



POLITECNICO
MILANO 1863

Department ABC- Architecture, Built environment, Construction engineering

Caratterizzazione interlayer STRATO® RIGIDO

Cliente: Satinal S.p.A.

Via del Lavoro 1

22036 Erba (CO)

Italy

Sara Cattaneo

Milano, 14 Maggio 2021



Introduzione

La presente relazione riporta i risultati sperimentali di prove di caratterizzazione dell'interlayer STRATO® RIGIDO prodotto dall'azienda Satinal in accordo con l'Annex A della norma EN 16613:2019 [1].

1. Identificazione dei campioni

In accordo con quanto indicato con l'Annex A si sono testati campioni di lunghezza pari a 1100 mm e larghezza pari a 360 mm costituiti da vetro stratificato composto da due strati da 8 mm di vetro float e uno strato di interlayer "STRATO® RIGIDO" composto da 0.4mm STRATO® EVA, 0.8mm intercalare rigido, 0.4mm STRATO® EVA.

I campioni sono identificati in base alla temperatura di prova e da un numero progressivo (da 1 a 3).

2. Procedura di prova

Le prove sono state effettuate in conformità con la configurazione prevista dalla norma ISO EN1288-3:2016 (prova di flessione su 4 punti – Fig. 1). I campioni sono stati caricati con un carico costante pari a 1150 N e gli spostamenti sono stati monitorati con un trasduttore LVDT posizionato in mezzeria e uno sull'appoggio (HBM WI10), al fine di valutare l'abbassamento della gomma interposta tra l'appoggio e il vetro (Fig.2).

L'acquisizione dei dati (con centralina HBM spider 8) è avvenuta con un campionamento pari a 100 Hz per le fasi di carico e i seguenti 10 minuti, pari a 1Hz per le prime ore e successivamente con campionamento ogni 10 secondi.

Le prove sono state eseguite alle seguenti temperature: 20°C, 30°C, 40°C, 50°C, 60°C, controllate in camera Tecam tipo M100A, S.N. N0133.

Per ogni temperatura sono stati testati 3 campioni.

I campioni sono stati mantenuti in camera in posizione verticale fino al raggiungimento della temperatura di prova.

Il carico è stato mantenuto per un tempo minimo tale da garantire uno spostamento costante. In accordo con quanto previsto dalla norma lo spostamento può essere assunto come costante quando la variazione tra due spostamenti acquisiti a quattro ore di distanza è inferiore all'1%.

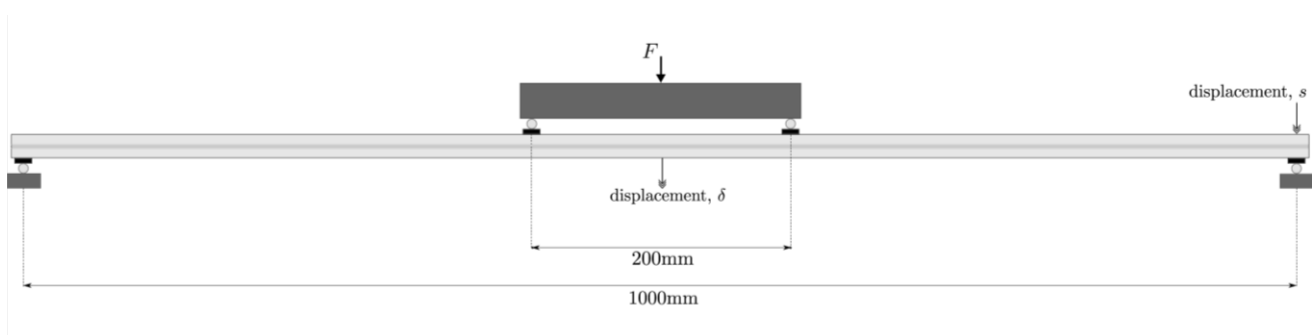


Figura 1 – Layout della prova sperimentale

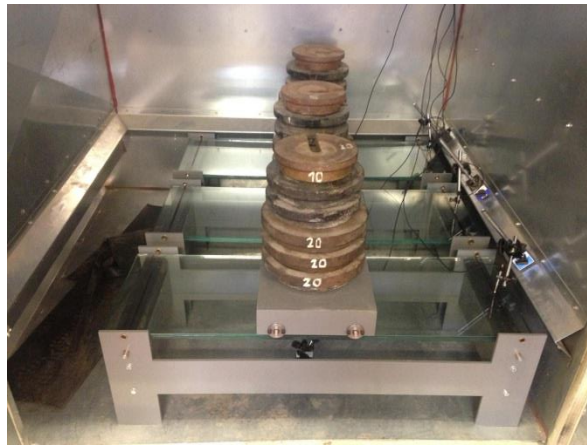


Figura 2 – Campioni soggetti a prova

3. Risultati sperimentali

I campioni soggetti a prova hanno mostrato un comportamento dipendente dalla temperatura, sia per quanto riguarda gli spostamenti osservati, sia per quanto riguarda il tempo necessario a raggiungere la loro stabilizzazione.

