



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE**  
**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

---

Corso di Laurea triennale **INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE**

**Assorbimento d'acqua per capillarità di calcestruzzi rinforzati con canapa: Round Robin Test nell'ambito della Commissione RILEM sui materiali "Bio-Based"**

**Water absorption by capillarity of concrete reinforced with hemp: Round Robin Test within the RILEM Commission on "Bio-Based" materials**

Relatore:

**Prof. Francesca Tittarelli**

Tesi di Laurea di:

**Marta Capecci**

**A.A. 2019 / 2020**

## INDICE

1	Introduzione	3
2	Prima prova	4
2.1	Introduzione	4
2.2	Monitoraggio stabilizzazione peso	5
2.3	Monitoraggio assorbimento d'acqua	7
2.4	Grafici	11
2.5	Osservazioni	17
3	Seconda prova	18
3.1	Introduzione	18
3.2	Monitoraggio stabilizzazione peso	19
3.3	Monitoraggio assorbimento d'acqua	21
3.4	Grafici	25
3.5	Osservazioni	31
4	Sintesi	32
4.1	Sintesi grafici Mw/t in scala logaritmica	32
4.2	Sintesi grafici Mw/vt	34
5	Conclusioni	37

## 1 INTRODUZIONE

L'Unione Internazionale dei Laboratori ed Esperti in Materiali, Sistemi e Strutture da Costruzione (RILEM, dal nome in francese Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages) è stata fondata nel giugno 1947, con lo scopo di promuovere la cooperazione scientifica nel settore dei materiali e delle strutture da costruzione.

All'interno di questa associazione, il Comitato Tecnico 275 (Technical Committee 275 HDB - Hygrothermal behaviour and Durability of Bio-aggregate based building materials) si occupa di indagare il comportamento igrotermico e la durabilità dei materiali da costruzione a base di bio-aggregati.

Il programma di lavoro prevede:

1. identificazione e selezione dei parametri;
2. revisione critica di vari metodi per misurare i parametri;
3. sviluppo di metodi per misurare i parametri;
4. Round Robin Test per testare i metodi.

I parametri che sono stati scelti sono:

- assorbimento d'acqua capillare;
- cicli umido/secco;
- cicli gelo/disgelo;
- crescita fungina.

La prova effettuata mira a determinare il coefficiente di assorbimento d'acqua per capillarità di calcestruzzo a base di canapa, misurando l'incremento di massa in funzione del tempo di un campione con una superficie immersa in acqua.

L'assorbimento d'acqua su una superficie di calcestruzzo "bio-based" dipende da molti fattori tra cui:

- (a) contenuto di bio-aggregati in massa;
- (b) tipo di legante;
- (c) presenza di materiali cementizi supplementari;
- (d) metodo di compattazione;
- (e) composizione e caratteristiche fisiche degli aggregati;
- (f) trattamenti dei bio-aggregati;
- (g) additivi chimici;
- (h) tipo e durata della stagionatura.

## 2 PRIMA PROVA DI ASSORBIMENTO D'ACQUA PER CAPILLARITA'

### 2.1 Introduzione

La prova si è svolta nel rispetto del protocollo proposto dall'associazione RILEM - International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures.

Per la prima prova sono stati utilizzati n.° 8 provini cubici di calcestruzzo a base di canapa di dimensioni 15 x 15 x 15 cm. I campioni erano già stati sottoposti ad essiccazione in stufa, pertanto il monitoraggio del loro peso è avvenuto durante il processo di stabilizzazione. I provini infatti, sono stati inseriti in contenitori, posizionati all'interno di una camera climatica e mantenuti per circa 2 settimane ad una temperatura e ad un'umidità relativa pressoché costanti ( $21 \pm 2^\circ\text{C}$  /  $55 \pm 5\%$  RH), fino a che non è stata riscontrata una variazione di massa tra 3 pesate successive (effettuate a distanza di 24 ore l'una dall'altra) inferiore allo 0.01%. Il monitoraggio delle condizioni di stabilizzazione è avvenuto per mezzo del regolatore di temperatura e umidità relativa della camera climatica e di un termigrometro posizionato all'interno di quest'ultima. Le misurazioni di peso sono state effettuate per tutta la prova con una bilancia di precisione PCB – KERN, con portata di 3000 g, sensibilità pari a 0.01 g e piatto di pesata L x P 130 x 130 mm, come quella in foto.



*Foto 1: bilancia.*

## 2.2 Monitoraggio stabilizzazione peso

Si riportano i dati relativi alle misurazioni effettuate durante la stabilizzazione dei provini.

Data	15/09	18/09	22/09	23/09	24/09	25/09
$t_{int}$ [°C]	26.9	25.6	22.9	24.3	23.9	23.8
$RH_{int}$ [%]	54	55	55	54	55	55
$t_{est}$ [°C]	27.7	26.2	23.6	25.2	24.4	24.4
$RH_{est}$ [%]	57	56	56	56	57	57
Campione	Massa [g]					
1	1099.27	1098.87	1099.3	1099.07	1099.13	1099.13
2	1084.46	1084.06	1084.28	1084.29	1084.29	1084.28
3	1089.61	1089.23	1089.51	1089.44	1089.44	1089.44
4	1111.76	1111.45	1111.7	1111.67	1111.7	1111.66
5	1051.33	1050.87	1051.07	1051.06	1051.15	1051.11
6	1109.13	1108.75	1108.86	1108.89	1108.96	1108.95
7	1137.54	1137.21	1137.39	1137.42	1137.41	1137.37
8	1139.03	1138.6	1138.75	1138.79	1138.85	1138.81

Tab. 1: monitoraggio giornaliero della massa dei campioni e di temperatura e umidità relativa della camera climatica.



Foto 2: provini essiccati e stabilizzati.

Si riportano le variazioni percentuali di peso netto tra le ultime 4 misurazioni, calcolate con la formula:

$$\text{Variazione percentuale} = \left[ \frac{m_{\text{finale}} - m_{\text{iniziale}}}{m_{\text{iniziale}}} * 100 \right] \%$$

Campione	Variazione percentuale peso netto tra la III e IV misurazione [%]	Variazione percentuale peso netto tra la IV e V misurazione [%]	Variazione percentuale peso netto tra la V e VI misurazione [%]
1	-0.02	0.01	0.00
2	0.00	0.00	0.00
3	-0.01	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.01	0.00
6	0.00	0.01	0.00
7	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.01	0.00

Tab. 2: calcolo delle variazioni percentuali di peso tra le ultime misurazioni.

NB: il colore verde in tabella indica il rispetto del limite di variazione percentuale dello 0.01%; il rosso indica che non si è ancora entro il limite.

Prima di iniziare la prova, i provini sono stati pesati. La superficie di misura è stata scelta parallela alla direzione di compattazione; successivamente le superfici laterali sono state rivestite con 4 strati di cellophane. I campioni pronti poi sono stati nuovamente pesati.

Campione	Massa provino [g]	Massa provino con pellicola [g]	Differenza di peso [g]
1	1099.13	1101.62	2.49
2	1084.28	1086.69	2.41
3	1089.44	1091.8	2.36
4	1111.66	1114.95	3.29
5	1051.11	1053.39	2.28
6	1108.95	1111.15	2.2
7	1137.37	1139.83	2.46
8	1138.81	1141.32	2.51

Tab. 3: confronto peso dei provini con e senza rivestimento.



Foto 3: provini rivestiti di cellophane.

### 2.3 Monitoraggio assorbimento d'acqua

La prova è iniziata alle ore 10:00 del giorno 28/09/2020.

Durante la prova sono state rilevate più volte le condizioni ambientali come di seguito riportato.

t [min]	t [h]	t <sub>int</sub> [°C]	RH <sub>int</sub> [%]	t <sub>est</sub> [°C]	RH <sub>est</sub> [%]
0	0	22.9	54	23.3	57
120	2	23.4	54	23.9	57
240	4	22.8	54	23.3	57
360	6	23.6	53	24.7	55
1440	24	22.3	55	22.7	55
2880	48	21.8	55	22.2	55

Tab. 4: monitoraggio orario di temperatura e umidità relativa della camera climatica.

Ogni provino è stato posizionato nel proprio contenitore per la prima volta a distanza di 10 minuti dal precedente, per poter avere il tempo di effettuare con precisione le misurazioni dei primi minuti di immersione e per poter monitorare il livello dell'acqua nei contenitori, al fine di mantenerlo costante.

Ogni provino poggiava su un supporto metallico a ferro di cavallo, al fine di garantire la corretta risalita dell'acqua dalla superficie inferiore del campione.



*Foto 4: posizionamento dei provini nei rispettivi contenitori.*



*Foto 5: contenitori e relativi coperchi utilizzati durante la prova.*

Si riportano i dati relativi alle misurazioni effettuate durante la prova e il valore della massa d'acqua assorbita per unità di area calcolata con la seguente formula:

$$M_w = \frac{(M - M_o)}{A}$$

Campione 1

t [min]	t [h]	Peso netto [g]	Mw [kg/m <sup>2</sup> ]
0	0	1101.62	0.0000
1	0.0167	1177.58	3.3760
3	0.05	1197.5	4.2613
5	0.0833	1219.82	5.2533
10	0.1667	1238.81	6.0973
15	0.25	1239.8	6.1413
30	0.5	1255.39	6.8342
60	1	1263.9	7.2124
120	2	1281.72	8.0044
240	4	1299.05	8.7747
360	6	1314.53	9.4627
1440	24	1346.87	10.9000
2880	48	1417.82	14.0533

Campione 2

t [min]	t [h]	Peso netto [g]	Mw [kg/m <sup>2</sup> ]
0	0	1086.69	0.0000
1	0.0167	1183.34	4.2956
3	0.05	1199.36	5.0076
5	0.0833	1208.5	5.4138
10	0.1667	1217.85	5.8293
15	0.25	1227.57	6.2613
30	0.5	1233.14	6.5089
60	1	1243.42	6.9658
120	2	1251.42	7.3213
240	4	1266.78	8.0040
360	6	1277.31	8.4720
1440	24	1321.11	10.4187
2880	48	1367.84	12.4956

Campione 3

t [min]	t [h]	Peso netto [g]	Mw [kg/m <sup>2</sup> ]
0	0	1091.8	0.0000
1	0.0167	1189.09	4.3240
3	0.05	1198.33	4.7347
5	0.0833	1202.82	4.9342
10	0.1667	1212.05	5.3444
15	0.25	1220.81	5.7338
30	0.5	1233.91	6.3160
60	1	1247.11	6.9027
120	2	1263.52	7.6320
240	4	1287.32	8.6898
360	6	1302.73	9.3747
1440	24	1373.02	12.4987
2880	48	1419.11	14.5471

Campione 4

t [min]	t [h]	Peso netto [g]	Mw [kg/m <sup>2</sup> ]
0	0	1114.95	0.0000
1	0.0167	1216.7	4.5222
3	0.05	1231.32	5.1720
5	0.0833	1238.77	5.5031
10	0.1667	1247.67	5.8987
15	0.25	1263.52	6.6031
30	0.5	1265.62	6.6964
60	1	1273.35	7.0400
120	2	1297.65	8.1200
240	4	1306.37	8.5076
360	6	1317.85	9.0178
1440	24	1374.68	11.5436
2880	48	1436.64	14.2973

Campione 5

t [min]	t [h]	Peso netto [g]	Mw [kg/m <sup>2</sup> ]
0	0	1053.39	0.0000
1	0.0167	1163.54	4.8956
3	0.05	1164.65	4.9449
5	0.0833	1178.26	5.5498
10	0.1667	1186.16	5.9009
15	0.25	1189.48	6.0484
30	0.5	1190.95	6.1138
60	1	1201.69	6.5911
120	2	1224.94	7.6244
240	4	1237.6	8.1871
360	6	1245.51	8.5387
1440	24	1315.35	11.6427
2880	48	1368.22	13.9924

Campione 6

t [min]	t [h]	Peso netto [g]	Mw [kg/m <sup>2</sup> ]
0	0	1111.15	0.0000
1	0.0167	1221.81	4.9182
3	0.05	1235.38	5.5213
5	0.0833	1237.47	5.6142
10	0.1667	1242.29	5.8284
15	0.25	1246.06	5.9960
30	0.5	1256.62	6.4653
60	1	1265.59	6.8640
120	2	1286.9	7.8111
240	4	1303.62	8.5542
360	6	1312.53	8.9502
1440	24	1391.31	12.4516
2880	48	1427.31	14.0516

Campione 7

t [min]	t [h]	Peso netto [g]	Mw [kg/m <sup>2</sup> ]
0	0	1139.83	0.0000
1	0.0167	1240.37	4.4684
3	0.05	1250.1	4.9009
5	0.0833	1257.2	5.2164
10	0.1667	1267.54	5.6760
15	0.25	1276.71	6.0836
30	0.5	1287.56	6.5658
60	1	1301.32	7.1773
120	2	1310.68	7.5933
240	4	1328.2	8.3720
360	6	1337.34	8.7782
1440	24	1408.51	11.9413
2880	48	1448.87	13.7351

Campione 8

t [min]	t [h]	Peso netto [g]	Mw [kg/m <sup>2</sup> ]
0	0	1141.32	0.0000
1	0.0167	1250.07	4.8333
3	0.05	1254.81	5.0440
5	0.0833	1267.79	5.6209
10	0.1667	1277.79	6.0653
15	0.25	1280.12	6.1689
30	0.5	1291.24	6.6631
60	1	1306.02	7.3200
120	2	1322.91	8.0707
240	4	1344.73	9.0404
360	6	1358.32	9.6444
1440	24	1430.84	12.8676
2880	48	1469.34	14.5787

## 2.4 Grafici

Si riportano i grafici che descrivono l'andamento del parametro Mw in funzione del tempo (espresso in ore, plottato in scala logaritmica).

