

Tabella 4.13 Calcolo della resistenza con la (4.42).

V [km/s]	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
I	R [MPa]								
5	0,77	1,16	1,62	2,16	2,76	3,43	4,17	4,98	5,85
10	1,82	2,75	3,85	5,12	6,55	8,14	9,90	11,80	13,87
15	3,01	4,55	6,37	8,48	10,85	13,50	16,40	19,56	22,98
20	4,31	6,51	9,12	12,13	15,53	19,31	23,47	28,00	32,89
25	5,69	8,60	12,05	16,02	20,51	25,51	31,00	36,97	43,43
30	7,14	10,79	15,12	20,11	25,74	32,01	38,90	46,40	54,51
35	8,65	13,08	18,32	24,37	31,20	38,79	47,14	56,23	66,05
40	10,22	15,44	21,64	28,78	36,84	45,81	55,67	66,41	78,00
45	11,84	17,88	25,06	33,33	42,67	53,05	64,47	76,90	90,33
50	13,50	20,39	28,57	38,00	48,65	60,50	73,52	87,69	103,01
55	15,20	22,96	32,18	42,79	54,79	68,12	82,79	98,75	115,99
60	16,94	25,59	35,86	47,69	61,06	75,93	92,27	110,06	129,28

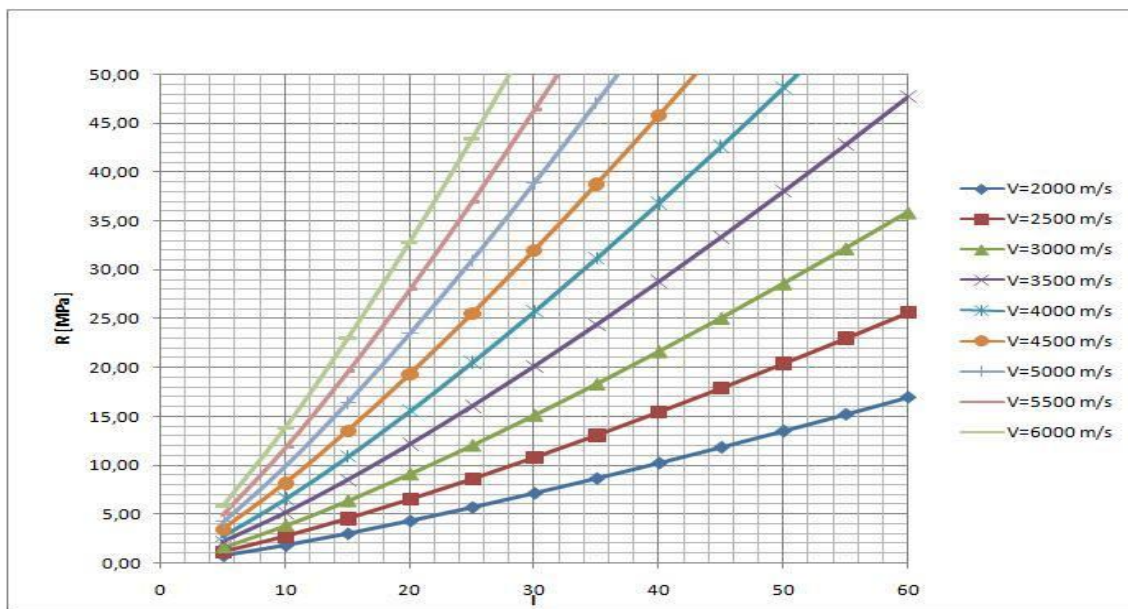


Figura 4.33 Correlazione analitica R – I secondo la (4.42).

Il Metodo Sonreb, quindi, ha il vantaggio sostanziale di consentire una misurazione corretta della resistenza e di non arrecare danno alla struttura. Per l'impiego di metodi combinati non distruttivi si può fare riferimento al progetto di norma Rilem 43 – CND.

Capitolo 5

“Confronti teorico – sperimentali”

Carpentieri Gerardo

13/04/2008

5.1 Esecuzione di carotaggi

5.2 Esecuzione di prove ultrasoniche

5.3 Prove sclerometriche

5.4 Metodo Sonreb

5.5 Discussione dei risultati ottenuti

5.1 Esecuzione di carotaggi

Nelle seguenti pagine sono esposti i risultati di alcuni carotaggi effettuati su pilastri in c.a precedentemente sottoposti alla prova a pressoflessione ciclica. Lo scopo di tali carotaggi è quello di indagare sulla variazione di resistenza a compressione del calcestruzzo a seguito di sforzi ciclici di pressoflessione. A tal fine è anche possibile eseguire delle prove non distruttive, come il metodo combinato sclerometro ed ultrasuoni per accertarsi della bontà dei dati ottenuti con le carote. I risultati ottenuti, e riportati nelle seguenti pagine, sono connessi anche con il punto in cui la prova è stata eseguita: lo scopo è quello di correlare il valore della sollecitazione con il decadimento di resistenza a compressione.

È facile immaginare che il calcestruzzo perde parte delle sue capacità meccaniche a seguito di forti sollecitazioni, soprattutto se queste sono variabili nel tempo o si verificano poche volte durante la vita della struttura (come ad esempio la forza sismica). È di fondamentale importanza provvedere a:

- quantificare la perdita di resistenza, e il danno, a seguito di variazioni dello stato tensionale;
- progettare e mettere in opera dei rinforzi che aumentino la resistenza dell'elemento strutturale (trave o pilastro) che ha subito un danno; come ad esempio l'applicazione di fasce in FRP o l'incamiciamento del pilastro.

I metodi di rinforzo strutturale hanno come scopo l'aumento della capacità portante dell'elemento sul quale insistono ma anche l'aumento della sua duttilità, ovvero si cerca di aumentare la deformazione ultima.

Ad esempio si consideri un pilastro che, durante una prova ciclica, è caricato da una forza F variabile. All'aumentare di F il pilastro subirà uno spostamento δ alla sua sommità via via crescente e vi sarà un momento massimo alla base pari a:

$$M = F \cdot H . \quad (5.1)$$

Nella pratica il pilastro potrà avere tre tipi di comportamento:

- duttile: il momento massimo sopportabile è quello di snervamento, pari a:

$$M_y = F_y \cdot H , \quad (5.2)$$

al quale corrisponde uno spostamento δ_y . La rottura avviene per un momento pari a M_y ma per una deformazione ultima δ_u tanto maggiore quanto più duttile è il pilastro;

- incrudente: la rottura avviene, come prima, per una deformazione ultima maggiore di quella di snervamento ma per un momento resistente ultimo maggiore di quello di snervamento e pari a F_u ;
- elasto – fragile: la rottura avviene al termine del tratto lineare: punto di coordinate F_y e δ_y .

I comportamenti precedenti sono descritti nel seguente diagramma in Figura 5.1.

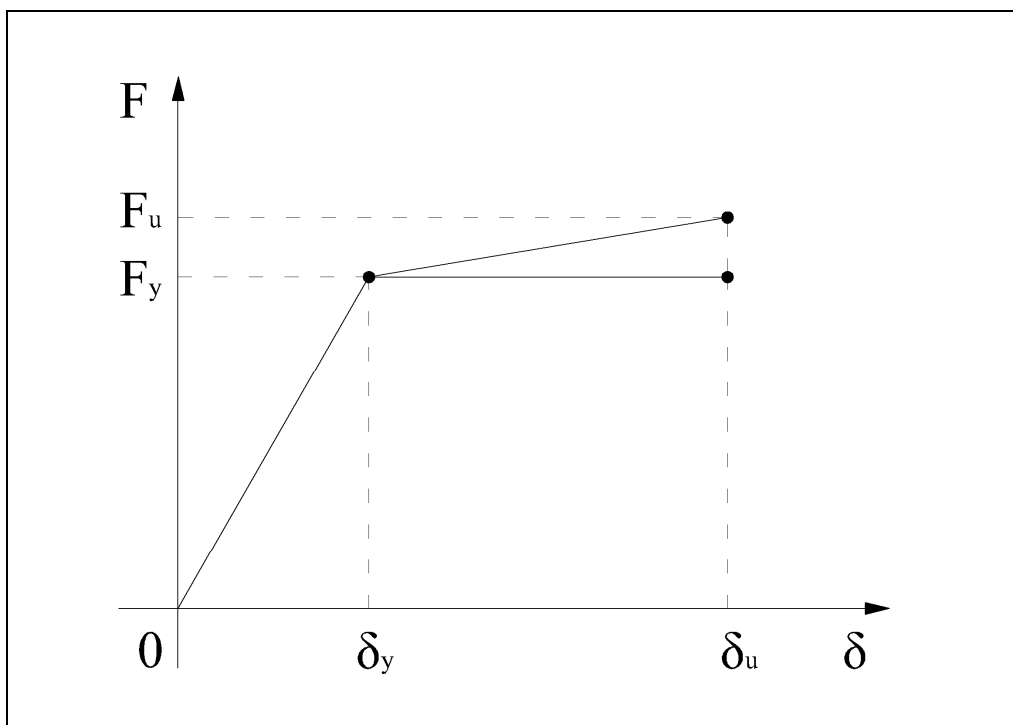


Figura 5.1 Comportamenti duttili, fragili ed incrudenti.

La duttilità della struttura è il rapporto tra la deformazione ultima e la deformazione di snervamento:

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y} \tag{5.3}$$

In caso di comportamento incrudente è importante quantificare l'aumento di resistenza grazie al rapporto tra il momento ultimo e di snervamento:

$$\alpha = \frac{M_u}{M_y} = \frac{F_u \cdot H}{F_y \cdot H} = \frac{F_u}{F_y} \tag{5.4}$$

Al raggiungimento della forza F_y (massima) si ha uno spostamento δ_y . Al crescere dello spostamento fino a δ_u si avrà una rotazione rigida del pilastro attorno all'incastro alla base: si è quindi formata una cerniera plastica.

La duttilità dipende dall'angolo massimo di cui può ruotare la sezione di base prima della rottura (curvatura ultima). Per la sezione di base è possibile calcolare la posizione dell'asse neutro in relazione alla forma del diagramma delle deformazioni. Si nota che la curvatura ultima, e quindi la duttilità, dipendono dall'inclinazione del diagramma delle deformazioni della sezione di c.a.

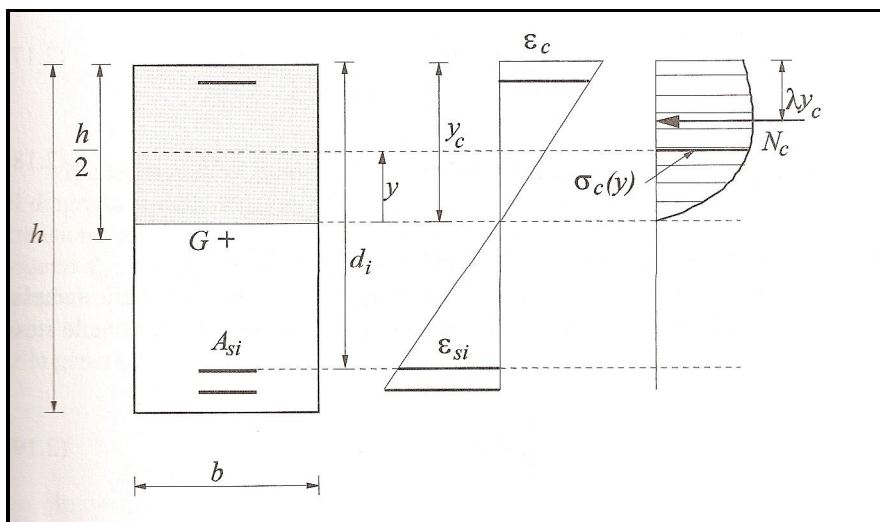


Figura 5.2 Valutazione delle sollecitazioni nel calcestruzzo. [2]

Nell'immagine precedente è indicata la posizione dell'asse neutro, alla quale corrisponde una precisa inclinazione del diagramma delle deformazioni, si verifica che la duttilità è direttamente proporzionale a tale deformazione. Si ricorda che se vale:

$$\psi \cdot b \cdot y_c \cdot f_{cd} - A_s \cdot f_{sd} = N_d \quad (5.5)$$

La posizione dell'asse neutro sarà:

$$y_c = \frac{N_d + A_s \cdot f_{sd}}{\psi \cdot b \cdot f_{cd}} \quad (5.6)$$

All'aumentare di N_d ed A_s diminuisce la duttilità della struttura. Si riportano di seguito i risultati dei carotaggi eseguiti, con indicazione delle quote delle carote rispetto alla base, dei carichi di rottura e delle resistenze stimate. Si ricorda che il calcestruzzo analizzato è del tipo $R_{ck} = 25 \text{ N/mm}^2$.



Figura 5.3 Alcuni dei pilastri sottoposti ai carotaggi.

Nelle tabelle che seguono si riportano i risultati dei carotaggi non cappati distinti in base alla posizione delle carote: in testa, al centro ed al piede. Ad ogni carota è, inoltre, stato assegnato un codice identificativo, legato al codice del pilastro, onde evitare confusioni in fase di prova. Sono, inoltre, indicate le quote in centimetri dei baricentri delle carote estratte, misurate dalla fondazione nel caso di pilastri integri e dalla sommità nel caso di pilastri rotti. Il diametro delle carote estratte è di 10 cm, ma nei calcoli successivi il diametro è stato misurato nuovamente prima della rottura ottenendo dei valori lievemente diversi. Le carote prelevate sono state in seguito provate fino a raggiungere i carichi di rottura, indicati nella tabella seguente. Infine, sono state calcolate le resistenze (f_{car}) di ogni carota, dal rapporto tra il carico di rottura e l'area di base, e le resistenze medie di ogni pilastro. Nella seconda tabella sono riportate le resistenze cubiche delle carote estratte, calcolate tramite le relazioni (4.28) riportate nei paragrafi precedenti, specificate nel caso in esame. In particolare le resistenze cubiche sono state calcolate nel seguente modo:

- R_1 è calcolata con riferimento alla relazione (4.28a) della British Standard 1881 con un rapporto altezza / diametro pari a 2 e costante $D = 2,5$ per carotaggi orizzontali;
- R_2 è calcolata secondo la formulazione riportata nei riferimenti [22] e [23], riportata nella relazione (4.28b), assumendo $D = 2$;
- R_3 è calcolata secondo la relazione suggerita nei riferimenti [20] e [21], esposta nella relazione (4.28d), assumendo $D = 1,84$.

Dai valori di resistenza ottenuti si denotano dei risultati di resistenza accettabile nella maggioranza delle carote. In seguito è stata eseguita una nuova indagine, simile alla precedente ma con esecuzione della cappatura. I risultati di questa nuova indagine sono quindi riportati nelle pagine seguenti e sono indicati anche i pesi delle carote e le dimensioni.

Tabella 5.1 Carotaggi non cappati.

