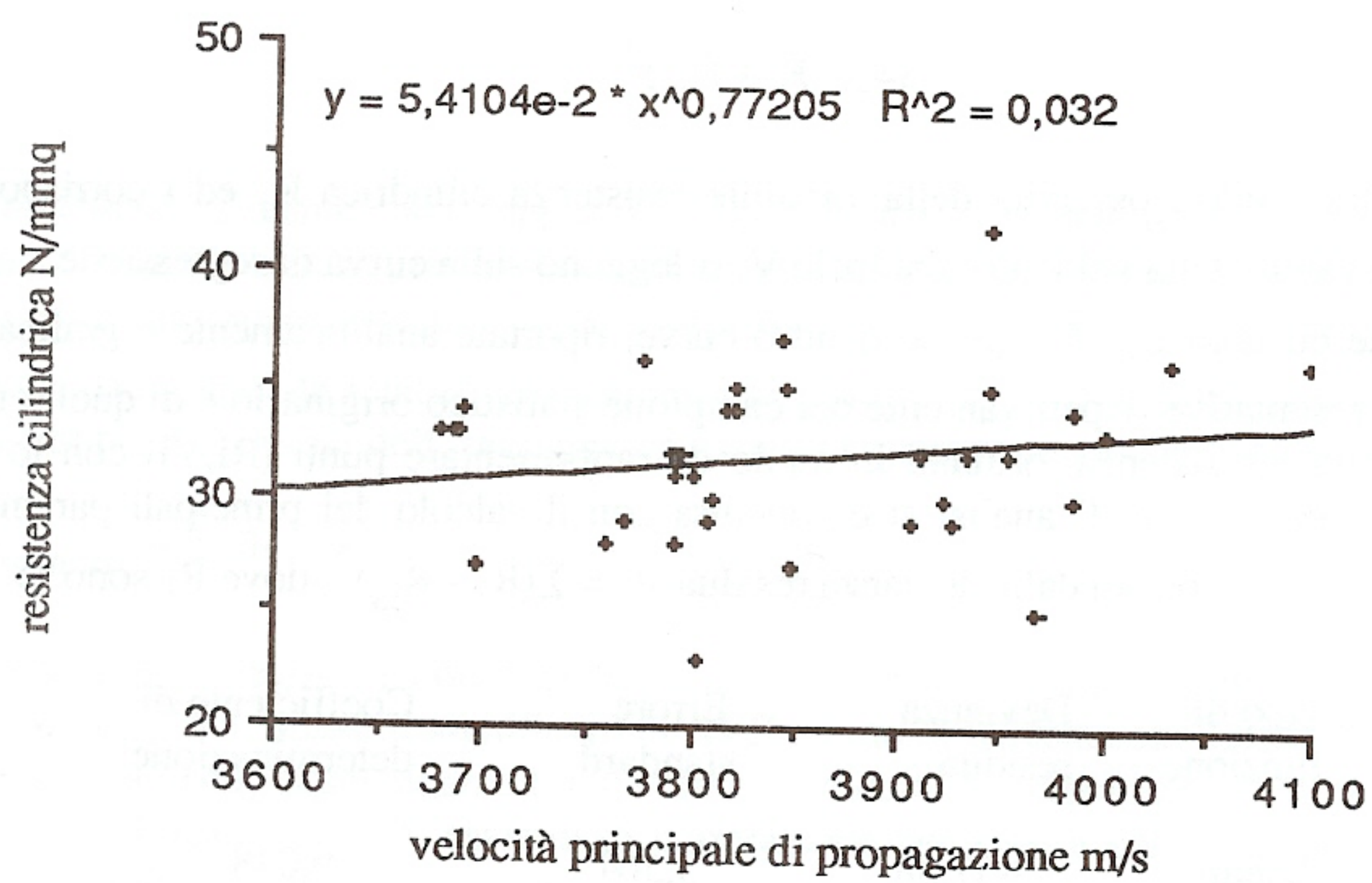


Fig.8 - Curva di regressione di R su V del tipo $R=C_0V^{C1}$ ottenuta dai dati originari