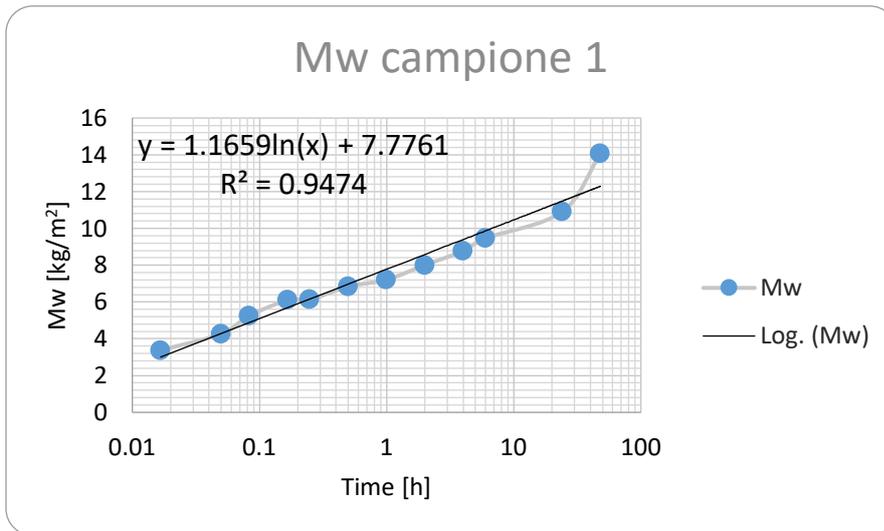


Grafico 1: Mw/t del campione 1.

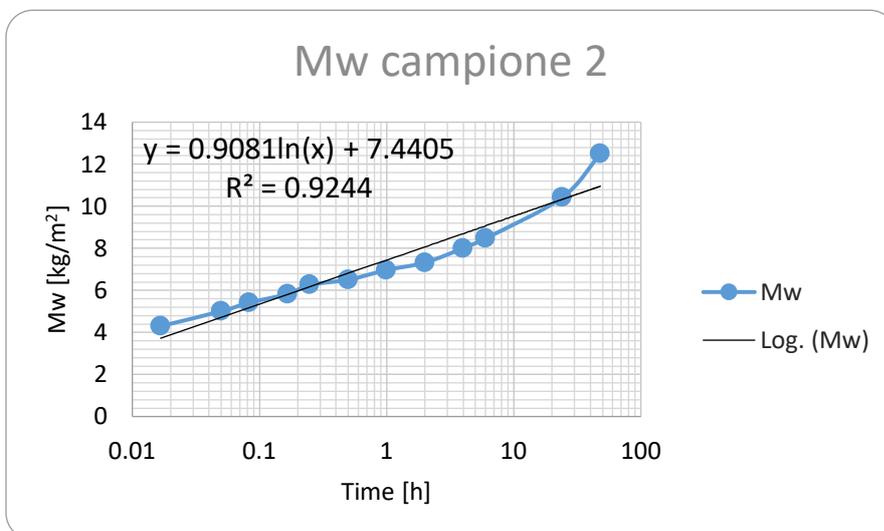


Grafico 2: Mw/t del campione 2.

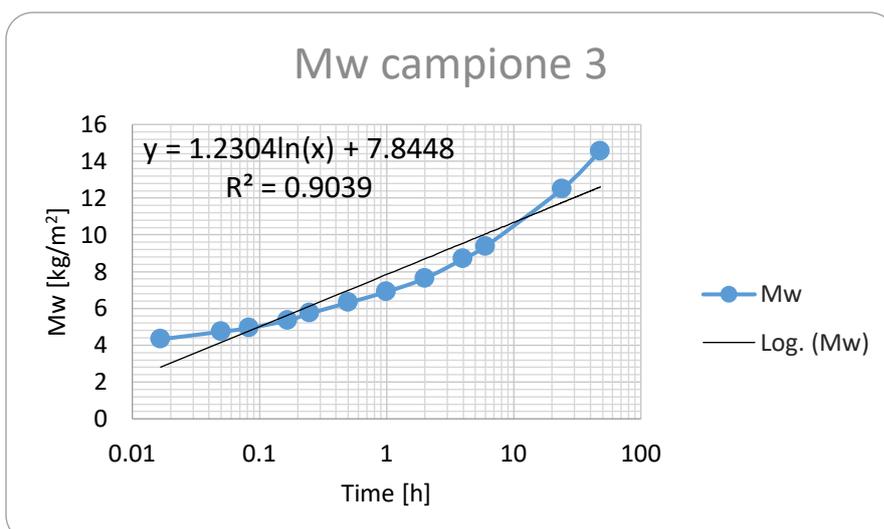


Grafico 3: Mw/t del campione 3.

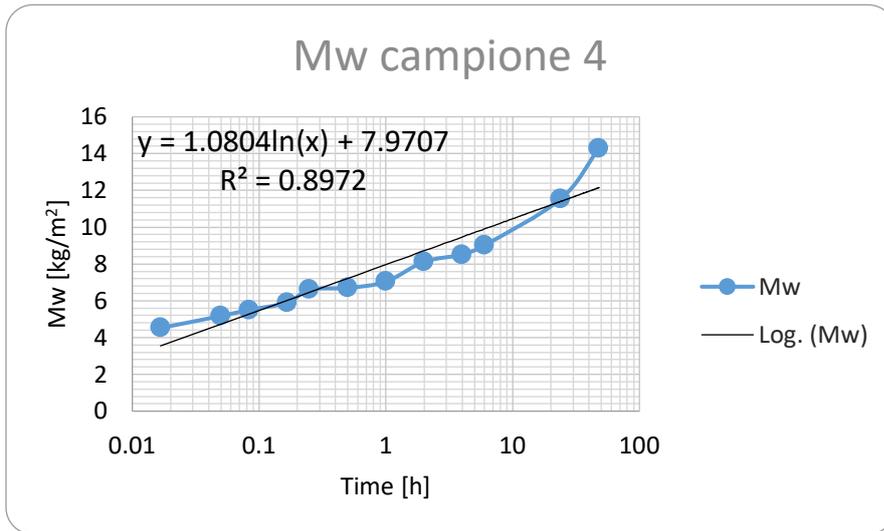


Grafico 4: Mw/t del campione 4.

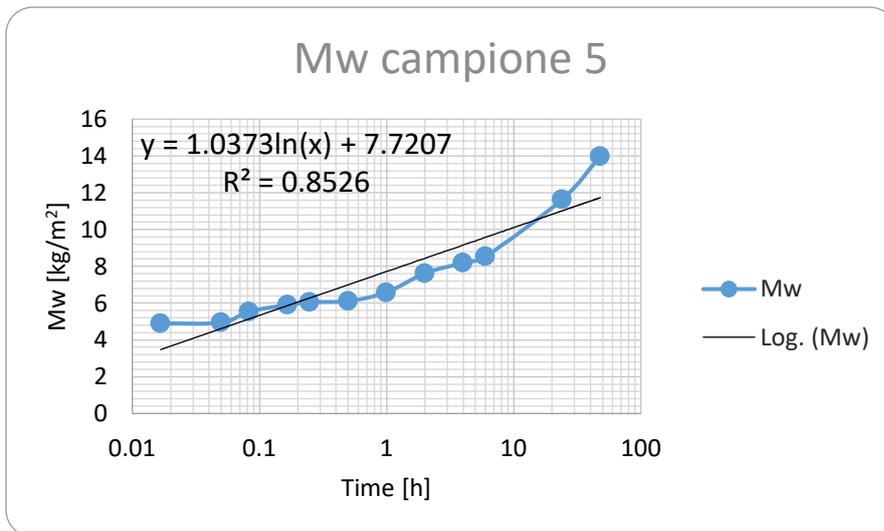


Grafico 5: Mw/t del campione 5.

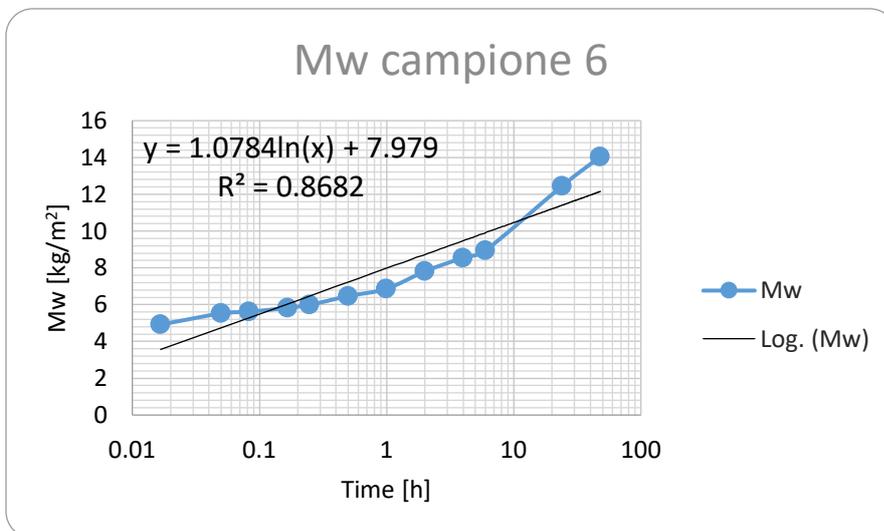


Grafico 6: Mw/t del campione 6.

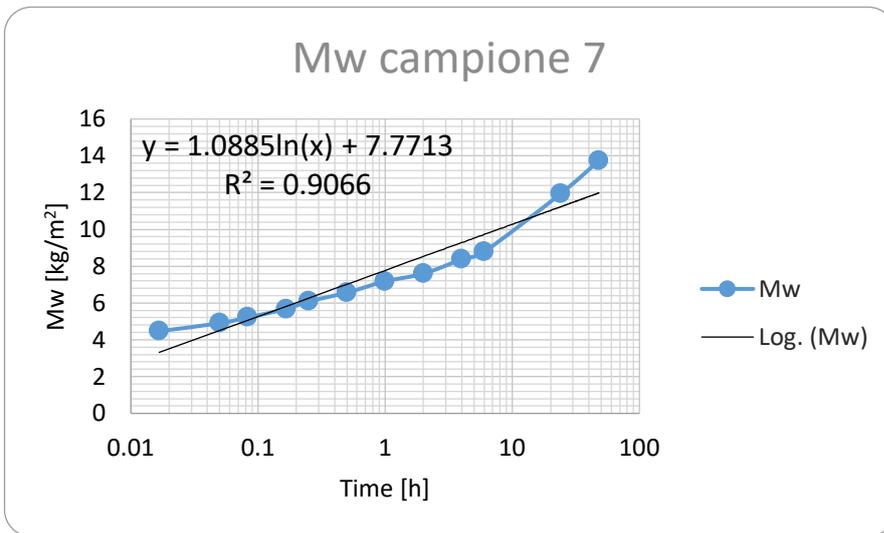


Grafico 7: Mw/t del campione 7.

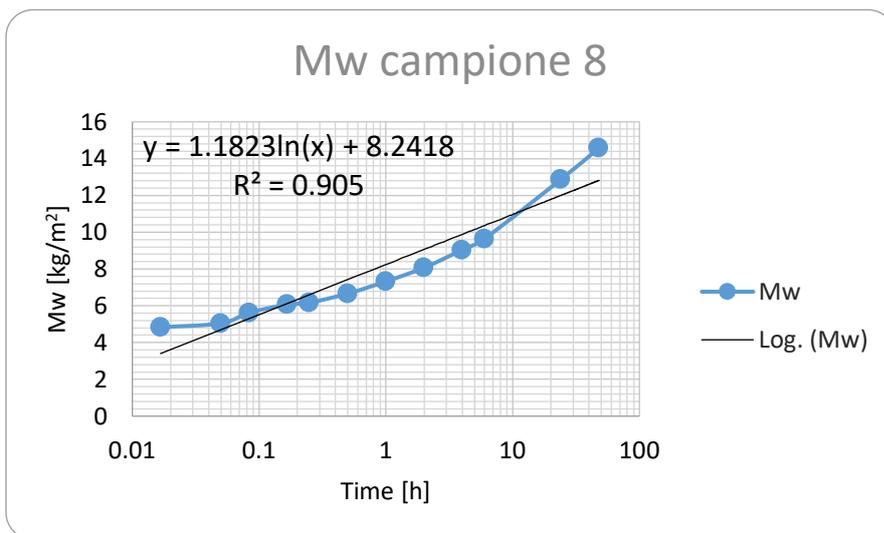


Grafico 8: Mw/t del campione 8.

Si riportano gli stessi grafici in un unico piano per un rapido confronto visivo.

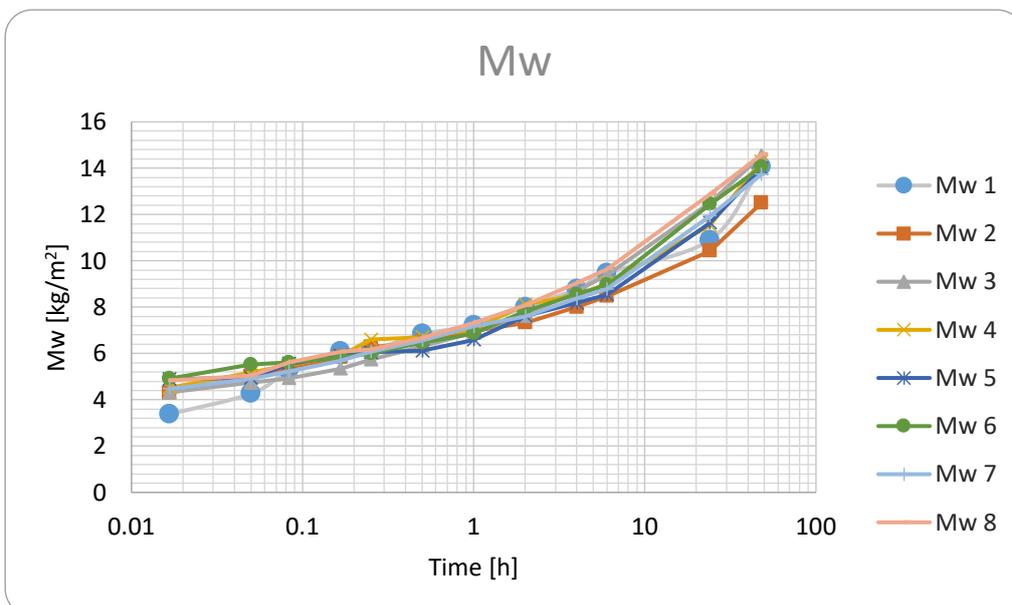


Grafico 9:  
Mw/t di tutti  
i campioni.

