



STRUCTURA

STRUCTURA S.r.l.

Laboratorio di Prove su
Materiali da Costruzione

www.structurasrl.net



**STIMA DELLA RESISTENZA DEL CALCESTRUZZO NELL'ADEGUAMENTO
SISMICO. CORRELAZIONE SPERIMENTALE FRA PROVE DISTRUTTIVE E
PROVE NON DISTRUTTIVE.**

Ing. Vincenzo Sannuto

NEL PRECEDENTE INTERVENTO È STATO RICORDATO CHE LE NTC 2018 CONSENTONO DI SOSTITUIRE ALCUNE PROVE DISTRUTTIVE, **NON PIU' DEL 50% , CON IL TRIPLO DI PROVE NON DISTRUTTIVE, SINGOLE O COMBinate, **TARATE SU QUELLE DISTRUTTIVE.****

IN ALTRE PAROLE, LE NTC 2018 **VIETANO L'UTILIZZO DELLE CURVE, CHE TRASFORMANO IL RISULTATO DELLE PROVE NON DISTRUTTIVE IN RESISTENZA, FORNITE DAL PRODUTTORE DELLO STRUMENTO O CHE SI TROVANO NELLA LETTERATURA TECNICA SPECIFICA.**

I CALCOLI STATISTICI NECESSARI PER DETERMINARE, SE ESISTE, UNA RELAZIONE FRA PARAMETRI NON DISTRUTTIVI (I_r , V , F) E PARAMETRI DISTRUTTIVI (RESISTENZA CAROTE) RICHIEDONO LUNGHI E NOIOSISSIMI CALCOLI .

OTTIMIZZAZIONE DEL PROCESSO DIAGNOSTICO

AUTOMATIZZAZIONE DEL CALCOLO

PER VENIRE INCONTRO ALLE ESIGENZE OPERATIVE DEI PROGETTISTI NELL'ELABORAZIONE DEI DATI DI CANTIERE, È STATO SVILUPPATO UN FILE EXCEL DEDICATO ESCLUSIVAMENTE ALL'ANALISI DI REGRESSIONE FRA PROVE DISTRUTTIVE E PROVE NON DISTRUTTIVE

IL FILE EXCEL E' UTILIZZABILE RIVOLGENDOSI DIRETTAMENTE AL LABORATORIO STRUTTURALE

LA STRUTTURA DEL CALCOLO

L'organizzazione modulare del file Excel

Inserimento dei parametri non distruttivi e delle resistenze delle carote di riferimento.

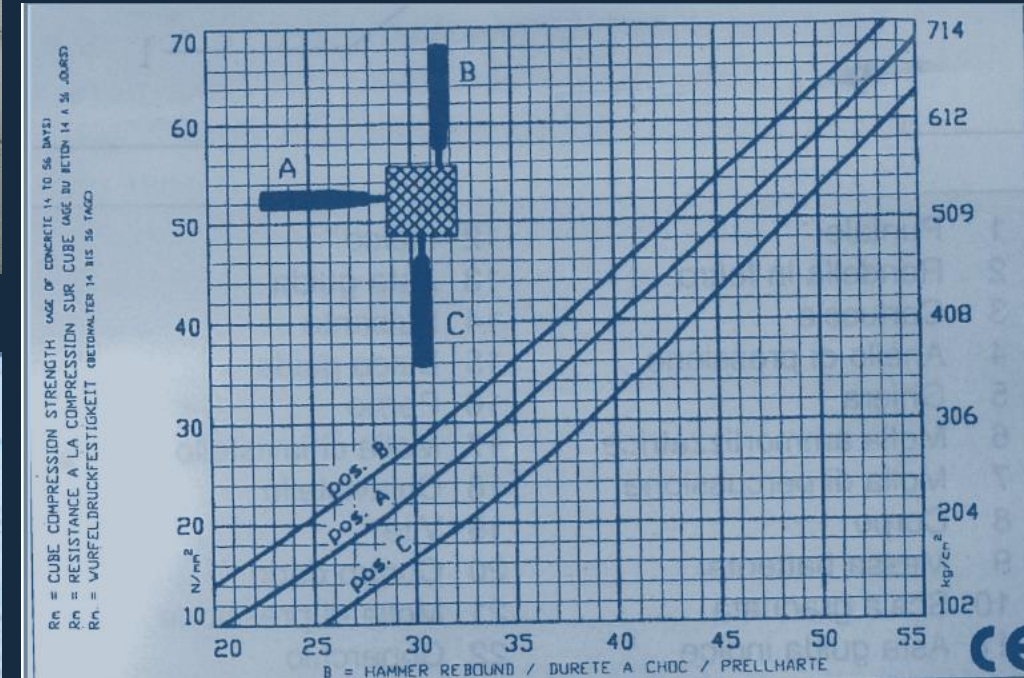
Analisi statistica ANOVA

Generazione automatica dei risultati e dei grafici di calibrazione.

ESEMPIO PRATICO DI CALIBRAZIONE

RESISTENZA A COMPRESSIONE (CAROTE) – INDICE DI RIMBALZO SCLEROMETRICO

	Resistenza della carota [N/mm ²]	Indice di rimbalzo sclerometrico
Carota	R	Ir
1	24,5	32
2	23,0	34
3	14,0	27
4	14,5	27
5	21,0	32
6	14,5	28
7	13,5	27
8	14,0	28
9	15,5	30
10	16,5	30



LA LEGGE DI REGRESSIONE SPERIMENTALE CHE LEGA L'INDICE DI RIMBALZO SCLEROMETRICO I_r CON LA RESISTENZA DEL CALCESTRUZZO E' UNA LEGGE MATEMATICA DI POTENZA DEL TIPO :

$$R = a I_r^b$$

PER DETERMINARE LE COSTANTI SPERIMENTALI "a" E "b" SI APPLICA IL
METODO DELLA RETTA DEI MINIMI QUADRATI.
 ESSENDO QUEST'ULTIMO UN ALGORITMO STRETTAMENTE LINEARE, È NECESSARIO
 RICONDURRE PRELIMINARMENTE L'EQUAZIONE DI POTENZA (NON LINEARE) IN UNA
 FORMA LINEARE ATTRAVERSO L'USO DEI LOGARITMI.

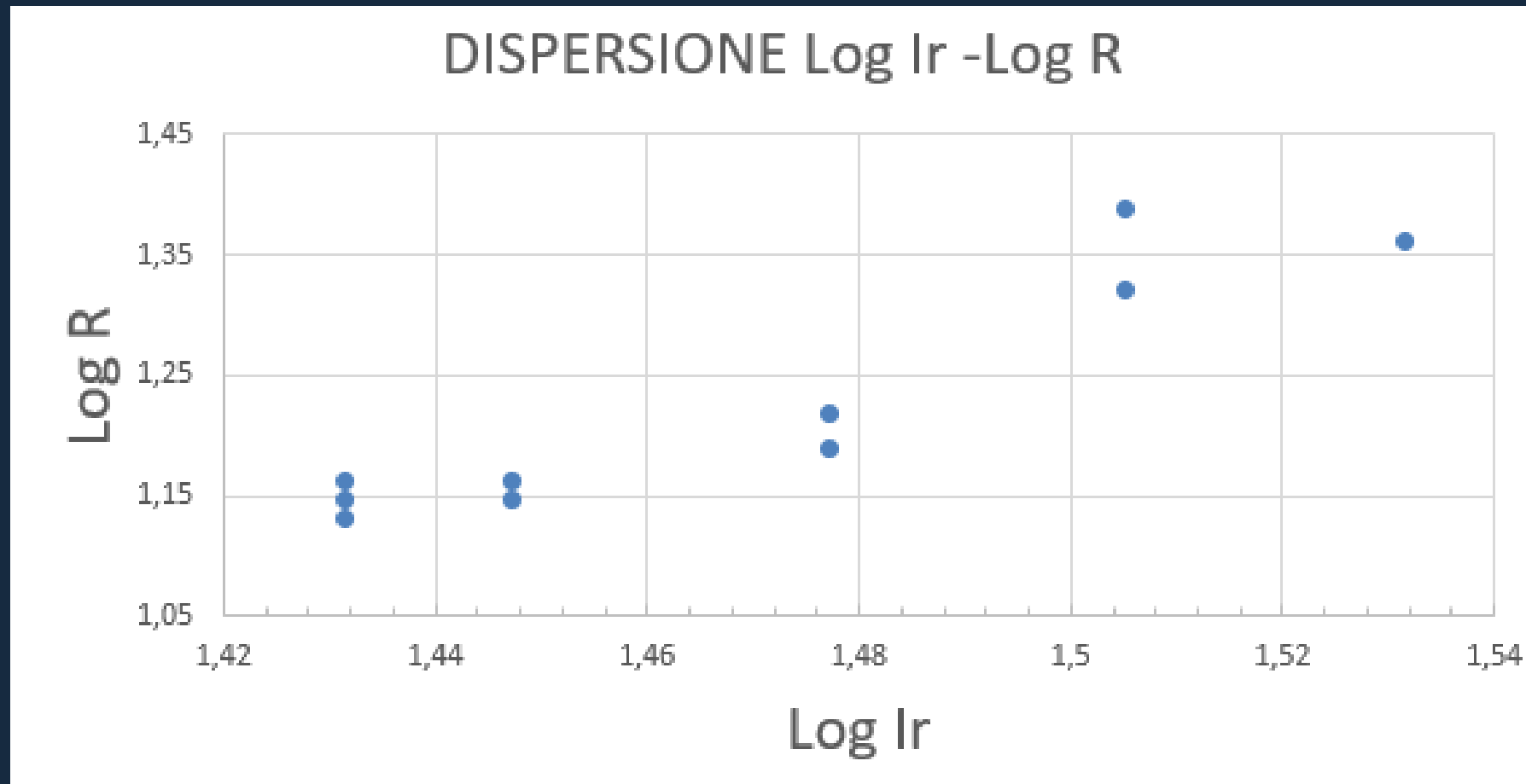
	Resistenza della carota [N/mm ²]	Indice di rimbalzo sclerometrico		Trasformazione dei dati in log ₁₀	
Carota	R	Ir		Log R	Log Ir
1	24,5	32		1,389166084	1,505149978
2	23,0	34		1,361727836	1,531478917
3	14,0	27		1,146128036	1,431363764
4	14,5	27		1,161368002	1,431363764
5	21,0	32	→	1,322219295	1,505149978
6	14,5	28		1,161368002	1,447158031
7	13,5	27		1,130333768	1,431363764
8	14,0	28		1,146128036	1,447158031
9	15,5	30		1,190331698	1,477121255
10	16,5	30		1,217483944	1,477121255

$$R = a I_r^b$$

LINEARIZZAZIONE : $\log_{10}(R) = \log_{10}(a) + b \log_{10}(Ir) \longrightarrow Y = A + b \cdot X$