Prima indagine: carote non cappate.						
Identificativo pilastro	Identificativo carota	Posizione	Quota dalla base [cm]	Carico Rottura [kN]	f_{car} [N/mm ²]	R_{cm} [N/mm ²]
P1	P1/1	Piede	86,00	108,95	15,05	21,96
	P1/2	Centro	110,00	221,20	30,56	
	P1/3	Testa	127,00	146,70	20,27	
P2	P2/1	Piede	94,50	61,52	8,50	8,02
	P2/2	Centro	122,00	61,82	8,54	
	P2/3	Testa	137,00	50,86	7,03	
P3	P3/1	Piede	69,50	134,90	18,64	20,96
	P3/2	Centro	111,50	184,20	25,45	
	P3/3	Testa	153,50	135,90	18,78	
P4*	P4/1	Piede	134,50**	153,10	21,15	19,24
	P4/2	Centro	96,50**	143,60	19,84	
	P4/3	Testa	82,00**	121,20	16,74	
P5	P5/1	Piede	71,00	188,90	26,10	21,22
	P5/2	Centro	121,50	94,20	13,01	
	P5/3	Testa	172,00	177,60	24,54	
P6	P6/1	Piede	79,00	96,85	13,38	16,21
	P6/2	Centro	119,00	148,00	20,45	
	P6/3	Testa	159,00	107,10	14,80	
P7	P7/1	Piede	109,00	152,40	21,05	18,71
	P7/2	Centro	132,00	144,40	19,95	
	P7/3	Testa	149,00	109,60	15,14	
P8	P8/1	Piede	50,00	201,20	27,80	24,70
	P8/2	Centro	89,50	132,70	18,33	
	P8/3	Testa	129,50	202,50	27,98	
P10*	P10/1	Piede	123,00**	64,25	8,88	8,48
	P10/2	Centro	107,00**	60,10	8,30	
	P10/3	Testa	86,00**	59,68	8,25	
P11	P11/1	Piede	78,00	182,00	25,14	20,49
	P11/2	Centro	122,00	140,90	19,47	
	P11/3	Testa	159,00	122,10	16,87	
P12	P12/1	Piede	87,00	126,90	17,53	15,37
	P12/2	Centro	128,50	109,30	15,10	
	P12/3	Testa	149,50	97,55	13,48	
P13	P13/1	Piede	61,50	252,00	34,82	27,65
	P13/2	Centro	101,50	206,00	28,49	
	P13/3	Testa	142,00	142,20	19,65	
P14	P14/1	Piede	48,50	179,30	24,77	18,77
	P14/2	Centro	87,00	110,10	15,21	
	P14/3	Testa	129,50	118,10	16,32	
P15	P15/1	Piede	49,00	105,20	14,53	15,39
	P15/2	Centro	91,00	137,80	19,04	
	P15/3	Testa	128,00	91,30	12,61	

*Rotto
**Distanza dalla sommità

Tabella 5.2 Calcolo della resistenza cubica dei provini senza cappatura.

Calcolo delle resistenze cubiche provini non cappati.						
Identificativo pilastro	Identificativo carota	Posizione	Quota dalla base [cm]	R ₁ [N/mm ²]	R ₂ [N/mm ²]	R ₃ [N/mm ²]
P1	P1/1	Piede	86,00	18,81	19,95	25,02
	P1/2	Centro	110,00	38,20	40,50	50,81
	P1/3	Testa	127,00	25,34	26,86	33,70
P2	P2/1	Piede	94,50	10,63	11,27	14,13
	P2/2	Centro	122,00	10,68	11,32	14,20
	P2/3	Testa	137,00	8,79	9,32	11,69
P3	P3/1	Piede	69,50	23,30	24,70	30,99
	P3/2	Centro	111,50	31,81	33,73	42,31
	P3/3	Testa	153,50	23,48	24,89	31,22
P4*	P4/1	Piede	134,50**	26,44	28,03	35,17
	P4/2	Centro	96,50**	24,80	26,29	32,99
	P4/3	Testa	82,00**	20,93	22,19	27,83
P5	P5/1	Piede	71,00	32,63	34,59	43,40
	P5/2	Centro	121,50	16,26	17,24	21,63
	P5/3	Testa	172,00	30,68	32,52	40,80
P6	P6/1	Piede	79,00	16,73	17,73	22,25
	P6/2	Centro	119,00	25,56	27,10	34,00
	P6/3	Testa	159,00	18,50	19,61	24,61
P7	P7/1	Piede	109,00	26,31	27,90	35,00
	P7/2	Centro	132,00	24,94	26,44	33,17
	P7/3	Testa	149,00	18,93	20,07	25,17
P8	P8/1	Piede	50,00	34,75	36,84	46,22
	P8/2	Centro	89,50	22,91	24,29	30,48
	P8/3	Testa	129,50	34,98	37,08	46,52
P10*	P10/1	Piede	123,00**	11,10	11,77	14,76
	P10/2	Centro	107,00**	10,38	11,00	13,80
	P10/3	Testa	86,00**	10,31	10,93	13,72
P11	P11/1	Piede	78,00	31,43	33,32	41,80
	P11/2	Centro	122,00	24,34	25,80	32,37
	P11/3	Testa	159,00	21,09	22,36	28,05
P12	P12/1	Piede	87,00	21,91	23,23	29,15
	P12/2	Centro	128,50	18,88	20,01	25,11
	P12/3	Testa	149,50	16,85	17,87	22,41
P13	P13/1	Piede	61,50	43,53	46,15	57,89
	P13/2	Centro	101,50	35,61	37,76	47,37
	P13/3	Testa	142,00	24,56	26,04	32,67
P14	P14/1	Piede	48,50	30,96	32,83	41,18
	P14/2	Centro	87,00	19,01	20,16	25,29
	P14/3	Testa	129,50	20,40	21,63	27,13
P15	P15/1	Piede	49,00	18,16	19,26	24,16
	P15/2	Centro	91,00	23,80	25,23	31,66
	P15/3	Testa	128,00	15,76	16,71	20,97

*Rotto
**Distanza dalla sommità

Tabella 5.3 Carotaggi cappati.

Seconda indagine: carote cappate.										
Identificativo pilastro	Identificativo carota	Posizione	Diametro [mm]	Altezza [mm]	Area [mm ²]	Massa [kg]	Peso specifico [kg/m ³]	Carico Rottura [kN]	f _{car} [N/mm ²]	R _{cm} [N/mm ²]
P1	P1/1	Piede	94,00	199,00	6936,26	3,280	2376,27	264,80	38,18	29,80
	P1/2	Centro	94,00	197,00	6936,26	3,240	2371,12	232,10	33,46	
	P1/3	Testa	94,00	197,00	6936,26	3,260	2385,76	123,15	17,75	
P2	P2/1	Piede	94,00	198,00	6936,26	3,115	2268,13	123,80	17,85	13,75
	P2/2	Centro	94,00	199,00	6936,26	3,130	2267,60	65,95	9,51	
	P2/3	Testa	94,00	197,00	6936,26	3,095	2265,00	96,30	13,88	
P3	P3/1	Piede	94,00	198,00	6936,26	3,290	2395,55	142,50	20,54	29,64
	P3/2	Centro	94,00	198,00	6936,26	3,290	2395,55	222,80	32,12	
	P3/3	Testa	94,00	199,00	6936,26	3,310	2398,00	251,40	36,24	
P4*	P4/1	Piede	94,00	198,00	6936,26	3,220	2344,58	219,10	31,59	32,98
	P4/2	Centro	94,00	199,00	6936,26	3,150	2282,09	203,40	29,32	
	P4/3	Testa	94,00	196,00	6936,26	3,080	2265,53	263,80	38,03	
P5	P5/1	Piede	94,00	198,00	6936,26	3,185	2319,10	262,20	37,80	32,10
	P5/2	Centro	94,00	199,00	6936,26	3,240	2347,29	112,85	16,27	
	P5/3	Testa	94,00	198,00	6936,26	3,190	2322,74	293,00	42,24	
P6	P6/1	Piede	94,00	198,00	6936,26	3,250	2366,43	166,00	23,93	29,97
	P6/2	Centro	94,00	199,00	6936,26	3,220	2332,80	231,60	33,39	
	P6/3	Testa	94,00	197,00	6936,26	3,275	2396,73	226,00	32,58	
P7	P7/1	Piede	94,00	199,00	6936,26	3,250	2354,53	172,10	24,81	24,35
	P7/2	Centro	94,00	199,00	6936,26	3,270	2369,02	198,80	28,66	
	P7/3	Testa	94,00	199,00	6936,26	3,250	2354,53	135,70	19,56	
P8	P8/1	Piede	94,00	199,00	6936,26	3,280	2376,27	249,60	35,98	36,52
	P8/2	Centro	94,00	198,00	6936,26	3,255	2370,07	262,20	37,80	
	P8/3	Testa	94,00	198,00	6936,26	3,250	2366,43	248,10	35,77	
P9	P9/1	Piede	0,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	0,00	11,24
	P9/2	Centro	94,00	9,90	6936,26	0,600	8737,57	123,55	17,81	
	P9/3	Testa	94,00	9,70	6936,26	0,530	7877,33	110,40	15,92	
P10*	P10/1	Piede	94,00	198,00	6936,26	3,230	2351,86	194,60	28,06	21,17
	P10/2	Centro	94,00	200,00	6936,26	3,260	2349,97	122,65	17,68	
	P10/3	Testa	94,00	198,00	6936,26	3,200	2330,02	123,35	17,78	
P11	P11/1	Piede	94,00	198,00	6936,26	3,280	2388,27	235,10	33,89	28,36
	P11/2	Centro	94,00	197,00	6936,26	3,300	2415,03	210,60	30,36	
	P11/3	Testa	94,00	197,00	6936,26	3,250	2378,44	144,50	20,83	
P12	P12/1	Piede	94,00	199,00	6936,26	3,310	2398,00	174,80	25,20	27,91
	P12/2	Centro	94,00	197,00	6936,26	3,250	2378,44	244,20	35,21	
	P12/3	Testa	94,00	199,00	6936,26	3,310	2398,00	161,70	23,31	
P13	P13/1	Piede	94,00	199,00	6936,26	3,325	2408,87	320,40	46,19	43,86
	P13/2	Centro	94,00	198,00	6936,26	3,295	2399,19	278,40	40,14	
	P13/3	Testa	94,00	197,00	6936,26	3,270	2393,07	313,80	45,24	
P14	P14/1	Piede	94,00	199,00	6936,26	3,250	2354,53	203,40	29,32	27,66
	P14/2	Centro	94,00	199,00	6936,26	3,270	2369,02	166,90	24,06	
	P14/3	Testa	94,00	197,00	6936,26	3,225	2360,14	205,20	29,58	
P15	P15/1	Piede	94,00	198,00	6936,26	3,290	2395,55	222,70	32,11	31,00
	P15/2	Centro	94,00	197,00	6936,26	3,285	2404,05	239,10	34,47	
	P15/3	Testa	94,00	197,00	6936,26	3,280	2400,39	183,20	26,41	

Tabella 5.4 Calcolo della resistenza cubica dei provini con cappatura.

Calcolo delle resistenze cubiche provini cappati.					
Identificativo pilastro	Identificativo carota	Posizione	R ₁ [N/mm ²]	R ₂ [N/mm ²]	R ₃ [N/mm ²]
P1	P1/1	Piede	48,39	51,30	64,36
	P1/2	Centro	42,31	44,86	56,28
	P1/3	Testa	22,45	23,80	29,86
P2	P2/1	Piede	22,60	23,96	30,05
	P2/2	Centro	12,05	12,78	16,03
	P2/3	Testa	17,55	18,61	23,35
P3	P3/1	Piede	26,01	27,58	34,59
	P3/2	Centro	40,66	43,11	54,09
	P3/3	Testa	45,94	48,71	61,11
P4*	P4/1	Piede	39,99	42,40	53,19
	P4/2	Centro	37,17	39,41	49,44
	P4/3	Testa	48,03	50,92	63,89
P5	P5/1	Piede	47,86	50,74	63,65
	P5/2	Centro	20,62	21,86	27,43
	P5/3	Testa	53,48	56,70	71,13
P6	P6/1	Piede	30,30	32,12	40,30
	P6/2	Centro	42,32	44,87	56,29
	P6/3	Testa	41,20	43,68	54,80
P7	P7/1	Piede	31,45	33,34	41,83
	P7/2	Centro	36,33	38,52	48,32
	P7/3	Testa	24,80	26,29	32,98
P8	P8/1	Piede	45,61	48,36	60,67
	P8/2	Centro	47,86	50,74	63,65
	P8/3	Testa	45,28	48,01	60,23
P9	P9/1	Piede	0,00	0,00	0,00
	P9/2	Centro	4,05	4,29	5,39
	P9/3	Testa	3,56	3,77	4,73
P10*	P10/1	Piede	35,52	37,66	47,24
	P10/2	Centro	22,44	23,79	29,85
	P10/3	Testa	22,51	23,87	29,95
P11	P11/1	Piede	42,91	45,49	57,08
	P11/2	Centro	38,39	40,70	51,06
	P11/3	Testa	26,34	27,93	35,04
P12	P12/1	Piede	31,94	33,87	42,49
	P12/2	Centro	44,52	47,20	59,21
	P12/3	Testa	29,55	31,33	39,30
P13	P13/1	Piede	58,55	62,08	77,88
	P13/2	Centro	50,81	53,87	67,59
	P13/3	Testa	57,20	60,65	76,09
P14	P14/1	Piede	37,17	39,41	49,44
	P14/2	Centro	30,50	32,34	40,57
	P14/3	Testa	37,41	39,66	49,76
P15	P15/1	Piede	40,65	43,10	54,06
	P15/2	Centro	43,59	46,21	57,98
	P15/3	Testa	33,40	35,41	44,42

Nei seguenti due grafici si riportano le resistenze delle carote cappate e non cappate distinte per piede, centro e testa, calcolate con la British Standard.

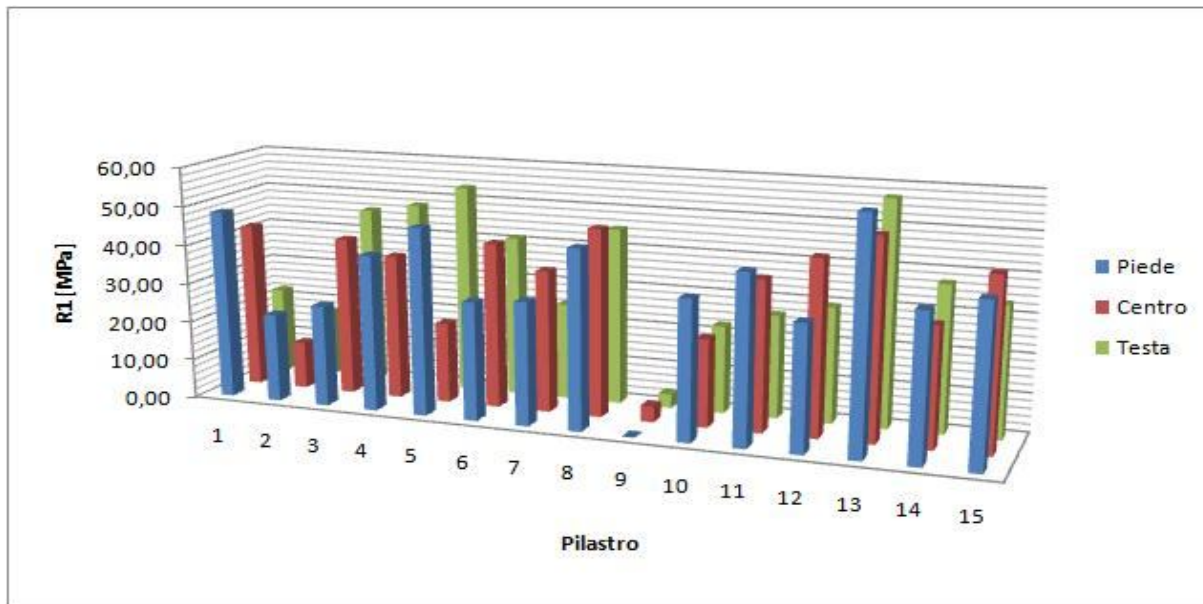


Figura 5.4 Confronti resistenze carote cappate per posizione.