Si riportano i grafici che descrivono l'andamento del parametro Mw in funzione della radice del tempo (espresso in ore).

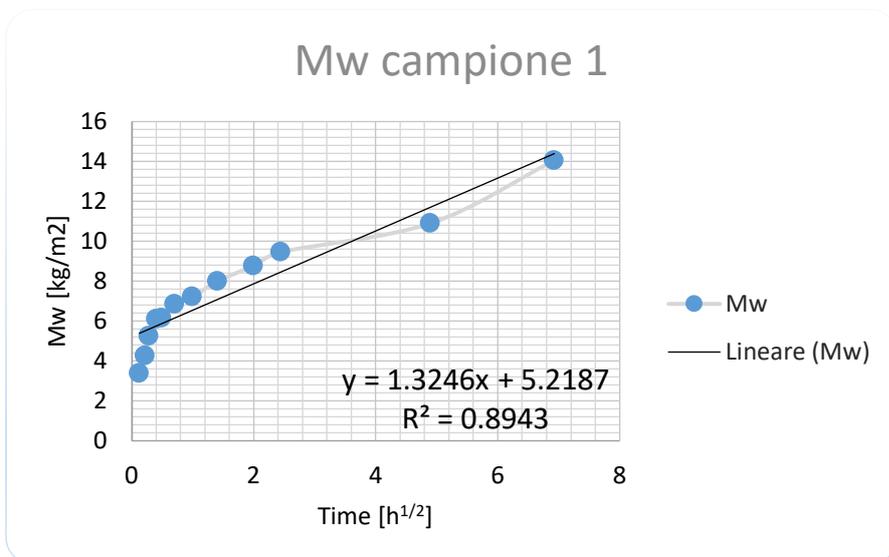


Grafico 10: Mw/t del campione 1.

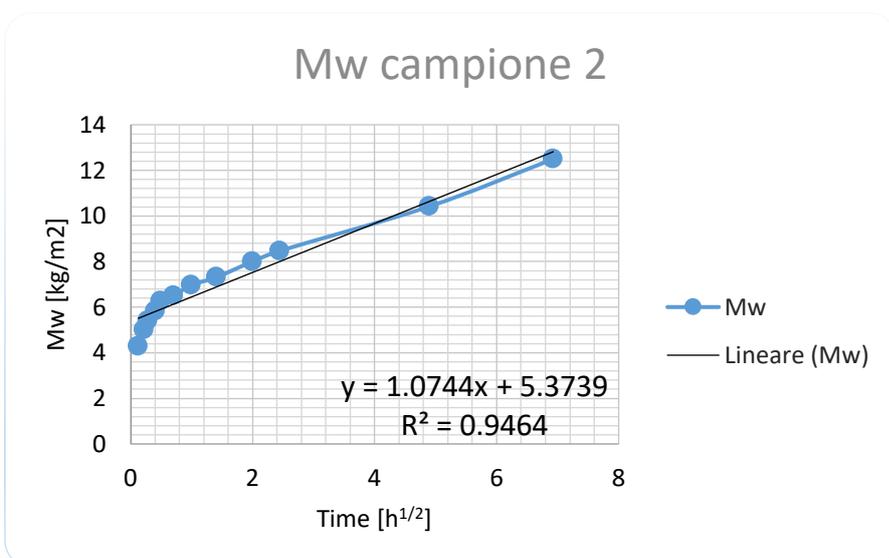


Grafico 11: Mw/t del campione 2.

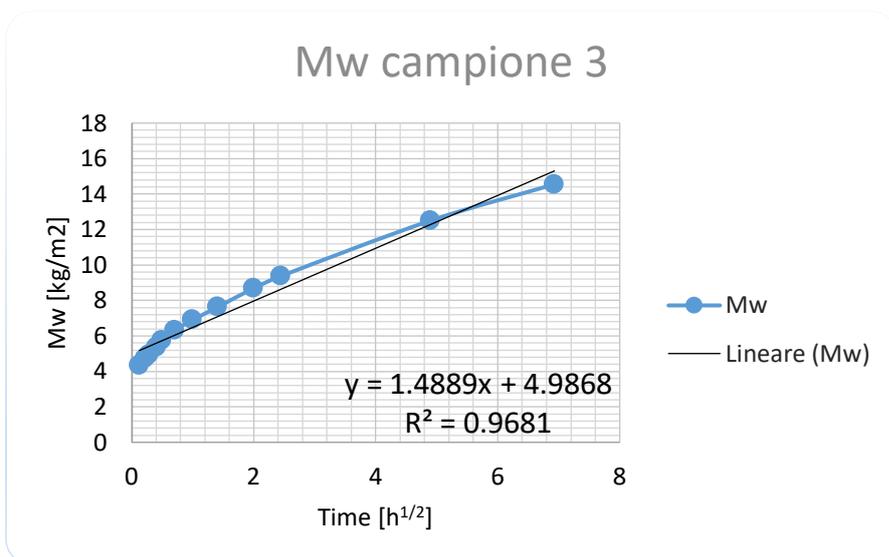


Grafico 12: Mw/t del campione 3.

### Mw campione 4

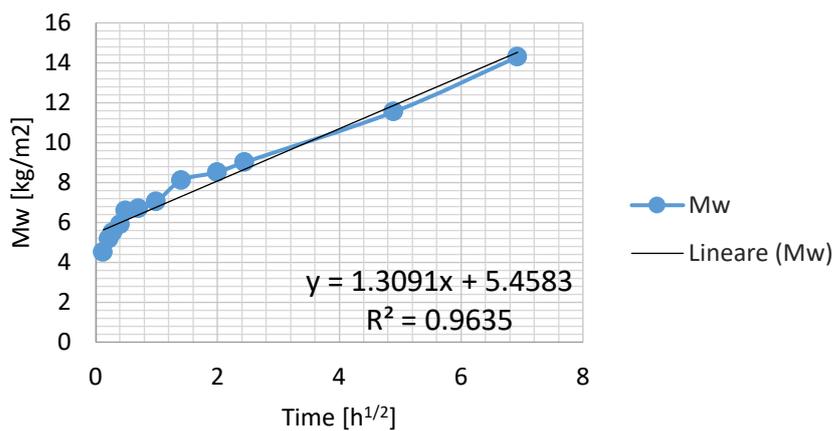


Grafico 13: Mw/t del campione 4.

### Mw campione 5

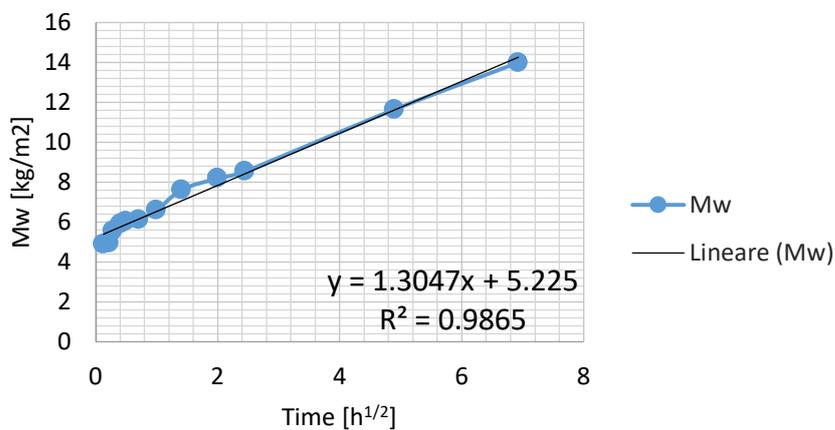


Grafico 14: Mw/t del campione 5.

### Mw campione 6

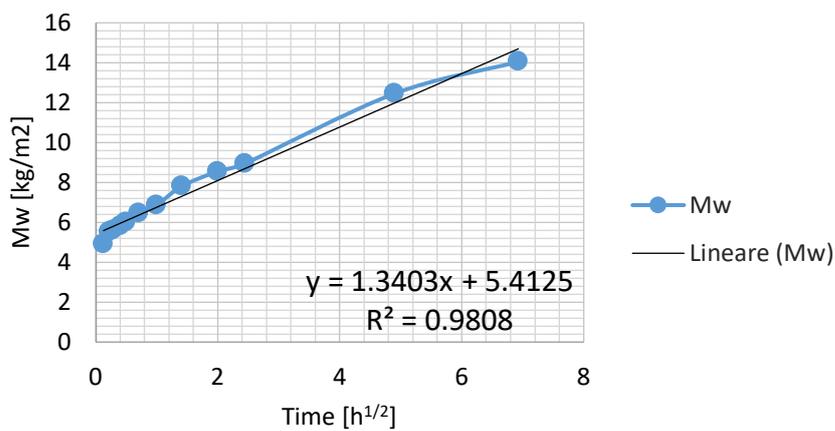


Grafico 15: Mw/t del campione 6.

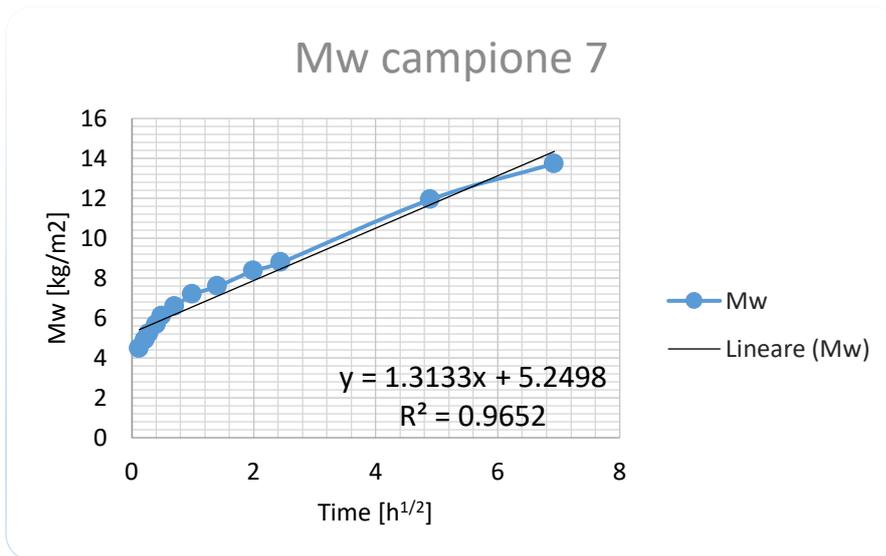


Grafico 16: Mw/t del campione 7.

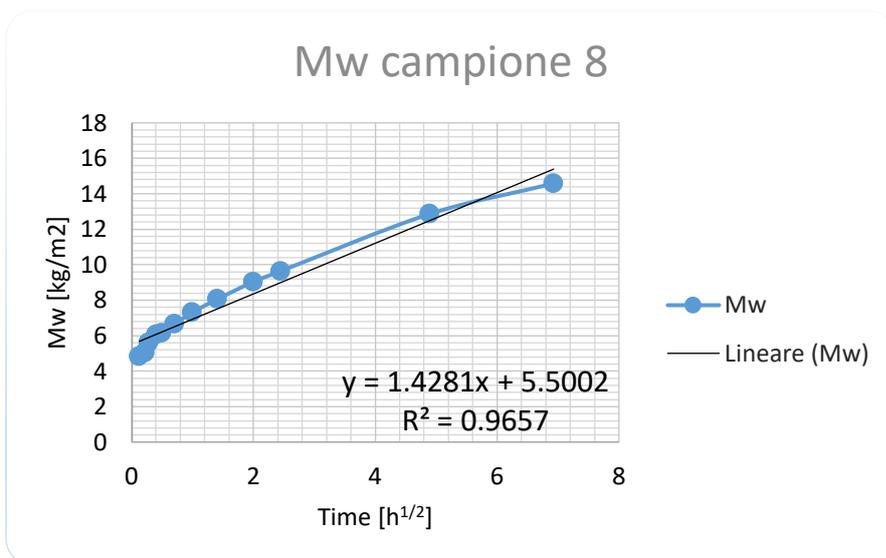


Grafico 17: Mw/t del campione 8.

Si riportano gli stessi grafici in un unico piano per un rapido confronto visivo.

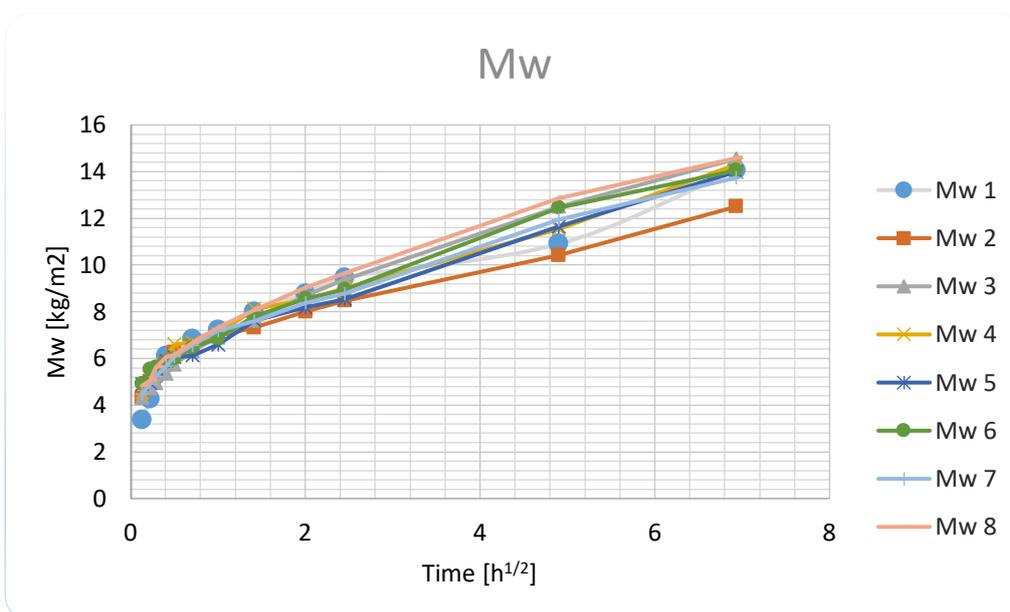


Grafico 18:  
Mw/t di tutti  
i campioni.