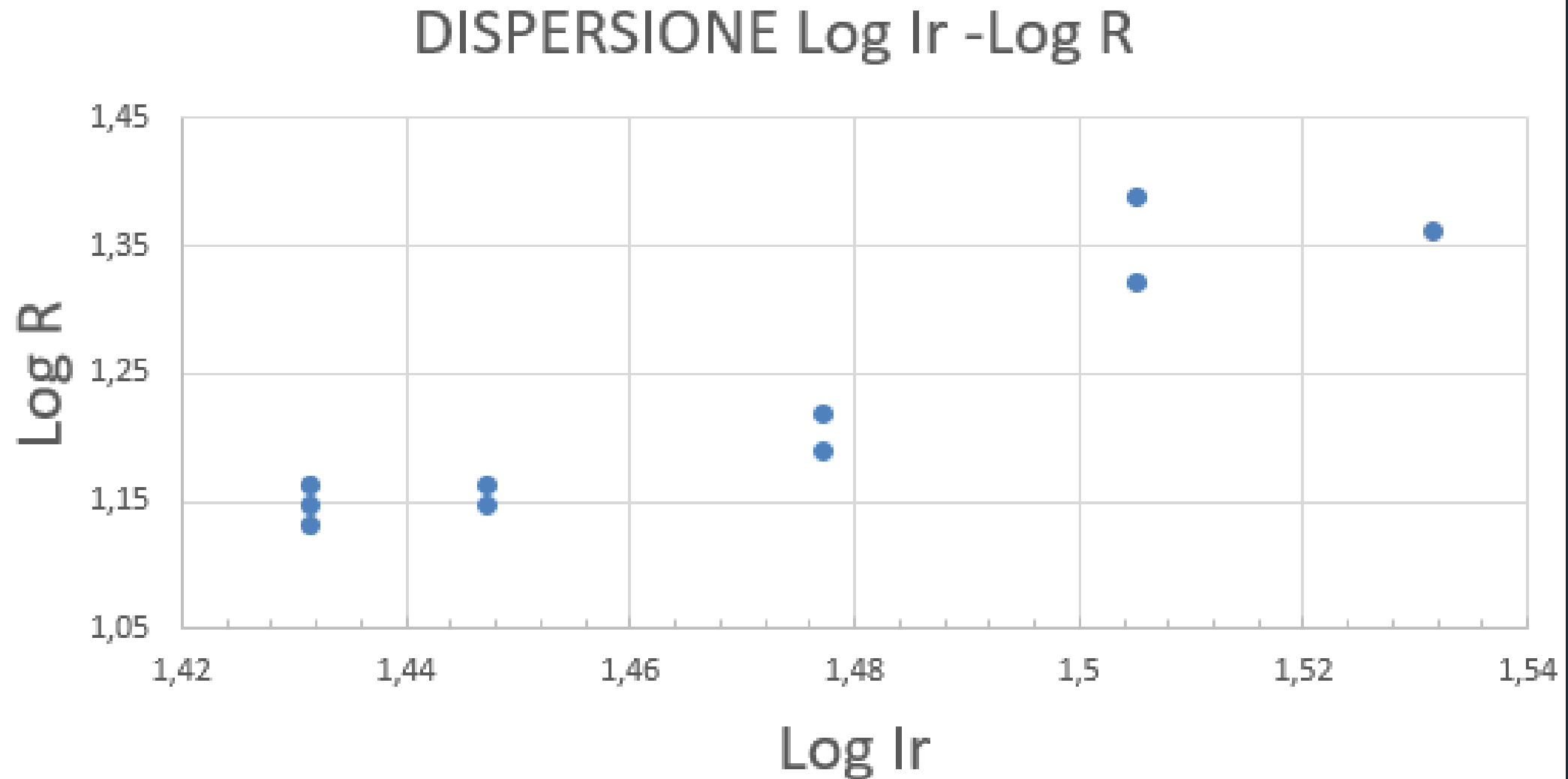
DOVE : $Y = \log_{10}(R) \quad A = \log_{10}(a) \quad X = \log_{10}(Ir)$

DAL GRAFICO SI INTUISCE CHIARAMENTE CHE ALL'AUMENTARE DI I_r AUMENTA R



IL FOCUS DEL NOSTRO LAVORO E' DETERMINARE L'EQUAZIONE DI UNA RETTA CHE SPIEGA COME VARIA R (VARIABILE DIPENDENTE) AL VARIARE DI I_r (VARIABILE INDIPENDENTE)

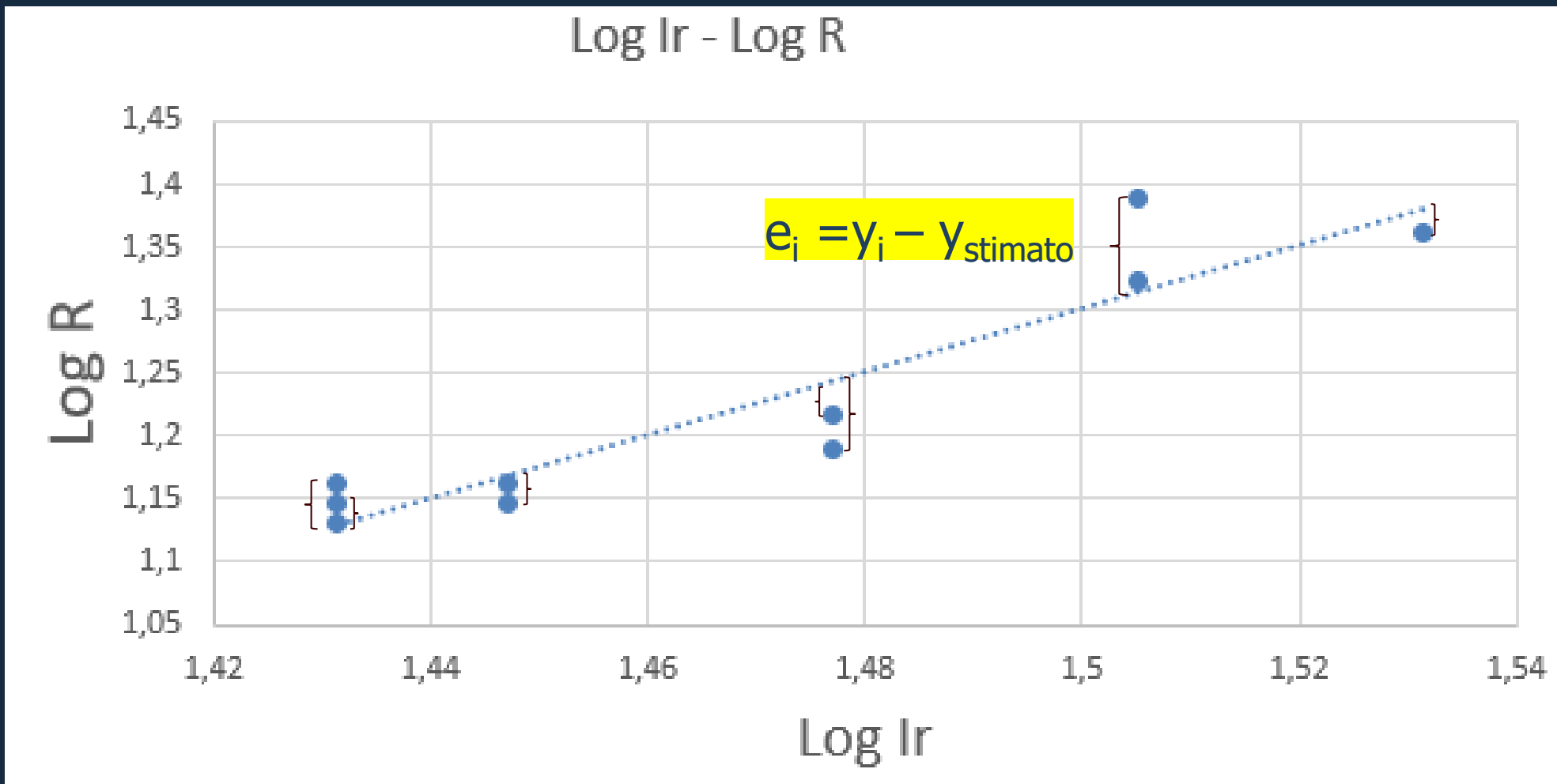
OVVERO, TROVARE LA RETTA CHE MEGLIO SI ADATTA ALLA DISPERSIONE DELLE COPPIE (Log Ir, Log R)



LA REGRESSIONE E' UN METODO STATISTICO CHE CI AIUTA A COMPRENDERE COME UNA VARIABILE DIPENDENTE VARIA AL VARIARE DI UNA VARIABILE INDIPENDENTE MEDIANTE UNA FUNZIONE MATEMATICA.