In Figura 3 vengono riportati i grafici tempo-spostamento (in mezzeria e sull'appoggio (S)) per ciascuna temperatura di prova e per ciascun provino (indicato con il numero progressivo). I grafici di sinistra mostrano uno zoom relativo ai primi 1000 secondi (fase di carico), nelle curve di destra gli spostamenti relativi a tutta la prova. In Figura 4 vengono riportati i grafici degli spostamenti effettivi (ottenuti sottraendo allo spostamento in mezzeria lo spostamento sull'appoggio causato dallo schiacciamento della gomma).

Le croci azzurre indicano il momento in cui è avvenuta la stabilizzazione del carico (spostamento inferiore all'1% nelle 4 ore precedenti).

In Tabella 1 e in Figura 5 si riportano per ciascun provino i valori degli spostamenti misurati e la loro media per alcuni istanti di carico significativi.

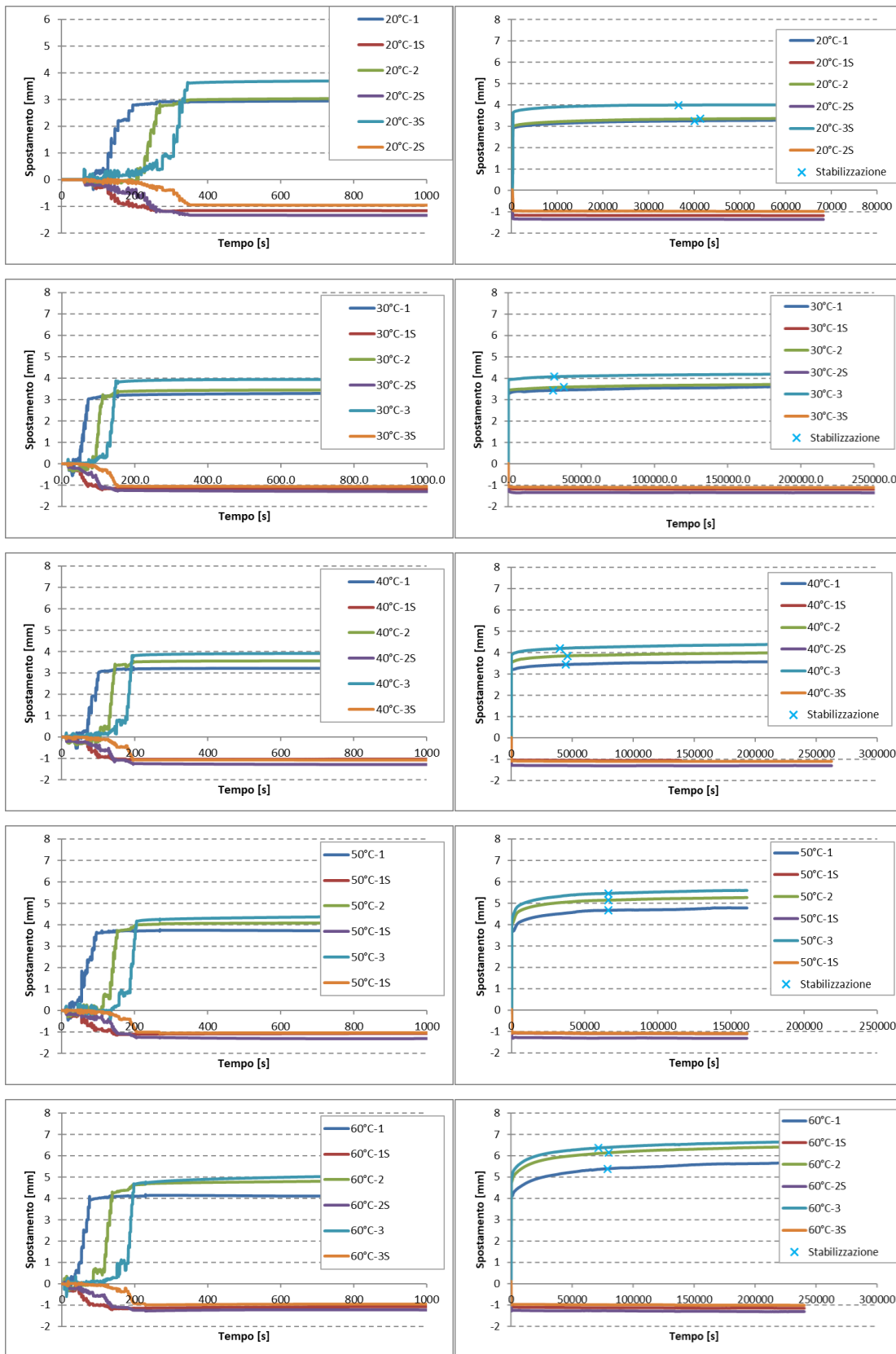


Figura 3 – Curve carico spostamento mezzeria e appoggio (S)- Zoom fase di carico (sx) e curve totali (dx)