## 2.5 Osservazioni

La prova si è conclusa il giorno 30/09/2020 alle ore 11:20.

Al termine della prova, l'acqua non era più limpida, bensì torbida per la presenza di residui solidi e tendente ad una colorazione giallo-ocra; ciò era dovuto sia alla minima perdita di materiale da parte dei provini, sia alla corrosione del materiale metallico che componeva i supporti utilizzati per tenere i campioni sollevati rispetto al fondo dei contenitori.



*Foto 6: colore assunto dall'acqua al termine della prova (dopo 48 h).*

I contenitori sono stati vuotati dell'acqua utilizzata durante la prova e puliti. I campioni sono stati sottoposti nuovamente ad essiccazione per poter ripetere la prova.

Non sono stati riscontrati problemi durante la prova, se non il mancato mantenimento dei provini a temperatura e umidità relativa comprese nei limiti previsti dal protocollo per alcuni periodi di tempo.

## **3 SECONDA PROVA DI ASSORBIMENTO D'ACQUA PER CAPILLARITA'**

### **3.1 Introduzione**

La prova si è svolta nel rispetto del protocollo proposto dall'associazione RILEM - International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures.

Per la seconda prova sono stati utilizzati n.° 8 provini cubici di calcestruzzo a base di canapa di dimensioni 15 x 15 x 15 cm, gli stessi della prima prova. I campioni sono stati sottoposti ad in un primo momento ad essiccazione in stufa (60°C) fino al raggiungimento di peso costante, ovvero fino a che la variazione di massa tra 3 pesate successive (effettuate ad una distanza di almeno 24 ore l'una dall'altra) è risultata inferiore allo 0.1%; successivamente hanno subito il processo di stabilizzazione. I provini infatti, sono stati inseriti in contenitori, posizionati all'interno di una camera climatica e mantenuti per una settimana ad una temperatura e ad un'umidità relativa pressoché costanti ( $21 \pm 2^\circ\text{C}$  /  $55 \pm 5\% \text{ RH}$ ), fino a che non è stata riscontrata una variazione di massa tra 3 pesate successive (effettuate sempre ad una distanza di almeno 24 ore l'una dall'altra) inferiore allo 0.01%.

Il monitoraggio delle condizioni di stabilizzazione è avvenuto per mezzo del regolatore di temperatura e umidità relativa della camera climatica e di un termigrometro posizionato all'interno di quest'ultima. Le misurazioni di peso sono state effettuate per tutta la prova con una bilancia di precisione PCB – KERN, con portata di 3000 g, sensibilità pari a 0.01 g e piatto di pesata L x P 130 x 130 mm.

### 3.2 Monitoraggio stabilizzazione peso

Si riportano i dati relativi alle misurazioni effettuate durante l'essiccazione e la successiva stabilizzazione dei provini.

Data	05/10	06/10	07/10	12/10
t [°C]	60	60	60	60
Campione	Massa [g]	Massa [g]	Massa [g]	Massa [g]
1	1147.49	1087.09	1056.13	1039.33
2	1102.51	1064.69	1042.61	1031.39
3	1161.62	1070.68	1052.33	1031.5
4	1124.63	1091.57	1074.37	1058.55
5	1073.97	1018.72	1009.67	996.87
6	1088.07	1078.51	1064.77	1056.14
7	1146.77	1117.53	1093.18	1080.88
8	1190.01	1106.51	1099.05	1081.85

Tab. 5:  
monitoraggio  
giornaliero della  
massa dei  
campioni durante  
l'essiccazione in  
stufa.

Data	12/10	19/10	20/10	21/10
t <sub>int</sub> [°C]		23.6	23.5	24.8
RH <sub>int</sub> [%]		54	53	54
t <sub>est</sub> [°C]		24.7	24.5	25.7
RH <sub>est</sub> [%]		58	57	58
Campione	Massa [g]	Massa [g]	Massa [g]	Massa [g]
1	1039.33	1079.51	1080.08	1080.47
2	1031.39	1067.02	1067.55	1067.70
3	1031.5	1071.96	1072.63	1072.88
4	1058.55	1096.3	1096.84	1097.17
5	996.87	1030.49	1030.97	1031.35
6	1056.14	1092.18	1092.74	1093.19
7	1080.88	1121.46	1122.03	1122.54
8	1081.85	1121.53	1122.13	1122.40

Tab. 6:  
monitoraggio  
giornaliero della  
massa dei  
campioni e di  
temperatura e  
umidità relativa  
della camera  
climatica.

Si riportano le variazioni percentuali di peso netto tra le misurazioni effettuate durante la stabilizzazione dei provini, calcolate con la seguente formula:

$$\text{Variazione percentuale} = \left[ \frac{m_{\text{finale}} - m_{\text{iniziale}}}{m_{\text{iniziale}}} * 100 \right] \%$$

Campione	Variazione percentuale peso netto tra la I e II misurazione [%]	Variazione percentuale peso netto tra la II e III misurazione [%]	Variazione percentuale peso netto tra la III e IV misurazione [%]
1	3.95	0.00	0.01
2	3.53	0.01	0.00
3	4.02	0.00	0.00
4	3.65	0.01	0.00
5	3.45	0.00	0.01
6	3.51	0.00	0.00
7	3.85	0.00	0.01
8	3.76	0.01	0.00

*Tab. 7: calcolo delle variazioni percentuali di peso tra le ultime misurazioni.*

NB: il colore verde in tabella indica il rispetto del limite di variazione percentuale dello 0.01%; il rosso indica che non si è ancora entro il limite.

Prima di iniziare la prova, i provini sono stati pesati. La superficie di misura è stata scelta parallela alla direzione di compattazione; successivamente le superfici laterali sono state rivestite con 4 strati di cellophane. I campioni pronti poi sono stati nuovamente pesati.

Campione	Massa provino [g]	Massa provino con pellicola [g]	Differenza di peso [g]
1	1080.47	1083.03	2.56
2	1067.70	1070.26	2.56
3	1072.88	1075.57	2.69
4	1097.17	1100.00	2.83
5	1031.35	1034.13	2.78
6	1093.19	1096.02	2.83
7	1122.54	1125.34	2.8
8	1122.40	1125.28	2.88

*Tab. 8: confronto peso dei provini con e senza rivestimento.*

### 3.3 Monitoraggio assorbimento d'acqua

La prova è iniziata alle ore 10:00 del giorno 21/10/2020.

Durante la prova sono state rilevate più volte le condizioni ambientali come di seguito riportato.

t [min]	t [h]	t <sub>int</sub> [°C]	RH <sub>int</sub> [%]	t <sub>est</sub> [°C]	RH <sub>est</sub> [%]
0	0	22.5	56	23	57
120	2	23.7	52	24.2	55
180	3	23.2	52	23.9	55
240	4	22.4	56	23.3	56
360	6	21.9	55	22.3	56
1440	24	24	51	25	53
2880	48	22.1	55	22.6	56

*Tab. 9: monitoraggio orario di temperatura e umidità relativa della camera climatica.*

Ogni provino è stato posizionato nel proprio contenitore per la prima volta a distanza di dieci minuti dal precedente, per poter avere il tempo di effettuare con precisione le misurazioni dei primi minuti di immersione e per poter monitorare il livello dell'acqua nei contenitori, al fine di mantenerlo costante.

A differenza della prima prova, per mantenere i provini sollevati dal fondo del contenitore sono stati utilizzati supporti in PVC; inoltre, per tener conto della perdita di materiale da parte dei campioni (seppur minima), è stata posta una rete in fibra di vetro tra essi e i supporti: al termine della prova i residui presenti su ogni rete sono stati pesati e addizionati ai valori ottenuti con le misurazioni.



*Foto 7: provini posizionati su rete.*

Tutto ciò è stato reso possibile basandosi sull'osservazione del fatto che i frammenti siano stati persi tutti all'inizio (col primo contatto con l'acqua) e sull'ipotesi che, data la dimensione ridotta di questi frammenti, essi si siano saturati istantaneamente (durante la prima immersione).

Si riportano i dati relativi alle misurazioni effettuate durante la prova e il valore della massa d'acqua assorbita per unità di area calcolata come segue:

$$M_w = \frac{(M - M_0)}{A}$$

Campione 1

<b>t</b> <b>[min]</b>	<b>t</b> <b>[h]</b>	<b>Peso netto</b> <b>[g]</b>	<b>Mw</b> <b>[kg/m<sup>2</sup>]</b>
0	0	1083.03	0.0000
1	0.0167	1216.94	5.9516
3	0.05	1242.18	7.0733
5	0.0833	1252.15	7.5164
10	0.1667	1265.15	8.0942
15	0.25	1273.11	8.4480
30	0.5	1287.36	9.0813
60	1	1299.64	9.6271
120	2	1314.9	10.3053
240	4	1337.48	11.3089
360	6	1348.94	11.8182
1440	24	1394.03	13.8222
2880	48	1466.18	17.0289

Campione 2

<b>t</b> <b>[min]</b>	<b>t</b> <b>[h]</b>	<b>Peso netto</b> <b>[g]</b>	<b>Mw</b> <b>[kg/m<sup>2</sup>]</b>
0	0	1070.26	0.0000
1	0.0167	1196.44	5.6080
3	0.05	1213.69	6.3747
5	0.0833	1224.95	6.8751
10	0.1667	1232.23	7.1987
15	0.25	1236.15	7.3729
30	0.5	1245.88	7.8053
60	1	1257.23	8.3098
120	2	1272.05	8.9684
240	4	1288.63	9.7053
360	6	1301.39	10.2724
1440	24	1349.06	12.3911
2880	48	1397.49	14.5436

Campione 3

<b>t</b> <b>[min]</b>	<b>t</b> <b>[h]</b>	<b>Peso netto</b> <b>[g]</b>	<b>Mw</b> <b>[kg/m<sup>2</sup>]</b>
0	0	1075.57	0.0000
1	0.0167	1211.46	6.0396
3	0.05	1224.95	6.6391
5	0.0833	1235.04	7.0876
10	0.1667	1241.94	7.3942
15	0.25	1252.03	7.8427
30	0.5	1261.43	8.2604
60	1	1277.92	8.9933
120	2	1289.04	9.4876
240	4	1316.35	10.7013
360	6	1327.91	11.2151
1440	24	1387.02	13.8422
2880	48	1434.39	15.9476

Campione 4

<b>t</b> <b>[min]</b>	<b>t</b> <b>[h]</b>	<b>Peso netto</b> <b>[g]</b>	<b>Mw</b> <b>[kg/m<sup>2</sup>]</b>
0	0	1100	0.0000
1	0.0167	1217.31	5.2138
3	0.05	1240.17	6.2298
5	0.0833	1253.88	6.8391
10	0.1667	1266.24	7.3884
15	0.25	1271.23	7.6102
30	0.5	1288.1	8.3600
60	1	1300.1	8.8933
120	2	1315.34	9.5707
240	4	1340.37	10.6831
360	6	1362.8	11.6800
1440	24	1430.14	14.6729
2880	48	1494.57	17.5364

Campione 5

<b>t</b> <b>[min]</b>	<b>t</b> <b>[h]</b>	<b>Peso netto</b> <b>[g]</b>	<b>Mw</b> <b>[kg/m<sup>2</sup>]</b>
0	0	1034.13	0.0000
1	0.0167	1127.77	4.1618
3	0.05	1159.61	5.5769
5	0.0833	1169.67	6.0240
10	0.1667	1186.72	6.7818
15	0.25	1198.9	7.3231
30	0.5	1217.34	8.1427
60	1	1227.79	8.6071
120	2	1246.72	9.4484
240	4	1281.54	10.9960
360	6	1301.01	11.8613
1440	24	1375.74	15.1827
2880	48	1440.56	18.0636

Campione 6

<b>t</b> <b>[min]</b>	<b>t</b> <b>[h]</b>	<b>Peso netto</b> <b>[g]</b>	<b>Mw</b> <b>[kg/m<sup>2</sup>]</b>
0	0	1096.02	0.0000
1	0.0167	1230.63	5.9827
3	0.05	1248.1	6.7591
5	0.0833	1257.09	7.1587
10	0.1667	1274.81	7.9462
15	0.25	1279.54	8.1564
30	0.5	1292.54	8.7342
60	1	1300.29	9.0787
120	2	1319.11	9.9151
240	4	1345.02	11.0667
360	6	1356.6	11.5813
1440	24	1422.41	14.5062
2880	48	1464.94	16.3964

Campione 7

t [min]	t [h]	Peso netto [g]	Mw [kg/m <sup>2</sup> ]
0	0	1125.34	0.0000
1	0.0167	1271.9	6.5138
3	0.05	1278.62	6.8124
5	0.0833	1288.53	7.2529
10	0.1667	1295.91	7.5809
15	0.25	1299.35	7.7338
30	0.5	1307.26	8.0853
60	1	1320.62	8.6791
120	2	1339.37	9.5124
240	4	1354.28	10.1751
360	6	1368.38	10.8018
1440	24	1430.41	13.5587
2880	48	1477.82	15.6658

Campione 8

t [min]	t [h]	Peso netto [g]	Mw [kg/m <sup>2</sup> ]
0	0	1125.28	0.0000
1	0.0167	1274.77	6.6440
3	0.05	1287.69	7.2182
5	0.0833	1293.18	7.4622
10	0.1667	1303	7.8987
15	0.25	1310.52	8.2329
30	0.5	1317.51	8.5436
60	1	1330.73	9.1311
120	2	1349.59	9.9693
240	4	1372.06	10.9680
360	6	1385.41	11.5613
1440	24	1454.8	14.6453
2880	48	1497.67	16.5507

NB: il peso dei frammenti persi dai campioni è già compreso.