OVVERO, NEL NOSTRO ESEMPIO, COME VARIA LA RESISTENZA A COMPRESSIONE DEL CALCESTRUZZO AL VARIARE DELL'INDICE DI RIMBALZO SCLEROMETRICO I_R .

LA CORRELAZIONE, INVECE, MISURA L'INTENSITA' DEL LEGAME DI INTERDIPENDENZA FRA LE VARIABILI.



LA RETTA CHE MEGLIO SI ADATTA ALLA DISPERSIONE DEI PUNTI E' LA RETTA CHE RENDE MINIMO LA SOMMA

$$\sum (y_i - y_{\text{stimato}})^2 = \sum (e_i)^2 = \min$$

LANCIANDO L'APPOSITA MACRO IN VBA IL SOFTWARE FORNISCE L'ANALISI STATISTICA ANOVA DEI DATI INSERITI.

Regression Statistics							
Multiple R	0,9306551						
R Square	0,8661189						
Adjusted R Square	0,8493837						
Standard Error	0,0378929	= Standard Deviation of Residuals					
Observations	10						
ANOVA							
	df	SS	MS	F	Significance (p-value) for F		
Regression	1	0,074313	0,074313	51,75449	9,3E-05		
Residual	8	0,011487	0,001436	= Variance of Residuals			
Total	9	0,0858	0,009533	= Variance of Dependent Variable			
Dependent (Criterion) Variable: Log R	Coef-ficients	Standard Error	t Stat	P-value (2-tails)	Lower 95%	Upper 95%	X Values for Prediction
Intercept	-2,4547352	0,511307	-4,80091	0,001354	-3,63381	-1,27566	
Log Ir	2,5042586	0,348101	7,19406	9,3E-05	1,701536	3,306981	1,477121255
Confidence Level	Confidence and Prediction Intervals for Log R						
0,95	Predicted Y	Standard Error	Lower 95%	Upper 95%			
Confidence Interval	1,2443584	0,012358	1,215861	1,272855			
Prediction Interval	1,2443584	0,039857	1,152448	1,336269			

Coefficiente di determinazione (CORRELAZIONE)
 $R^2=0,8661$

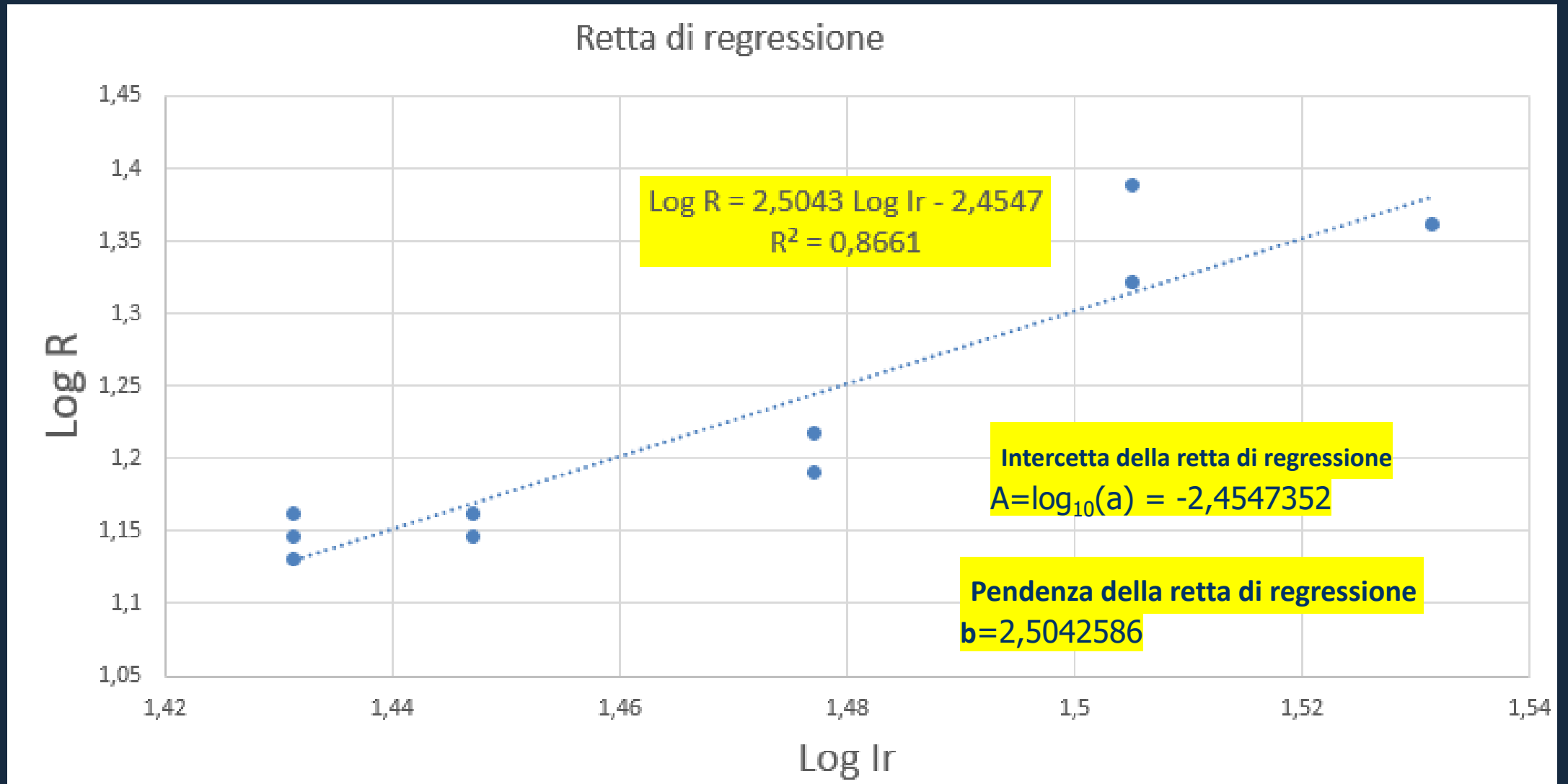
Intercetta della retta di regressione
 $A=\log_{10}(a) = -2,4547352$

Pendenza della retta di regressione
 $b=2,5042586$

Equazione della retta di regressione media scritta in forma logaritmica $\text{Log } R_{\text{stimata}}$
 $= -2,4547352 + 2,5042586 \log \text{Ir}$

Rappresentazione grafica dell'Equazione della retta di regressione media scritta in forma logaritmica

$$\text{Log } R_{\text{stimata}} = -2,4547352 + 2,5042586 \log I_r$$



L'INCERTEZZA DELLA RETTA STIMATA

La retta di regressione media che abbiamo stimato

$$\text{Log } R_{\text{stimata}} = -2,4547352 + 2,5042586 \log I_r$$

si basa solo su 10 campioni, non è la verità assoluta dell'intera zona di indagine.

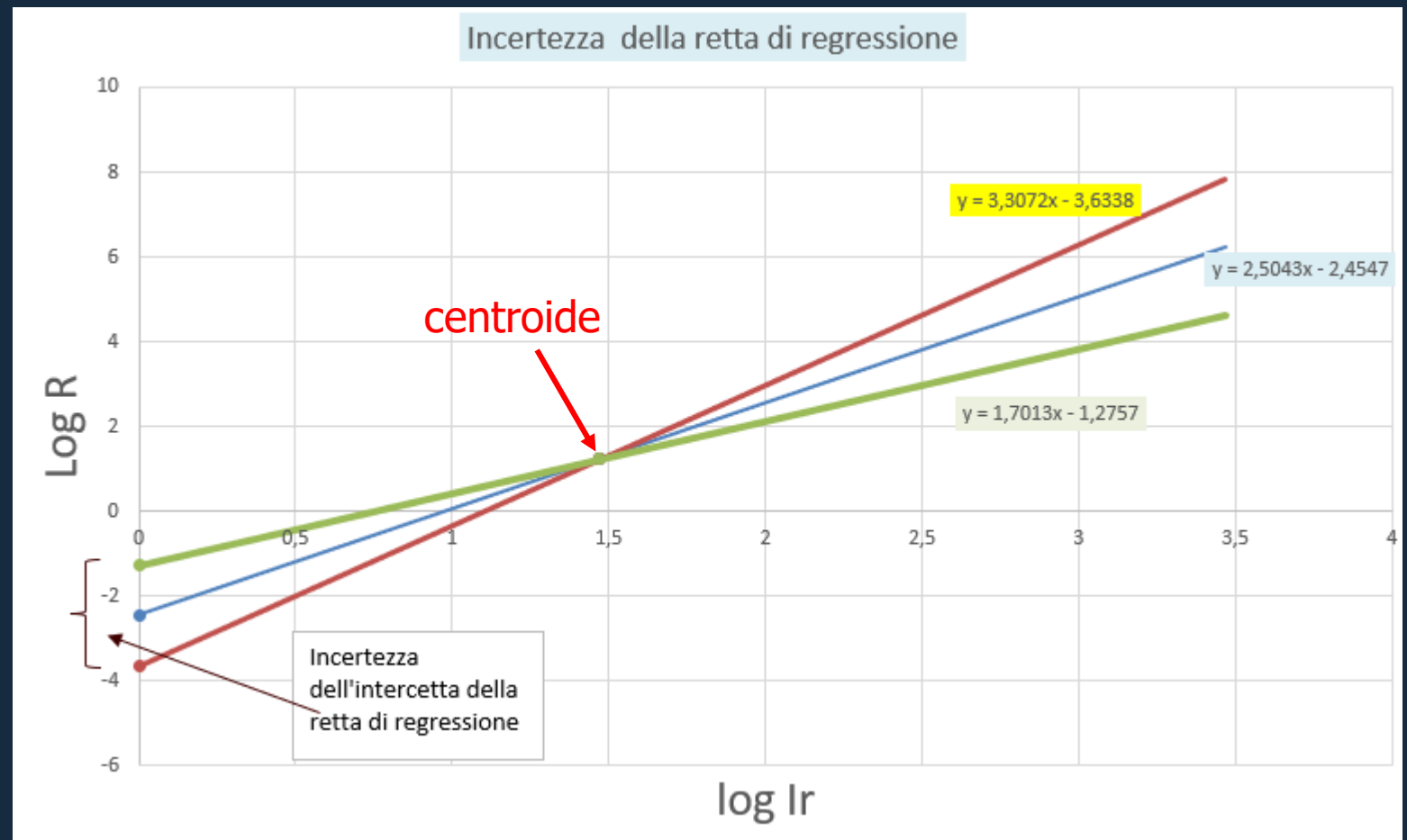
I coefficienti A e b che abbiamo estratto sono stime su un campione ristretto, quindi, affetti da un errore standard (incertezza).