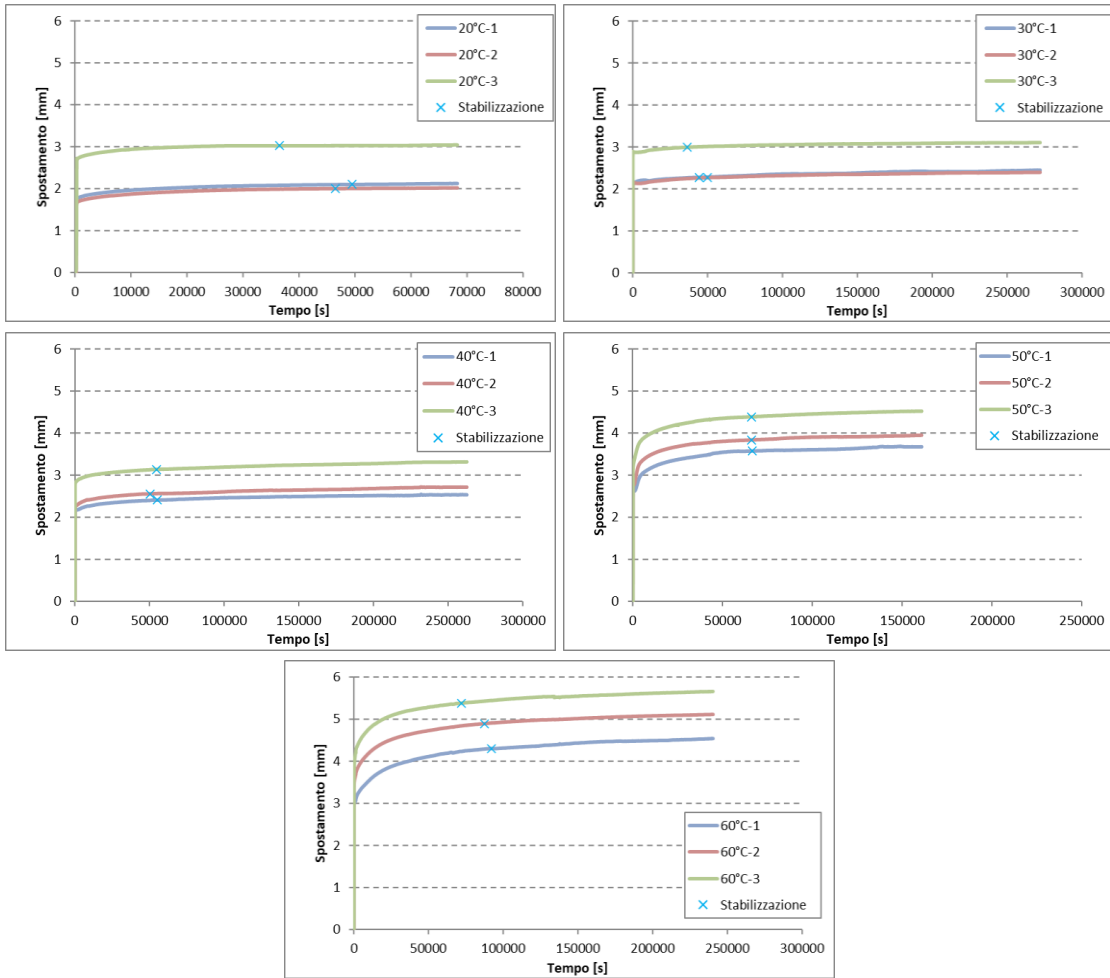


Figura 4 – Curve carico spostamento effettivo in mezzeria

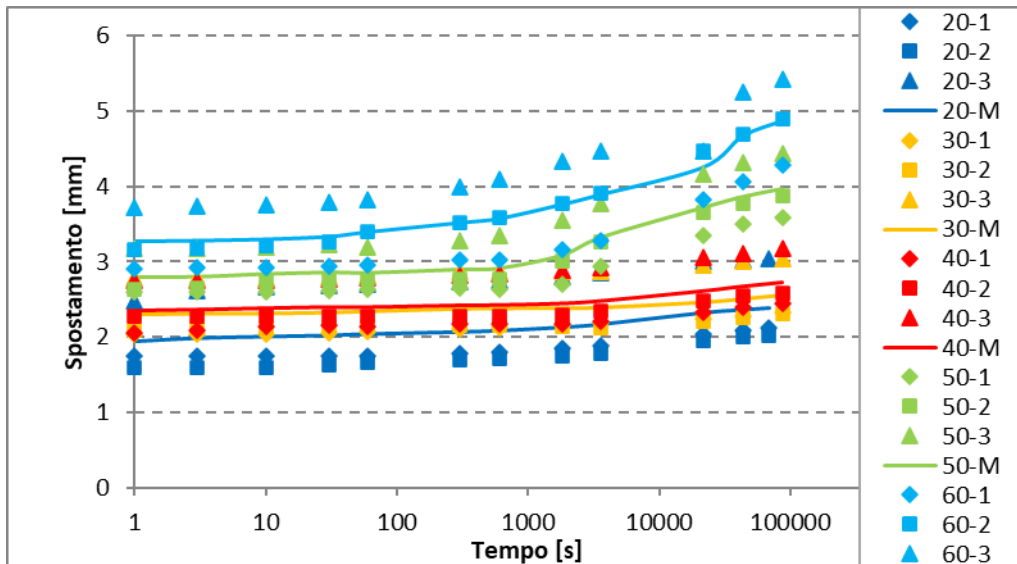


Figura 5 – Spostamento vs tempo



Tabella 1 -Spostamento effettivo per diversi istanti di carico significativi

Temperatura [°C]	Tempo [s]	Tempo [h]	Spostamento [mm]			
			Lastra 1	Lastra 2	Lastra 3	Media
20	1	0.0003	1.741	1.594	2.485	1.940
	3	0.0008	1.741	1.595	2.616	1.984
	10	0.0028	1.743	1.598	2.674	2.005
	30	0.0083	1.749	1.631	2.686	2.022
	60	0.0167	1.752	1.670	2.696	2.040
	300	0.0833	1.782	1.692	2.731	2.068
	600	0.1667	1.798	1.709	2.753	2.086
	1800	0.5000	1.843	1.749	2.802	2.131
	3600	1.0000	1.882	1.790	2.848	2.174
	21600	6.0000	2.039	1.946	3.005	2.330
	44197	12.2770	2.098	1.999	3.020	2.372
	43200	12.0000	2.092	1.997	3.023	2.371
	68260	18.9611	2.123	2.018	3.041	2.394
30	1	0.0003	2.040	2.097	2.783	2.306
	3	0.0008	2.042	2.122	2.783	2.315
	10	0.0028	2.046	2.126	2.785	2.319
	30	0.0083	2.055	2.135	2.807	2.332
	60	0.0167	2.066	2.145	2.828	2.346
	300	0.0833	2.105	2.162	2.874	2.380
	600	0.1667	2.125	2.156	2.877	2.386
	1800	0.5000	2.162	2.137	2.871	2.390
	3600	1.0000	2.188	2.131	2.872	2.397
	21600	6.0000	2.235	2.206	2.959	2.467
	43651	12.1253	2.275	2.267	2.990	2.512
	43200	12.0000	2.274	2.259	3.002	2.512
	86400	24.0000	2.335	2.306	3.042	2.561
40	1	0.0003	2.058	2.272	2.745	2.358
	3	0.0008	2.097	2.271	2.747	2.372