*Foto 8: esempio del quantitativo di materiale perso da ciascun provino durante la prova.*

### 3.4 Grafici

Si riportano i grafici che descrivono l'andamento del parametro Mw in funzione del tempo (espresso in ore, plottato in scala logaritmica).

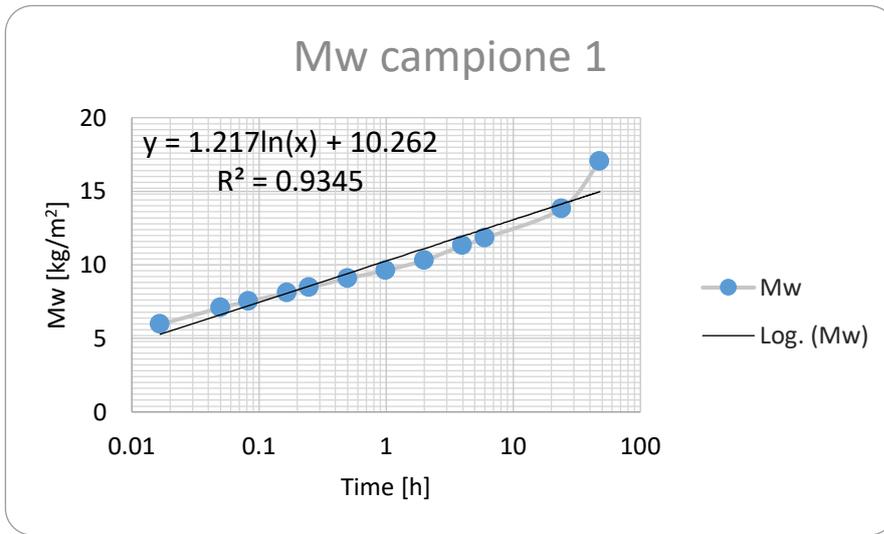


Grafico 19: Mw/t del campione 1.

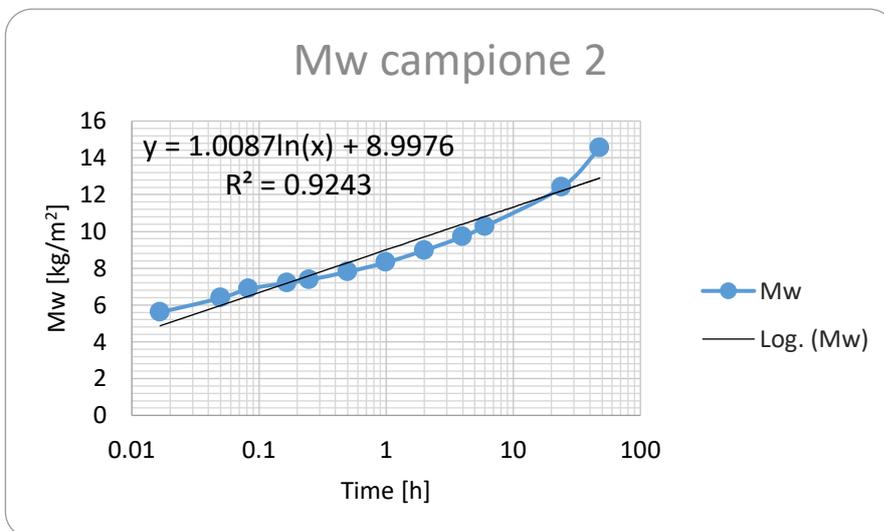


Grafico 20: Mw/t del campione 2.

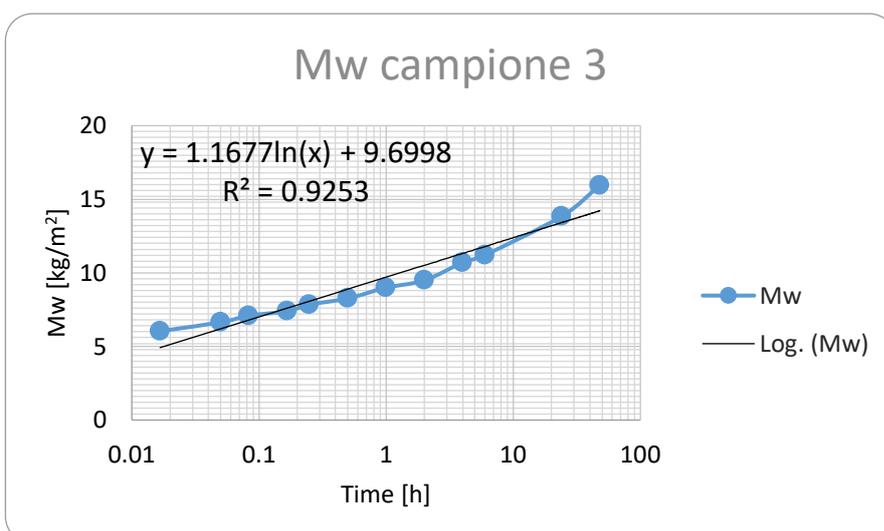


Grafico 21: Mw/t del campione 3.

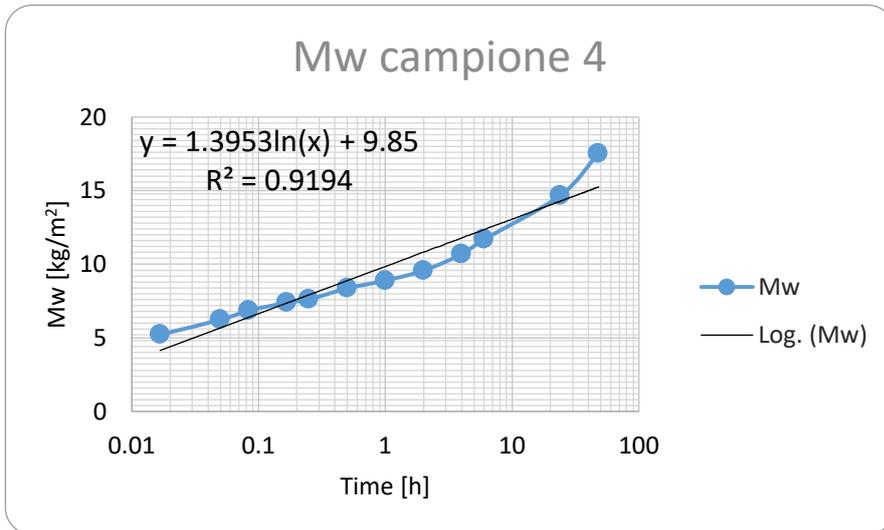


Grafico 22: Mw/t del campione 4.

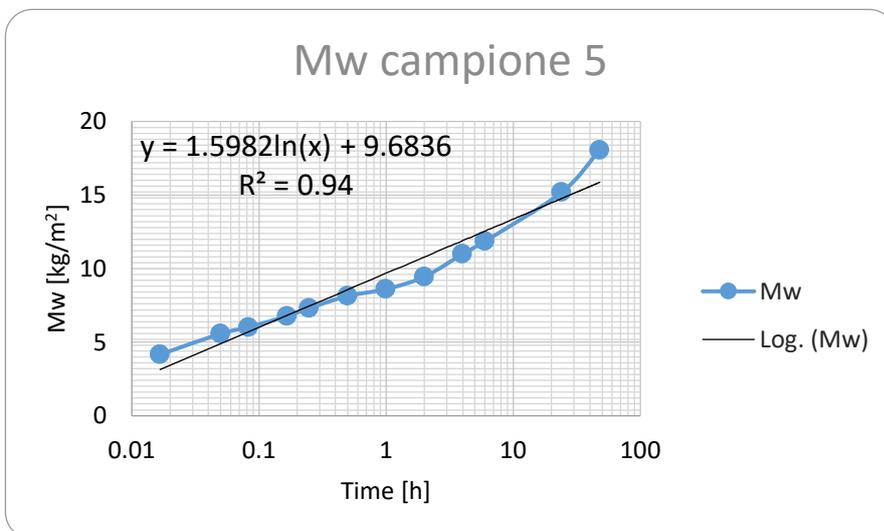


Grafico 23: Mw/t del campione 5.

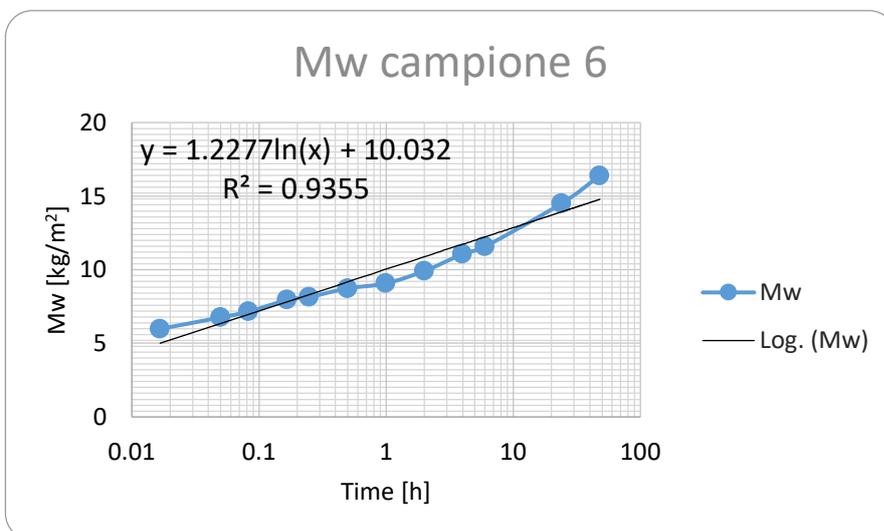


Grafico 24: Mw/t del campione 6.

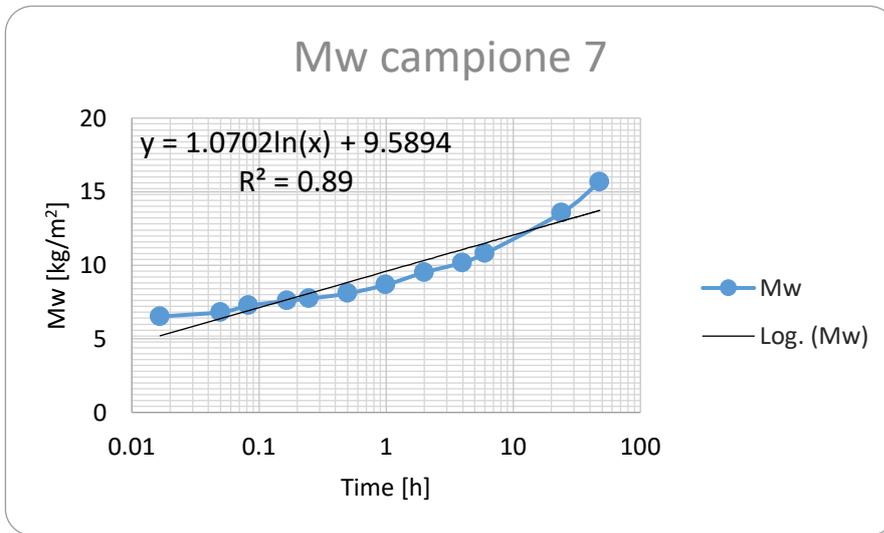


Grafico 25: Mw/t del campione 7.

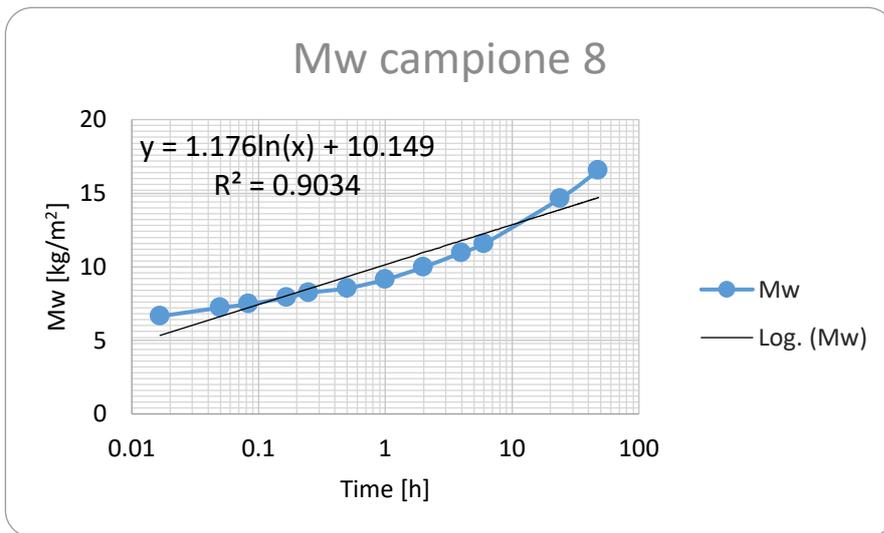


Grafico 26: Mw/t del campione 8.

Si riportano gli stessi grafici in un unico piano per un rapido confronto visivo.

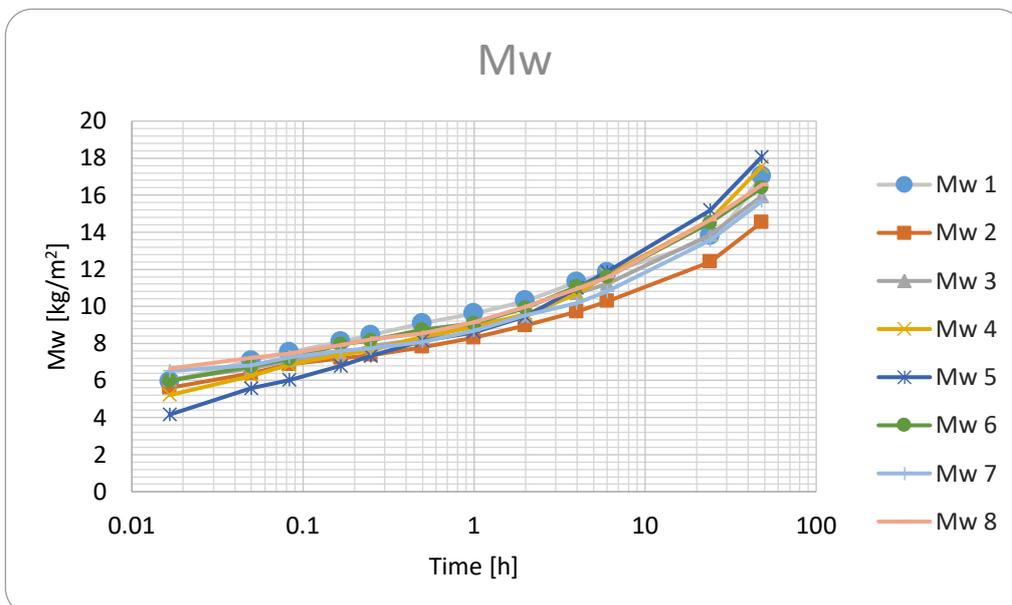


Grafico 27:  
Mw/t di tutti  
i campioni.