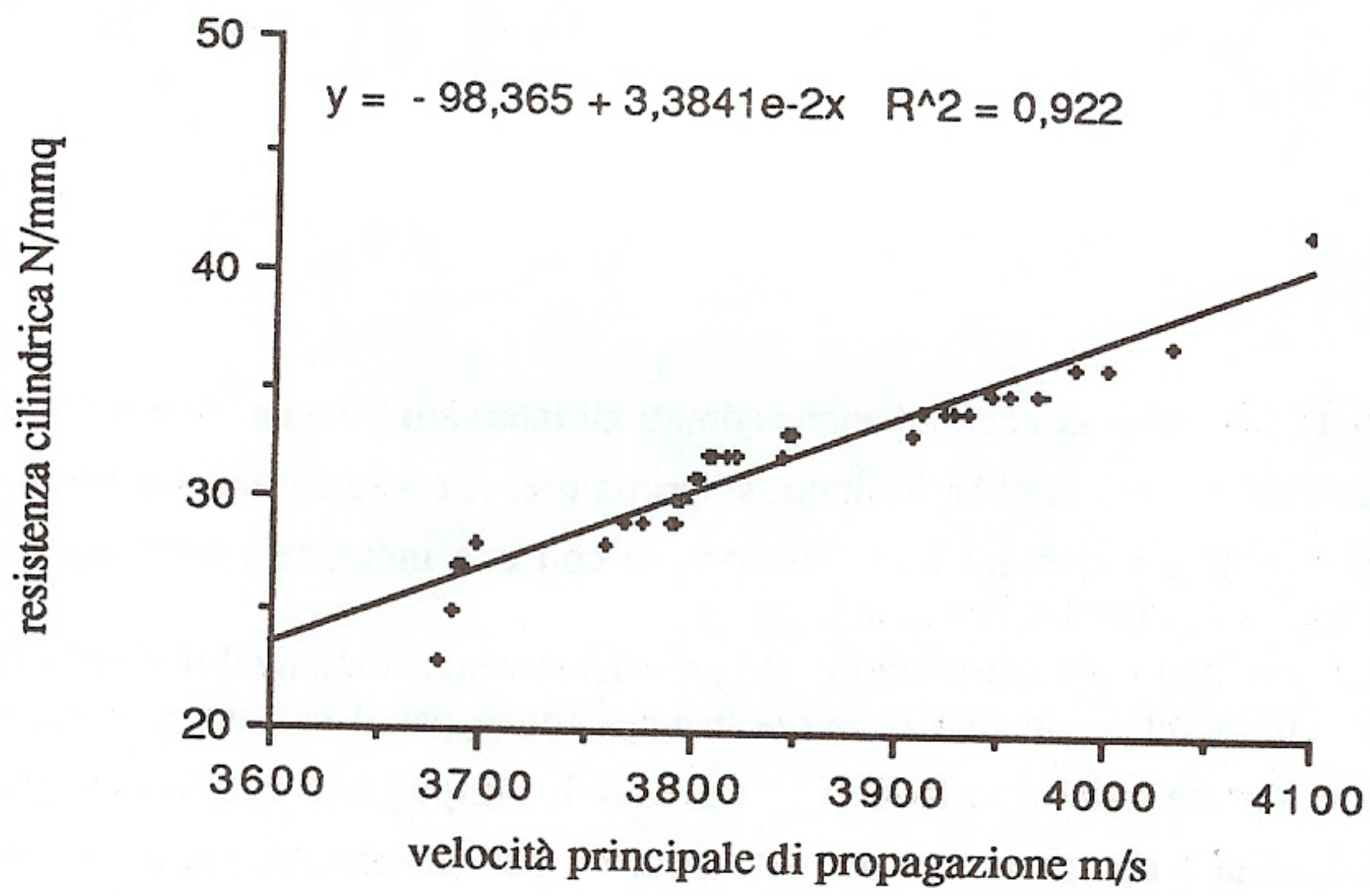


Fig.9 - Curva di regressione lineare di R su V del tipo $R = C_0 + C_1 V$ ottenuta dai dati ordinati con stesso valore di frequenza cumulata relativa

