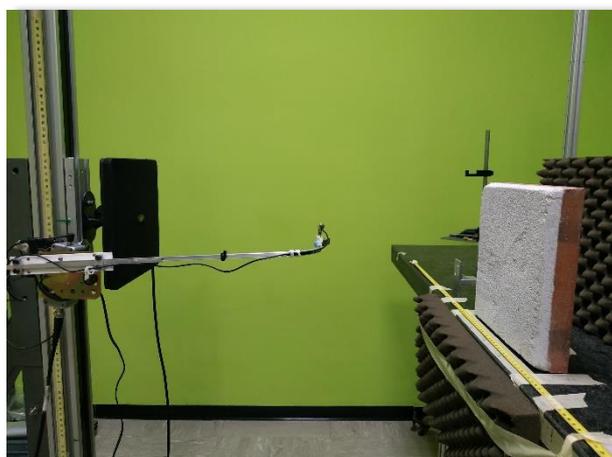


RELAZIONE TECNICA



INDAGINE IN LABORATORIO MEDIANTE METODI ACUSTICI

PROVINI DI MURATURA

LABORATORIO DI ACUSTICA APPLICATA AI BENI CULTURALI – LARCH
AGOSTO-OTTOBRE 2019

Dr.ssa Paola CALICCHIA
Ing. Sara DE SIMONE
Versione 1 del 11 novembre 2019

Progetto ADAMO

Task 4.6 – Diagnostiche acustiche, imaging termografico e a raggi X per la diagnostica strutturale di manufatti

Immagini acustiche per la valutazione della correlazione tra la percentuale di umidità e l'assorbimento acustico sui provini di laboratorio

METODO DI INDAGINE

Nell'ambito dell'indagine sulla parete affrescata dell'abside della Chiesa di San Nicola in Carcere, in Roma, si è proseguito lo studio in laboratorio per la valutazione della correlazione tra la percentuale di umidità e l'assorbimento acustico.

La finalità delle misure era valutare la relazione tra la risposta acustica alla variazione della proprietà strutturali del provino in muratura e la presenza di acqua, per costruire un modello per la validazione delle misure in situ.

Le misure sono state eseguite nei laboratori LARCH e la configurazione della strumentazione consiste in una sorgente acustica e un ricevitore (microfono omnidirezionale), montati coassiali, sistemati di fronte il provino poggiato sul tavolo antivibrazione, come mostrato in Fig 1. Il sistema di controllo e acquisizione, ci permette di rilevare il segnale dell'onda sonora diretta e dell'onda riflessa dalla superficie e lo elabora per estrarre l'informazione sull'assorbimento acustico.

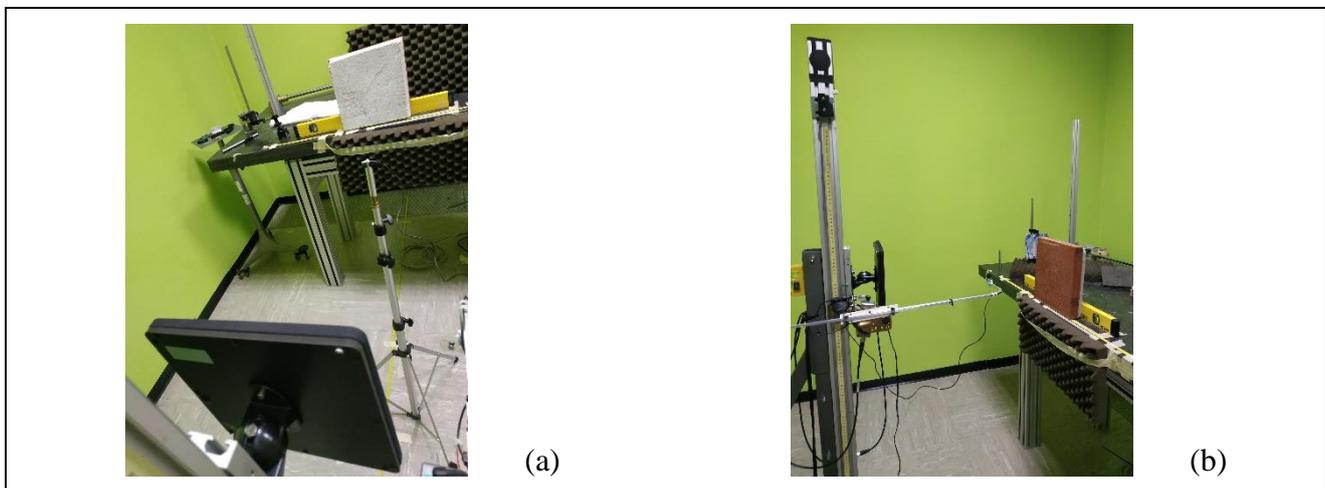


Fig. 1: Strumentazione acustica di fronte al provino lato intonaco (a); e lato mattone (b).

I due provini identificati con la sigla WT1 e WT2, mostrati in figura. 2 insieme alle loro caratteristiche geometriche, simulano un elemento murario costituito da un mattone e da diversi strati di intonaco più o meno fine.