Si riportano i grafici che descrivono l'andamento del parametro Mw in funzione della radice del tempo (espresso in ore).

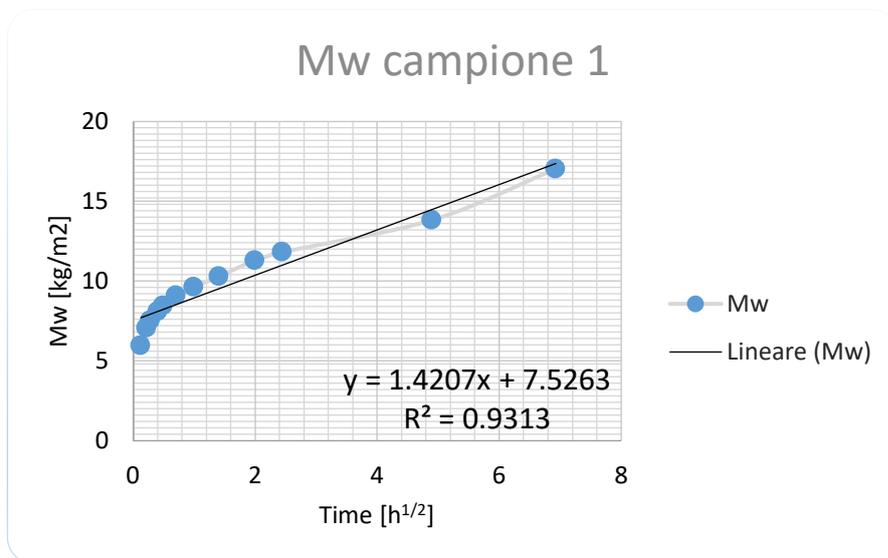


Grafico 28: Mw/t del campione 1.

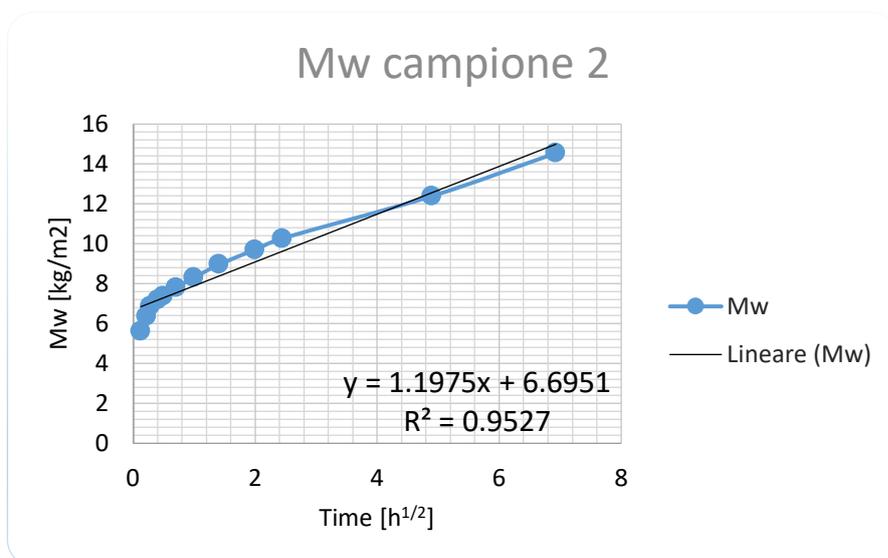


Grafico 29: Mw/t del campione 2.

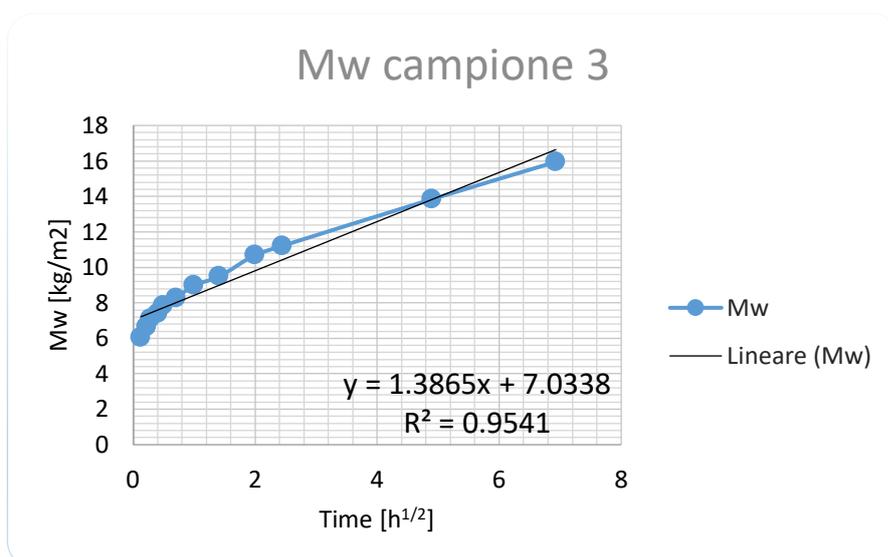


Grafico 30: Mw/t del campione 3.

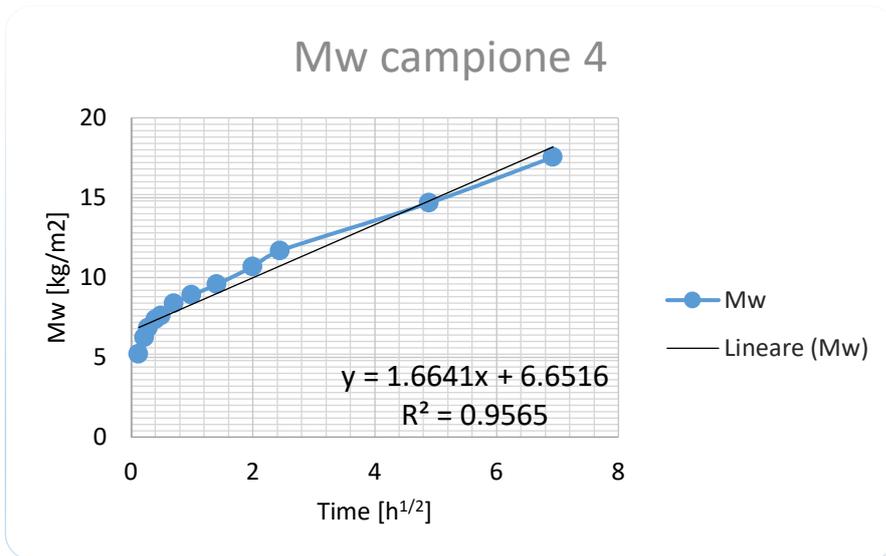


Grafico 31: Mw/t del campione 4.

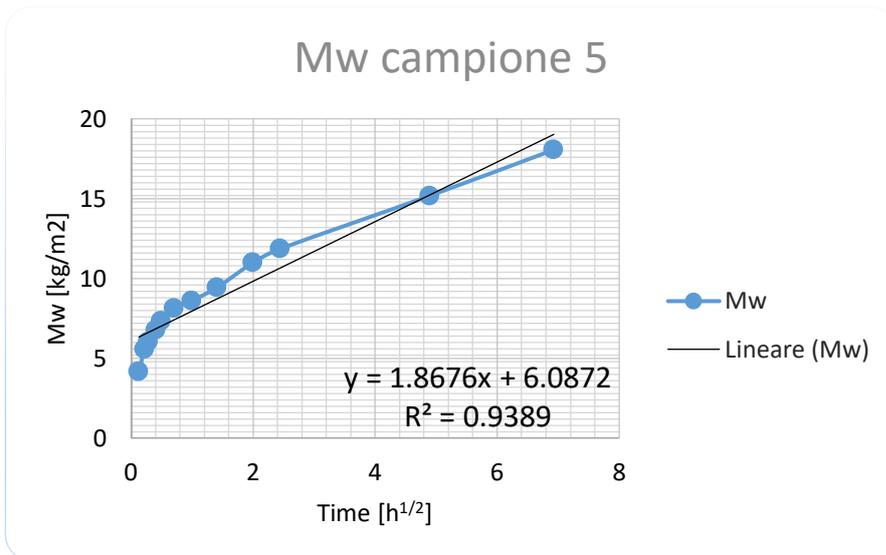


Grafico 32: Mw/t del campione 5.

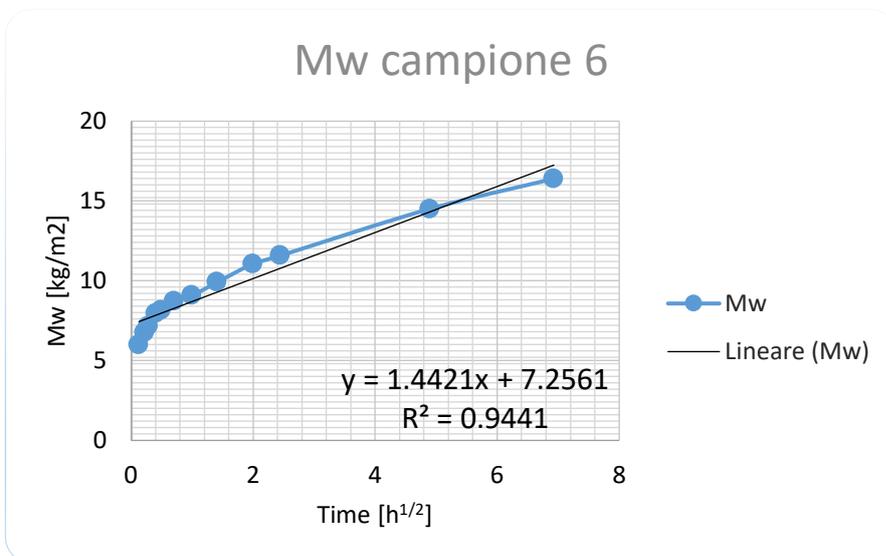


Grafico 33: Mw/t del campione 6.

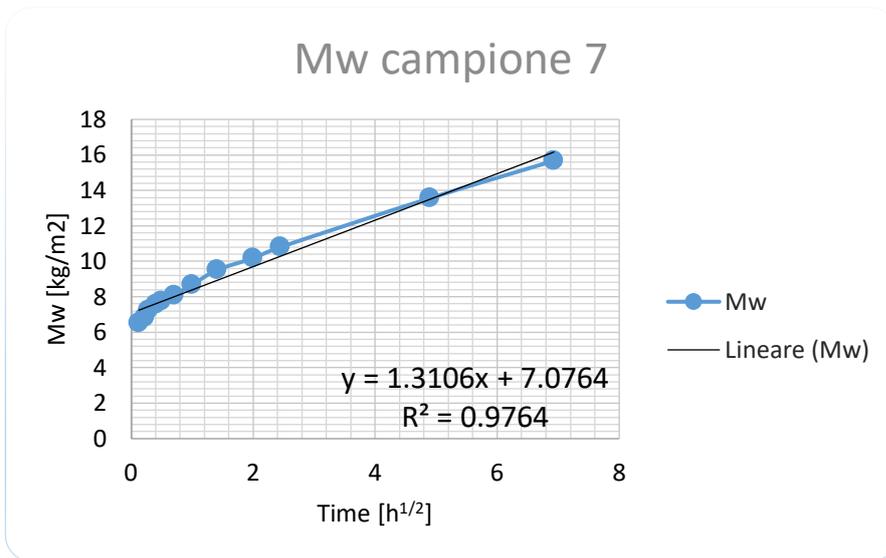


Grafico 34: Mw/t del campione 7.

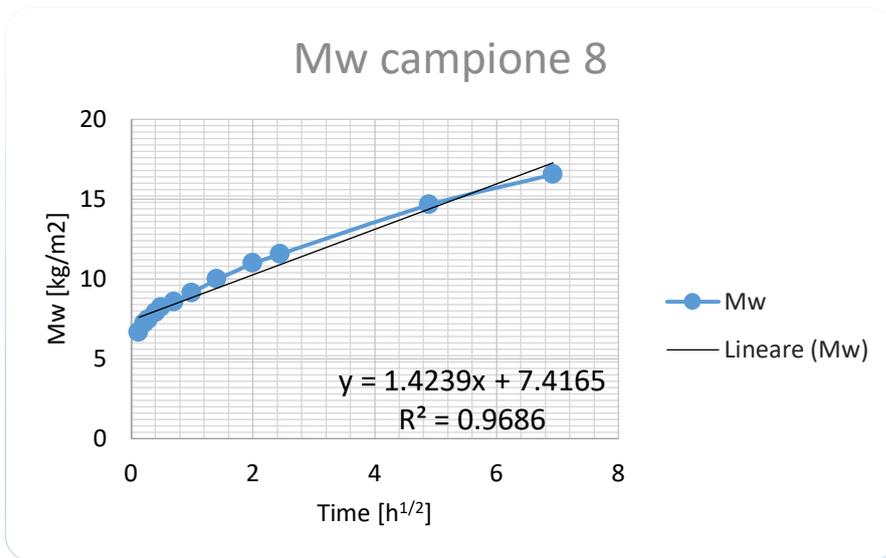


Grafico 35: Mw/t del campione 8.

Si riportano gli stessi grafici in un unico piano per un rapido confronto visivo.