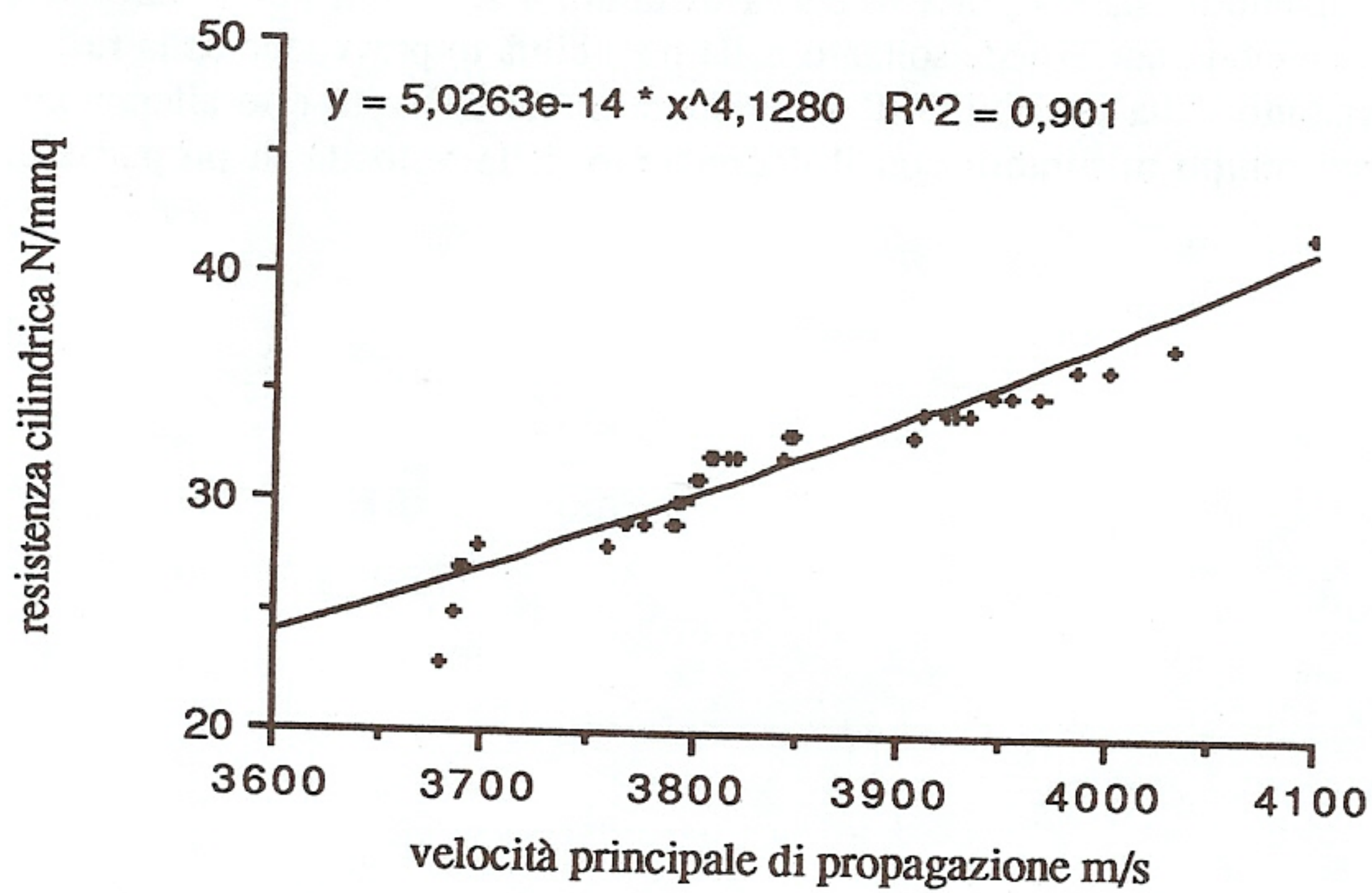


Fig.10 - Curva di regressione del tipo $R = C_0 V^{c1}$ ottenuta dai dati ordinati con stesso valore di frequenza cumulata relativa

ordinate dei punti sperimentali ed R_{iS} le ordinate dei corrispondenti punti stimati sulla curva di regressione, dell' errore standard della stima, definito come $s = \sqrt{dr/n-2}$ e per ultimo del coefficiente di determinazione r^2 espressione quadratica del coefficiente di correlazione r , tutte queste caratteristiche sono riportate in tabella 3.