Per questo motivo, il software non si ferma alla linea media, ma calcola l'oscillazione dei parametri A e b.

L'INCERTEZZA DELL' INTERCETTA "A"

Dependent (Criterion) Variable: Log R	Coef- ficients	Standard Error	t Stat	P-value (2-tails)	Lower 95%	Upper 95%
Intercept	-2,4547352	0,511307	-4,80091	0,001354	-3,63381	-1,27566

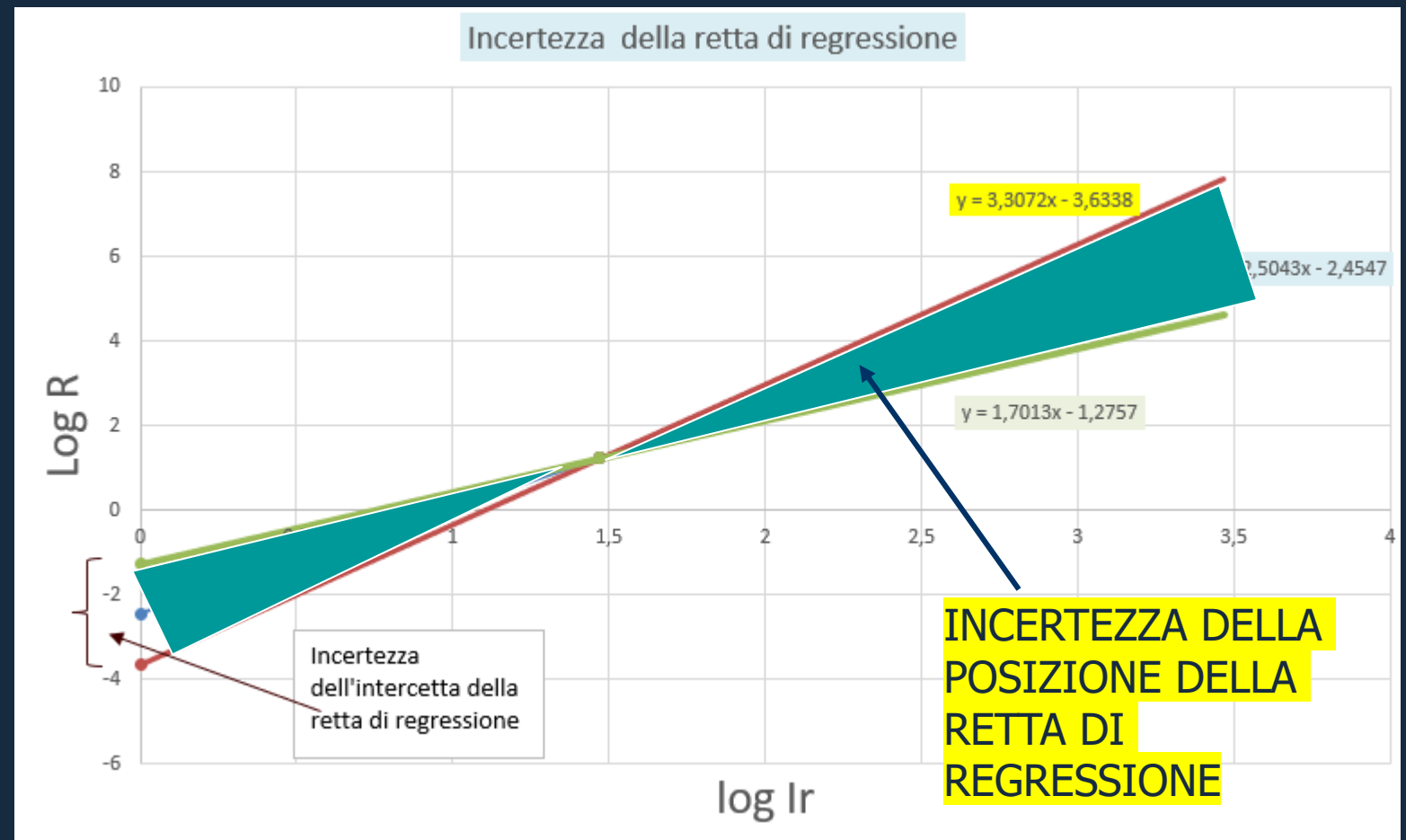
L'analisi statistica specifica del campione esaminato ci dice che l'intercetta della retta di regressione stimata (-2,4547352) può variare fra -3,63381 e -1,27566



INCERTEZZA DELLA POSIZIONE DELLA RETTA DI REGRESSIONE

Dependent (Criterion) Variable: Log R	Coef- ficients	Standard Error	t Stat	P-value (2-tails)	Lower 95%	Upper 95%
Intercept	-2,4547352	0,511307	-4,80091	0,001354	-3,63381	-1,27566

CON LA PROBABILITA' DEL 95% LA RETTA DI REGRESSIONE E' CONTENUTA NELLA REGIONE IN VERDE.



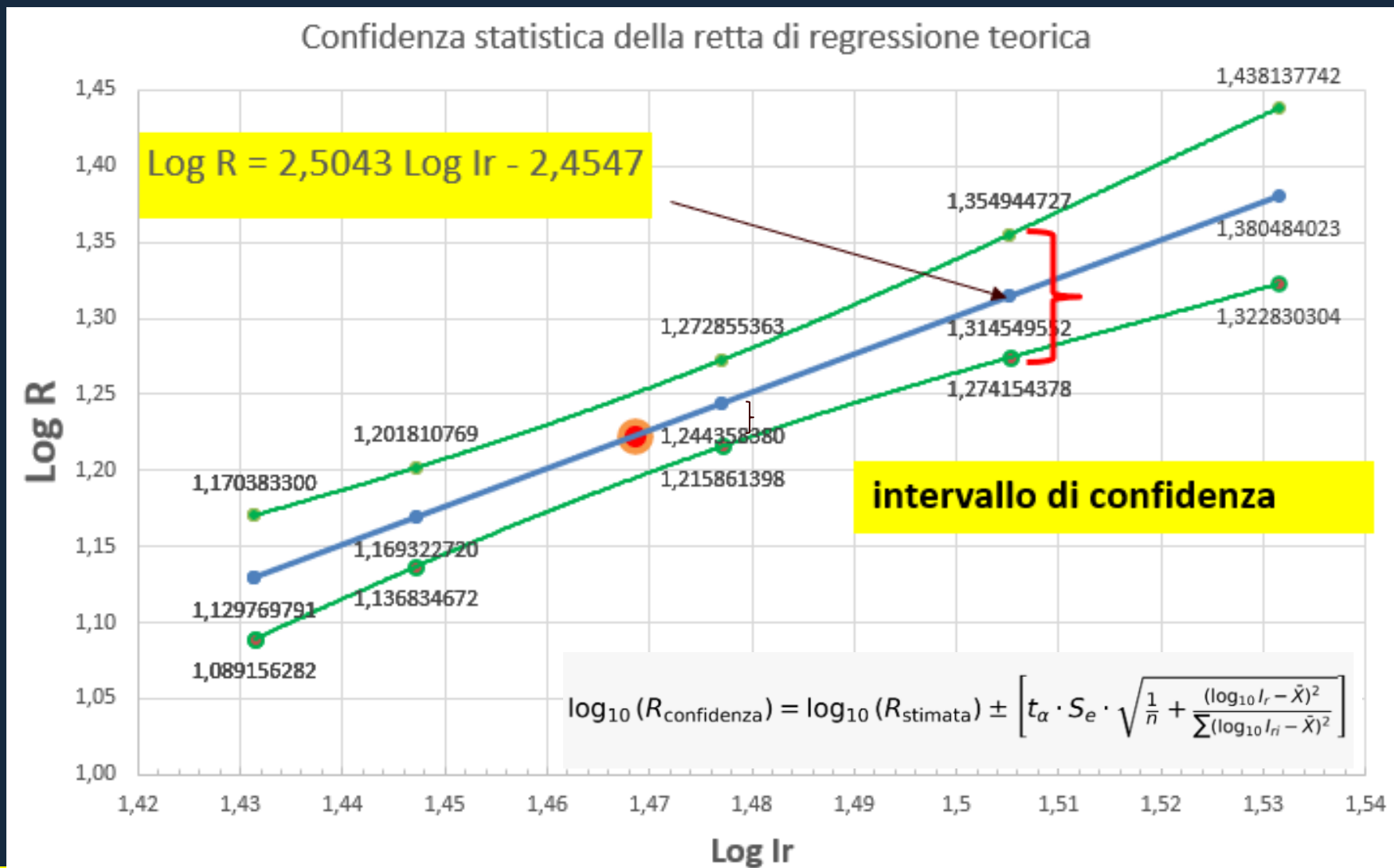
Calcolo analitico puntuale dell'intervallo di confidenza della retta di regressione stimata.

$$\log_{10} (R_{\text{confidenza}}) = \log_{10} (R_{\text{stimata}}) \pm \left[t_{\alpha} \cdot S_e \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(\log_{10} I_r - \bar{X})^2}{\sum (\log_{10} I_{ri} - \bar{X})^2}} \right]$$

- $\log_{10}(R_{\text{stimata}})$ = Valore centrale della retta di regressione d'opera.
- $t_{\alpha} = 2,306004$ (Moltiplicatore probabilistico di Student al 95% bilaterale).
- $S_e = 0,0378929$ (Standard Error della Regressione / Deviazione Standard dei Residui).
- $n = 10$ (Numero di pilastri campionati per la taratura).
- $\bar{X} = 1,468443$ (Centroide o baricentro dei dati dell'Indice di Rimbalzo I_r).