	10	0.0028	2.143	2.273	2.757	2.391
	30	0.0083	2.161	2.278	2.775	2.404
	60	0.0167	2.145	2.281	2.788	2.405
	300	0.0833	2.172	2.283	2.829	2.428
	600	0.1667	2.178	2.278	2.842	2.433
	1800	0.5000	2.178	2.301	2.883	2.454
	3600	1.0000	2.204	2.344	2.918	2.488
	21600	6.0000	2.331	2.481	3.051	2.621
	43200	12.0000	2.389	2.547	3.113	2.683
	53521	14.8670	2.407	2.554	3.137	2.699
	86400	24.0000	2.448	2.586	3.173	2.736
50	1	0.0003	2.595	2.642	3.179	2.805
	3	0.0008	2.595	2.645	3.183	2.808
	10	0.0028	2.602	2.732	3.201	2.845
	30	0.0083	2.616	2.755	3.222	2.864
	60	0.0167	2.626	2.766	3.191	2.861
	300	0.0833	2.651	2.771	3.285	2.902
	600	0.1667	2.640	2.771	3.348	2.920
	1800	0.5000	2.704	3.005	3.561	3.090
	3600	1.0000	2.944	3.268	3.773	3.328
	21600	6.0000	3.341	3.651	4.169	3.720
	43200	12.0000	3.495	3.778	4.318	3.864
	66303	18.4175	3.573	3.837	4.388	3.933
	86400	24.0000	3.591	3.882	4.429	3.967
60	1	0.0003	2.909	3.169	3.730	3.269
	3	0.0008	2.915	3.176	3.748	3.280
	10	0.0028	2.921	3.207	3.762	3.297
	30	0.0083	2.938	3.264	3.793	3.332
	60	0.0167	2.957	3.391	3.832	3.393
	300	0.0833	3.022	3.524	3.999	3.515
	600	0.1667	3.022	3.588	4.105	3.571
	1800	0.5000	3.161	3.779	4.333	3.758
	3600	1.0000	3.282	3.916	4.472	3.890
	21600	6.0000	3.822	4.466	4.467	4.252
	43200	12.0000	4.064	4.687	5.246	4.666
	83998	23.3328	4.300	4.894	5.378	4.857
	86400	24.0000	4.287	4.890	5.425	4.867