	WT1 stratigrafia: mattone + intonaco + intonaco fine dimensioni: (25x25x4,82) cm peso a secco: 5,4 kg
	WT2 stratigrafia: mattone + intonaco dimensioni: (25x25x4,4) cm peso a secco: 5,1 kg

Fig. 2: Provino WT1 (sx); WT2 (dx); caratteristiche geometriche e di costruzione

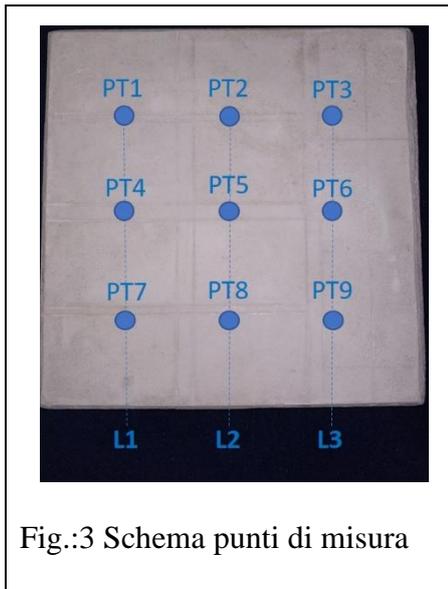


Fig.:3 Schema punti di misura

I punti di misura su ogni provino sono 9, identificati con un numero progressivo a partire dal punto alto di sinistra. Il PT5 identifica il punto geometrico centrale dal quale si è creata la maglia equidistante di punti allineati su tre linee L1, L2, L3, come in Fig. 3.

Le misure sono state articolano in diverse fasi per permettere di valutare i parametri acustici con il provino a secco, completamente imbibito e in una fase intermedia.

In particolare sul provino WT2 sono stati eseguiti i test durante diverse fasi:

fase 1: provino a secco e misura della riflessione dell'onda sonora con due metodi su entrambe le facce (Fig. 4a)

fase 2: il provino è stato immerso, sollevato dal fondo, in una vaschetta con acqua distillata fino a copertura completa per circa 30gg. Completata la fase di imbibimento, verificata con il controllo della non più variazione del peso, sono stati ripetuti i test della fase1 (Fig. 4b)

fase 3: il provino è stata messo in un ambiente con temperatura controllata per facilitare l'evaporazione di una parte dell'acqua. Evaporata circa la metà dell'acqua che aveva assorbito sono state eseguite le misure con il metodo del rapporto della risposta impulsiva su entrambe le facce.

Mentre il provino WT1 è stato tenuto sempre a secco per essere utilizzando come referee nelle diverse fasi dell'indagine e sul quale sono stati fatti test sulle due facce e con due diversi metodi.



Fig. 4: Provini con muratura a secco (a); WT2 nella vaschetta durante il processo di imbibizione (b).

Risultati

L'indagine è stata condotta misurando la riflessione dell'onda sonora sulle due facce dei provini, secondo due metodi sperimentali:

1 - metodo della risposta impulsiva;

2 – metodo del rapporto tra ampiezze.

Quando una sorgente acustica indirizza un suono verso la parete da analizzare, una parte del suono viene riflessa indietro, una parte è trasmessa attraverso la parete dalla parte opposta, e una parte è assorbita al suo interno dissipata in calore oppure trasmessa ad elementi attigui per via solida. La figura 5 mostra in modo schematico cosa avviene in questo processo.

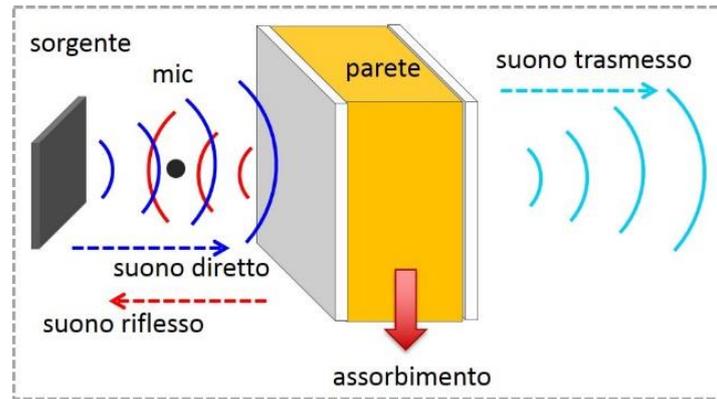


Fig. 5: Principio di base dei due metodi acustici impiegati.

La percentuale di energia acustica trasmessa e quella riflessa dipendono dalle proprietà intrinseche dei materiali, nello specifico dalla *impedenza acustica caratteristica* del materiale Z , pari al prodotto della densità e della velocità di propagazione del suono nel materiale stesso

$$Z = \rho c$$

ρ densità del materiale

c velocità di propagazione del suono nel materiale

$$c = \sqrt{\frac{D}{\rho}}$$

$$\text{dove } D = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

D rigidità

E modulo di Young

ν rapporto di Poisson

Nella propagazione del suono l'impedenza acustica cambia da Z_0 dell'aria a Z_p della parete, ottenendo così un coefficiente di riflessione di pressione r_p , o di intensità r_i

$$r_p = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_p - Z_0}{Z_p + Z_0} \quad r_i = \left(\frac{P_r}{P_i}\right)^2 = \left(\frac{Z_p - Z_0}{Z_p + Z_0}\right)^2 \quad (\text{Eq. 1})$$

L'assorbimento è calcolato considerando tutta l'energia che non viene riflessa (assorbimento apparente – energia trasmessa + dissipata). In entrambi i metodi si può poi di estrarre come dato indicativo della muratura umida la percentuale di assorbimento acustico, ABS%

1 - METODO DEL RAPPORTO TRA AMPIEZZE

Il metodo del rapporto di ampiezza impiega toni puri, a specifiche frequenze, misurando l'ampiezza dell'onda diretta e l'ampiezza della riflessione dal provino e calcolando il loro rapporto r^{ratio}

$$r_i^{\text{ratio}} = \frac{1}{L_b^2} \left(\frac{\overline{p_r}}{\overline{p_i}}\right)^2 = \frac{1}{L_b^2} \left(\frac{\overline{P_r^{\text{RMS}}}}{\overline{P_i^{\text{RMS}}}}\right)^2 \quad L_b = \text{fattore di spreading geometrico}$$

Il rapporto delle ampiezze è calcolato in funzione dei valori RMS delle relative pressioni.