Il software provvede a restituire per ogni singolo punto l'intervallo di confidenza della retta di regressione e a tracciare la banda d'incertezza.

Rappresentazione grafica dell'Equazione della retta di regressione e del relativo intervallo di confidenza (curva verde).



L'intervallo di confidenza quantifica l'incertezza campionaria legata alla posizione nel piano della retta media della zona di indagine.

*Fino a questo momento abbiamo analizzato l'incertezza della **retta di regressione media**. Abbiamo individuato dove si posiziona il modello nello spazio d'insieme della zona di indagine.*

*Ma ora sorge il vero problema pratico del progettista strutturale: quando mi sposto su un **nuovo pilastro cieco** del cantiere, del quale conosco solo l'indice di rimbalzo sclerometrico, la mia formula mi restituirà un valore medio .*

Come faccio a proteggere il calcolo dall'eterogeneità locale del calcestruzzo (la carbonatazione, un nido di ghiaia, un difetto di getto, un errore dello strumento in quel punto esatto) ?

*La statistica d'insieme non mi basta più. Ho bisogno di uno **scudo di sicurezza per il singolo valore futuro**. È qui che entra in gioco l'**Intervallo di PREDIZIONE** .*

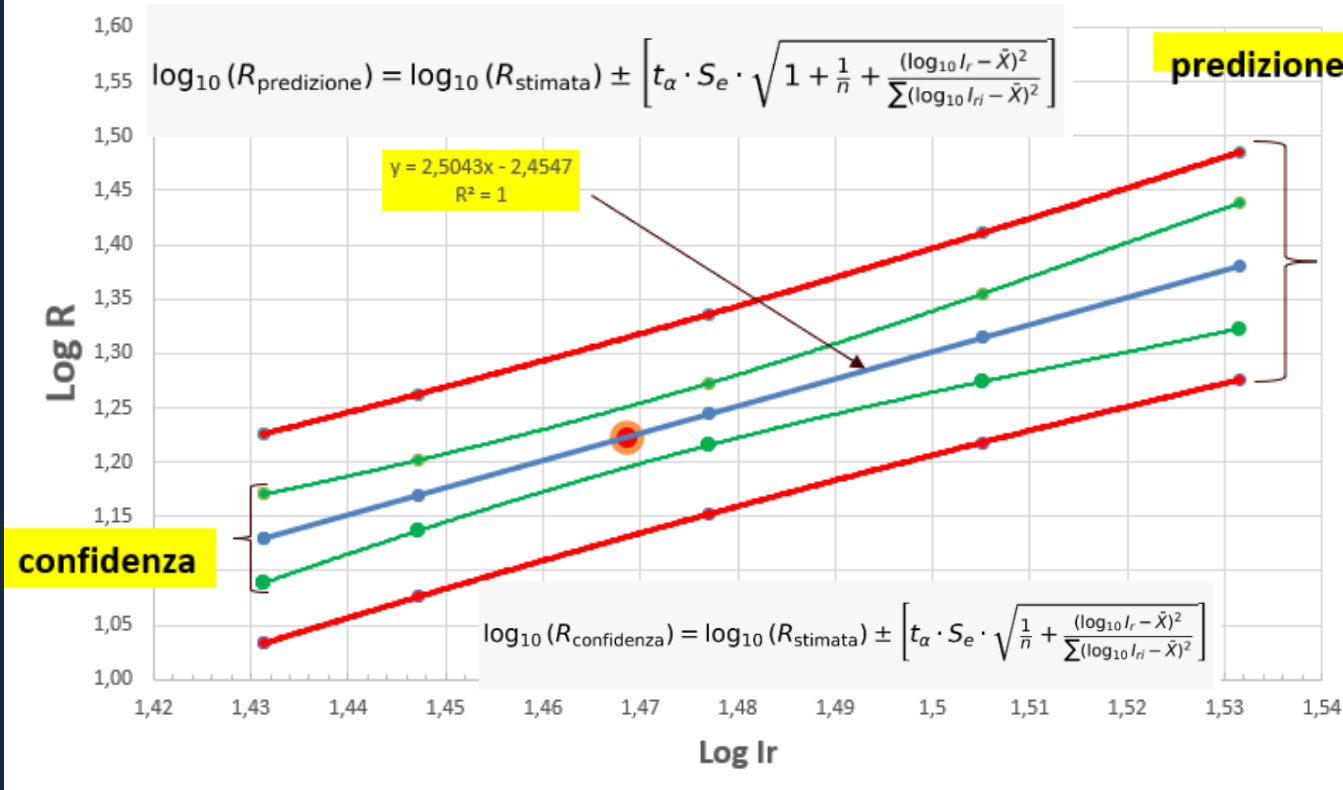
Calcolo analitico puntuale dell' **INTERVALLO DI PREDIZIONE** del singolo valore.

$$\log_{10} (R_{\text{predizione}}) = \log_{10} (R_{\text{stimata}}) \pm \left[t_{\alpha} \cdot S_e \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(\log_{10} I_r - \bar{X})^2}{\sum (\log_{10} I_{ri} - \bar{X})^2}} \right]$$

- $\log_{10}(R_{\text{stimata}})$ = Valore centrale della retta di regressione d'opera.
- $t_{\alpha} = 2,306004$ (Moltiplicatore probabilistico di Student al 95% bilaterale con 8 gradi di libertà).
- $S_e = 0,0378929$ (Standard Error della Regressione / Deviazione Standard dei Residui).
- $n = 10$ (Numero di pilastri campionati per la taratura).
- $\bar{X} = 1,468443$ (Centroide o baricentro dei dati dell'Indice di Rimbalzo I_r).
- Il termine "**1 +**" sotto radice: rappresenta matematicamente la varianza del singolo residuo. Isola l'errore locale del materiale nel punto di prova, allargando l'intervallo a tutela della sicurezza strutturale.

Rappresentazione grafica dell'equazione della retta di regressione e del relativo intervallo di PREDIZIONE (curve di colore rosso)

2							
3	Regression Statistics						
4	Multiple R	0,9306551					
5	R Square	0,8661189					
6	Adjusted R Square	0,8493837					
7	Standard Error	0,0378929	= Standard Deviation of Residuals				
8	Observations	10					
9							
10	ANOVA						
11		df	SS	MS	F	Significance (p-value) for F	
12	Regression	1	0,074313	0,074313	51,75449	9,3E-05	
13	Residual	8	0,011487	0,001436	= Variance of Residuals		
14	Total	9	0,0858	0,009533	= Variance of Dependent Variable		
15							
16	Dependent (Criterion) Variable: Log R	Coef-ficients	Standard Error	t Stat	P-value (2-tails)	Lower 95%	Upper 95%
17	Intercept	-2,4547352	0,511307	-4,80091	0,001354	-3,63381	-1,27566
18	Log Ir	2,5042586	0,348101	7,19406	9,3E-05	1,701536	3,306981
19							1,477121255
20	Confidence Level	Confidence and Prediction Intervals for Log R					
21	0,95	Predicted Y	Standard Error	Lower 95%	Upper 95%		
22	Confidence Interval	1,2443584	0,012358	1,215861	1,272855		
23	Prediction Interval	1,2443584	0,039857	1,152448	1,336269		
24							



L'intervallo di predizione definisce il margine di sicurezza necessario per stimare la resistenza del singolo punto non campionato con carote.

Riconversione del Modello Statistico dalla Forma Logaritmica alla Legge di Potenza Reale

Equazione della retta di regressione scritta in forma logaritmica :

$$\text{Log } R_{\text{stimata}} = -2,4547352 + 2,5042586 \log I_r$$

Per tornare alla formula originaria di potenza

$$a = 10^{-2,4547352} = 0,00351 \quad b = 2,5042586$$

La nostra equazione di calibrazione personalizzata per questo calcestruzzo è quindi:

$$R_{\text{stimata}} = 0,00351 I_r^{2,5042586} \text{ [MPa]}$$

Considerazioni sulla curva di regressione

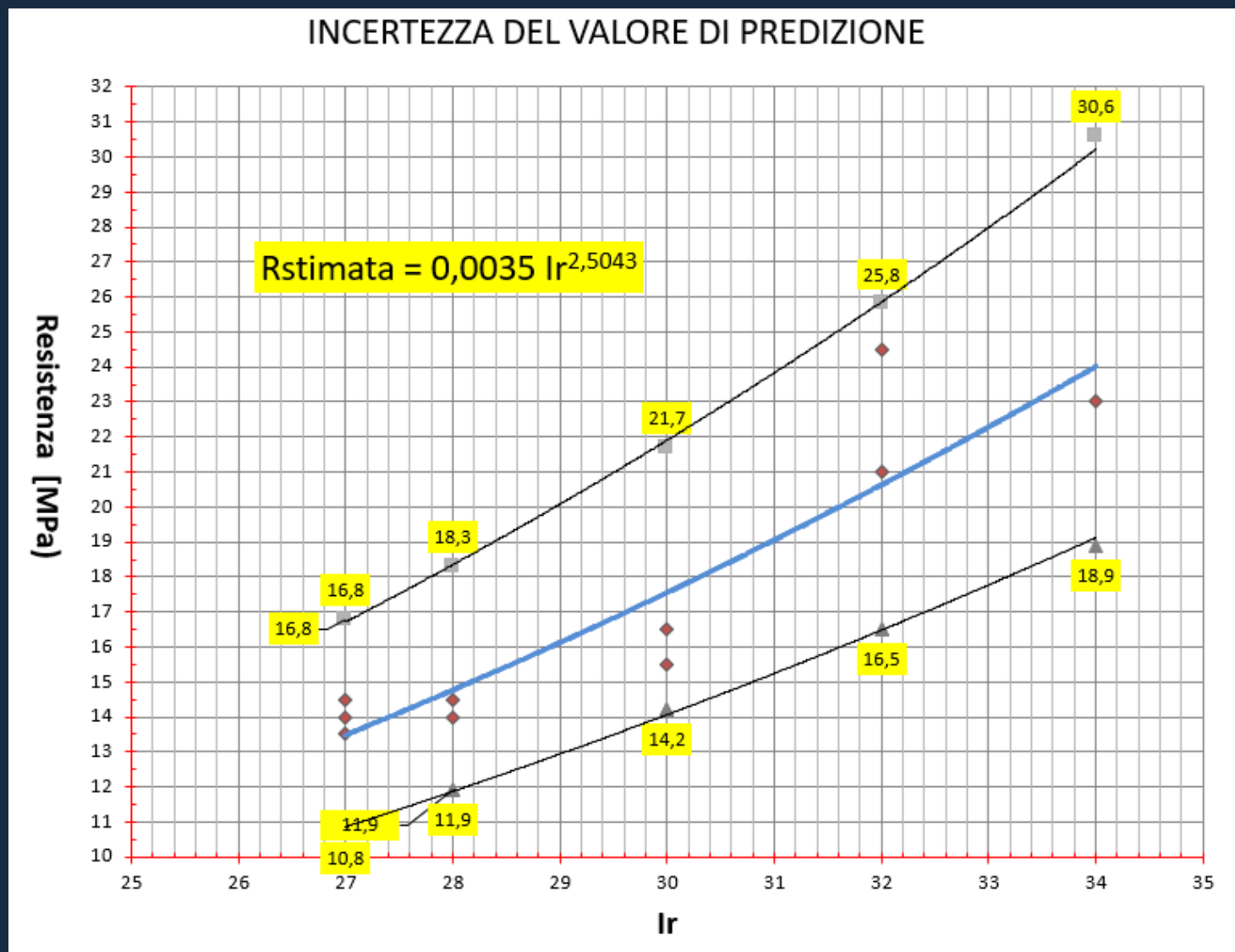
$$R_{\text{stimata}} = 0,00351 I_r^{2,5042586}$$

L'equazione della curva di regressione non è VANGELO.

Ogni stima si porta dietro un'incertezza

DATI SPERIMENTALI			Intervallo di incertezza sulla resistenza del singolo punto		Intervallo di confidenza sul modello	
I _r	R _{carota} [MPa]	R _{stimata} [MPa]	R _{min} [MPa]	R _{max} [MPa]	R _{min} [MPa]	R _{max} [MPa]
32,0	24,5	20,6	16,5	25,8	18,8	22,6
34,0	23,0	24,0	18,9	30,6	21,0	27,4
27,0	14,0	13,5	10,8	16,8	12,3	14,8
27,0	14,5	13,5	10,8	16,8	12,3	14,8
32,0	21,0	20,6	16,5	25,8	18,8	22,6
28,0	14,5	14,8	11,9	18,3	13,7	15,9
27,0	13,5	13,5	10,8	16,8	12,3	14,8
28,0	14,0	14,8	11,9	18,3	13,7	15,9
30,0	15,5	17,6	14,2	21,7	16,4	18,7
30,0	16,5	17,6	14,2	21,7	16,4	18,7

Rappresentazione grafica dell'Equazione della CURVA di TARATURA del modello e del relativo intervallo di PREDIZIONE



USO DELLA CURVA DI TARATURA SPERIMENTALE SUGLI ELEMENTI STRUTTURALI NON INTERESSATI DAL CAROTAGGIO

Si sono scelti altri 10 elementi strutturali su cui eseguire solo prove sclerometriche.

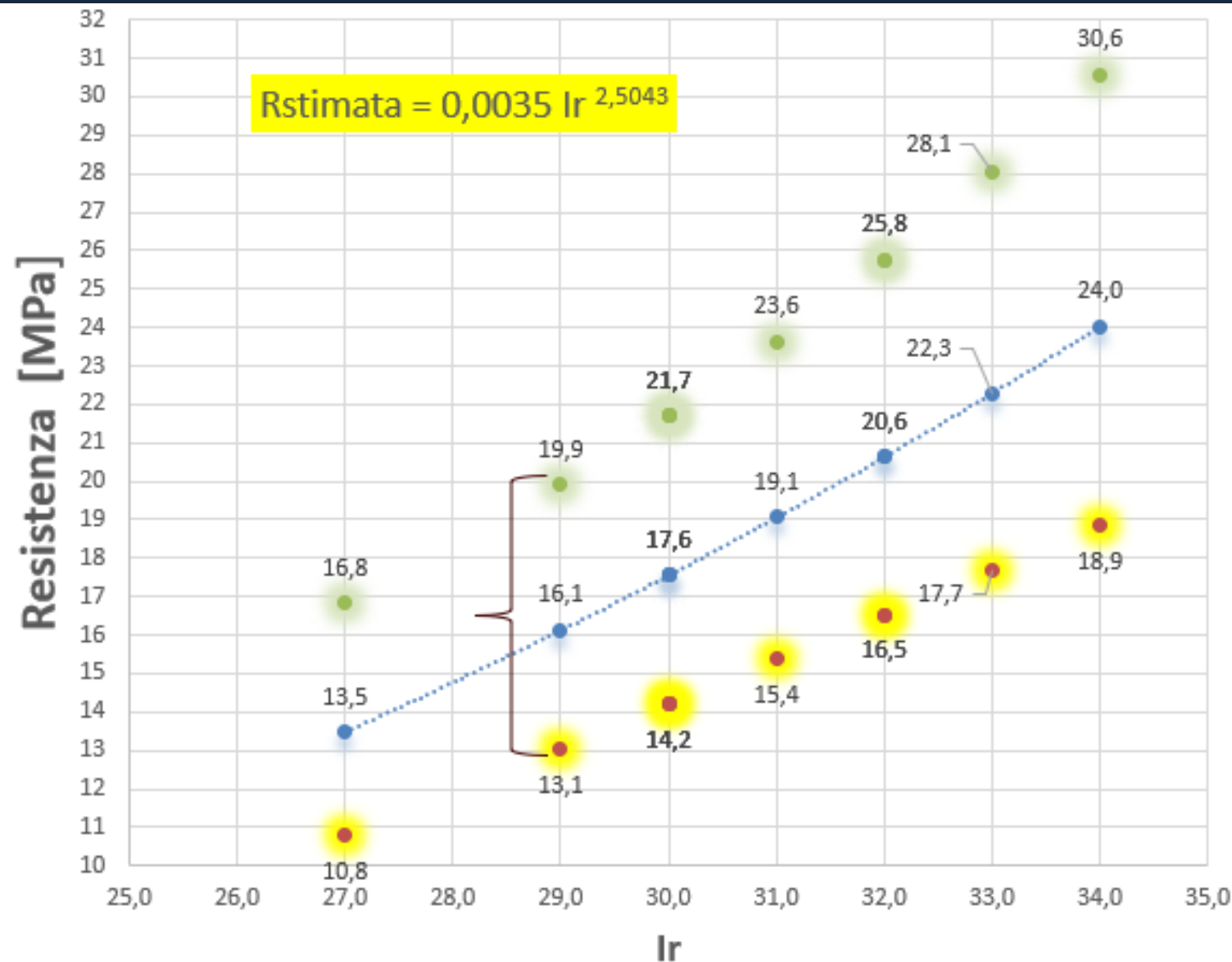
Elemento strutturale	Ir
1	32
2	30
3	29
4	31
5	27
6	32
7	30
8	33
9	30
10	34

USO DELLA CURVA DI REGRESSIONE SPERIMENTALE SUGLI ELEMENTI STRUTTURALI NON INTERESSATI DAL CAROTAGGIO

Per ogni singolo valore di I_r il software calcola il valore della resistenza stimata sulla curva media e le relative incertezze.

		INCERTEZZA DEL SINGOLO VALORE		INCERTEZZA RETTA DI REGRESSIONE	
I_r	$R_{stimata}$ [MPa]	R_{min} [MPa]	R_{max} [MPa]	R_{min} [MPa]	R_{max} [MPa]
32,0	20,6	16,5	25,8	18,8	22,6
30,0	17,6	14,2	21,7	16,4	18,7
29,0	16,1	13,1	19,9	15,1	17,2
31,0	19,1	15,4	23,6	17,7	20,6
27,0	13,5	10,8	16,8	12,3	14,8
32,0	20,6	16,5	25,8	18,8	22,6
30,0	17,6	14,2	21,7	16,4	18,7
33,0	22,3	17,7	28,1	19,9	24,9
30,0	17,6	14,2	21,7	16,4	18,7
34,0	24,0	18,9	30,6	21,0	27,4

RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DEGLI ULTERIORI 10 RISULTATI (PILASTRI NON CAROTATI)



ATTENZIONE !!!!!

LA CURVA DI **PREDIZIONE INFERIORE** CI GARANTISCE, CON PROBABILITÀ DEL 95%, CHE IL VALORE VERO DELLA RESISTENZA SIA MAGGIORE DEL VALORE LETTO SU DI ESSA.