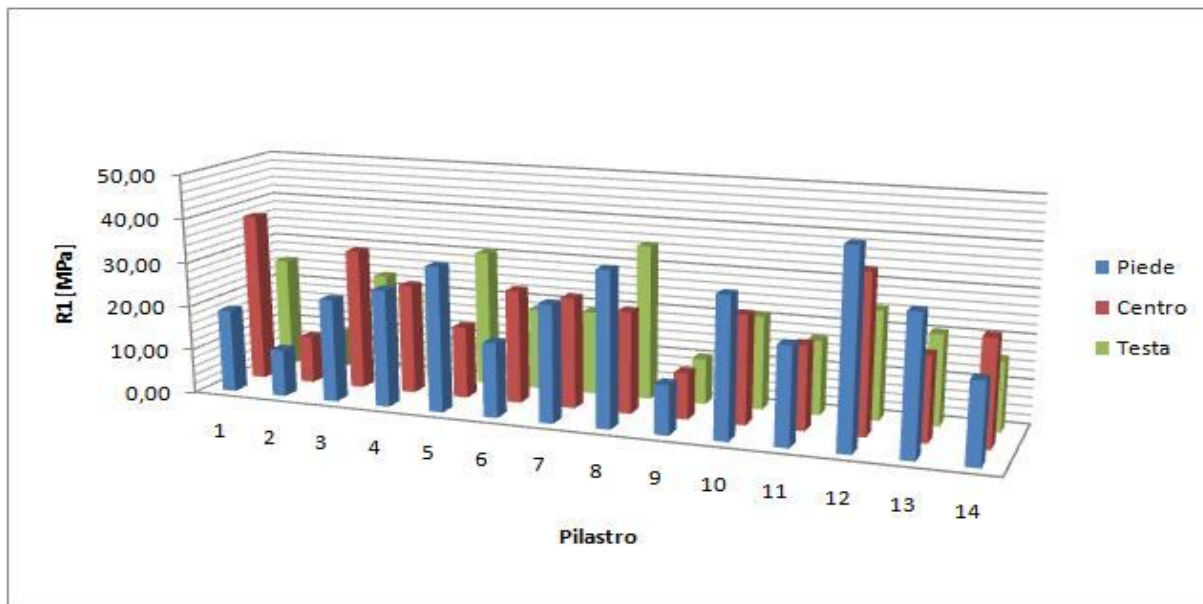


Figura 5.5 Confronti resistenze carote non cappate per posizione.

Nelle seguenti due figure è possibile raffrontare i risultati dei carotaggi con le tre diverse formulazioni utilizzate.

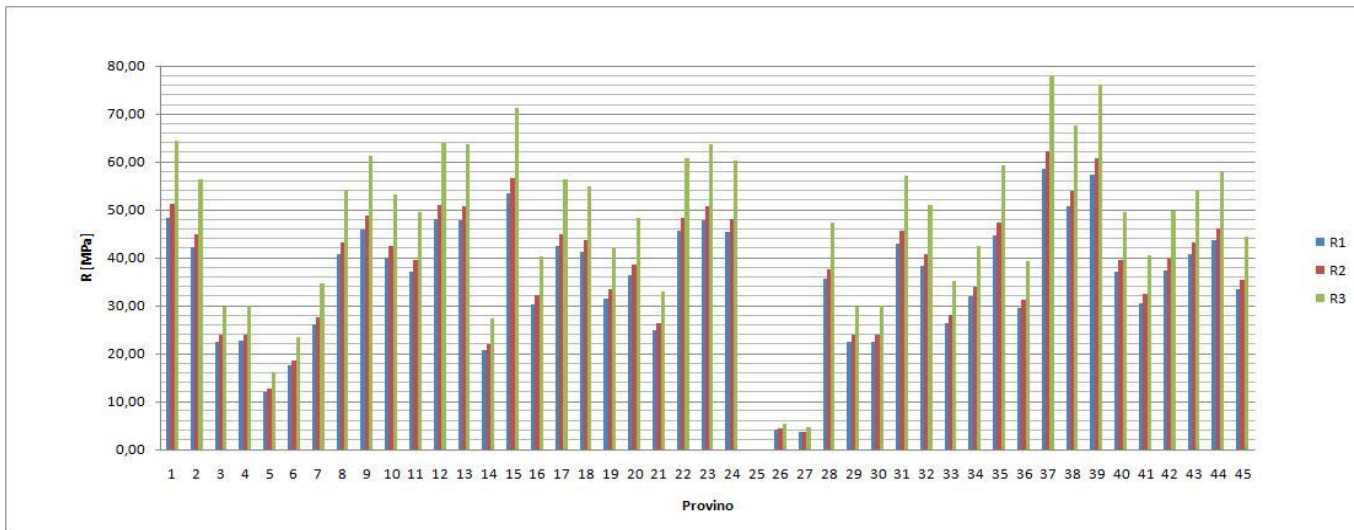


Figura 5.6 Confronto tra le resistenze delle carote cappate.

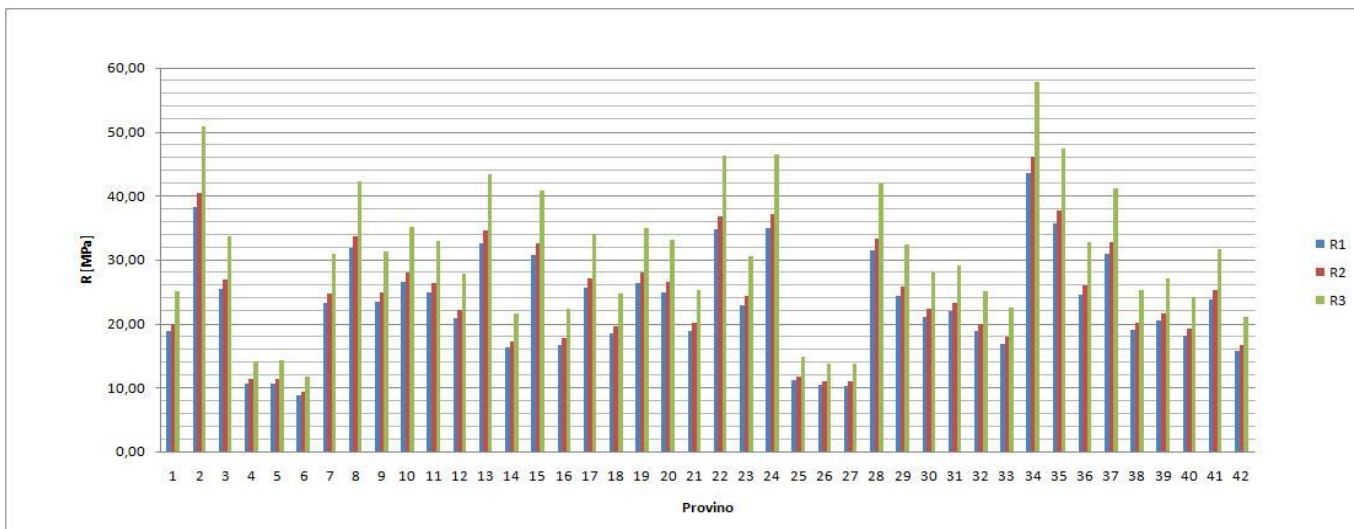


Figura 5.7 Confronto tra le resistenze delle carote non cappate.

Si riporta infine le coppie di valori tra resistenza delle carote cappate e peso specifico e le resistenze cubiche medie delle carote cappate distinte per posizione.

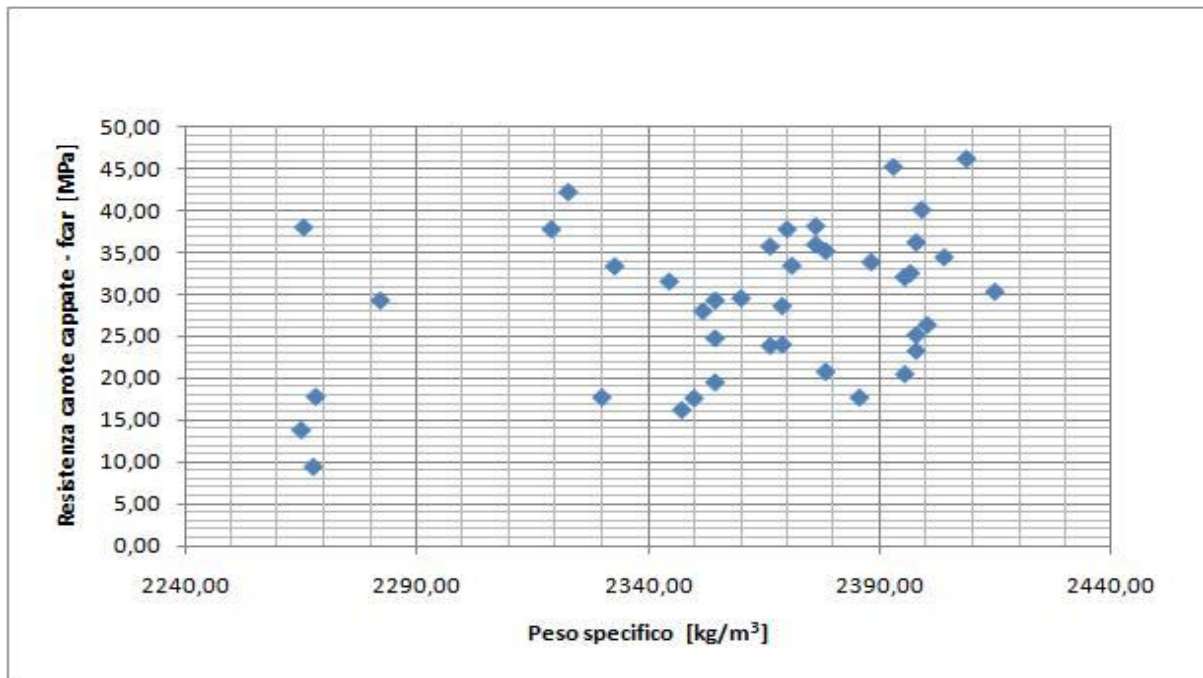


Figura 5.8 Relazione resistenza carote – peso specifico.



Figura 5.9 Resistenze medie nelle carote cappate in funzione della posizione.

5.2 Esecuzione di prove ultrasoniche

Nell'ambito della verifica statica di pilastri in c.a. normali e rinforzati con FRP precedentemente sottoposti alla prova di carico ciclica sono state eseguite, per controllo e per comparazione, delle prove ultrasoniche al fine di determinare la resistenza del calcestruzzo.

I risultati ottenuti, e riportati di seguito, sono da leggere assieme a quelli dei carotaggi precedenti e sono successivamente stati corretti. I risultati delle due analisi sono stati opportunamente rielaborati secondo le procedure esposte nei paragrafi precedenti per ottenere valori di resistenza più veritieri e meno aleatori di quelli rilevabili utilizzando un solo metodo.

In questo paragrafo si riportano i risultati circa l'applicazione della procedura ultrasonica sui pilastri realizzati con calcestruzzo $R_{ck} = 25 \text{ N/mm}^2$ precedentemente caricati, al fine di studiarne il decadimento della resistenza correlandola al valore della sollecitazione sostenuta e quindi alla posizione nel pilastro in termini di quota dalla base.

La strumentazione utilizzata consta di un generatore d'impulsi in sincronismo con un segnale elettrico e le sonde trasmettenti e riceventi. I rilievi sono stati effettuati in stretta vicinanza delle carote estratte e misurando più volte il tempo impiegato e lo spazio attraversato dall'onda. La superficie del pilastro, il più possibile uniforme è stata trattata con un gel che favorisce la trasmissione e la ricezione delle onde ed attenua l'impedenza acustica provocata dalla presenza di aria tra le sonde e la superficie dell'elemento.

Prima dell'esecuzione della prova è stata eseguita un'operazione di taratura o calibrazione del dispositivo accostando le due sonde (trasmettente e ricevente) in modo da eseguire la misura partendo da un tempo nullo e quindi tarando il tempo di propagazione degli impulsi su di un cilindro avente velocità, tempo e lunghezza noti. Sono quindi stati successivamente letti, per ogni battuta e per ogni pilastro, i relativi valori di tempo di propagazione degli impulsi.

Se si considera il materiale analizzato come isotropo ed elastico, la velocità di propagazione degli ultrasuoni dipende da fattori quali densità, porosità, armature. Perciò nell'esecuzione della prova si è tenuto conto, per evitare dati falsati, dei seguenti aspetti:

- se la traiettoria degli ultrasuoni non incontra nessuna discontinuità i parametri di velocità (V), spazio (dx) e tempo (dt) saranno conformi ai valori di taratura sul campione di riferimento;
- se la traiettoria degli ultrasuoni incontra un vuoto macroscopico, si leggerà un aumento del tempo ed una riduzione di velocità, poiché il percorso sarà maggiore lungo la congiungente le due sonde;
- se la traiettoria degli ultrasuoni attraversa vuoti riempiti da materiale pulverulento, risulterà uno sfasamento poco marcato rispetto ai parametri di riferimento;
- se la traiettoria degli ultrasuoni incontra una zona a bassa densità e ad alta porosità, risulterà una marcata attenuazione della velocità ed un tempo di poco superiore a quello di riferimento.

Si riportano, nelle tabelle seguenti, i risultati della campagna di indagine eseguite con riferimento alle prescrizioni della legge UNI 9524. Nelle tabelle sono inoltre indicate la modalità di prova, il tipo di superficie analizzata, il codice identificativo del pilastro, lo schema ed i dati di prova.

L'indagine ultrasonica è stata eseguita sia in trasparenza che in riflessione su alcuni pilastri del laboratorio. I risultati di tale analisi sono stati riportati sul grafico (fcar - V) dove si possono notare in blu i valori della velocità in trasparenza e la determinazione della retta interpolatrice.

Come si può notare i dati diagrammati presentano un buon andamento con velocità basse in corrispondenza delle rispettive resistenze a rottura del calcestruzzo, anch'esse basse; sia per le velocità in trasparenza che in riflessione.

Tabella 5.5 Prove ultrasoniche.

Indagini ultrasoniche in prossimità dei carotaggi non cappati.								
Identificativo pilastro	Posizione	Quota dalla base [cm]	Tempo [µsec]	Distanza Sonde [m]	V _{trasparenza} [m/sec]	Tempo [µsec]	Distanza Sonde [m]	V _{riflessione} [m/sec]
P1	P1/1	86,00	79,80	0,310	3884,71	-	-	-
	P1/2	110,00	76,00	0,310	4078,95	-	-	-
	P1/3	127,00	75,60	0,310	4100,53	-	-	-
P2	P2/1	94,50	85,90	0,295	3434,23	37,60	0,10	2659,57
	P2/2	122,00	85,30	0,295	3458,38	39,40	0,10	2538,07
	P2/3	137,00	86,50	0,295	3410,40	70,60	0,14	1983,00
P3	P3/1	69,50	65,50	0,295	4503,82	-	-	-
	P3/2	111,50	66,30	0,295	4449,47	-	-	-
	P3/3	153,50	70,30	0,295	4196,30	-	-	-
P4*	P4/1	134,50**	79,35	0,300	3780,72	-	-	-
	P4/2	96,50**	78,80	0,300	3807,11	-	-	-
	P4/3	82,00**	77,50	0,300	3870,97	-	-	-
P5	P5/1	71,00	75,10	0,310	4127,83	-	-	-
	P5/2	121,50	78,80	0,310	3934,01	-	-	-
	P5/3	172,00	76,60	0,310	4047,00	-	-	-
P6	P6/1	79,00	80,60	0,295	3660,05	32,10	0,10	3115,26
	P6/2	119,00	82,70	0,295	3567,11	39,50	0,10	2531,65
	P6/3	159,00	81,00	0,295	3641,98	46,70	0,14	2997,86
P7	P7/1	109,00	71,70	0,305	4253,84	-	-	-
	P7/2	132,00	74,00	0,305	4121,62	-	-	-
	P7/3	149,00	74,00	0,305	4121,62	-	-	-
P8	P8/1	50,00	78,80	0,310	3934,01	30,10	0,10	3322,26
	P8/2	89,50	82,70	0,310	3748,49	35,80	0,10	2793,30
	P8/3	129,50	76,40	0,310	4057,59	38,90	0,14	3598,97
P10*	P10/1	123,00**	91,00	0,300	3296,70	49,70	0,10	2012,07
	P10/2	107,00**	89,50	0,300	3351,96	42,50	0,10	2352,94
	P10/3	86,00**	88,30	0,300	3397,51	62,70	0,14	2232,85
P11	P11/1	78,00	78,20	0,300	3836,32	31,00	0,10	3225,81
	P11/2	122,00	77,40	0,300	3875,97	37,00	0,10	2702,70
	P11/3	159,00	76,80	0,300	3906,25	35,80	0,14	3910,61
P12	P12/1	87,00	72,00	0,295	4097,22	30,00	0,10	3333,33
	P12/2	128,50	73,50	0,295	4013,61	33,70	0,10	2967,36
	P12/3	149,50	75,20	0,295	3922,87	41,67	0,14	3359,73
P13	P13/1	61,50	61,40	0,315	5130,29	-	-	-
	P13/2	101,50	60,30	0,315	5223,88	-	-	-
	P13/3	142,00	62,20	0,315	5064,31	-	-	-
P14	P14/1	48,50	79,40	0,310	3904,28	-	-	-
	P14/2	87,00	80,10	0,310	3870,16	-	-	-
	P14/3	129,50	80,50	0,310	3850,93	-	-	-
P15	P15/1	49,00	72,10	0,300	4160,89	-	-	-
	P15/2	91,00	67,70	0,300	4431,31	-	-	-
	P15/3	128,00	69,10	0,300	4341,53	-	-	-

*Rotto
**Distanza dalla sommità

Tabella 5.6 Velocità degli ultrasuoni nelle carote cappate.