La configurazione di misura scelta, determinata dal posizionamento e distanza relativa tra sorgente–microfono e provino, ci ha permesso di identificare il segnale diretto e il segnale di prima riflessione cioè quello proveniente dal provino, nella Fig.6 si riportano le grandezze e una immagine del segnale.

I punti di misura sono stati tre: PT4, PT5 e PT6 e per ognuno valutato r^{ratio} nel range di frequenze tra 700Hz e 13000Hz, Fig 7.

Le misure sul provino **WT1** sono state eseguite in due giorni e riportate con il proprio errore di misura nella Tab. 1. Nella Tab.2 si riporta il calcolo della ripetibilità sul WT1, cioè sul campione stabile, valutata come $((r_1^{ratio} - r_2^{ratio}) / r_{media}^{ratio})$

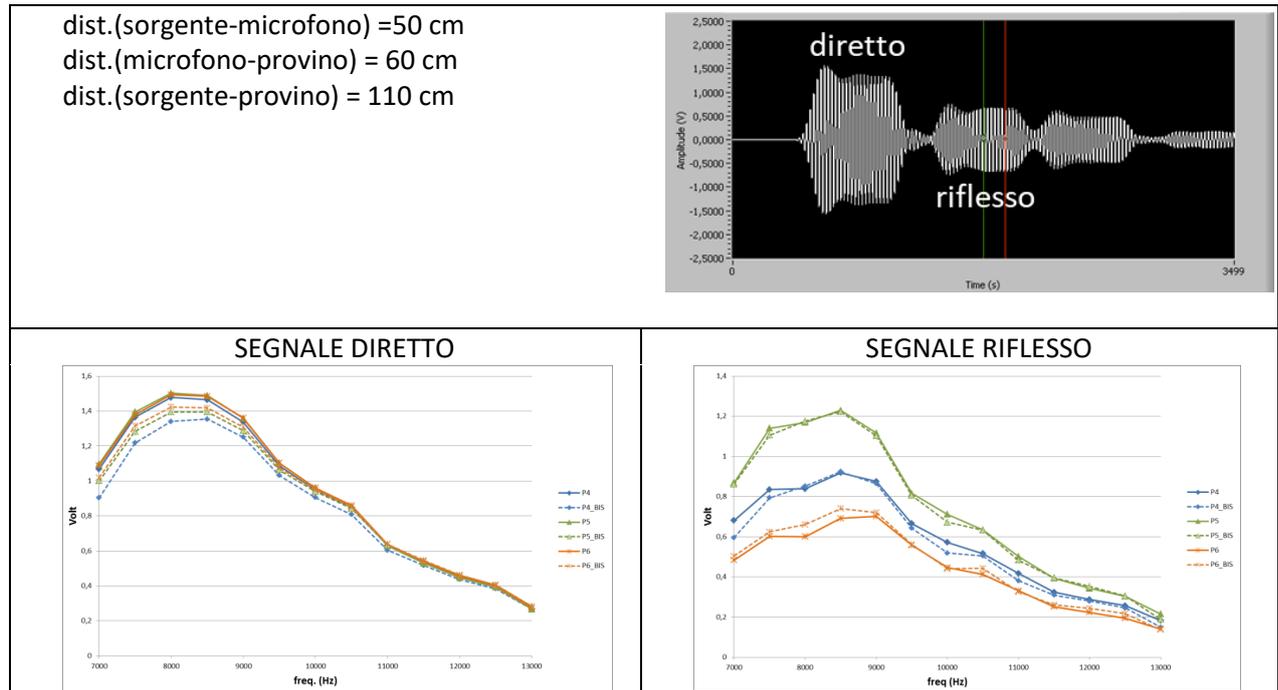


Fig. 6: Configurazione di misura e andamento segnale diretto e segnale riflesso

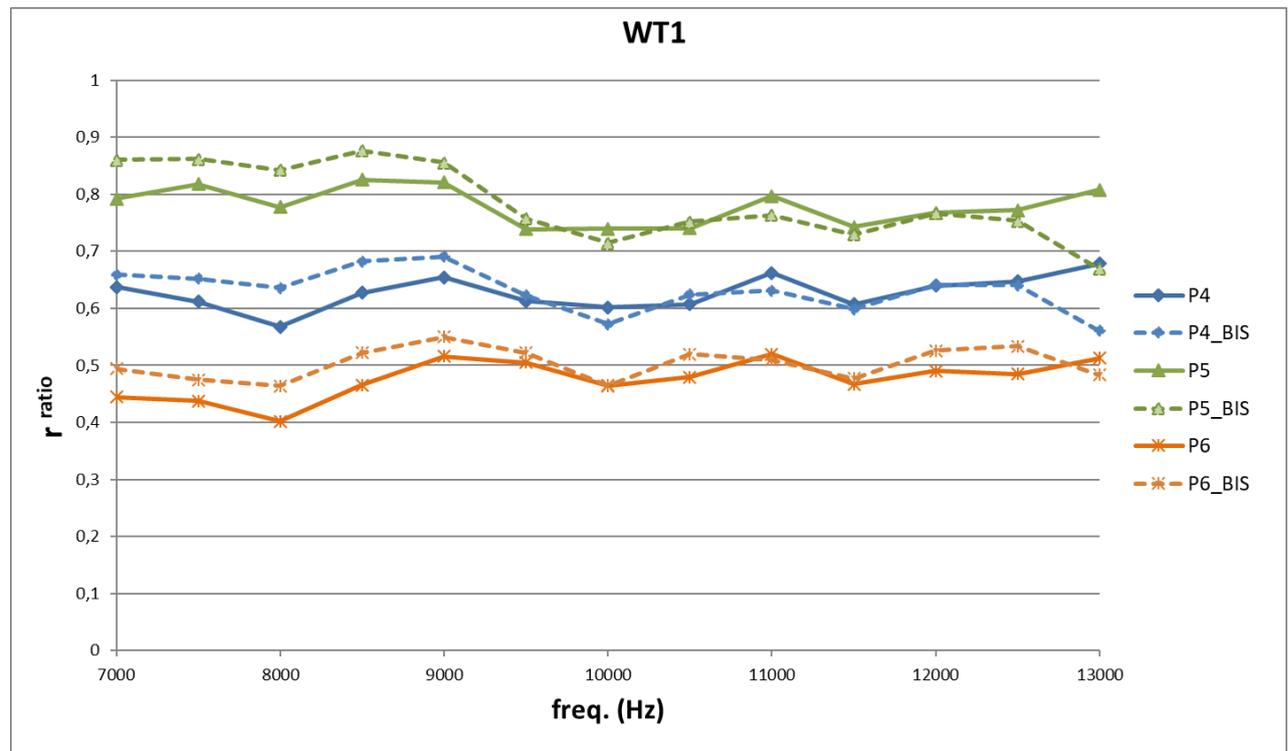