"MENTRE LA CURVA DI REGRESSIONE CI ESPONE AL RISCHIO, CON PROBABILITÀ DEL 50%, CHE IL VALORE VERO DELLA RESISTENZA SIA INFERIORE AL VALORE LETTO SU DI ESSA."

SINTESI DEI RISULTATI OTTENUTI UTILIZZANDO LA CURVA DI TARATURA

Elemento strutturale	lr	Rstimata sulla curva media [MPa]	Resistenza stimata sulla curva di predizione inferiore [MPa]
1	32	20,6	16,5
2	30	17,6	14,2
3	29	16,1	13,1
4	31	19,1	15,4
5	27	13,5	10,8
6	32	20,6	16,5
7	30	17,6	14,2
8	33	22,3	17,7
9	30	17,6	14,2
10	34	24,0	18,9
	Media	18,9	15,1

LA CURVA DI **PREDIZIONE INFERIORE** CI GARANTISCE, CON PROBABILITÀ DEL 95%, CHE IL VALORE VERO DELLA RESISTENZA SIA MAGGIORE DEL VALORE LETTO SU DI ESSA.

"MENTRE LA CURVA DI REGRESSIONE CI ESPONE AL RISCHIO, CON PROBABILITÀ DEL 50%, CHE IL VALORE VERO DELLA RESISTENZA SIA INFERIORE AL VALORE LETTO SU DI ESSA."

COSA IMPONE LA NORMA UNI EN 13791:2019

NORMA EUROPEA	Valutazione della resistenza a compressione in sito nelle strutture e nei componenti prefabbricati di calcestruzzo	UNI EN 13791
		SETTEMBRE 2019
	Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components	Versione italiana dell'aprile 2020

8

**STIMA DELLA RESISTENZA A COMPRESSIONE PER LA VALUTAZIONE
STRUTTURALE DI UNA STRUTTURA ESISTENTE**

Stima della resistenza a compressione *in sito* in una posizione specifica

- (1) Non è sicuro utilizzare la correlazione media per stimare la resistenza a compressione *in sito* in una posizione specifica in quanto vi è una probabilità del 50 % che la resistenza effettiva sia inferiore alla resistenza stimata. Di conseguenza, la resistenza a compressione *in sito* in una posizione specifica deve essere

determinata come il valore del risultato di prove indirette convertito al valore sulla curva limite inferiore dell'intervallo di previsione per un livello significativo α del 5 % (prova unilaterale).

- (2) Per scopi di valutazione strutturale, la resistenza a compressione *in sito* stimata in una posizione di prova specifica ($f_{c, is, est}$) è calcolata utilizzando la formula seguente:

$$f_{c, is, est} = f_{c, is, reg} - t_{(0,05, n-2)} s_c \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_{i, cor} - \bar{x})^2}} \quad (10)$$

dove 0,05 in $t_{(0,05, n-2)}$ è il valore alfa per una prova unilaterale con $(n - 2)$ gradi di libertà

$$f_{c, is, est} = f_{c, is, reg} - t_{(0,05, n-2)} s_c \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_{i, cor} - \bar{x})^2}} \quad (10)$$



Elemento strutturale	l _r	Resistenza stimata sulla curva media MPa	Resistenza puntuale CALCOLATA CON ANOVA MPa	Resistenza puntuale calcolata con la formula 10 UNI EN 13791:2019 MPa
1	32	20,6	16,5	17,3
2	30	17,6	14,2	14,8
3	29	16,1	13,1	13,6
4	31	19,1	15,4	16,0
5	27	13,5	10,8	11,3
6	32	20,6	16,5	17,3
7	30	17,6	14,2	14,8
8	33	22,3	17,7	18,5
9	30	17,6	14,2	14,8
10	34	24,0	18,9	19,8
Media		18,9	15,1	15,8

CALCOLO DELLA RESISTENZA MEDIA STRUTTURALE IN SITU

N. Carota	R carota [MPa]		Elementi strutturali non interessati dal carotaggio Rminimo UNI EN 13791 (MPa)				
1	24,5		1	17,3			N. carote 10
2	23,0		2	14,8			somma 171,0
3	14,0		3	13,6			media 17,1
4	14,5		4	16,0			
5	21,0		5	11,3			
6	14,5		6	17,3			N. PND 10,0
7	13,5		7	14,8			somma 158,1
8	14,0		8	18,5			media 15,8
9	15,5		9	14,8			
10	16,5		10	19,8			
$f_{m,is} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{c,is,i} + \sum_{j=1}^m f_{c,is,reg,j}}{n + m}$							
Resistenza media		$f_{m,is} =$	16,5	MPa			

— La Formula di Sintesi Strutturale per il calcolo di $f_{m,is}$

$$f_{m,is} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{c,is,i} + \sum_{j=1}^m f_{c,is,reg,j}}{n + m}$$

Dove i singoli termini rappresentano:

- $f_{m,is}$: La **resistenza media in situ** globale dell'intera struttura (il valore richiesto dalle NTC 2018 per ricavare la f_{cd}).
- $\sum_{i=1}^n f_{c,is,i}$: La **somma delle resistenze a compressione reali** ottenute dallo schiacciamento in laboratorio delle n carote estratte per la taratura iniziale ($n = 10$).
- $\sum_{j=1}^m f_{c,is,reg,j}$: La **somma delle resistenze locali stimate** nei successivi m punti indagati con sole prove non distruttive ($m = 10$ ). Ciascuno di questi m valori è stato preventivamente depurato dall'incertezza dello strumento applicando il frattile 5% a una coda della **Formula (10) della UNI EN 13791:2019**.
- $n + m$: Il **numero totale di elementi indagati** sulla struttura, che costituisce la popolazione campionaria complessiva ($10 + 10 = 20$ punti totali).

$$f_{m,is} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{c,is,i} + \sum_{j=1}^m f_{c,is,reg,j}}{n + m}$$

= 16,50 MPa

In definitiva si ribadisce che :

Estrapolare le resistenze puntuali dalla retta media per un adeguamento sismico significa accettare un rischio del 50% di sovrastimare il risultato.

Applicare la Formula (10) UNI EN 13791:2019 e lavorare sul frattile inferiore non è un esercizio di stile: è l'unico modo per fare ingegneria sicura secondo una norma europea e, soprattutto, proteggere la vita di chi abiterà quell'edificio.

I limiti della correlazione con singole Prove Non Distruttive :

- La risposta dello sclerometro viene influenzata dalla carbonatazione e dall'umidità.**
- La velocità degli ultrasuoni viene influenzata da eventuali vuoti presenti all'interno dell'elemento strutturale (nidi d'ape locali).**

La Soluzione: Combinare più metodologie per compensare gli errori sistematici dei singoli metodi.

Metodi combinati SON-REB e SON-EX

SON-REB: Ultrasuoni + Sclerometro

SON-EX: Ultrasuoni + Pull-Out .

Combinare più metodologie per compensare gli errori

Cosa cambia matematicamente?

Si passa da una retta a una **superficie tridimensionale di potenza** a 3 variabili, governata dall'equazione:

$$R = a I_r^b V^c \quad R = a F^b V^c$$

APPLICAZIONE DELL'ANOVA AL MODELLO A 3 VARIABILI

La linearizzazione logaritmica segue lo stesso identico principio visto in precedenza per trasformare la potenza in un'equazione lineare:

$$\text{Log } R = \log a + b \log I_r + c \log V \quad \text{per il metodo SON-REB}$$

$$\text{Log } R = \log a + b \log F + c \log V \quad \text{per il metodo SON-EX}$$

Dati sperimentali per calcolare il piano di taratura

	Resistenza della carota [N/mm ²]	PULL-OUT [KN]	Velocità ultrasuoni [m/s]		Trasformazione dei dati in log		
Carota	R	F	V		Log R	Log F	Log V
1	24,5	23,80	3802,0		1,3891661	1,376577	3,5800121
2	23,0	25,50	3875,0		1,3617278	1,4065402	3,5882717
3	14,0	15,50	3590,0		1,146128	1,1903317	3,5550944
4	14,5	16,50	3600,0		1,161368	1,2174839	3,5563025
5	21,0	24,50	3802,0		1,3222193	1,3891661	3,5800121
6	14,5	17,00	3600,0		1,161368	1,2304489	3,5563025
7	13,5	16,00	3610,0		1,1303338	1,20412	3,5575072
8	14,0	15,60	3615,0		1,146128	1,1931246	3,5581083
9	15,5	19,00	3701,0		1,1903317	1,2787536	3,5683191
10	16,5	17,00	3710,0		1,2174839	1,2304489	3,5693739