Tempo di stabilizzazione



4. Analisi dei dati sperimentali

4.1 Valutazione del modulo di elasticità tangenziale dell'interlayer G

La valutazione del valore del modulo di elasticità tangenziale è stata effettuata in accordo con quanto indicato nella norma (EN 16613:2019 §A.4) assumendo lo spostamento massimo.

In particolare è stato valutato lo spessore equivalente ad un vetro monolitico (h_{mono}) mediante la seguente formula:

$$h_{mono} = \sqrt[3]{\frac{F(2L_S^3 + L_B^3 - 3L_S L_B^2)}{8E_G b w} + \frac{60QL_S^4}{384E_G b w}} \quad (1)$$

dove:

F : forza applicata pari a 1150 N

Q: peso proprio dell'elemento pari a 0.144N/m

L_S, L_B : distanza tra gli appoggi e tra i coltelli di carico (rispettivamente 1000 mm e 200 mm)

E_G : modulo elastico del vetro assunto pari a 70000 MPa

b: larghezza della trave soggetta a carico pari a 360 mm

w: abbassamento misurato durante la prova

Il coefficiente di trasferimento del taglio è valutato mediante la relazione

$$\omega = \frac{h_{mono}^3 - \sum_k h_k^3}{12 \sum_k (h_k h_{m;k}^2)} \quad (2)$$

dove:

$h_k, h_{m;k}$: sono rispettivamente gli spessori del singolo strato di vetro e la distanza tra il baricentro della singola k-esima lastra e il baricentro della sezione stratificata, pari rispettivamente a 8 mm e a 4.8 mm.

Infine il modulo di elasticità tangenziale G dell'interlayer è stato valutato mediante l'inversione della formula di Wölfel-Bennison [3]:

$$\omega = \frac{1}{1 + 9.6 \frac{h_{int} E I_S}{G L_S^2 h_m^2}} \quad (3)$$

dove

h_k è lo spessore dell'interlayer assunto pari a 1.6 mm

$$I_S = \sum_k (h_k h_{m;k}^2).$$

Si osserva che il coefficiente 9.6 assunto nell'Eq.3 è quello comunemente adottato [3], tuttavia nella trattazione completa di Wölfel [4] il coefficiente per la condizione di carico assunta risulta pari a 10.17.

Nella presente analisi si è optato per l'assunzione del valore 9.6, che conduce a valori di modulo di elasticità tangenziale inferiori, e pertanto più cautelativi.