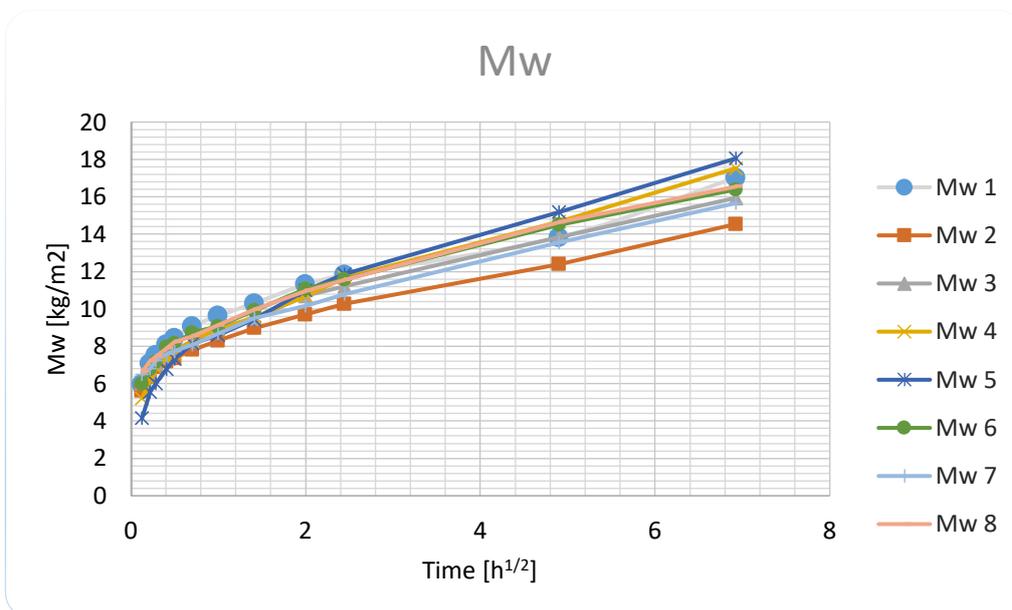


Grafico 36: Mw/t di tutti i campioni.

### **3.5 Osservazioni**

La prova si è conclusa il giorno 23/10/2020 alle ore 11:20.

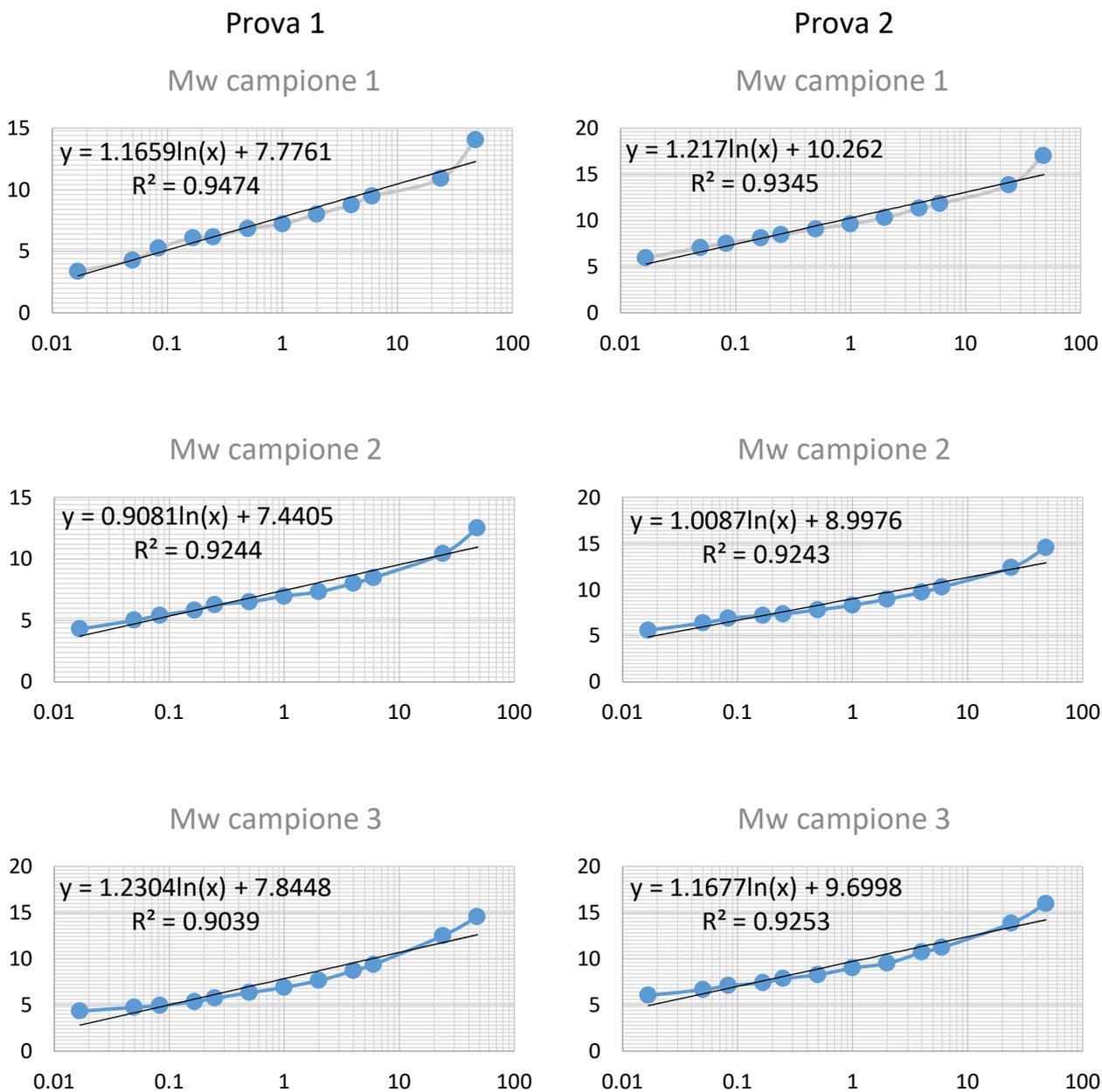
Al termine della prova, l'acqua non era più limpida, bensì torbida e tendente ad una colorazione giallo-ocra.

Non sono stati riscontrati problemi durante la prova, se non il mancato mantenimento dei provini a temperatura e umidità relativa comprese nei limiti previsti dal protocollo per alcuni periodi di tempo.

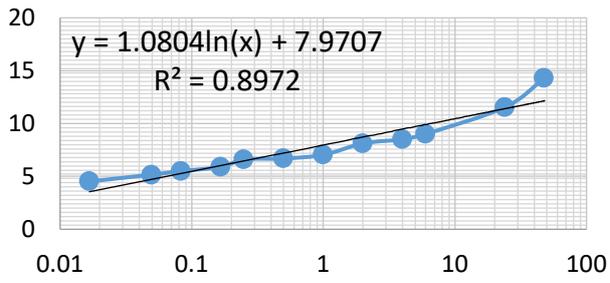
## 4 SINTESI

### 4.1 Sintesi grafici Mw/t in scala logaritmica

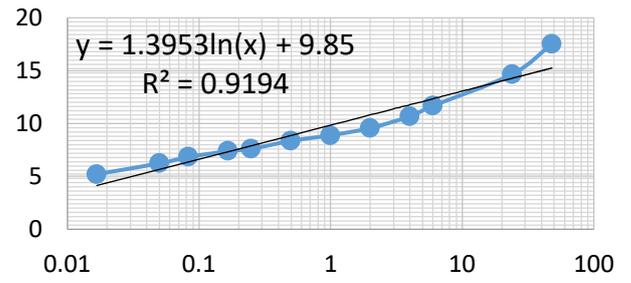
Si riportano i grafici che descrivono l'andamento del parametro Mw in funzione del tempo (espresso in ore, plottato in scala logaritmica).



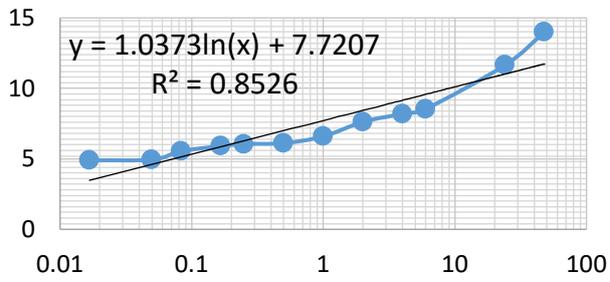
Mw campione 4



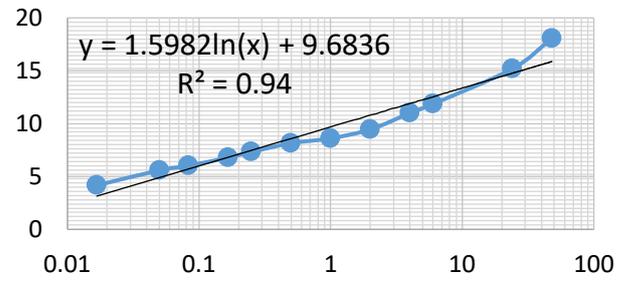
Mw campione 4



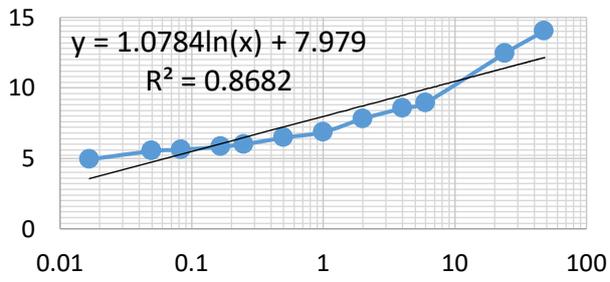
Mw campione 5



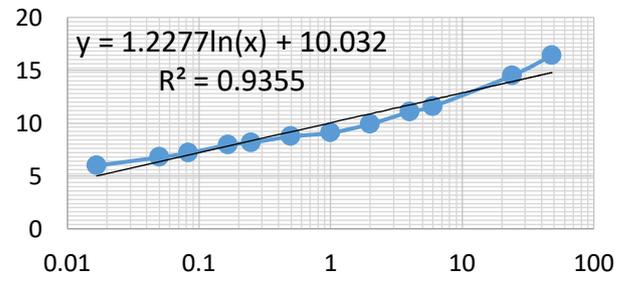
Mw campione 5



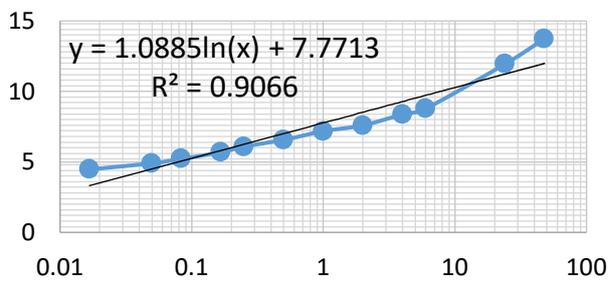
Mw campione 6



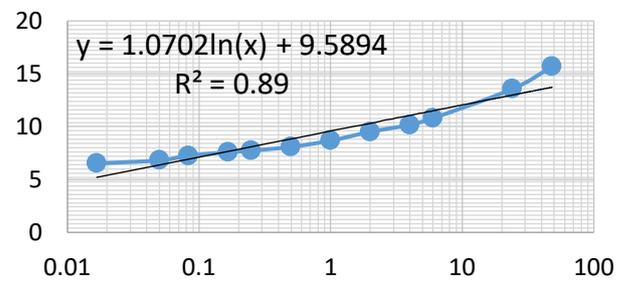
Mw campione 6

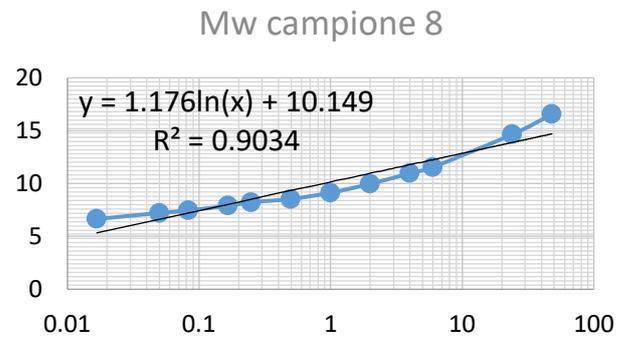
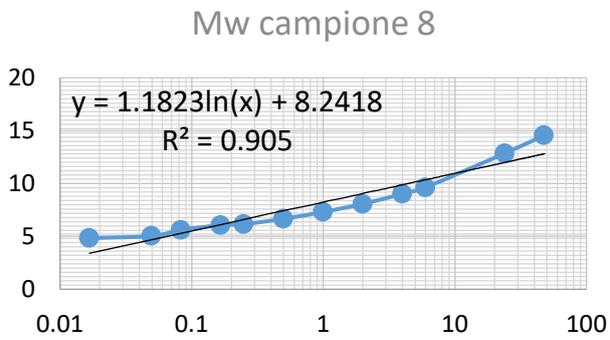


Mw campione 7

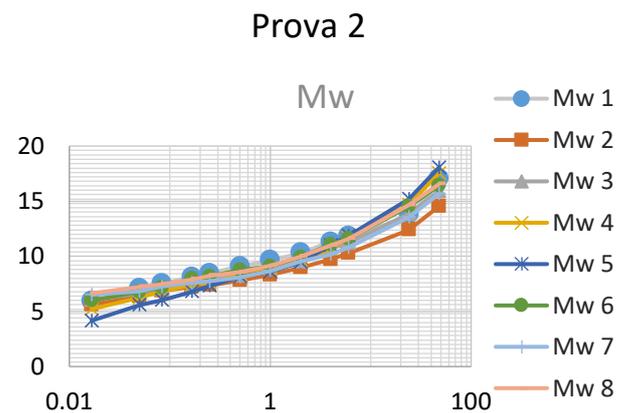
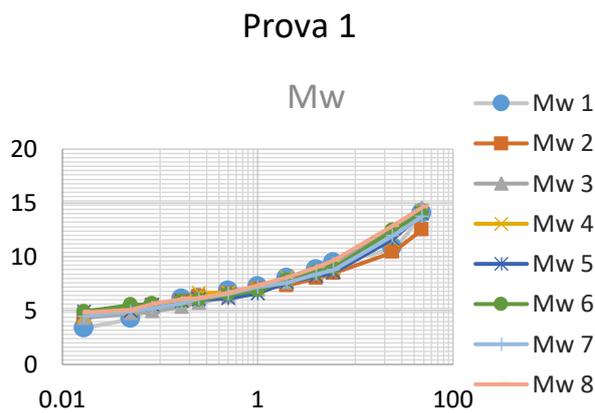