Il software ci restituisce l'equazione del piano di taratura

$$R_{stimata} = 6,9483 \cdot 10^{-12} \cdot F^{0,6451} \cdot V^{3,241}$$

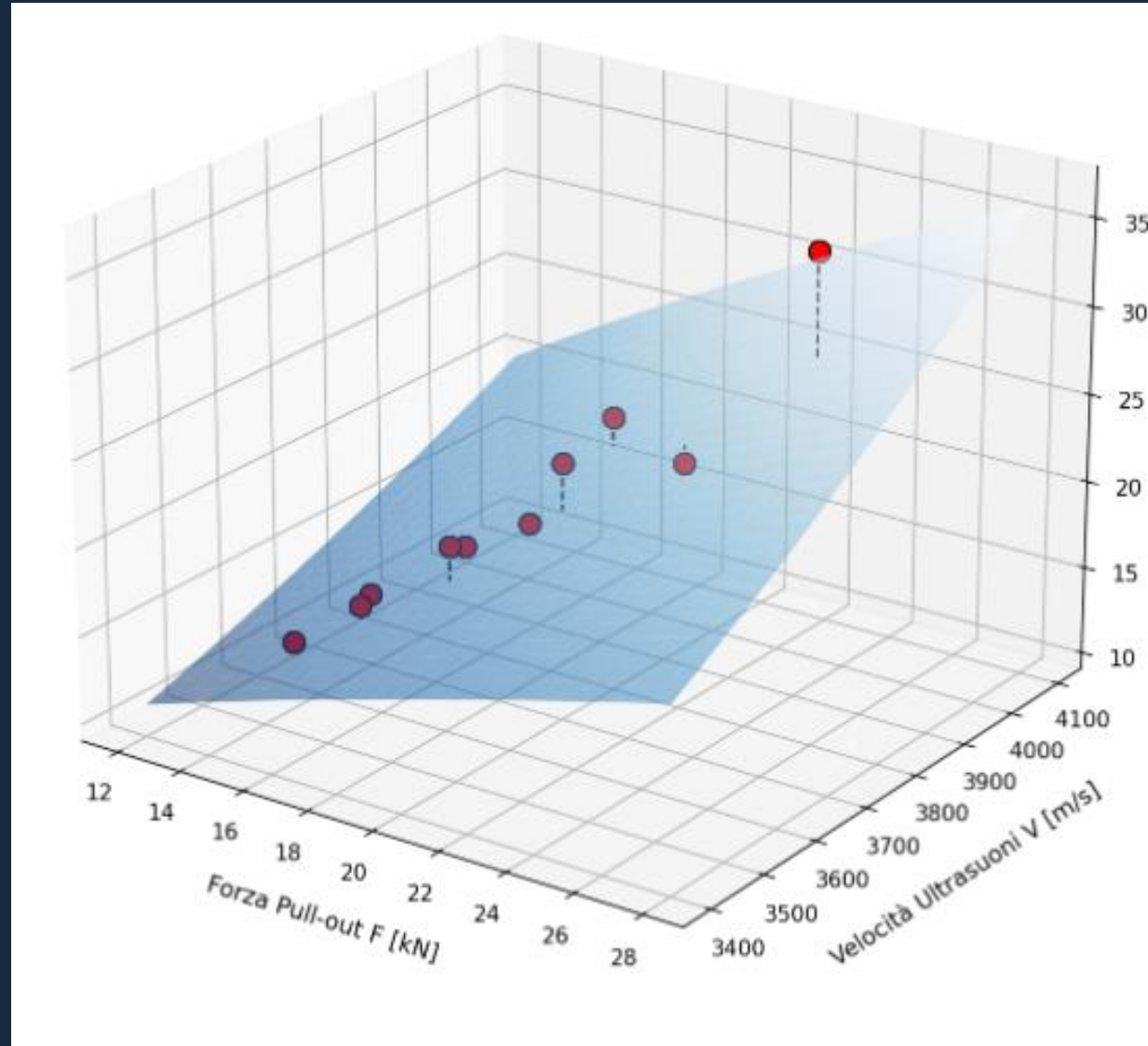
	A	B	C	D	E	F	G	H
3	Regression Statistics							
4	Multiple R	0,9624066						
5	R Square	0,9262264						
6	Adjusted R Square	0,9051482						
7	Standard Error	0,0300708	= Standard Deviation of Residuals					
8	Observations	10						
9								
10	ANOVA							
11		df	SS	MS	F	Significance (p-value) for F		
12	Regression	2	0,07947	0,039735	43,94244	0,000109		
13	Residual	7	0,00633	0,000904	= Variance of Residuals			
14	Total	9	0,0858	0,009533	= Variance of Dependent Variable			
15								
16	Dependent (Criterion) Variable: Log R	Coef- ficients	Standard Error	t Stat	P-value (2-tails)	Lower 95%	Upper 95%	X Values for Prediction
17	Intercept	-11,15812	9,183306	-1,21504	0,263738	-32,8732	10,55695	
18	Log F	0,6450682	0,382956	1,684444	0,135967	-0,26048	1,550616	1,230448921
19	Log V	3,2409976	2,704306	1,198458	0,269734	-3,15367	9,635664	3,56937391
20								
21	Confidence Level	Confidence and Prediction Intervals for Log R						
22	0,95	Predicted Y	Standard Error	Lower 95%	Upper 95%			
23	Confidence Interval	1,2039355	0,024136	1,146863	1,261008			
24	Prediction Interval	1,2039355	0,038559	1,112758	1,295113			
25								

Coefficiente di determinazione
 $R^2=0,9261$

$$a = 10^{-11,15812} = 6,9483 \times 10^{-12}$$
$$b = 0,6451$$
$$c = 3,241$$

Rappresentazione grafica del piano di taratura

$$R_{\text{stimata}} = 6,9483 \cdot 10^{-12} \cdot F^{0,6451} \cdot V^{3,241}$$



Il software calcola i valori stimati per ogni singolo punto indagato (R_{carota} , F , V) della resistenza sul piano medio e relative forchette di incertezza.

$$R_{\text{stimata}} = 6,9483 \cdot 10^{-12} \cdot F^{0,6451} \cdot V^{3,241}$$

DATI SPERIMENTALI				Intervallo di incertezza sulla resistenza del singolo punto		Intervallo di Confidenza sul modello	
F [KN]	V [m/s]	Rcarota [MPa]	Rstimata [MPa]	Rmin	Rmax	Rmin	Rmax
23,8	3802,0	24,5	21,5	17,9	25,9	19,7	23,4
25,5	3875,0	23,0	23,9	19,6	29,1	21,4	26,7
15,5	3590,0	14,0	13,5	11,3	16,2	12,6	14,6
16,5	3600,0	14,5	14,2	11,9	17,1	13,1	15,4
24,5	3802,0	21,0	21,9	18,1	26,5	19,8	24,2
17,0	3600,0	14,5	14,5	12,0	17,5	13,2	15,9
16,0	3610,0	13,5	14,1	11,8	16,8	13,2	15,1
15,6	3615,0	14,0	13,9	11,6	16,7	12,9	15,0
19,0	3701,0	15,5	17,0	14,4	20,2	16,2	18,0
17,0	3710,0	16,5	16,0	13,0	19,7	14,0	18,2

APPLICAZIONE DEL PIANO DI TARATURA SPERIMENTALE

Si sono scelti altri 10 elementi strutturali su cui eseguire le prove di pull-out e prove con ultrasuoni.

Forza (kN)	Velocità (m/s)
20	3700
21	3690
19	3687
16,5	3600
18,1	3640
20	3678
23,3	3790
18	3640
20	3725
21	3753

APPLICAZIONE DEL PIANO DI REGRESSIONE SPERIMENTALE (ANOVA).

Per ogni singolo valore di F e V il software determina il valore della resistenza stimata SUL PIANO MEDIO e delle incertezze.

Forza (kN)	Velocità (m/s)	Rstimata [MPa]	INCERTEZZA SUL SINGOLO VALORE		INCERTEZZA PIANO DI REGRESSIONE	
			Rmin [MPa]	Rmax [MPa]	Rmin [MPa]	Rmax [MPa]
20	3700	17,6	14,7	21,0	16,5	18,8
21	3690	18,0	14,7	22,0	16,0	20,2
19	3687	16,8	14,2	20,0	15,9	17,8
16,5	3600	14,2	11,9	17,1	13,1	15,4
18,1	3640	15,7	13,1	18,8	14,5	16,9
20	3678	17,3	14,3	20,9	15,7	19,0
23,3	3790	21,0	17,5	25,2	19,4	22,8
18	3640	15,6	13,0	18,7	14,5	16,8
20	3725	18,0	15,1	21,4	17,0	19,0
21	3753	19,0	16,0	22,7	17,9	20,2

SINTESI CON CALCOLO DELLA RESISTENZA STIMATA SUL SINGOLO ELEMENTO STRUTTURALE NON CAROTATO (UNI EN 13791:2019)

$$\log_{10}(f_{c,is,est}) = \log_{10}(f_{c,is,reg}) - t_{(0,05;n-3)} \cdot s_c \cdot \sqrt{1 + \mathbf{x}_0^T (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{x}_0}$$



F (kN)	V (m/s)	Rstimato PIANO MEDIO (MPa)	Rminimo ANOVA (MPa)	Rminimo UNI EN 13791 (MPa)
20	3700	17,6	14,7	15,3
21	3690	18,0	14,7	15,3
19	3687	16,8	14,2	14,7
16,5	3600	14,2	11,9	12,3
18,1	3640	15,7	13,1	13,5
20	3678	17,3	14,3	14,8
23,3	3790	21,0	17,5	18,1
18	3640	15,6	13,0	13,5
20	3725	18,0	15,1	15,7
21	3753	19,0	16,0	16,5
MEDIE		17,3	14,5	15,0

— La Formula di Sintesi Strutturale per il calcolo di $f_{m,is}$

$$f_{m,is} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{c,is,i} + \sum_{j=1}^m \tilde{f}_{c,is,est,j}}{n + m}$$

Dove i singoli termini rappresentano:

- $f_{m,is}$: La **resistenza media in situ** globale dell'intera struttura (il valore richiesto dalle NTC 2018 per ricavare la f_{cd}).
- $\sum_{i=1}^n f_{c,is,i}$: La **somma delle resistenze a compressione reali** ottenute dallo schiacciamento in laboratorio delle n carote estratte per la taratura iniziale ($n = 10$).
- $\sum_{j=1}^m \tilde{f}_{c,is,est,j}$: La **somma delle resistenze locali stimate** nei successivi m punti indagati con sole prove non distruttive ($m = 10$ ). Ciascuno di questi m valori è stato preventivamente depurato dall'incertezza dello strumento applicando il frattile 5% a una coda della **Formula (10) della UNI EN 13791:2019**.
- $n + m$: Il **numero totale di elementi indagati** sulla struttura, che costituisce la popolazione campionaria complessiva ($10 + 10 = 20$ punti totali).

$$f_{m,is} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{c,is,i} + \sum_{j=1}^m \tilde{f}_{c,is,est,j}}{n + m}$$

$$f_{m,is} = 16,1 \text{ MPa}$$