Indagini ultrasoniche sulle carote cappate.				
Identificativo pilastro	Posizione	Tempo [μsec]	Distanza Sonde [m]	V _{trasparenza} [m/sec]
P1	P1/1	47,30	199,00	4207,19
	P1/2	49,50	197,00	3979,80
	P1/3	50,20	197,00	3924,30
P2	P2/1	54,20	198,00	3653,14
	P2/2	53,50	199,00	3719,63
	P2/3	53,00	197,00	3716,98
P3	P3/1	51,10	198,00	3874,76
	P3/2	46,50	198,00	4258,06
	P3/3	47,40	199,00	4198,31
P4*	P4/1	49,50	198,00	4000,00
	P4/2	50,20	199,00	3964,14
	P4/3	50,50	196,00	3881,19
P5	P5/1	47,50	198,00	4168,42
	P5/2	46,70	199,00	4261,24
	P5/3	47,50	198,00	4168,42
P6	P6/1	47,70	198,00	4150,94
	P6/2	46,70	199,00	4261,24
	P6/3	46,80	197,00	4209,40
P7	P7/1	46,60	199,00	4270,39
	P7/2	47,50	199,00	4189,47
	P7/3	48,50	199,00	4103,09
P8	P8/1	46,50	199,00	4279,57
	P8/2	47,50	198,00	4168,42
	P8/3	47,70	198,00	4150,94
P9	P9/1	-	-	-
	P9/2	29,10	9,90	340,21
	P9/3	27,50	9,70	352,73
P10*	P10/1	48,20	198,00	4107,88
	P10/2	49,70	200,00	4024,14
	P10/3	48,80	198,00	4057,38
P11	P11/1	47,70	198,00	4150,94
	P11/2	46,70	197,00	4218,42
	P11/3	47,70	197,00	4129,98
P12	P12/1	48,10	199,00	4137,21
	P12/2	48,50	197,00	4061,86
	P12/3	48,70	199,00	4086,24
P13	P13/1	44,10	199,00	4512,47
	P13/2	44,20	198,00	4479,64
	P13/3	44,50	197,00	4426,97
P14	P14/1	49,70	199,00	4004,02
	P14/2	47,80	199,00	4163,18
	P14/3	48,20	197,00	4087,14
P15	P15/1	45,70	198,00	4332,60
	P15/2	46,30	197,00	4254,86
	P15/3	47,30	197,00	4164,90

Nel seguente grafico si riportano le velocità in trasparenza nelle carote cappate, distinte in base alla posizione e al pilastro.

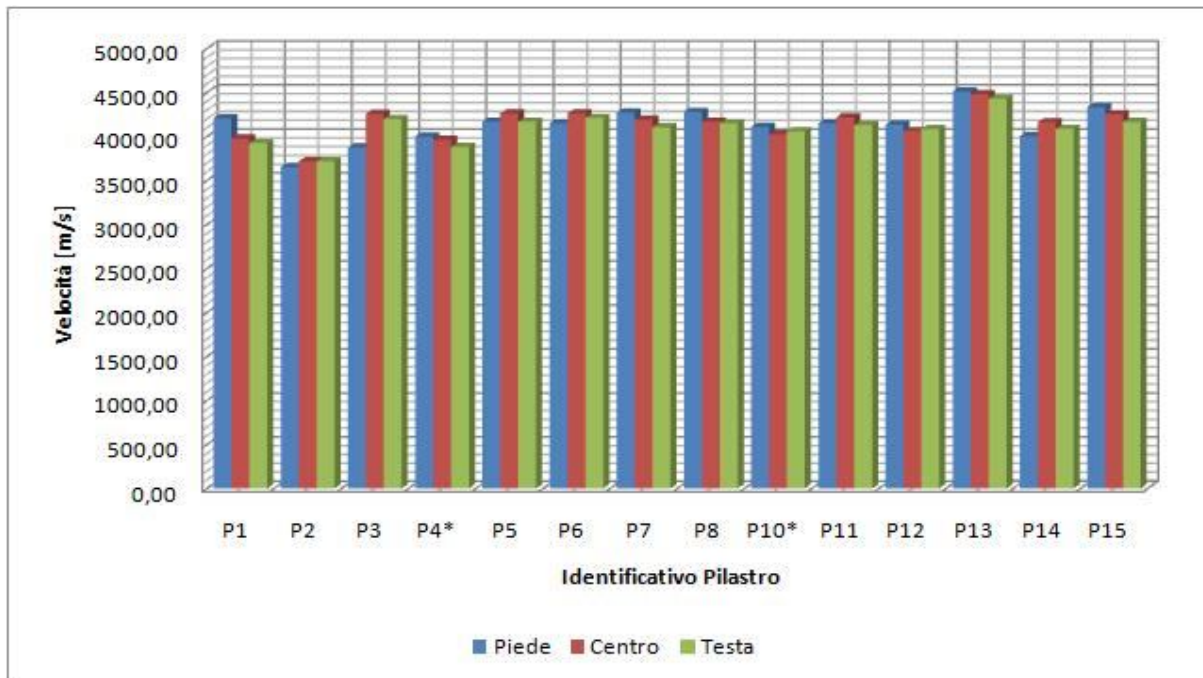


Figura 5.10 Diagramma velocità – posizione.

I valori medi delle velocità precedenti, distinte in base alla posizione, sono riportati nel successivo diagramma.

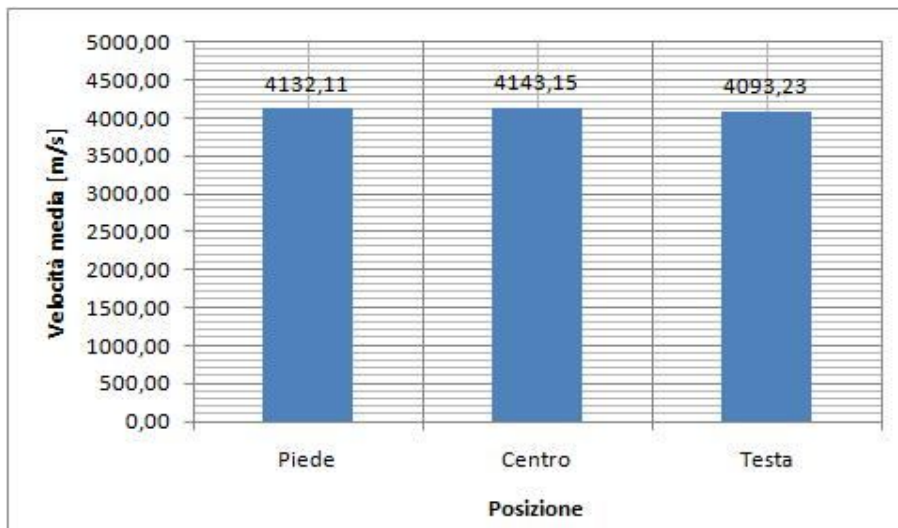


Figura 5.11 Velocità medie per posizione.

Diagrammando i risultati precedenti si ottiene la seguente relazione tra i valori di resistenza a rottura delle carote cappate desunti tramite prove distruttive e quelli desunti da prove non distruttive.

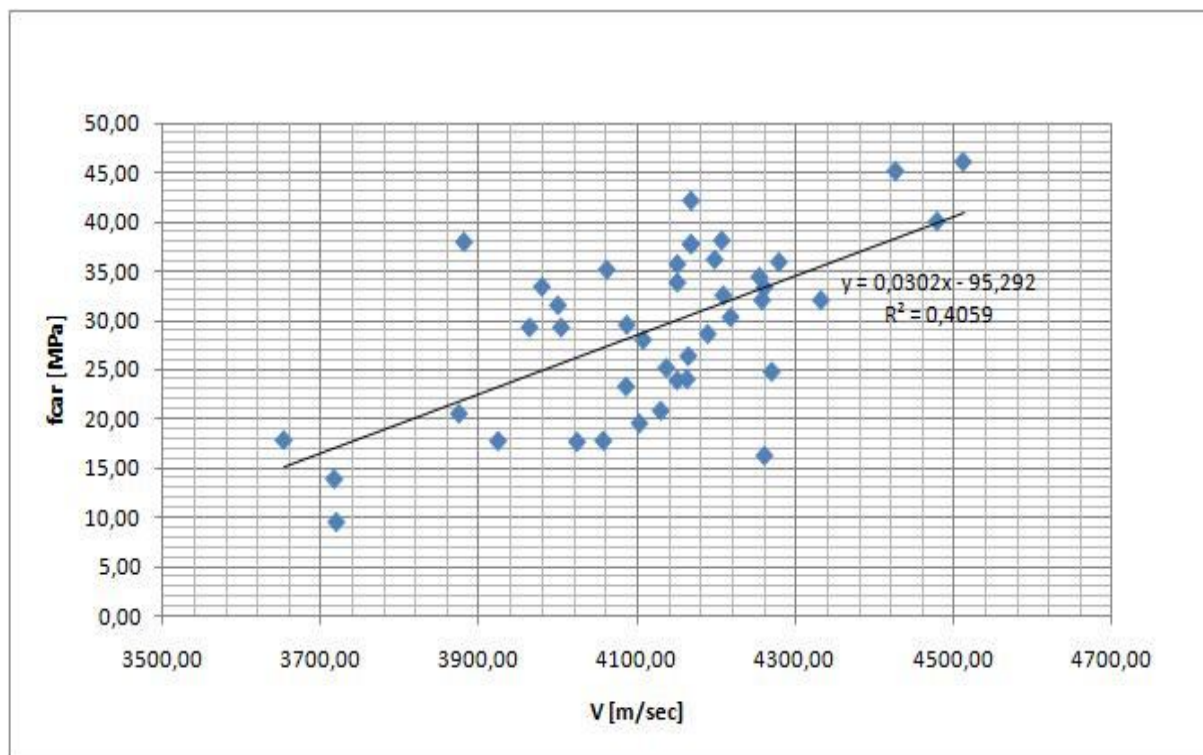


Figura 5.12 Grafico velocità – resistenza.

La resistenza media in trasparenza, vista la retta di interpolazione, è data dalla relazione:

$$f_{car} = 0,0302 \cdot V - 95,292. \quad (5.7)$$

La velocità media in trasparenza è pari a:

$$V_{med} = 4122,83 \text{ m/s}. \quad (5.8)$$

Sostituendo nella precedente si ottiene la resistenza media dei pilastri:

$$R_{cm} = 0,0302 \cdot 4122,83 - 95,292 = 29,22 \text{ MPa}. \quad (5.9)$$

Nel seguente diagramma si riportano gli andamenti delle velocità ultrasoniche in trasparenza in funzione delle resistenze cubiche ottenute dai carotaggi cappati con la relazione della British Standard 1881 (4.28a).

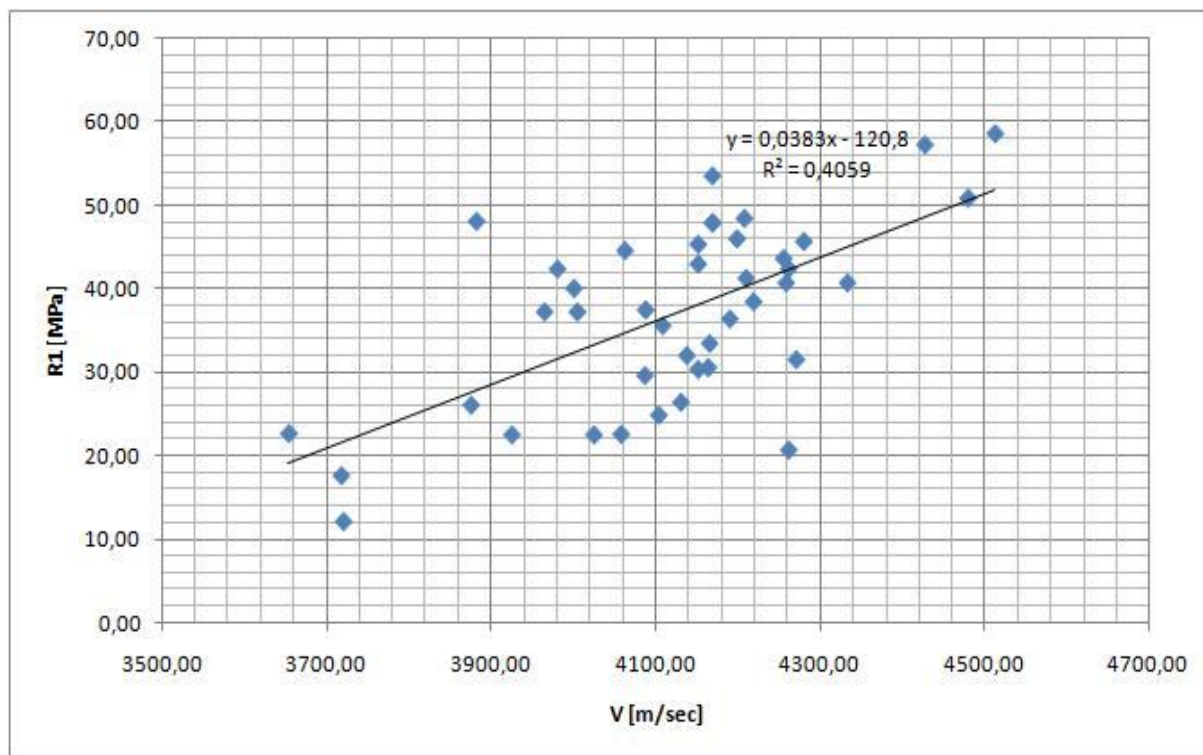


Figura 5.13 Grafico velocità – resistenza cubica.

La resistenza media in trasparenza, vista la retta di interpolazione, è data dalla relazione:

$$R_1 = 0,0383 \cdot V - 120,8. \quad (5.10)$$

La velocità media in trasparenza è pari a:

$$V_{med} = 4122,83 \text{ m/s}. \quad (5.11)$$

Sostituendo nella precedente si ottiene la resistenza media dei pilastri:

$$R_{1m} = 0,0383 \cdot 4122,83 - 120,8 = 37,10 \text{ MPa}. \quad (5.12)$$

Si procede a distinguere, nei seguenti grafici, le serie di valori di velocità e resistenza a rottura delle carote cappate in base alla posizione di testa, piede o centro. Per ognuna delle combinazioni viene riportata anche la retta di interpolazione dei valori.