Nelle Tabelle 2 e 3 si riportano i valori di spostamento, il conseguente spessore equivalente h_{mono} (Eq.1), il coefficiente di trasferimento del taglio ω (Eq. 2), il modulo di elasticità tangenziale G e il modulo di elasticità E (valutato come $E=2(G+\nu)$ assumendo $\nu=0.5$) misurati a diversi tempi di carico per le varie temperature considerate (Figura 6).

Tabella 2 – Spostamento massimo e spessore equivalente per diversi istanti di carico significativi

Durata del carico	Temperatura [°C]					Temperatura [°C]				
	20	30	40	50	60	20	30	40	50	60
	Spostamento [mm]					h_{mono} [mm]				
1 s	2.485	2.783	2.745	3.179	3.730	16.74	16.12	16.20	15.42	14.62
3s	2.616	2.783	2.747	3.183	3.748	16.46	16.12	16.19	15.42	14.60
10s	2.674	2.785	2.757	3.201	3.762	16.34	16.12	16.17	15.39	14.58
30 s	2.686	2.807	2.775	3.222	3.793	16.31	16.08	16.14	15.35	14.54
1 m	2.696	2.828	2.788	3.191	3.832	16.29	16.04	16.11	15.40	14.49
5 m	2.731	2.874	2.829	3.285	3.999	16.22	15.95	16.03	15.25	14.29
10 m	2.753	2.877	2.842	3.348	4.105	16.18	15.94	16.01	15.16	14.16
30 m	2.802	2.871	2.883	3.561	4.333	16.09	15.96	15.93	14.85	13.91
1 h	2.848	2.872	2.918	3.773	4.472	16.00	15.95	15.87	14.57	13.76
6h	3.005	2.959	3.051	4.169	5.036	15.72	15.80	15.64	14.09	13.23
12h	3.023	3.002	3.113	4.318	5.246	15.68	15.72	15.53	13.93	13.05
24 h	3.041	3.042	3.173	4.429	5.425	15.65	15.65	15.43	13.81	12.91

Tabella 3 - Coefficiente di trasferimento di taglio ω , modulo di elasticità tangenziale G e modulo di elasticità E per diversi istanti di carico significativi

Durata del carico	Temperatura [°C]					Temperatura [°C]					Temperatura [°C]				
	20	30	40	50	60	20	30	40	50	60	20	30	40	50	60
	ω					G [MPa]					E [MPa]				
1 s	0.83	0.72	0.73	0.60	0.48	20.9	10.8	11.6	6.4	3.9	62.8	32.5	34.7	19.2	11.7
3s	0.78	0.72	0.73	0.60	0.47	14.9	10.8	11.5	6.4	3.8	44.8	32.5	34.6	19.1	11.5
10s	0.75	0.72	0.72	0.59	0.47	13.2	10.8	11.3	6.2	3.8	39.6	32.4	34.0	18.7	11.4
30 s	0.75	0.71	0.72	0.59	0.46	12.9	10.4	11.0	6.1	3.7	38.7	31.3	32.9	18.3	11.1
1 m	0.75	0.70	0.71	0.59	0.46	12.7	10.1	10.7	6.3	3.6	38.0	30.2	32.2	18.9	10.8
5 m	0.73	0.69	0.70	0.57	0.43	11.9	9.4	10.1	5.7	3.2	35.6	28.2	30.2	17.2	9.6
10 m	0.73	0.68	0.70	0.56	0.41	11.4	9.3	9.8	5.4	3.0	34.2	28.0	29.5	16.2	9.0
30 m	0.71	0.69	0.68	0.51	0.38	10.5	9.4	9.3	4.5	2.6	31.5	28.3	27.8	13.4	7.8
1 h	0.69	0.69	0.67	0.47	0.36	9.8	9.4	8.8	3.8	2.4	29.3	28.2	26.5	11.3	7.2
6h	0.65	0.66	0.63	0.40	0.29	7.8	8.3	7.4	2.9	1.8	23.5	25.0	22.2	8.6	5.3
12h	0.64	0.65	0.62	0.38	0.27	7.7	7.9	6.9	2.6	1.6	23.0	23.6	20.6	7.9	4.8
24 h	0.64	0.64	0.60	0.36	0.25	7.5	7.5	6.4	2.5	1.5	22.5	22.5	19.3	7.4	4.4