Fig.7: Andamento r^{ratio} nei punti PT4, PT5, PT6.

Le misure su WT2 sono state fatta in fase successive: con il provino a secco, completamente imbibito, in una fase intermedia dopo evaporazione di una parte dell'acqua. Il provino è stato posto in verticale davanti al sistema di misura e sono stati ripetuti gli stessi test su entrambi le facce, quella con intonaco e

quella con la mattonella scoperta. I punti di misura sono stati tre: PT4, PT5 e PT6. Nella Fig.8 si riportano le caratteristiche fisiche del provino durante le diverse fasi.

Le considerazioni sul segnale diretto e riflesso sono le stesse del provino WT1, il segnale era ben distinguibile e con un numero di cicli sufficiente al calcolo del valore RMS su tutte le frequenze.

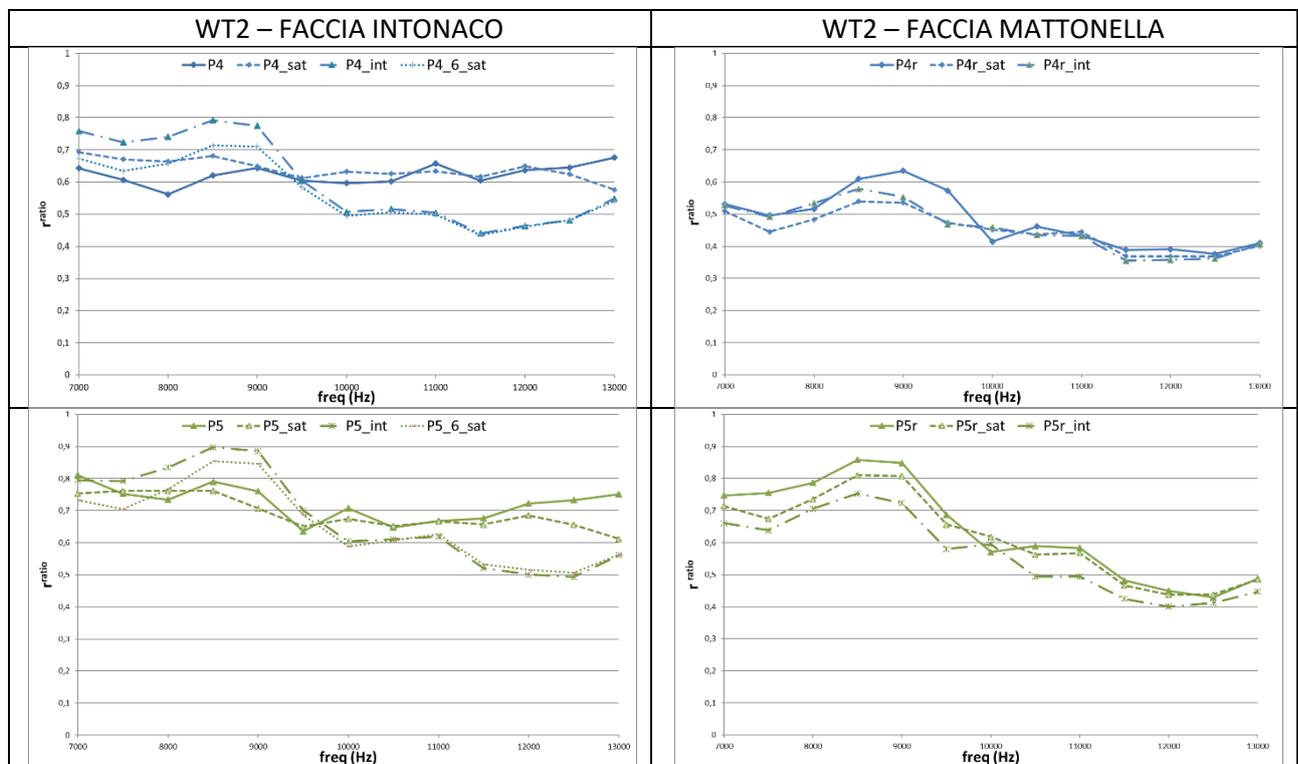
Le misure sul provino WT2 sono state eseguite in due giorni e riportate con il proprio errore di misura nella Tab. 3.