5. CONCLUSIONI

Per una analisi completa e corretta andrebbero anche stimati gli intervalli fiduciali dei coefficienti C_0 e C_1 , ma il rigore formale dell' analisi sarebbe limitato, se prima non si operasse una scelta sul tipo di relazione empirica più idonea ad interpretare i dati disponibili con una indagine campionaria attuata tramite misure di velocità soniche e di resistenza cilindrica.

Al riguardo i metodi d' interpretazione disponibili [9] prevalentemente studiati ed impiegati nell' est europeo, prevedono, una volta adottato un tipo di curva di regressione per il calcestruzzo standard di riferimento solitamente non lineare e del tipo $R=C_0 V^{C_1}$ con $C_1=4$, l'impiego di coefficienti globali d' influenza, da stabilirsi in base alla composizione del calcestruzzo, per passare dai valori di resistenza misurati sul calcestruzzo standard ai valori di resistenza stimati per generico calcestruzzo modificato.

Ritornando alle motivazioni che hanno dato origine al presente lavoro, circa l' effettivo impiego delle relazioni empiriche soprariportate, nel controllo di produzione di elementi strutturali, si deve segnalare come queste abbiano raggiunto l' affidabilità previsionale richiesta al metodo ultrasonico di controllo utilizzato e siano state ulteriormente confermate dagli omologhi risultati ottenuti con prove sclerometriche condotte parallelamente alla indagine ultrasonica, mentre non è possibile fare la precedente considerazione rispetto alla prove normalizzate su cubetto, eseguite in fase di produzione delle travi, per la constatazione di una sovrastima della resistenza dovuta all' errore tecnologico di confezionamento dei cubetti.

L' indagine ultrasonica si propone quindi come metodo di controllo non distruttivo applicabile agli elementi in calcestruzzo quando si sia tracciata la curva di taratura specifica per il calcestruzzo di riferimento. L' interesse del metodo non risiede soltanto nella possibilità di previsione della resistenza in cantiere, ma anche e soprattutto nella possibilità d' individuare le eterogeneità e le alterazioni che il calcestruzzo può subire nel tempo misurabili con il decremento della velocità di propagazione nel manufatto.

¹ (Nota 1) Le relazioni che legano la velocità di propagazione degli ultrasuoni alle costanti elastiche del mezzo, fanno sempre riferimento a moduli elastici E ed a coefficienti di Poisson ν normalmente qualificati con il termine di dinamici, per specificare i metodi con cui normalmente si procede alla loro determinazione.