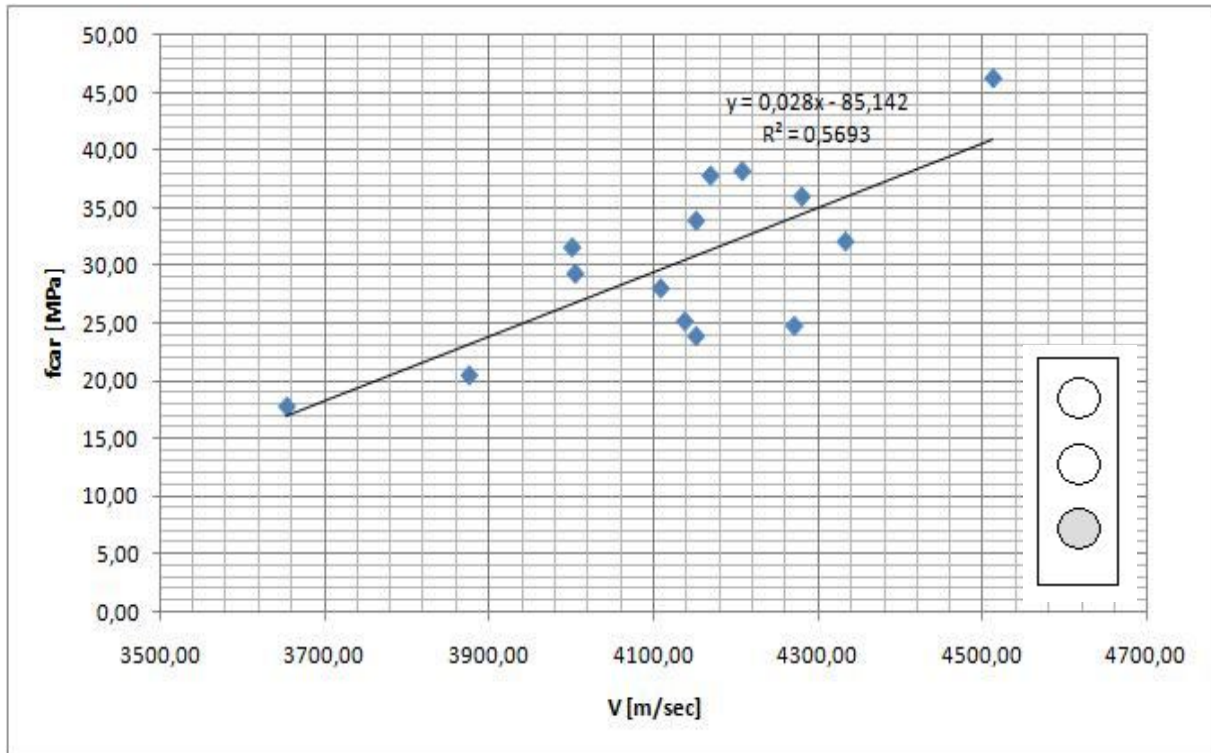


Figura 5.14 Serie di Piede.

La resistenza media al piede, vista la retta di interpolazione, è data dalla relazione:

$$f_{car} = 0,028 \cdot V - 85,142 . \quad (5.13)$$

La velocità media al piede è pari a:

$$V_{med} = 4132,11 \text{ m/s} . \quad (5.14)$$

Sostituendo nella precedente si ottiene la resistenza media dei pilastri al piede:

$$R_{cm} = 0,028 \cdot 4132,11 - 85,142 = 30,56 \text{ MPa} . \quad (5.15)$$

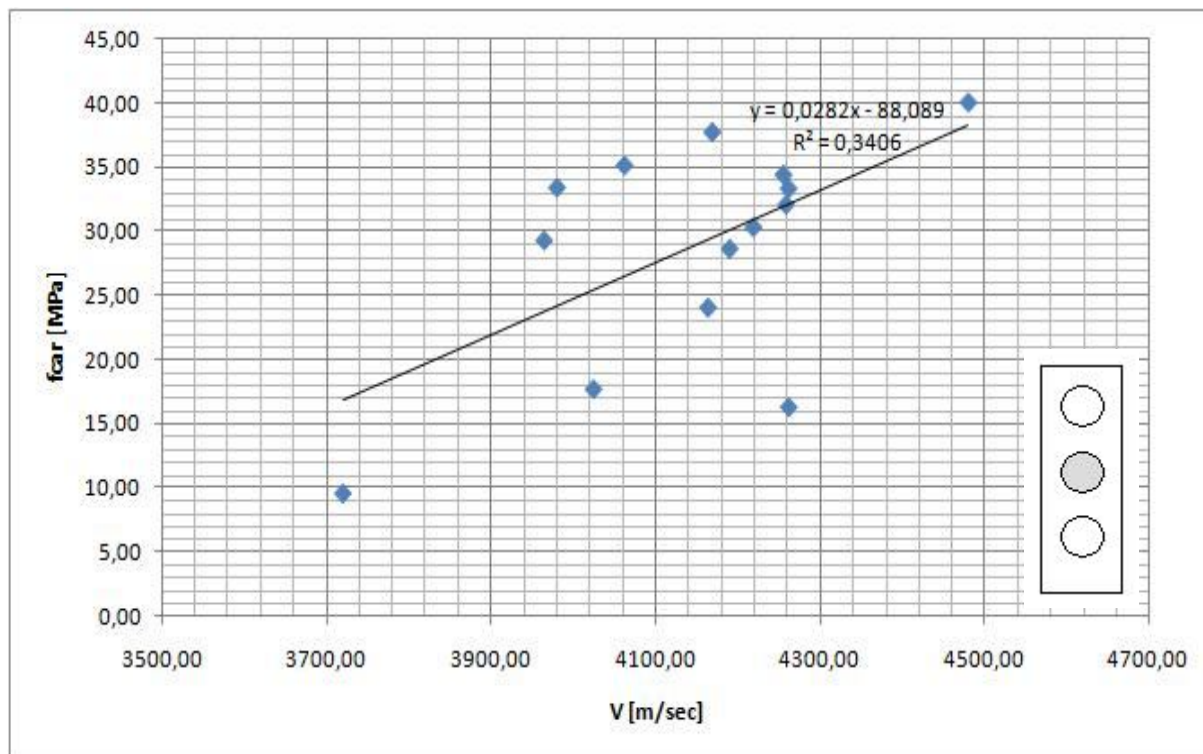


Figura 5.15 Serie di Centro.

La resistenza media al centro, vista la retta di interpolazione, è data dalla relazione:

$$f_{car} = 0,0282 \cdot V - 88,089 . \tag{5.16}$$

La velocità media al centro è pari a:

$$V_{med} = 4143,15 \text{ m/s} . \tag{5.17}$$

Sostituendo nella precedente si ottiene la resistenza media dei pilastri al centro:

$$R_{cm} = 0,0282 \cdot 4143,15 - 88,089 = 28,75 \text{ MPa} . \tag{5.18}$$

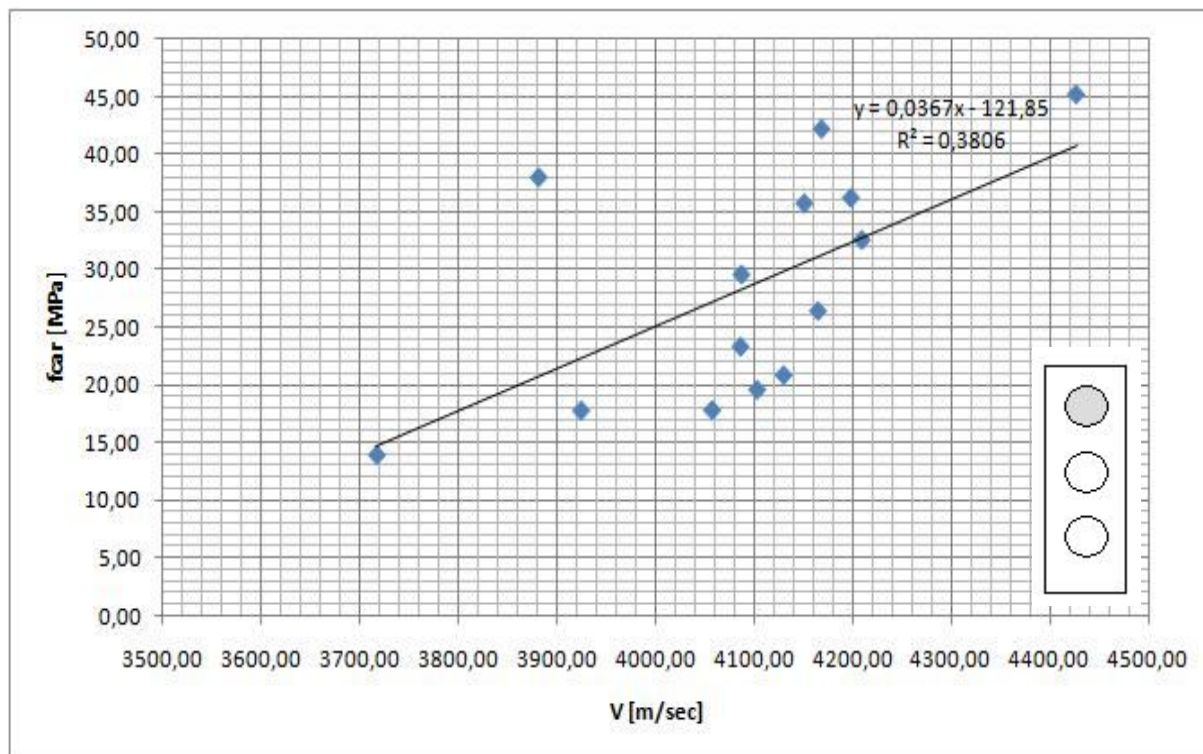


Figura 5.16 Serie di Testa.

La resistenza media alla testa, vista la retta di interpolazione, è data dalla relazione:

$$f_{car} = 0,0367 \cdot V - 121,85. \tag{5.19}$$

La velocità media alla testa è pari a:

$$V_{med} = 4093,23 \text{ m/s}. \tag{5.20}$$

Sostituendo nella precedente si ottiene la resistenza media dei pilastri alla testa:

$$R_{cm} = 0,0367 \cdot 4093,23 - 121,85 = 28,37 \text{ MPa}. \tag{5.21}$$

Si procede, infine, a distinguere nei seguenti grafici le serie di valori di velocità degli ultrasuoni e resistenza cubica delle carote cappate secondo la British Standard 1881, in base alla posizione di testa, piede o centro. Per ognuna delle combinazioni viene riportata anche la retta di interpolazione dei valori.

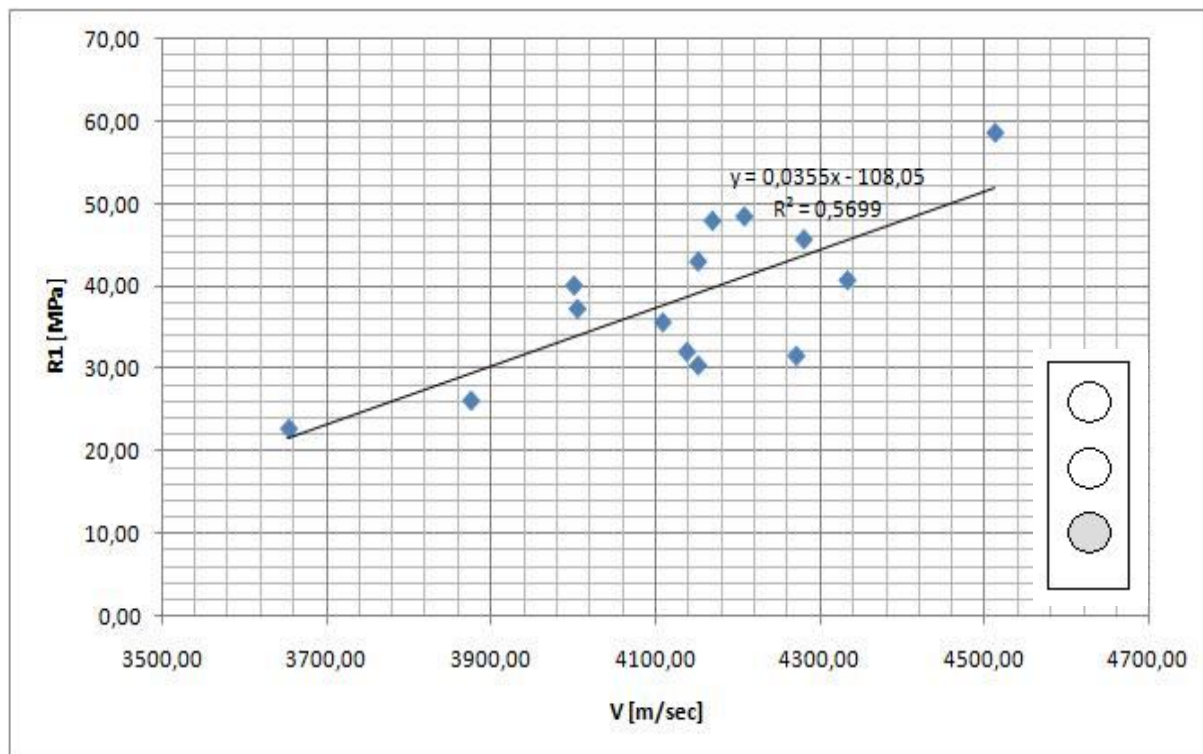


Figura 5.17 Serie di piede, V – R1.

La resistenza media al piede, vista la retta di interpolazione, è data dalla relazione:

$$R_1 = 0,0355 \cdot V - 108,05 . \tag{5.22}$$

La velocità media al piede è pari a:

$$V_{med} = 4132,11 \text{ m/s} . \tag{5.23}$$

Sostituendo nella precedente si ottiene la resistenza media dei pilastri al piede:

$$R_{1,m} = 0,0355 \cdot 4132,11 - 108,05 = 38,64 \text{ MPa} . \tag{5.24}$$

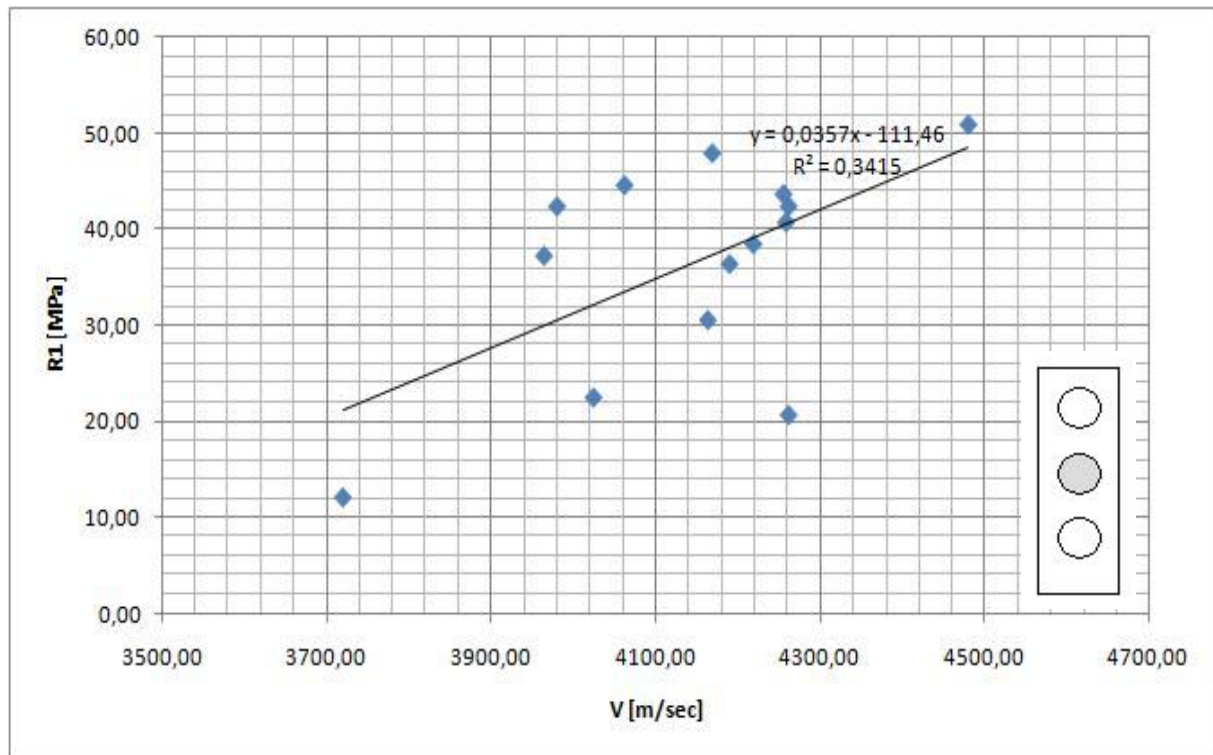


Figura 5.18 Serie di centro, $V - R_1$.