Nella Fig.9 si riportano gli andamenti del rapporto tra segnale riflesso e segnale diretto distinto nei tre punti di misura e nella due facce del provino, mentre i dati numerici sono riportati nella Tab.4.

In Tab.5 si riportano i valori di variazione percentuale tra r^{ratio}_{secco} e r^{ratio} (saturo o intermedio) che ci serviranno per confrontare la variazione del dato reale con l'errore di misura.

	CARATTERISTICHE FISICHE	IDENTIFICATIVO MISURA FACCIA INTONACO	IDENTIFICATIVO MISURA FACCIA MATTONELLA
A secco	Dimensioni: (25x25x4,4) cm Peso: 5,1 kg	Px	Pxr
Imbibito	Dimensioni: (25x25x4,4) cm Peso: 5,65 kg acqua assorbita: 0,55 kg (10,8%)	Px_sat (10/10/2019) Px_6_sat(15/10/2019)	Pxr_sat
Evaporazione parziale H ₂ O	Dimensioni: (25x25x4,4) cm Peso: 5,36 Kg acqua evaporata: 0,29 Kg	Px_int	Pxr_int

Fig.8: Caratteristiche fisiche di WT2 e identificativo delle diverse fasi di misura.



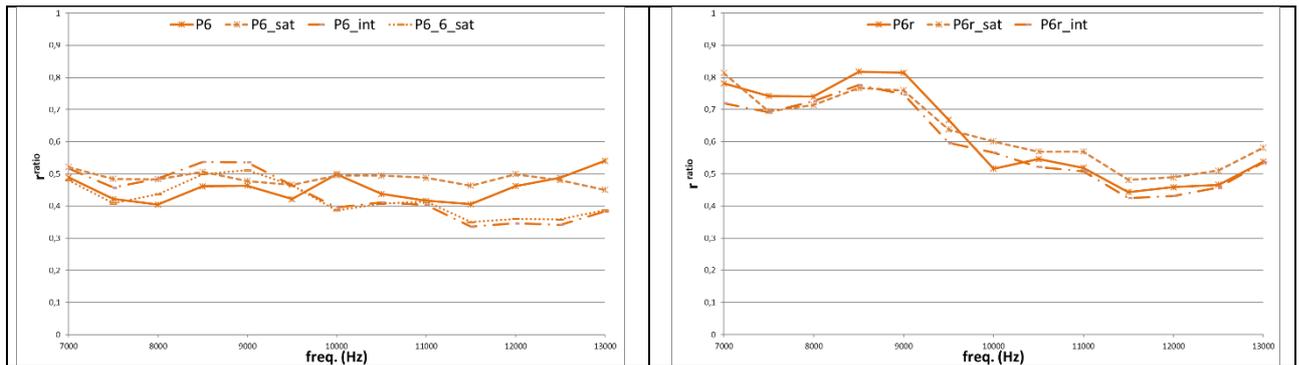


Fig. 9: Andamento r^{ratio} nei punti PT4, PT5, PT6 su entrambe le facce del provino

OSSERVAZIONI:

- La distanza scelta tra sorgente – microfono – provino ci permette di avere una buona distinzione tra segnale diretto e segnale di prima riflessione proveniente dal provino e un numero di cicli accettabile per il calcolo del valore RMS;
- Le due misure fatte con il provino WT1 secco in giorni diversi, danno una variazione della misura in media sul tutte le frequenze di circa il 4%, indicativa della Riproducibilità della misura su provino stabile;
- La misura risulta stabile nella procedura e ripetibile sul provino WT1 di riferimento.
- Nel provino WT2 imbibito la quantità di acqua risulta essere pari al 10,8% del suo peso;
- Nella Fig.8 dalle curve che rappresentano l'andamento del rapporto tra segnale riflesso e segnale diretto non è possibile individuare una tendenza che possa distinguere le diverse fasi (a secco, imbibito e intermedia). Le curve sembrano invece presentare un comportamento opposto alle basse e alle alte frequenze, nel caso che la misura venisse fatta sulla faccia con intonaco e quella della mattonella;
- Le due misure fatte con il provino totalmente imbibito WT2 in giorni diversi, danno una variazione di misura in media sul tutte le frequenze di circa il 10%, dando un'indicazione della Riproducibilità della misura su provino non stabile;
- La variazione tra i valori del provino WT2 a secco e dello stesso provino imbibito sulla faccia con intonaco ha un valore assoluto di circa il 11%
- La variazione tra i valori del provino WT2 a secco e dello stesso provino nella fase intermedia sulla faccia con intonaco ha un valore assoluto di circa il 17%
- La variazione tra i valori del provino WT1 mantenuto a secco e del provino imbibito WT2 sulla faccia con la mattonella ha un valore assoluto di circa il 7%
- La variazione tra i valori del provino WT1 mantenuto a secco e del provino WT2 nella fase intermedia sulla faccia con mattonella ha un valore assoluto di circa il 9%
- Il materiale così disomogeneo sembra reagire alla presenza di acqua nel suo interno in maniera diverso, non è possibile distinguere né un indurimento del materiale, né un deterioramento dello stesso;
- Dall'analisi dei dati possiamo solo dedurre che c'è una variazione tra i valori della fase a secco e quelli del provino imbibito, questa in media risulta più alta rispetto alle variazioni di misura; cosa però non evidente in egual misura alle diverse frequenze.