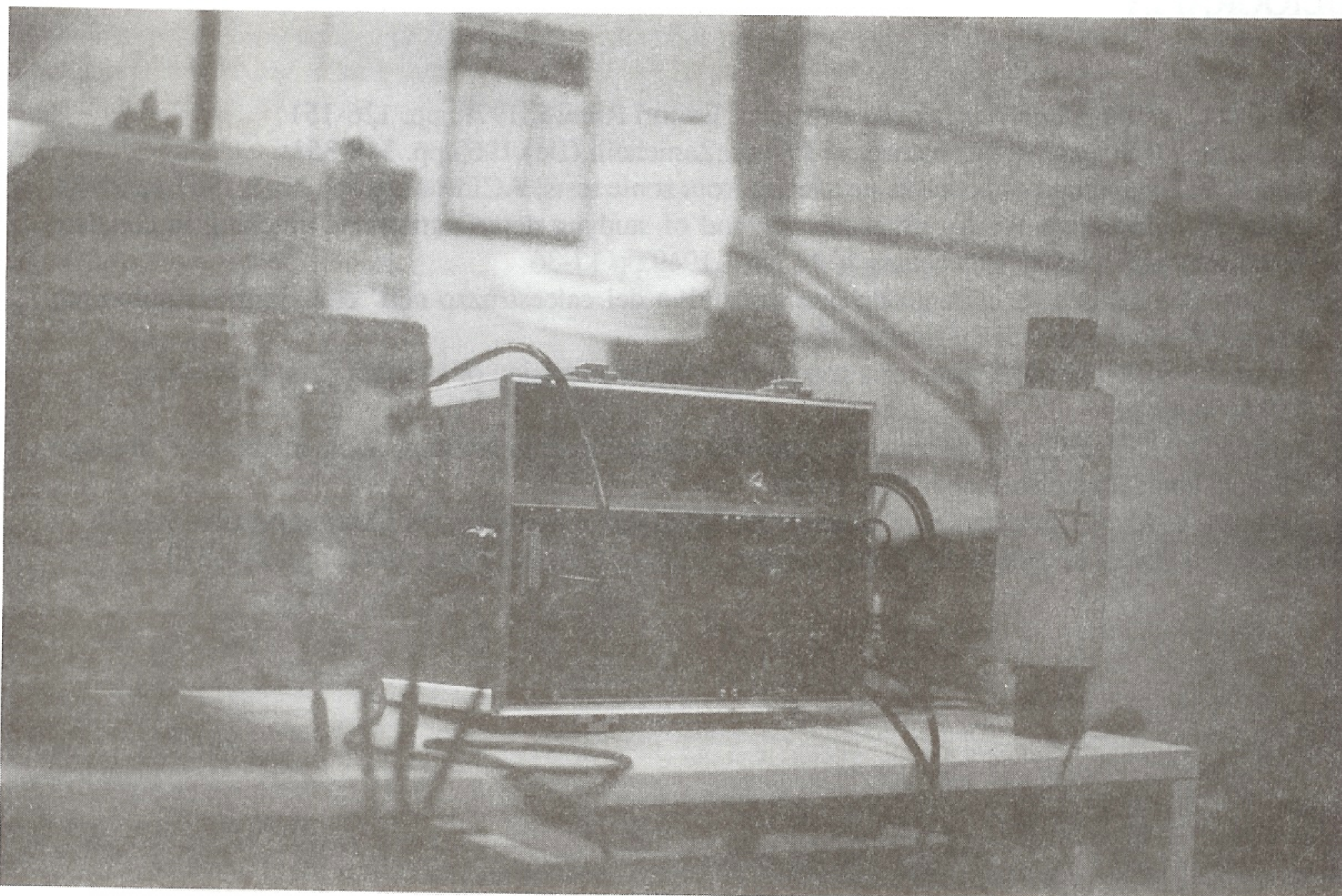


Foto 1. Attrezzatura di prova impiegata in cantiere.