La resistenza media al centro, vista la retta di interpolazione, è data dalla relazione:

$$R_c = 0,0357 \cdot V - 111,46. \quad (5.25)$$

La velocità media al centro è pari a:

$$V_{med} = 4143,15 \text{ m/s}. \quad (5.26)$$

Sostituendo nella precedente si ottiene la resistenza media dei pilastri al centro:

$$R_{1m} = 0,0357 \cdot 4143,15 - 111,46 = 36,45 \text{ MPa}. \quad (5.27)$$

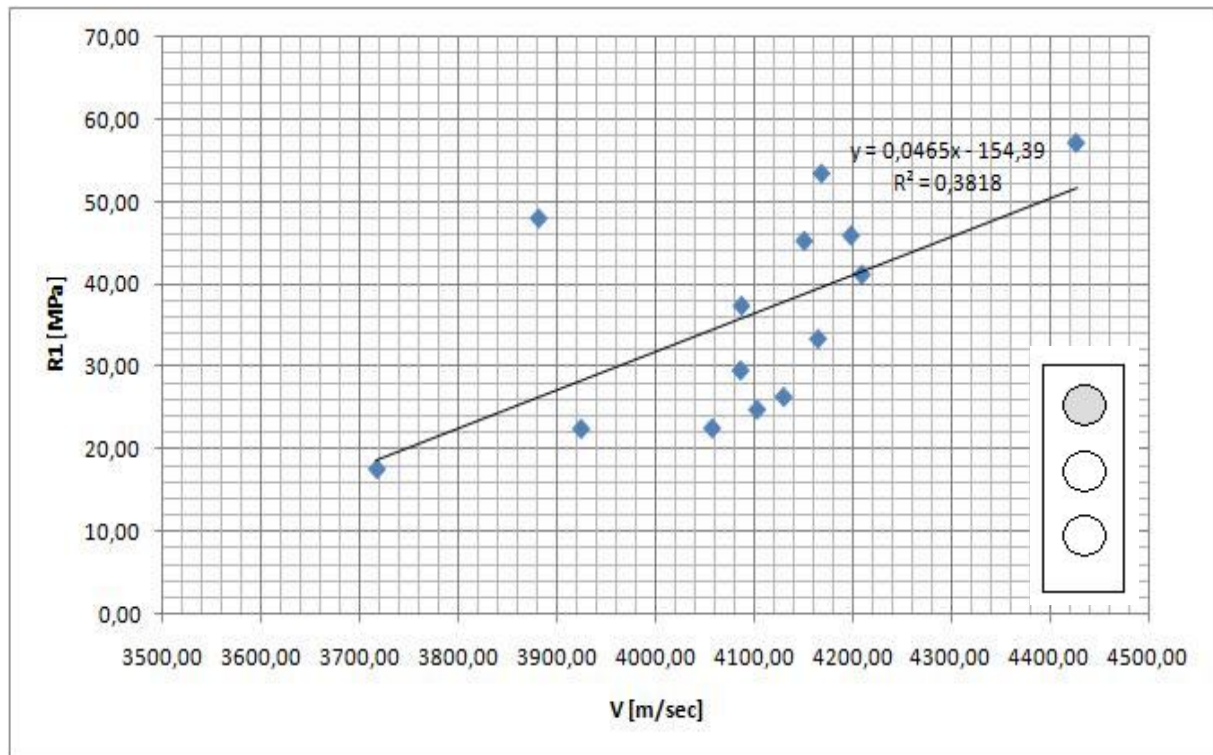


Figura 5.19 Serie di testa, $V - R_1$.

La resistenza media alla testa, vista la retta di interpolazione, è data dalla relazione:

$$R_1 = 0,0465 \cdot V - 154,39 . \quad (5.28)$$

La velocità media alla testa è pari a:

$$V_{med} = 4093,23 \text{ m/s} . \quad (5.29)$$

Sostituendo nella precedente si ottiene la resistenza media dei pilastri alla testa:

$$R_{1,m} = 0,0465 \cdot 4093,23 - 154,39 = 35,95 \text{ MPa} . \quad (5.30)$$

In seguito, sono state utilizzate le velocità ultrasoniche in trasparenza sulle carote cappate, assieme alle indagini sclerometriche, per l'applicazione del metodo Sonreb.

5.3 Prove sclerometriche

In aggiunta alle prove precedenti sono state eseguite delle indagini sclerometriche, per la misura dell'indice di rimbalzo medio in corrispondenza di ogni punto di estrazione delle carote. L'obiettivo di questa ulteriore indagine è quello di utilizzare la velocità degli ultrasuoni e l'indice di rimbalzo per stimare la resistenza a compressione con le formule riportate nei paragrafi precedenti. In questo modo è quindi possibile:

- controllare la correttezza dei risultati dei carotaggi;
- confrontare i risultati ottenuti con le diverse formulazioni prodotte dai vari studi.

In questo paragrafo, e nelle prossime due tabelle, sono riportati:

- gli indici di rimbalzo medi ottenuti da almeno nove o dieci battute dello strumento e tenendo conto (eliminandoli) dei valori estremi e/o errati;
- la stima della qualità del calcestruzzo utilizzando il criterio qualitativo di Kolek (1928) esposto in Tabella 4.9;
- calcolo della resistenza cubica a compressione utilizzando la relazione approssimata (4.39).

Le indagini sclerometriche sono state eseguite utilizzando:

- uno strumento appositamente tarato dalla casa costruttrice e posizionato in orizzontale (angolo di inclinazione 0°) e normale alla superficie da saggiare;
- una pietra porosa idonea ed in buone condizioni per rendere la superficie adatta alla prova.

Nella scelta delle zone da provare, come da prescrizioni normative, sono state evitate le zone particolarmente degradate come: nidi di ghiaia, armature affioranti, spazi vuoti e superfici troppo irregolari. In questo modo si è, quindi, evitato di ottenere dei valori falsati dell'indice di rimbalzo e non rappresentativi delle reali resistenze del conglomerato. I risultati di resistenza ottenuti nelle due tabelle seguenti, comunque, hanno una precisione del 10 – 30 % rispetto a quelli reali perché sono stati calcolati utilizzando soltanto l'indice di rimbalzo. Si denota, quindi, l'utilità di accoppiare i risultati delle prove sclerometriche ad altri tipi di prove, soprattutto non distruttive, così come esposto nel successivo paragrafo.

Tabella 5.7 Calcolo dell'indice di rimbalzo e stima della resistenza.

Risultati prove sclerometriche.												
Identificativo pilastro	Identificativo carota	Battute									I _{med}	R _{c, strumento} [MPa]
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
P1	P1/1	24	24	23	28	23	25	27	26	27	25	10
	P1/2	26	30	26	28	24	25	28	25	26	26	11
	P1/3	25	26	24	23	21	30	24	27	24	25	10
P2	P2/1	20	21	22	20	20	20	26	18	20	21	10
	P2/2	18	20	22	22	24	22	20	20	20	21	10
	P2/3	20	16	20	18	21	30	24	27	24	22	10
P3	P3/1	26	32	30	34	24	32	32	32	32	30	24
	P3/2	35	34	28	30	32	31	30	29	32	31	25
	P3/3	30	34	26	32	28	36	32	33	37	32	26
P4	P4/1	40	39	38	30	34	36	36	40	40	37	35
	P4/2	46	40	36	37	44	35	36	30	37	38	36
	P4/3	35	34	36	34	39	38	40	37	32	36	33
P5	P5/1	38	30	35	30	32	34	38	30	36	34	30
	P5/2	36	34	34	32	35	36	36	38	32	35	31
	P5/3	30	26	28	30	32	38	32	32	36	32	26
P6	P6/1	26	30	34	28	33	29	27	29	34	30	24
	P6/2	27	26	27	30	28	28	30	32	35	29	22
	P6/3	33	29	29	29	33	38	24	29	27	30	23
P7	P7/1	36	32	32	43	37	33	40	35	37	36	33
	P7/2	37	40	37	34	35	34	32	38	38	36	33
	P7/3	35	33	34	37	32	36	35	35	38	35	31
P8	P8/1	30	36	36	32	37	30	30	38	36	34	30
	P8/2	26	26	32	30	28	34	34	30	32	30	24
	P8/3	30	28	28	30	30	32	30	28	32	30	24
P9	P9/1	23	21	16	24	22	25	19	24	21	22	12
	P9/2	22	24	22	20	22	21	24	22	26	23	14
	P9/3	21	22	22	24	25	24	22	23	27	23	14
P10	P10/1	34	30	28	29	30	29	31	32	28	30	24
	P10/2	28	29	35	34	32	34	33	34	30	32	26
	P10/3	30	30	31	31	34	32	35	32	28	31	25
P11	P11/1	34	38	32	29	34	33	28	34	30	32	26
	P11/2	38	40	41	34	32	38	40	41	39	38	36
	P11/3	34	35	30	35	30	32	36	40	37	34	30
P12	P12/1	32	35	34	34	38	34	30	36	38	35	31
	P12/2	36	36	32	30	33	36	38	30	32	34	30
	P12/3	31	30	33	38	29	36	33	34	36	33	28
P13	P13/1	36	30	32	36	34	36	33	39	37	35	31
	P13/2	36	34	35	39	30	36	36	34	38	35	31
	P13/3	36	38	32	34	35	34	38	36	39	36	33
P14	P14/1	32	30	26	32	36	34	37	38	38	34	30
	P14/2	33	36	32	34	36	36	42	34	32	35	31
	P14/3	32	32	34	30	30	34	30	36	33	32	26
P15	P15/1	32	36	35	36	37	36	36	40	36	36	33
	P15/2	26	36	40	34	35	33	31	35	35	34	30
	P15/3	38	35	32	31	32	30	34	30	34	33	28

Tabella 5.8 Calcolo della resistenza con l'indice di rimbalzo.

Stima della resistenza in base all'indice di rimbalzo.				
Identificativo pilastro	Identificativo carota	l_{med}	Criterio qualitativo di Kolk	R _{cub} [MPa]
P1	P1/1	25	discreto	16,75
	P1/2	26	discreto	18,19
	P1/3	25	discreto	16,36
P2	P2/1	21	discreto	11,93
	P2/2	21	discreto	12,04
	P2/3	22	discreto	13,42
P3	P3/1	30	medio	23,28
	P3/2	31	medio	24,33
	P3/3	32	medio	25,40
P4	P4/1	37	medio	32,75
	P4/2	38	medio	34,14
	P4/3	36	medio	31,39
P5	P5/1	34	medio	27,76
	P5/2	35	medio	29,39
	P5/3	32	medio	24,79
P6	P6/1	30	medio	22,69
	P6/2	29	discreto	21,67
	P6/3	30	medio	22,84
P7	P7/1	36	medio	31,39
	P7/2	36	medio	31,39
	P7/3	35	medio	29,71
P8	P8/1	34	medio	28,08
	P8/2	30	medio	22,98
	P8/3	30	medio	22,40
P9	P9/1	22	discreto	12,84
	P9/2	23	discreto	13,77
	P9/3	23	discreto	14,62
P10	P10/1	30	medio	22,84
	P10/2	32	medio	25,56
	P10/3	31	medio	24,64
P11	P11/1	32	medio	26,02
	P11/2	38	medio	34,49
	P11/3	34	medio	28,73
P12	P12/1	35	medio	29,06
	P12/2	34	medio	27,76
	P12/3	33	medio	27,28
P13	P13/1	35	medio	29,39
	P13/2	35	medio	30,21
	P13/3	36	medio	30,88
P14	P14/1	34	medio	27,76
	P14/2	35	medio	29,71
	P14/3	32	medio	25,87
P15	P15/1	36	medio	31,22
	P15/2	34	medio	28,08
	P15/3	33	medio	26,65

È possibile diagrammare la resistenza cubica letta dalla curva dello strumento in funzione dell'indice sclerometrico.

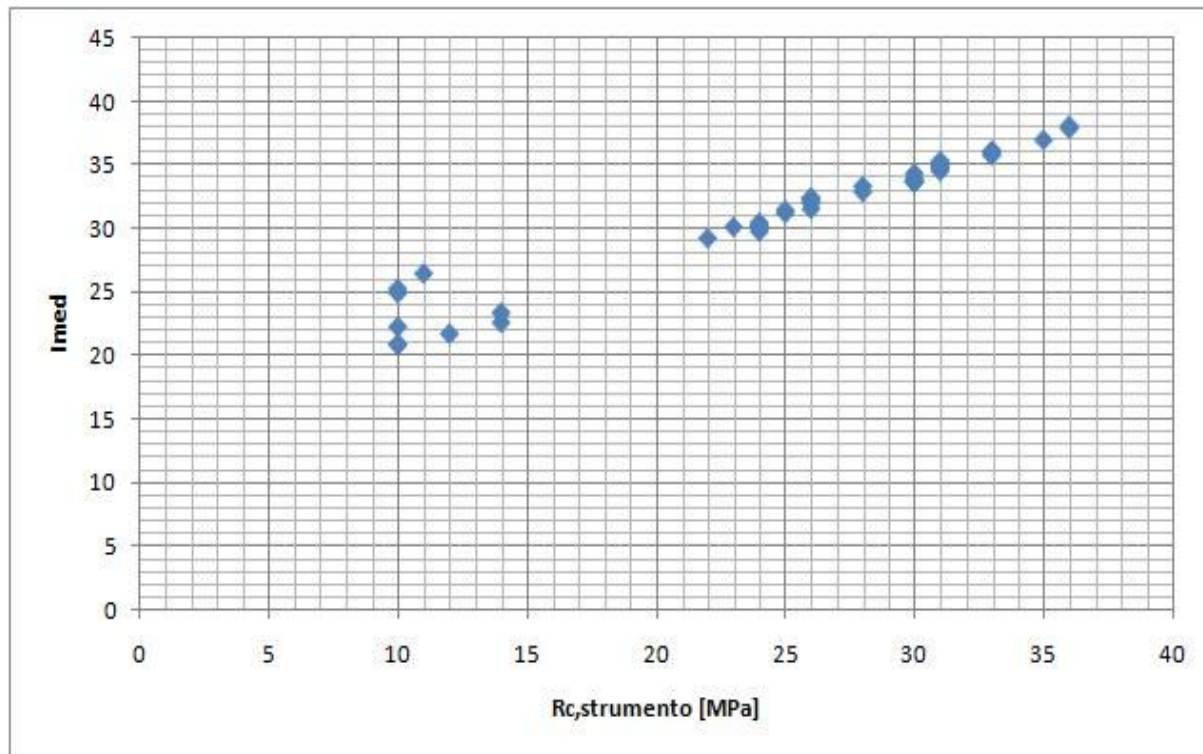


Figura 5.20 Relazione resistenza – indice sclerometrico.

Inoltre si confrontano, nel successivo grafico, le resistenze ottenute dalle carote cappate, calcolate con la British Standard, e le resistenze ottenute dalla curva dello sclerometro. È possibile notare che, a parità di resistenza delle carote cappate, corrispondono resistenze inferiori misurate con lo sclerometro. Tale risultato è tipico di calcestruzzi giovani, ove non si è ancora manifestato il fenomeno della carbonatazione.