Nelle seguenti tabelle, i dati sono riportati come r^{ratio} , assieme all'incertezza di misura U espressa come incertezza estesa secondo la norma UNI CEI 70098:2016 con fattore di copertura relativo ad un intervallo di fiducia del 95%, ed errore relativo Err Rel .

WT1	Incertezza di misura /Misura secco 8/08/2019								
	P4			P5			P6		
	r ^{ratio}	U	Errore Rel	r ^{ratio}	U	Errore Rel	r ^{ratio}	U	Errore Rel
7000	0,622	0,048	7,7%	0,800	0,073	9,1%	0,446	0,051	11,5%
7500	0,605	0,045	7,5%	0,827	0,127	15,3%	0,437	0,069	15,7%
8000	0,561	0,043	7,7%	0,784	0,109	13,9%	0,402	0,051	12,6%
8500	0,620	0,043	7,0%	0,831	0,107	12,9%	0,467	0,048	10,3%
9000	0,646	0,047	7,2%	0,826	0,100	12,1%	0,519	0,085	16,3%
9500	0,606	0,016	2,7%	0,743	0,037	4,9%	0,508	0,032	6,4%
10000	0,596	0,009	1,5%	0,743	0,026	3,5%	0,466	0,022	4,7%
10500	0,601	0,009	1,5%	0,741	0,021	2,9%	0,482	0,018	3,8%
11000	0,659	0,010	1,5%	0,794	0,021	2,6%	0,524	0,016	3,1%
11500	0,605	0,008	1,4%	0,738	0,017	2,3%	0,472	0,014	2,9%
12000	0,636	0,011	1,8%	0,762	0,017	2,3%	0,496	0,016	3,2%
12500	0,644	0,014	2,2%	0,765	0,018	2,4%	0,491	0,014	2,9%
13000	0,674	0,013	2,0%	0,798	0,023	2,9%	0,520	0,016	3,1%
	Incertezza di misura /Misura secco 25/09/2019								
7000	0,611	0,085	13,9%	0,883	0,054	6,1%	0,517	0,141	27,2%
7500	0,624	0,242	38,8%	0,869	0,043	5,0%	0,491	0,091	18,6%
8000	0,615	0,201	32,8%	0,848	0,043	5,1%	0,476	0,065	13,6%
8500	0,665	0,014	2,1%	0,880	0,038	4,4%	0,533	0,063	11,7%
9000	0,674	0,175	26,0%	0,860	0,025	2,9%	0,561	0,064	11,4%
9500	0,608	0,055	9,1%	0,762	0,016	2,0%	0,531	0,056	10,5%
10000	0,556	0,035	6,3%	0,721	0,015	2,1%	0,473	0,051	10,7%
10500	0,605	0,029	4,7%	0,759	0,015	2,0%	0,531	0,020	3,9%
11000	0,610	0,028	4,6%	0,773	0,015	2,0%	0,520	0,012	2,3%
11500	0,578	0,030	5,2%	0,740	0,016	2,1%	0,487	0,011	2,2%
12000	0,619	0,034	5,4%	0,778	0,018	2,3%	0,537	0,011	2,0%
12500	0,616	0,035	5,7%	0,767	0,018	2,3%	0,545	0,011	2,0%
13000	0,540	0,033	6,1%	0,681	0,017	2,4%	0,492	0,010	2,0%

WT1 retro	Incertezza di misura /Misura secco 15/10/2019								
	P4			P5			P6		
	r ^{ratio}	U	Errore Rel	r ^{ratio}	U	Errore Rel	r ^{ratio}	U	Errore Rel
7000	0,554	0,045	8,2%	0,776	0,053	6,8%	0,717	0,045	6,3%
7500	0,512	0,111	21,6%	0,775	0,034	4,4%	0,697	0,036	5,2%
8000	0,530	0,093	17,5%	0,806	0,026	3,3%	0,704	0,030	4,2%
8500	0,624	0,033	5,2%	0,879	0,023	2,6%	0,779	0,023	2,9%
9000	0,649	0,021	3,2%	0,868	0,021	2,4%	0,777	0,020	2,6%
9500	0,586	0,019	3,3%	0,706	0,020	2,8%	0,634	0,019	3,0%
10000	0,425	0,027	6,3%	0,588	0,020	3,3%	0,488	0,020	4,1%
10500	0,473	0,019	4,1%	0,610	0,020	3,3%	0,513	0,019	3,7%
11000	0,445	0,017	3,7%	0,607	0,021	3,5%	0,484	0,018	3,8%
11500	0,400	0,016	3,9%	0,501	0,018	3,6%	0,413	0,016	4,0%
12000	0,403	0,016	4,0%	0,468	0,018	3,8%	0,426	0,017	4,0%
12500	0,387	0,016	4,0%	0,447	0,017	3,8%	0,432	0,017	4,0%
13000	0,424	0,017	4,1%	0,509	0,020	4,0%	0,496	0,020	4,1%