Mw campione 7



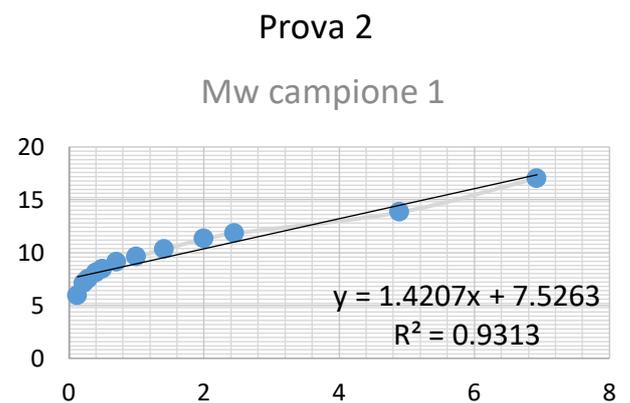
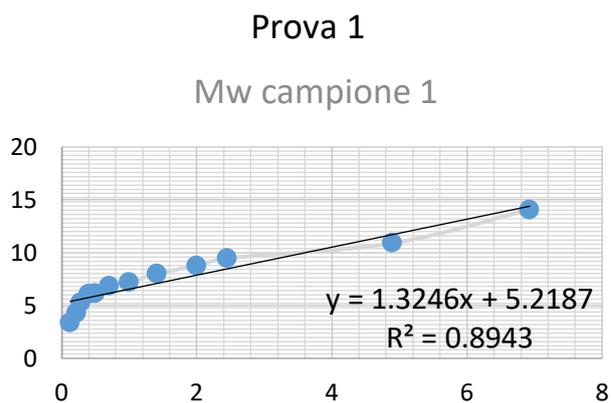


Si riportano gli stessi grafici in un unico piano per un rapido confronto visivo.

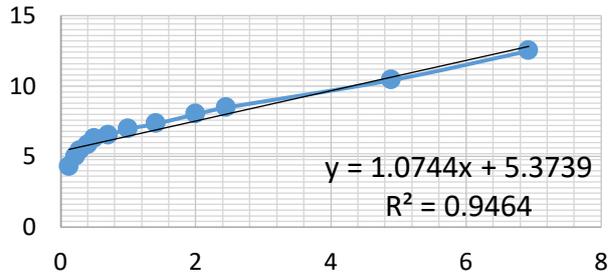


#### 4.2 Sintesi grafici Mw/vt

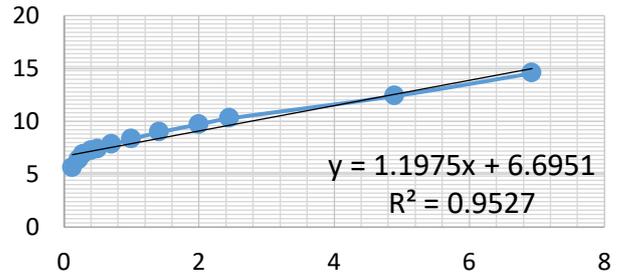
Si riportano i grafici che descrivono l'andamento del parametro Mw in funzione della radice del tempo (espresso in ore).



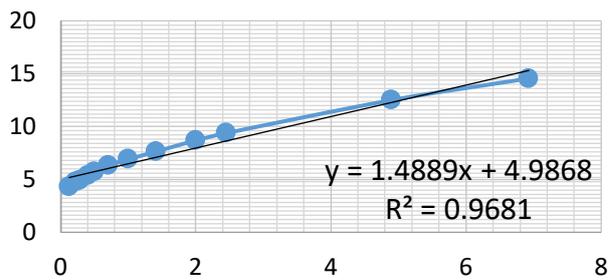
Mw campione 2



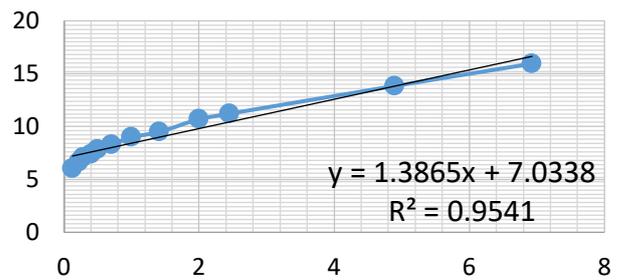
Mw campione 2



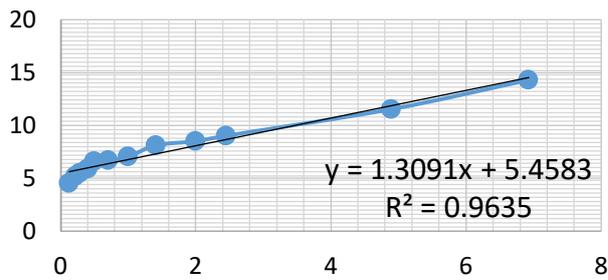
Mw campione 3



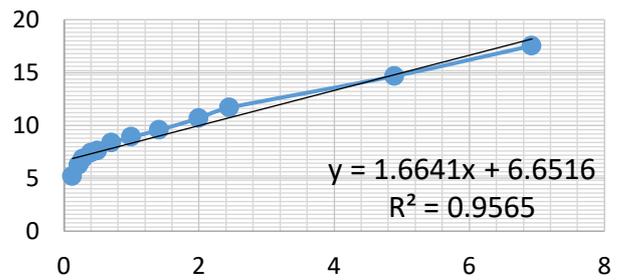
Mw campione 3



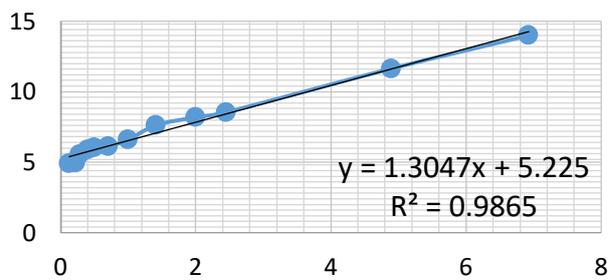
Mw campione 4



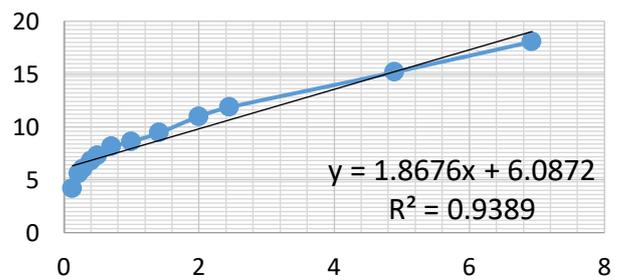
Mw campione 4

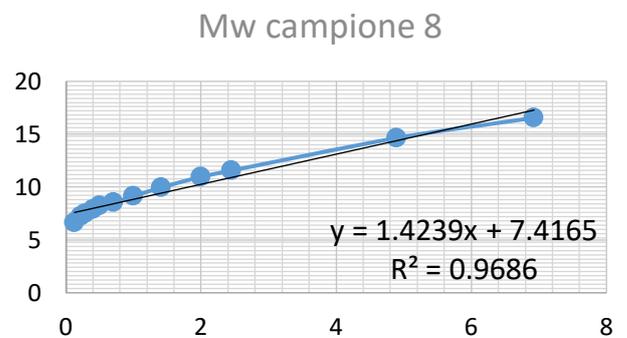
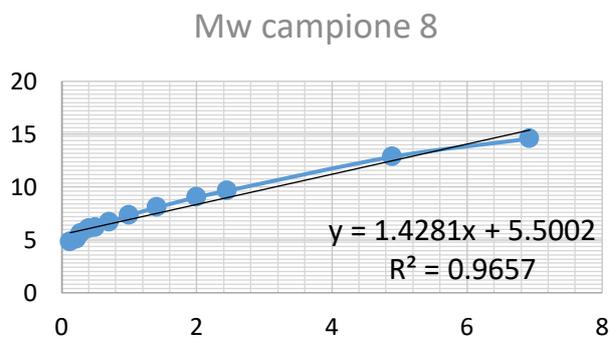
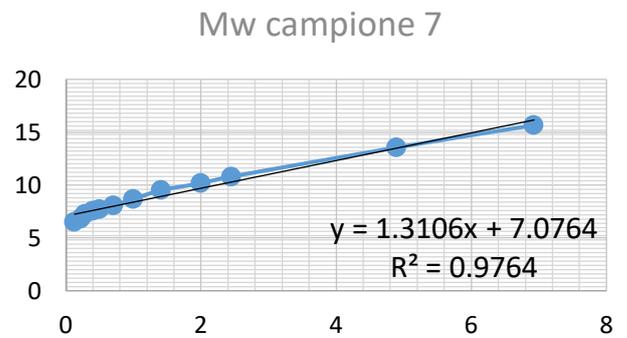
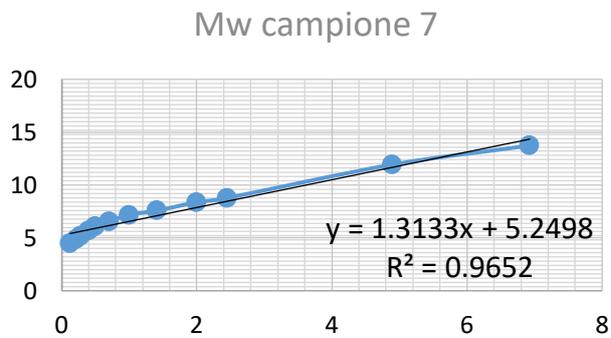
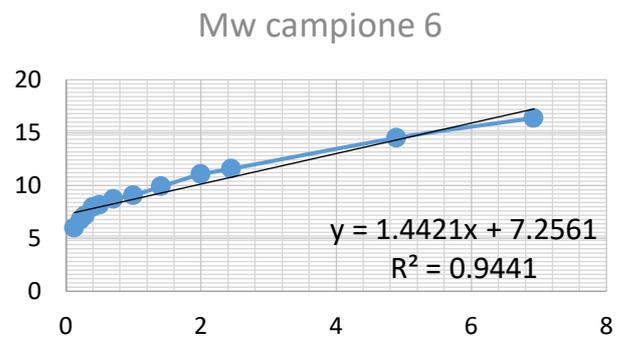
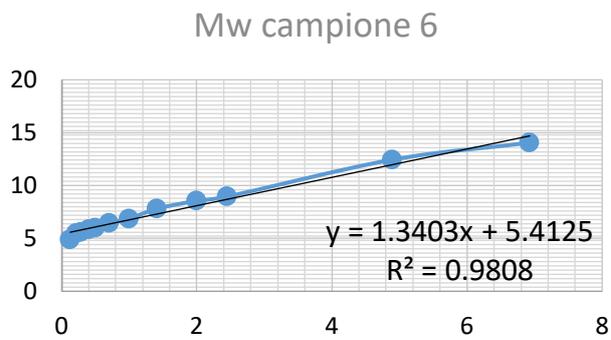


Mw campione 5

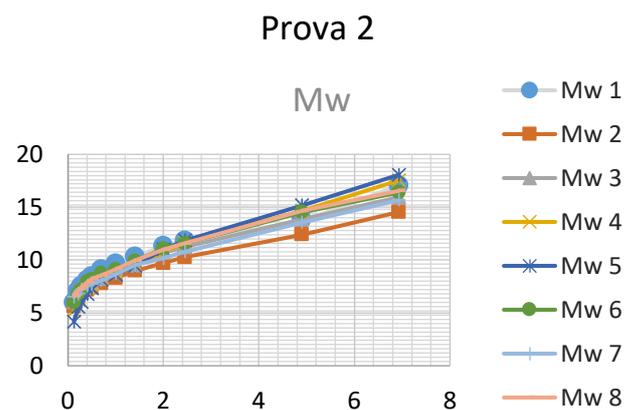
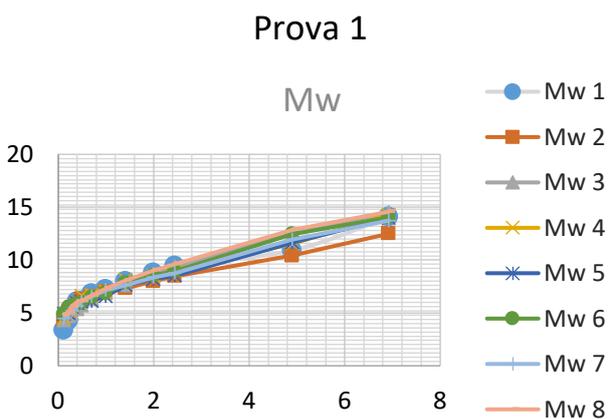


Mw campione 5





Si riportano gli stessi grafici in un unico piano per un rapido confronto visivo.



## 5 CONCLUSIONI

La prova è stata ripetuta due volte ed è stato utilizzato un numero maggiore di provini rispetto a quello suggerito dal protocollo per avere uno spettro di dati più ampio da analizzare.

Gli andamenti dei valori della massa d'acqua assorbita per unità di area ( $M_w$ ) all'aumentare del tempo sono simili per tutti i campioni e per entrambe le prove. Tuttavia, i singoli valori di  $M_w$  sono risultati (per tutti e 8 i campioni) più elevati nella seconda prova. Questo è dovuto al fatto che, quando è stata eseguita la prima prova, i provini erano in camera climatica da parecchio tempo: avevano già assorbito umidità dall'ambiente, il peso di partenza era maggiore, pertanto è stato minore l'assorbimento di acqua per capillarità; la seconda prova invece è stata condotta una settimana dopo l'essiccazione, pertanto i provini hanno avuto il tempo di stabilizzarsi senza però assorbire troppa umidità.