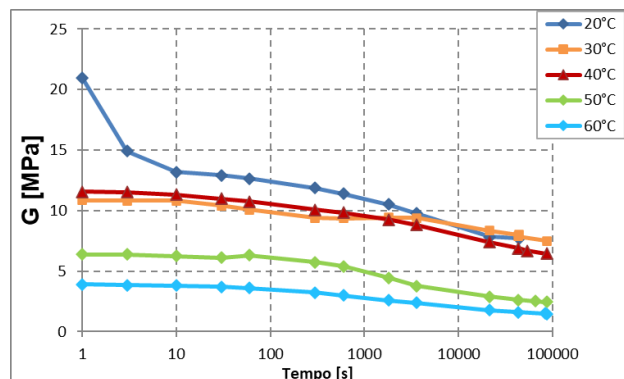
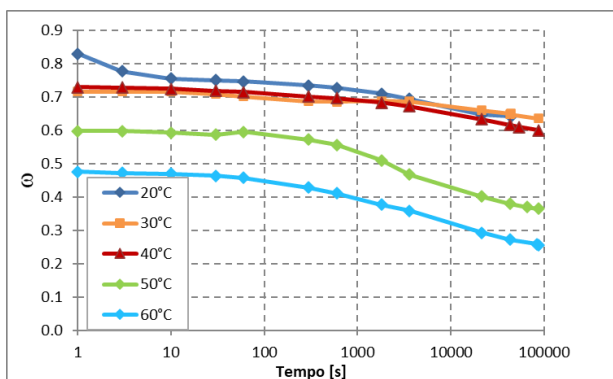


Figura 6 – Coefficiente di trasferimento al taglio ω e modulo di elasticità tangenziale G a diverse temperature e per diverse durate del carico



4.2 Master curves

La time-temperature equivalence, noto fenomeno osservabile nei test di stress-relaxation sui polimeri, può essere usata per costruire una master curve generale per una data temperatura di riferimento T , a partire dalle osservazioni a diverse temperature.

Per generare una master curve relativa ad una data temperatura di riferimento T , le curve modulo di elasticità tangenziale G vs tempo (Figura 6-dx) devono essere traslate orizzontalmente, tenendo fissa la posizione della curva di riferimento.

L'entità della traslazione orizzontale può essere valutata, in funzione della temperatura attraverso il calcolo dello shift factor a_{T_0} mediante la nota relazione di Williams and Ferry [5][5]

$$\log a_{T_0} = \frac{-C_1(T - T_0)}{C_2 + (T - T_0)}$$

dove T_0 è la temperatura di riferimento, mentre C_1 e C_2 sono due coefficienti assunti rispettivamente pari a 17,44 e 51,6.

L'entità dello shift orizzontale a cui deve essere soggetta ogni curva può essere plottata in funzione della temperatura, come mostrato in Figura 7 per la temperatura di riferimento $T=20^\circ\text{C}$.

In questo modo si determina lo shift orizzontale di ogni curva $G(t)$ rappresentata in Figura 6, semplicemente applicando la seguente equazione

$$\log t_1 = \log t - \log a_{T_0}$$

dove con t si indica la scala dei tempi originale, mentre t_1 è la nuova scala dei tempi traslata, ottenendo così le master curves per le diverse temperature. In Figura 8 sono rappresentate le master curves ottenute.

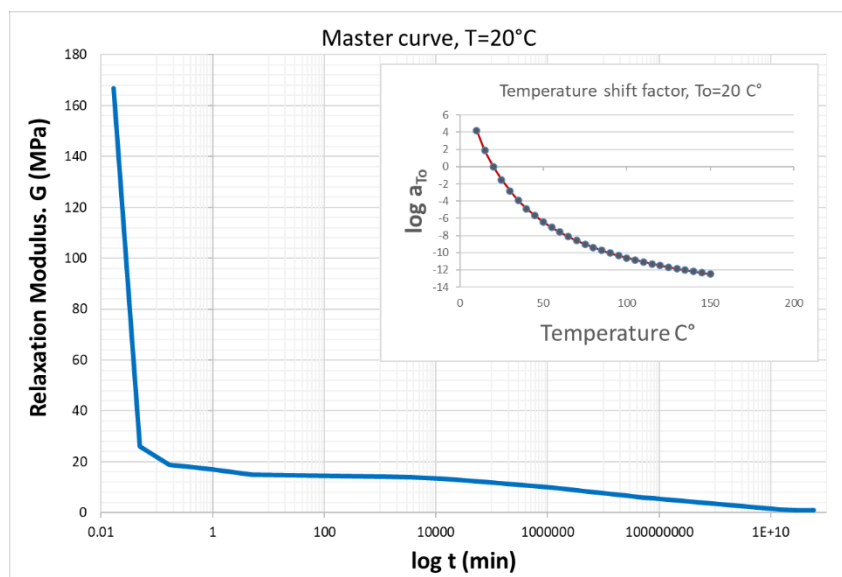


Figura 7 Master curve corrispondente alla temperatura di $T=20^\circ\text{C}$ e relativo andamento dello shift factor con il variare della temperatura.