Tab.1: Misure sul provino WT1, errore di misura U corrispondente

	WT1 -Ripetibilità su campione stabile												
	7000	7500	8000	8500	9000	9500	10000	10500	11000	11500	12000	12500	13000
P4	-3,27%	-6,37%	-11,37%	-8,49%	-5,45%	-1,62%	4,97%	-2,73%	4,78%	1,47%	-0,34%	1,15%	19,06%
P5	-8,30%	-5,27%	-8,02%	-5,95%	-4,12%	-2,44%	3,44%	-1,53%	4,28%	1,79%	0,09%	2,40%	18,82%
P6	-10,58%	-8,24%	-14,38%	-11,51%	-6,44%	-3,40%	0,17%	-8,12%	1,83%	-2,05%	-7,00%	-9,59%	5,89%

Tab.2: Calcolo della ripetibilità sul campione stabile WT1

WT2	Incertezza di misura /Misura secco 8/08/2019								
	P4			P5			P6		
	r _{ratio}	U	Errore Rel	r _{ratio}	U	Errore Rel	r _{ratio}	U	Errore Rel
7000	0,655	0,062	9,4%	0,735	0,057	7,7%	0,521	0,193	37,1%
7500	0,620	0,125	20,2%	0,711	0,155	21,8%	0,435	0,086	19,9%
8000	0,572	0,097	17,0%	0,702	0,129	18,4%	0,414	0,067	16,2%
8500	0,631	0,098	15,6%	0,758	0,131	17,4%	0,472	0,069	14,7%
9000	0,656	0,100	15,3%	0,730	0,116	15,9%	0,472	0,067	14,2%
9500	0,617	0,108	17,5%	0,606	0,037	6,1%	0,433	0,075	17,3%
10000	0,609	0,035	5,8%	0,673	0,026	3,9%	0,513	0,090	17,6%
10500	0,615	0,024	3,9%	0,614	0,024	3,9%	0,449	0,084	18,6%
11000	0,673	0,021	3,1%	0,632	0,020	3,2%	0,428	0,019	4,5%
11500	0,619	0,019	3,0%	0,639	0,020	3,2%	0,418	0,015	3,7%
12000	0,651	0,021	3,2%	0,683	0,021	3,1%	0,475	0,014	2,9%
12500	0,659	0,023	3,4%	0,692	0,022	3,2%	0,502	0,015	2,9%
13000	0,691	0,023	3,3%	0,709	0,022	3,2%	0,557	0,017	3,0%
	Incertezza di misura /Misura intermedia 15/10/2019								
7000	0,743	0,043	5,7%	0,792	0,044	5,6%	0,527	0,022	4,3%
7500	0,716	0,009	1,2%	0,791	0,007	0,9%	0,463	0,009	2,0%
8000	0,733	0,006	0,9%	0,834	0,006	0,7%	0,491	0,008	1,6%
8500	0,784	0,006	0,7%	0,896	0,006	0,7%	0,544	0,007	1,3%
9000	0,766	0,006	0,8%	0,885	0,006	0,6%	0,542	0,006	1,2%
9500	0,600	0,006	1,0%	0,703	0,005	0,7%	0,469	0,005	1,0%
10000	0,503	0,005	0,9%	0,607	0,005	0,9%	0,400	0,005	1,2%
10500	0,513	0,005	1,0%	0,614	0,005	0,8%	0,417	0,004	1,0%
11000	0,502	0,005	0,9%	0,622	0,005	0,8%	0,411	0,004	0,9%
11500	0,437	0,005	1,1%	0,523	0,005	0,9%	0,342	0,004	1,2%
12000	0,460	0,005	1,1%	0,503	0,005	0,9%	0,353	0,004	1,1%
12500	0,478	0,005	1,1%	0,495	0,005	1,1%	0,348	0,005	1,3%
13000	0,545	0,005	1,0%	0,563	0,006	1,1%	0,390	0,005	1,3%