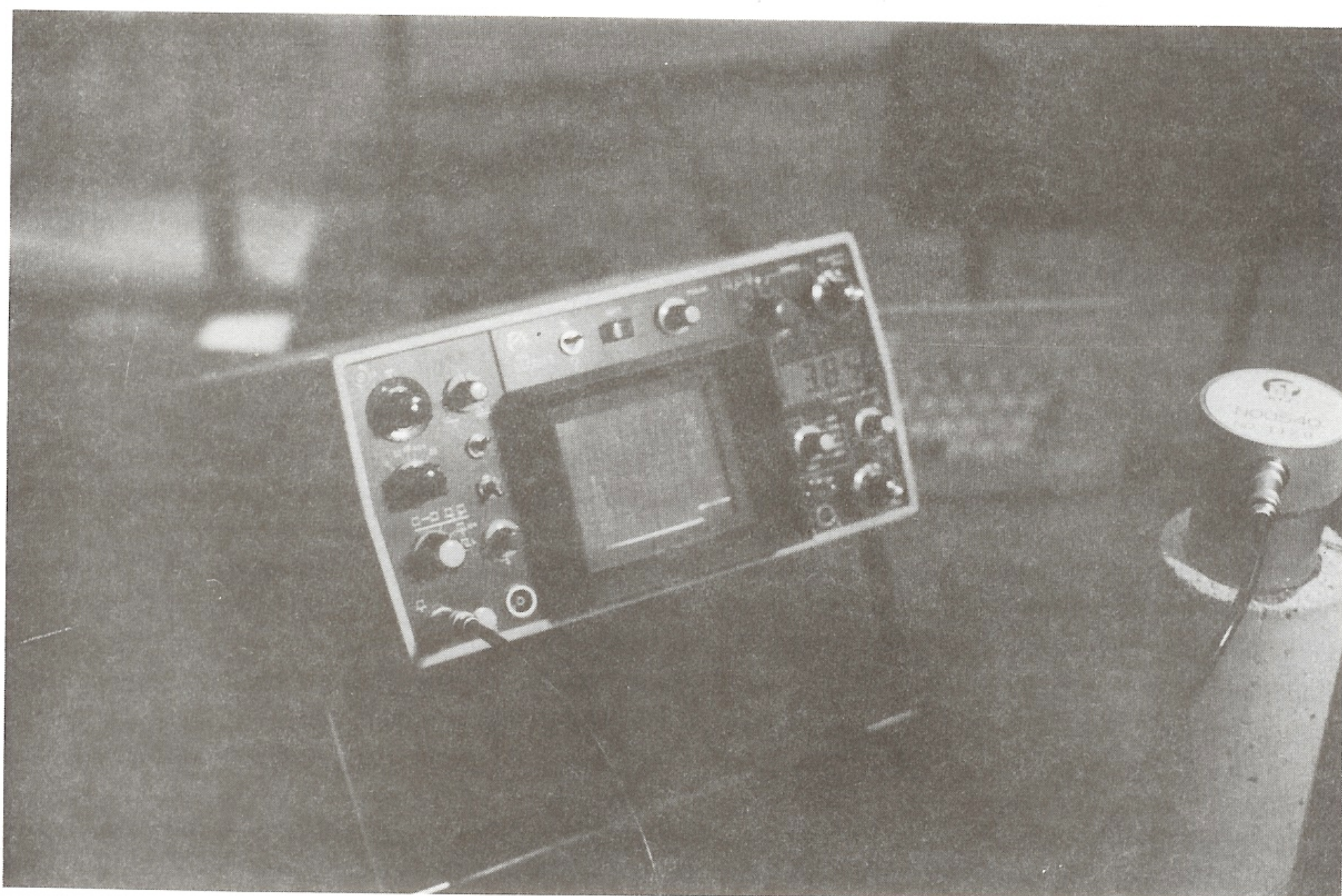


Foto 2. Attrezzatura di prova impiegata in laboratorio (Tecnica per riflessione)

BIBLIOGRAFIA

- [1] Landau L. - Lifshits E. : Teoria della elasticità; Editori Riuniti, 1979, pp. 126-151
- [2] Belluzzi O. : Scienza delle costruzioni IV vol.; Zanichelli (Bo), 1963, pp. 348-351
- [3] A.A.V.V: Evaluation of concrete properties from sonic tests; ACI Monograph No 2, 1967, pp. 27-34
- [4] Leslie J. - Cheesman W: An ultrasonic method of studying deterioration and cracking in concrete structures; ACI Journal, Proceeding V 46 No 1, 1949, pp 17-36
- [5] Pascale G. - Di Leo A. : Controllo non distruttivo del calcestruzzo nell' edilizia industrializzata; Atti del V° Congresso CTE Firenze, 1984
- [6] Tucker J. : Effect of dimension of a specimen upon the precision of strength data; Proceeding ASTM V.45, 1945
- [7] Bertola D. : Controllo non distruttivo di provini confezionati in malta plastica, mediante l' impiego di ultrasuoni; Rapporto Icite n 326, 1972
- [8] Malhotra V. M. : Testing hardened concrete. Nondestructive Methods; ACI Monograph No 9, 1976
- [9] Balan S. - Arcan M. : Essai des Constructions; Editions Eyrolles Paris, 1972, pp. 218-270