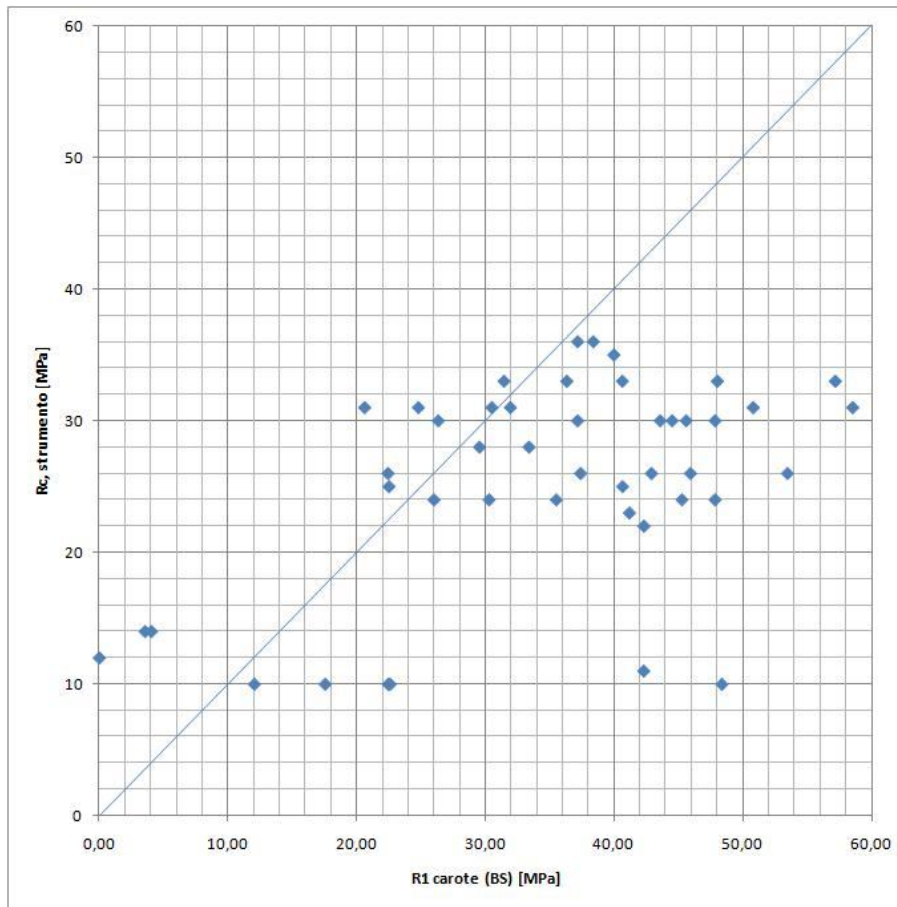


Figura 5.21 Relazione tra resistenza delle carote e resistenza delle indagini sclerometriche.

5.4 Metodo Sonreb

I risultati della prova ultrasonica e della prova sclerometrica possono essere usati per ottenere la resistenza cubica del calcestruzzo. Il metodo Sonreb, essendo la combinazione di due prove non distruttive, si presta convenientemente ad essere utilizzato per strutture particolarmente danneggiate, anche a seguito di azioni sismiche, e che non possono sostenere prove più aggressive come, ad esempio, i carotaggi. Le due prove, in questo modo, diminuiscono le rispettive incertezze ed i punti deboli, in particolare:

- influenza dell'umidità, della granulometria degli inerti, del dosaggio di cemento sulla lettura della velocità degli ultrasuoni;
- influenza delle variazioni di qualità tra strati superficiali e profondi sulla lettura dell'indice di rimbalzo.

Il metodo Sonreb non può essere utilizzato in quei casi che inficiano i risultati della misura di velocità e indice, ad esempio: superfici troppo degradate, elevata presenza di armature, elementi in calcestruzzo di forma troppo complessa ed irregolare. Nella tabella seguente si riportano, per ogni pilastro e per ogni carota, i valori della velocità delle onde ultrasoniche (misurate sulle carote cappate) ed il valore dell'indice di rimbalzo medio, calcolati nelle pagine precedenti. I valori medi dei due parametri vanno determinati su almeno tre misurazioni dirette di velocità e almeno 9 – 10 misurazioni dell'indice di rimbalzo. Vengono utilizzate, rispettivamente, le tre formulazioni (4.40), (4.41) e (4.42) per il calcolo delle resistenze cubiche. Dall'applicazione delle formule si denotano alcune differenze, in particolare la terza relazione fornisce, nella maggioranza dei casi, valori più elevati di resistenza, è dunque la meno conservativa. La stima della resistenza può essere condotta anche interpolando i diagrammi delle figure 4.31, 4.32 e 4.33 ottenuti studiando le funzioni precedenti. È bene notare che, nelle relazioni utilizzate, la velocità degli ultrasuoni va inserita in m/s o in km/s in relazione al caso. Negli anni sono state prodotte numerose altre relazioni da studi specifici su provini in calcestruzzo confezionati con cementi differenti e sottoposti a schiacciamento con pressa dopo aver calcolato i valori di indice di rimbalzo e di velocità delle onde ultrasoniche. I risultati delle due relazioni suddette possono essere assunti con una precisione media del 15 %. Per l'impiego di metodi combinati non distruttivi si può fare riferimento al progetto di norma Rilem 43 – CND.

Tabella 5.9 Risultati del metodo Sonreb.

Metodo Sonreb						
Identificativo pilastro	Identificativo carota	l_{med}	V [m/s]	Rcub(1) [MPa]	Rcub(2) [MPa]	Rcub(3) [MPa]
P1	P1/1	25	4207,19	18,67	26,70	22,77
	P1/2	26	3979,80	17,26	24,51	21,79
	P1/3	25	3924,30	15,29	22,21	19,69
P2	P2/1	21	3653,14	9,86	15,40	13,77
	P2/2	21	3719,63	10,41	16,18	14,34
	P2/3	22	3716,98	11,33	17,25	15,46
P3	P3/1	30	3874,76	19,61	26,64	24,72
	P3/2	31	4258,06	25,97	34,46	30,37
	P3/3	32	4198,31	25,91	34,17	30,51
P4	P4/1	37	4000,00	27,99	35,40	33,43
	P4/2	38	3964,14	28,27	35,51	33,87
	P4/3	36	3881,19	25,02	32,05	30,67
P5	P5/1	34	4168,42	27,30	35,43	32,08
	P5/2	35	4261,24	30,26	38,70	34,79
	P5/3	32	4168,42	24,94	33,09	29,59
P6	P6/1	30	4150,94	22,98	31,04	27,57
	P6/2	29	4261,24	23,71	32,19	28,01
	P6/3	30	4209,40	23,96	32,25	28,42
P7	P7/1	36	4270,39	32,07	40,48	36,61
	P7/2	36	4189,47	30,52	38,63	35,33
	P7/3	35	4103,09	27,67	35,52	32,70
P8	P8/1	34	4279,57	29,51	38,05	33,96
	P8/2	30	4168,42	23,47	31,61	28,04
	P8/3	30	4150,94	22,74	30,80	27,32
P9	P9/1	22	0,00	0,00	0,00	0,00
	P9/2	23	340,21	0,02	0,05	0,19
	P9/3	23	352,73	0,03	0,06	0,21
P10	P10/1	30	4107,88	22,48	30,38	27,17
	P10/2	32	4024,14	23,32	30,92	28,33
	P10/3	31	4057,38	23,13	30,86	28,03
P11	P11/1	32	4150,94	25,64	33,73	30,40
	P11/2	38	4218,42	33,50	41,60	38,27
	P11/3	34	4129,98	27,40	35,37	32,31
P12	P12/1	35	4137,21	27,77	35,76	32,68
	P12/2	34	4061,86	25,53	33,26	30,58
	P12/3	33	4086,24	25,57	33,40	30,54
P13	P13/1	35	4512,47	35,12	44,52	38,68
	P13/2	35	4479,64	35,23	44,47	38,92
	P13/3	36	4426,97	34,77	43,78	38,68
P14	P14/1	34	4004,02	24,59	32,11	29,78
	P14/2	35	4163,18	28,73	36,81	33,59
	P14/3	32	4087,14	24,51	32,35	29,41
P15	P15/1	36	4332,60	33,16	41,81	37,45
	P15/2	34	4254,86	29,07	37,52	33,59
	P15/3	33	4164,90	26,37	34,50	31,11

Si riportano i valori delle resistenze ottenute con il metodo Sonreb in funzione dei risultati dei carotaggi cappati (calcolati con la British Standard).

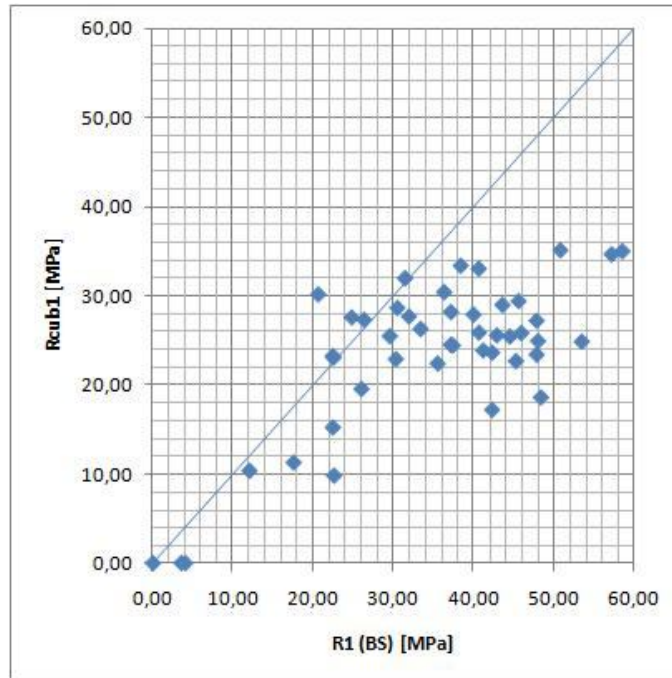


Figura 5.22 Confronto tra resistenza Sonreb con la (4.40) e resistenza dei carotaggi.

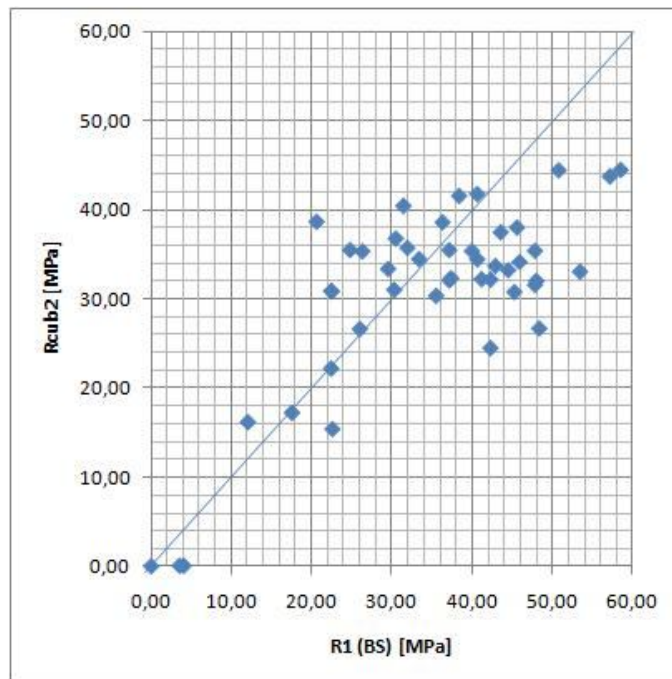


Figura 5.23 Confronto tra resistenza Sonreb con la (4.41) e resistenza dei carotaggi.

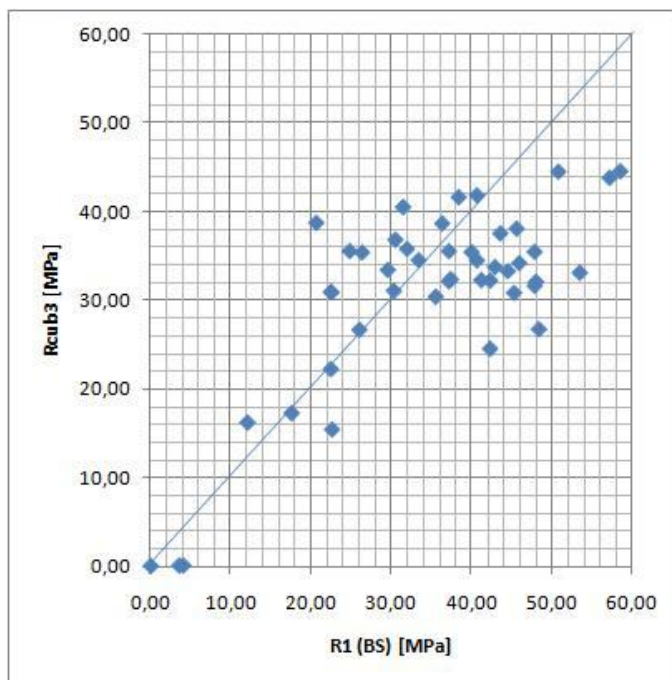


Figura 5.24 Confronto tra resistenza Sonreb con la (4.42) e resistenza dei carotaggi.

È noto che l'espressione del calcolo della resistenza con il metodo Sonreb è del tipo:

$$R_c = a \cdot V^b \cdot I^c \quad (5.31)$$

Nella seguente tabella si calcolano le costanti a, b, e c imponendo che sia minimo lo scarto tra le resistenze dei carotaggi cappati, calcolati mediante la British Standard, e le resistenze calcolate con la formula precedente. Procedendo per iterazioni sono stati ottenuti i seguenti valori:

- a = 0,0000152,
- b = 1,589;
- c = 0,427.

Tabella 5.10 Calcolo delle costanti del metodo Sonreb.

Calcolo dei coefficienti a, b, c.						
Identificativo pilastro	Identificativo carota	R1 (BS) [MPa]	l_{med}	V [m/s]	Rc [MPa]	$(R1-Rc)^2$
P1	P1/1	48,39	25	4207,19	34,51	192,64
	P1/2	42,31	26	3979,80	32,24	101,42
	P1/3	22,45	25	3924,30	30,72	68,43
P2	P2/1	22,60	21	3653,14	25,38	7,77
	P2/2	12,05	21	3719,63	26,18	199,63
	P2/3	17,55	22	3716,98	26,85	86,43
P3	P3/1	26,01	30	3874,76	32,82	46,33
	P3/2	40,66	31	4258,06	38,53	4,54
	P3/3	45,94	32	4198,31	38,08	61,84
P4	P4/1	39,99	37	4000,00	37,52	6,12
	P4/2	37,17	38	3964,14	37,36	0,04
	P4/3	48,03	36	3881,19	35,39	159,72
P5	P5/1	47,86	34	4168,42	38,47	88,05
	P5/2	20,62	35	4261,24	40,40	391,13
	P5/3	53,48	32	4168,42	37,42	257,77
P6	P6/1	30,30	30	4150,94	36,38	36,98
	P6/2	42,32	29	4261,24	37,50	23,22
	P6/3	41,20	30	4209,40	37,25	15,55
P7	P7/1	31,45	36	4270,39	41,19	94,96
	P7/2	36,33	36	4189,47	39,96	13,20
	P7/3	24,80	35	4103,09	38,15	178,21
P8	P8/1	45,61	34	4279,57	40,23	28,98
	P8/2	47,86	30	4168,42	36,74	123,60
	P8/3	45,28	30	4150,94	36,26	81,34
P9	P9/1	-	22	0,00	-	-
	P9/2	-	23	340,21	-	-
	P9/3	-	23	352,73	-	-
P10	P10/1	35,52	30	4107,88	35,84	0,10
	P10/2	22,44	32	4024,14	35,65	174,54
	P10/3	22,51	31	4057,38	35,80	176,46
P11	P11/1	42,91	32	4150,94	37,62	28,01
	P11/2	38,39	38	4218,42	41,34	8,71
	P11/3	26,34	34	4129,98	38,23	141,32
P12	P12/1	31,94	35	4137,21	38,44	42,24
	P12/2	44,52	34	4061,86	36,92	57,67
	P12/3	29,55	33	4086,24	37,12	57,27
P13	P13/1	58,55	35	4512,47	44,25	204,53
	P13/2	50,81	35	4479,64	44,03	45,94
	P13/3	57,20	36	4426,97	43,45	189,27
P14	P14/1	37,17	34	4004,02	36,09	1,16
	P14/2	30,50	35	4163,18	39,04	72,92
	P14/3	37,41	32	4087,14	36,65	0,57
P15	P15/1	40,65	36	4332,60	42,10	2,10
	P15/2	43,59	34	4254,86	39,86	13,89
	P15/3	33,40	33	4164,90	38,04	21,56

Si riportano, infine, i valori delle resistenze medie, distinte per posizione, calcolate con le tre formulazioni precedenti.