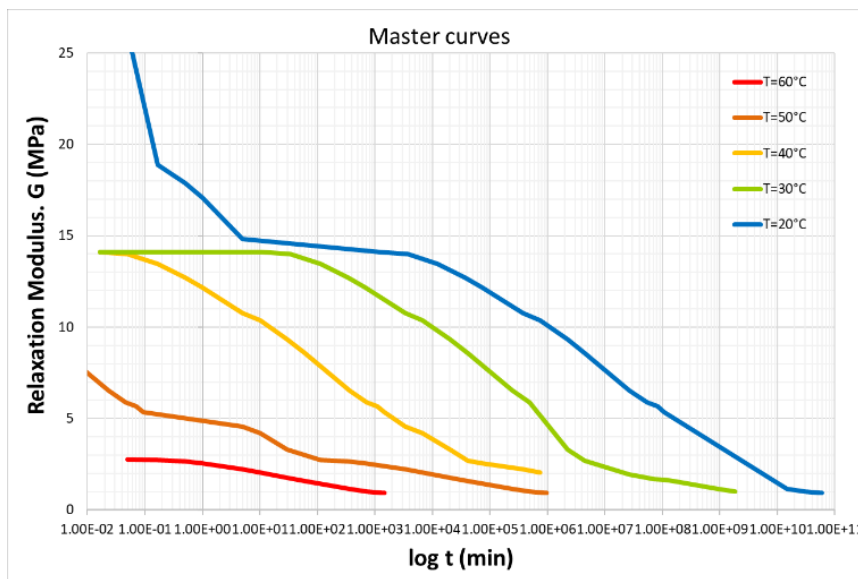


Figura 8 Master curves corrispondenti a diverse temperature T

Sulla base dei risultati ottenuti è possibile valutare la famiglia di rigidezza dell'intercalare in accordo all'Annex A della norma UNI EN16613 (Tabella 4).

Tabella 4 – Famiglia di rigidezza dell'intercalare

	Load case	Durata del carico	Temperatura	Famiglia di rigidezza
1	Carico da raffiche di vento (aree mediterranee)	3 sec	35°C	2
2	Carico da raffiche di vento (altre aree)	3 sec	20°C	1
3	Carico da tempeste di vento (aree mediterranee)	10 min	35°C	2
4	Carico da tempeste di vento (altre aree)	10 min	20°C	2
5	Carico da balaustre nessun affollamento (per esempio categorie d'utilizzo degli edifici A, B1, C1, E dalla EN 1991-1-1)	30 sec	30°C	2
6	Carico da balaustre affollamento	5 min	30°C	2
7	Carichi da manutenzione	30 min	40°C	2
8	Carichi da neve – tettoie esterne e tetti di edifici non riscaldati	3 weeks	20°C	2
9	Carichi da neve – tetti di edifici riscaldati	5 days	20°C	2
10	Carichi climatici su vetrate isolanti: estate	6 hours	40°C	2
11	Carichi climatici su vetrate isolanti: inverno	12 hours	20°C	2
12	Permanente	50 years	60°C	-



5. Riferimenti bibliografici

- [1] UNI EN 16613:2019: Vetro per l'edilizia – Vetro stratificato e vetro stratificato di sicurezza - Determinazione delle proprietà meccaniche dell'intercalare - Glass in building. Laminated glass and laminated safety glass. Determination of interlayer mechanical properties, edizione Marzo 2020.
- [2] UNI EN 1288-3:2001, Vetro per edilizia - Determinazione della resistenza a flessione del vetro - Prova con provino supportato in due punti (flessione in quattro punti), Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), 2001.
- [3] Consiglio Nazionale delle Ricerche, CNR-DT 210/2013, Istruzioni per la progettazione, esecuzione e il controllo di costruzioni con elementi strutturali in vetro, 2013.
- [4] Wölfel E., Elastic Composite: An Approximation Solution and its Application Possibilities, Stahlbau, 6: 173–180, 1987
- [5] Ferry, J.D., Viscoelastic Properties of Polymers, 3rd ed., JW, NY, 1980.