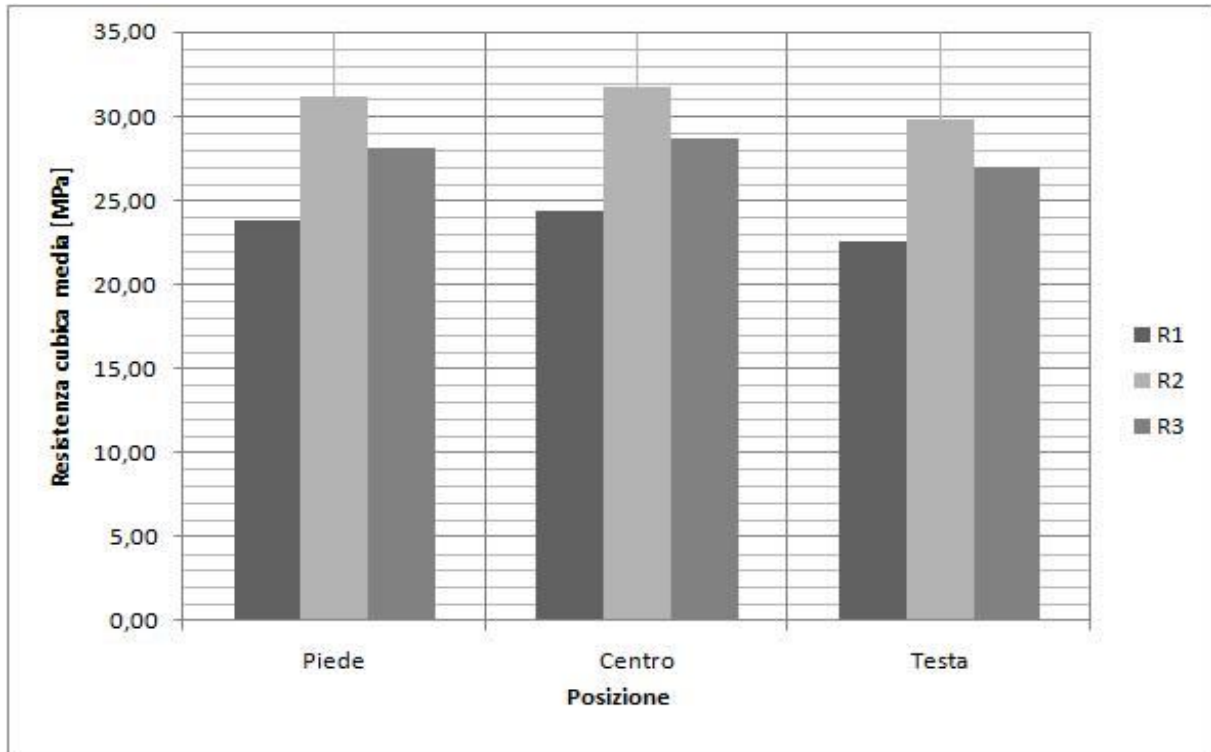


Figura 5.25 Resistenze medie con il metodo Sonreb, distinte per posizione.

5.5 Discussione dei risultati ottenuti

La stima della resistenza a compressione del calcestruzzo è di fondamentale importanza nella valutazione dello stato di costruzioni già esistenti ed è di non facile determinazione, necessitano quindi specifiche procedure di stima. Si è visto che, a tale scopo, è possibile utilizzare delle prove distruttive e non distruttive e sono stati esposti tutti i metodi e gli strumenti necessari alla loro esecuzione, dagli strumenti di misura agli algoritmi di calcolo dei sistemi di elaborazione dei dati. Nel seguente lavoro sono state descritte ed esaminate le più diffuse prove non distruttive (ultrasuoni, sclerometro, metodo Sonreb) e distruttive (prove di carico a compressione su provini cubici e cilindrici). Con riferimento ai metodi distruttivi, il modo più semplice per analizzare una struttura esistente è l'estrazione e rottura di carote. I risultati ottenuti dai carotaggi, sebbene forniscono i valori più affidabili rispetto a tutti gli altri metodi non distruttivi, forniscono valori di resistenze del calcestruzzo comunque differenti rispetto a quelli della struttura originaria. Inoltre, poiché il numero di carote estratte non può essere eccessivo (massimo tre per pilastro e/o trave) si ritiene opportuno ed utile affiancare ad esse altre prove non distruttive per avere una stima più sufficientemente precisa del calcestruzzo nella struttura. Nel presente lavoro è stata fornita una espressione per la valutazione dei principali fattori che influiscono sulla resistenza delle carote ed una procedura per stimare la resistenza in situ del calcestruzzo mediante prove non distruttive.

Il tema delle indagini sulle strutture spesso non viene preso in seria considerazione dai progettisti che, sia in passato che correntemente, molto spesso arrivano ad assunzioni troppo conservative, dunque dispendiose, o addirittura non conservative e quindi potenzialmente gravi per la sicurezza. I motivi che generano tali situazioni sono da ricercarsi nelle difficoltà oggettive in cui si trovano ad operare spesso i tecnici in termini logistici ed economici. Tuttavia va riconosciuto al settore dell'Ingegneria Civile un ritardo culturale sul tema della diagnosi, che invece si è ampiamente sviluppato nel settore della Medicina. Altro aspetto che ha causato questo ritardo può essere l'omologazione adottata soprattutto in passato nelle fasi di progettazione di nuove strutture e riabilitazione delle strutture esistenti. Ci si riferisce soprattutto all'uso di coefficienti di sicurezza identici nei due casi, senza considerare evidenti differenze quali rappresentatività delle caratteristiche dei materiali e vita utile della struttura.

Nella valutazione di un edificio in calcestruzzo armato devono essere seguiti i seguenti passi:

- identificazione dell'organismo strutturale: verifica delle dimensioni degli elementi quali travi e pilastri;
- identificazione delle strutture di fondazione;
- identificazione delle armature;
- informazioni su possibili difetti dei materiali;
- informazioni su difetti strutturali, quali eccentricità e collegamenti mancanti;
- informazioni sulle Norme base utilizzate per il progetto della struttura;
- identificazione dell'uso passato e futuro della struttura;
- informazioni su danni e lavori eseguiti precedentemente.

Dall'analisi delle prove sono state individuate le caratteristiche positive e negative di ognuna in relazione ai costi, alla rapidità di esecuzione, al danno alla struttura e all'affidabilità.

Tabella 5.11 Caratteristiche delle prove strutturali.

Prova	Costo	Rapidità	Danno	Rappresentatività	Affidabilità
Carotaggio	Alto	Bassa	Moderato	Moderata	Buona
Sonde Windsor	Medio	Alta	Minimo	Superficiale	Scarsa
Ultrasuoni	Basso	Alta	Nulla	Buona	Moderata
Sclerometro	Minimo	Alta	Nulla	Superficiale	Scarsa

Nel valutare la resistenza sismica degli edifici esistenti un ruolo fondamentale è svolto dalle indagini sui materiali. La resistenza da assumere nei calcoli verrà determinata a partire dalla resistenza media ottenuta dalle prove, dividendola per il fattore di sicurezza.

Conclusioni

L'attività di tirocinio svolta presso il Laboratorio di Strutture del Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università degli Studi di Salerno nel periodo da Novembre a Marzo per una durata complessiva di 150 ore ha riguardato la messa a punto, l'analisi ed il monitoraggio delle prove sperimentali eseguite su elementi strutturali realizzati con materiali tradizionali ed innovativi.

Il lavoro è stato costantemente seguito dai tutor della struttura ospitante e universitaria, che mi hanno guidato nell'apprendimento dimostrandosi ottimi insegnanti e trasmettendo la passione con la quale si dedicano al loro lavoro.

Nella redazione di questo elaborato ho approfondito, in buona parte, le basi apprese durante i corsi dell'Università degli Studi di Salerno, soprattutto nello studio di tematiche nuove che sono andate ad arricchire il mio bagaglio culturale. Nell'attività di tirocinio, infatti, sono stati trattati argomenti solo marginalmente presentati durante il corso di studi, in particolare si fa riferimento alle prove di carico distruttive e non distruttive sugli elementi strutturali.

Il presente elaborato finale ha riportato, perciò, tutte le informazioni, i dati sperimentali, le osservazioni e gli spunti teorici formulati ed appresi durante il suddetto periodo. Nel lavoro svolto sono stati descritti ed analizzati, nel comportamento e nel funzionamento, le presse, gli attuatori orizzontali, verticali, statici, dinamici ed iperdinamici. Il secondo capitolo si conclude con la descrizione degli strumenti utilizzati per il monitoraggio e l'acquisizione dei dati sperimentali durante le prove; sono descritti, ad esempio gli estensimetri, gli LVDT, i sensori a filo e le celle di carico.

Nel terzo capitolo sono stati descritti i sistemi di monitoraggio utilizzati per le prove sperimentali, ovvero i sistemi software professionali di calcolo scientifico e di monitoraggio dei segnali e dei dati sperimentali, quali ad esempio Station Builder e Station Manager nonché MPT Procedure Editor.

In particolare sono state trattate le procedure utilizzate per la programmazione delle prove, dalla preparazione e l'allocazione delle risorse hardware disponibili, alla formulazione della storia di carico o di spostamenti cui sottoporre il provino da testare.

Nel quarto capitolo è stata illustrata, in una prima parte, la prova a pressoflessione su pilastri in cemento armato tradizionali e rinforzati con fibre di carbonio; sono state evidenziate le differenze di comportamento con particolare riferimento a considerazioni sulla duttilità e sul miglioramento della resistenza del calcestruzzo grazie al confinamento.

Il quarto capitolo è entrato nel cuore della sperimentazione e dell'uso dei mezzi descritti in precedenza illustrando delle prove distruttive e non distruttive utilizzate per il calcolo della resistenza a compressione di provini in conglomerato cementizio prelevati da elementi strutturali che sono stati precedentemente sottoposti a pressoflessione. In questa sezione sono state descritte le procedure utilizzate per il calcolo della resistenza, sia tradizionali, come la prova a compressione su provini cubici a mezzo di semplici presse verticali, sia moderne ed innovative come i carotaggi, le prove ultrasoniche e sclerometriche. Sono stati anche individuati alcuni riferimenti alle normative nazionali, europee ed internazionali di riferimento per le attività di prova e le applicazioni pratiche e procedurali che esse comportano, essendo le metodiche di analisi dei problemi strutturali concreti non separabili dalle prescrizioni normative.

Nel rigore dell'impostazione teorica si è cercato sempre di tenere ben presente sia il significato fisico dei fenomeni sia il fine applicativo, con l'utilizzo di figure illustrative.

L'ultimo capitolo contiene alcune considerazioni e confronti teorico – sperimentali e delle conclusioni sui risultati ottenuti durante la sperimentazione e l'attività di tirocinio. La presente trattazione si sofferma sui suddetti aspetti e, anche attraverso degli esempi, mira a dare maggiore chiarezza e carattere agli argomenti esposti.

L'attività svolta in questo periodo, e che ha portato a produrre la presente tesi, ha pertanto significato una notevole maturazione professionale grazie alle numerose esperienze pratiche. Sono consapevole che le tematiche trattate saranno molto utili nel prosieguo degli studi.

Riferimenti bibliografici

- [1] **“Argomenti di teoria e tecnica delle costruzioni – Volume 1 A – Costruzioni in calcestruzzo armato normale e precompresso”**
C. Faella, CUES, 2001
- [2] **“Argomenti di teoria e tecnica delle costruzioni – Volume 1 B – Costruzioni in calcestruzzo armato normale e precompresso”**
C. Faella, CUES, 2001
- [3] **“Corso di tecnologia delle costruzioni – Volume 1/A – Materiali e meccanica delle terre”**
G.K. Koenig – B. Furiuzzi – G.Ceccarelli, Le Monnier, 2001
- [4] **“Il calcestruzzo – Materiali e tecnologia – Seconda edizione”**
V.A. Rossetti, McGraw – Hill, 2003
- [5] **“Stress Analysis – Strumentazione elettronica per la meccanica sperimentale”**
F. Luchsinger, Vishay, 1999
- [6] **“Preparazione della superficie per l’incollaggio degli estensimetri – Bollettino tecnico”**
F. Luchsinger, Vishay, 1999
- [7] **“Applicazione di estensimetri con adesivi – Bollettino tecnico”**
F. Luchsinger, Vishay, 1999
- [8] **“Macchine prova materiali”**
Lonos Test, 2000
- [9] **“The news and info letter – N° 2/2002”**
F. Luchsinger, Vishay, 2002

- [10] **“Competenza nelle Misure di Spostamento”**
Micro - Epsilon, 1994
- [11] **“Collaudo statico delle strutture in cemento armato normale e precompresso e delle strutture metalliche”**
S. Lombardo – F. Mortellaro, Dario Flaccavio Editore, 1998
- [12] **“UNI EN 12504 – 2: 2001”**
Prova sul calcestruzzo nelle strutture – Prove non distruttive, determinazione dell’indice sclerometrico
- [13] **“UNI EN 12504 – 4: 2005”**
Prova sul calcestruzzo nelle strutture – Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici
- [14] **“UNI EN 12390 – 1: 2002”**
Prova sul calcestruzzo indurito – Forma, dimensione ed altri requisiti per provini e casseforme
- [15] **“UNI EN 12390 – 3: 2003”**
Prova sul calcestruzzo indurito – Resistenza alla compressione dei provini
- [16] **“Software di sistema Model 793.00 – Informazioni per l’utente e guida di riferimento”**
MTS Systems Corporation, 2001
- [17] **“Model 793.00 MultiPurpose TestWare – Informazioni sul prodotto”**
MTS Systems Corporation, 2002
- [18] **“Stima della resistenza del calcestruzzo in situ mediante prove distruttive e non distruttive”**
A. Masi, Università degli Studi di Basilicata, Potenza, 2005

- [19] **Pilastri in c.a. confinati con FRP: risultati sperimentali, Atti del workshop “Materiali ed approcci innovativi per il progetto in zona sismica e la mitigazione della vulnerabilità delle strutture”**
C. Faella, A. Napoli, R. Realfonzo, G. Rizzano, 2007
- [20] **“Durabilità delle opere stradali, ANAS, Circolare 14/88”**
M. Macori, G. Scaramuzzi, V.A. Rossetti, M. Mele, G. Fontanieri, 1988
- [21] **“Collaudo e risanamento delle strutture”**
B. Barbarito, UTET, Torino, 1993
- [22] **“La resistenza dei Calcestruzzi negli Edifici Esistenti”**
N. Augenti, Atti del Convegno Internazionale “Crolli e affidabilità delle strutture”, Napoli, 2003
- [23] **“Diagnostica nella prevenzione dei crolli: Applicazione ad un Caso di Studio”**
R. Pucinotti, Atti del Convegno Internazionale “Crolli e affidabilità delle strutture”, Napoli, 2003
- [24] **“Indagini conoscitive su alcuni edifici scolastici con struttura portante in c.a. per la valutazione della vulnerabilità sismica”**
C. Faella, E. Martinelli, M. Candela, E. Nigro, Atti del XV Congresso C.T.E., Bari, 2004
- [25] **“Recommendations for in situ concrete strength determination by combined non-destructive methods”**
Rilem, London, 1993
- [26] **“Prove non distruttive sulle costruzioni in c.a”**
A. Di Leo, G. Pascale, 1994
- [27] **“Prove non distruttive nell’edilizia. Quaderno didattico AIPnD”**
J. Gasparirik , Brescia, 1992