WT2	Incertezza di misura / Misura imbibito 25/09/2019								
	P4			P5			P6		
	r _{ratio}	U	Errore Rel	r _{ratio}	U	Errore Rel	r _{ratio}	U	Errore Rel
7000	1,000	0,025	2,5%	0,770	0,029	3,8%	0,532	0,030	5,6%
7500	0,650	0,079	12,1%	0,776	0,035	4,5%	0,489	0,057	11,7%
8000	0,647	0,060	9,2%	0,775	0,089	11,5%	0,487	0,047	9,7%
8500	0,666	0,056	8,4%	0,774	0,078	10,1%	0,510	0,048	9,3%
9000	0,634	0,056	8,9%	0,718	0,067	9,3%	0,481	0,044	9,1%
9500	0,598	0,055	9,2%	0,661	0,016	2,4%	0,470	0,044	9,3%
10000	0,618	0,013	2,1%	0,685	0,012	1,7%	0,499	0,016	3,3%
10500	0,610	0,011	1,8%	0,663	0,012	1,8%	0,499	0,017	3,3%
11000	0,616	0,011	1,7%	0,678	0,013	1,9%	0,493	0,010	2,0%
11500	0,599	0,010	1,7%	0,667	0,012	1,7%	0,469	0,009	1,8%
12000	0,631	0,011	1,8%	0,695	0,011	1,6%	0,506	0,008	1,6%
12500	0,607	0,010	1,6%	0,664	0,013	1,9%	0,488	0,008	1,6%
13000	0,560	0,009	1,7%	0,620	0,011	1,7%	0,457	0,008	1,7%
	Incertezza di misura / Misura imbibito 09/10/2019								
7000	0,725	0,078	10,8%	0,787	0,078	9,9%	0,520	0,309	59,5%
7500	0,656	0,209	31,8%	0,730	0,232	31,7%	0,422	0,133	31,6%
8000	0,674	0,165	24,6%	0,785	0,062	7,9%	0,445	0,109	24,6%
8500	0,728	0,050	6,9%	0,868	0,037	4,3%	0,505	0,106	21,0%
9000	0,724	0,030	4,1%	0,860	0,029	3,4%	0,518	0,100	19,3%
9500	0,595	0,023	3,9%	0,699	0,024	3,4%	0,471	0,092	19,6%
10000	0,505	0,023	4,6%	0,601	0,022	3,7%	0,392	0,082	20,9%
10500	0,518	0,022	4,2%	0,619	0,023	3,7%	0,414	0,031	7,6%
11000	0,514	0,021	4,1%	0,643	0,025	3,8%	0,424	0,019	4,4%
11500	0,449	0,020	4,4%	0,548	0,022	4,1%	0,361	0,018	5,0%
12000	0,476	0,021	4,4%	0,532	0,023	4,2%	0,372	0,018	4,7%
12500	0,497	0,022	4,5%	0,522	0,022	4,3%	0,369	0,017	4,7%
13000	0,558	0,025	4,5%	0,580	0,026	4,4%	0,400	0,018	4,6%

WT2 retro	Incertezza di misura /Misura intermedia 15/10/2019								
	P4			P5			P6		
	r ^{ratio}	U	Errore Rel	r ^{ratio}	U	Errore Rel	r ^{ratio}	U	Errore Rel
7000	0,529	0,026	5,0%	0,649	0,037	5,8%	0,729	0,023	3,2%
7500	0,493	0,007	1,3%	0,635	0,008	1,3%	0,692	0,010	1,4%
8000	0,536	0,005	0,9%	0,703	0,009	1,3%	0,726	0,004	0,6%
8500	0,580	0,005	0,9%	0,751	0,004	0,5%	0,777	0,004	0,5%
9000	0,554	0,006	1,1%	0,722	0,006	0,8%	0,747	0,005	0,6%
9500	0,469	0,002	0,5%	0,578	0,002	0,4%	0,598	0,003	0,5%
10000	0,458	0,004	0,8%	0,593	0,004	0,6%	0,570	0,003	0,5%
10500	0,435	0,002	0,5%	0,491	0,004	0,8%	0,525	0,002	0,4%
11000	0,431	0,002	0,5%	0,491	0,004	0,8%	0,511	0,002	0,5%
11500	0,354	0,002	0,7%	0,422	0,003	0,6%	0,428	0,003	0,7%
12000	0,356	0,002	0,7%	0,398	0,002	0,6%	0,435	0,003	0,6%
12500	0,360	0,002	0,5%	0,410	0,003	0,7%	0,461	0,004	0,8%
13000	0,405	0,002	0,5%	0,444	0,004	0,8%	0,541	0,005	0,8%
	Incertezza di misura /Misura satura 10/10/2019								
7000	0,534	0,307	57,6%	0,771	0,078	10,1%	0,708	0,084	11,8%
7500	0,463	0,147	31,7%	0,702	0,227	32,3%	0,638	0,221	34,7%
8000	0,499	0,123	24,6%	0,759	0,062	8,1%	0,669	0,176	26,3%
8500	0,554	0,116	20,9%	0,832	0,036	4,4%	0,726	0,039	5,4%
9000	0,549	0,105	19,1%	0,827	0,028	3,4%	0,722	0,029	4,0%
9500	0,486	0,094	19,4%	0,672	0,023	3,4%	0,605	0,024	3,9%
10000	0,465	0,032	6,9%	0,634	0,023	3,6%	0,567	0,023	4,1%
10500	0,452	0,025	5,5%	0,580	0,023	3,9%	0,533	0,023	4,3%
11000	0,462	0,019	4,1%	0,587	0,023	4,0%	0,527	0,022	4,3%
11500	0,384	0,018	4,7%	0,484	0,020	4,2%	0,443	0,021	4,6%
12000	0,383	0,018	4,7%	0,455	0,020	4,4%	0,449	0,021	4,7%
12500	0,384	0,017	4,5%	0,456	0,020	4,4%	0,468	0,022	4,8%
13000	0,419	0,019	4,5%	0,506	0,023	4,6%	0,531	0,027	5,1%

Tab.3: Misure sul provino WT2, errore di misura U corrispondente

Valori segnale diretto e segnale riflesso WT2												
WT2	P4	P4_sat	P4_6_sat	P4_int	P5	P5_sat	P5_6_sat	P5_int	P6	P6_sat	P6_6_sat	P6_int
7000	0,643	0,693	0,673	0,758	0,811	0,753	0,733	0,795	0,489	0,522	0,480	0,518
7500	0,606	0,671	0,634	0,723	0,752	0,761	0,704	0,792	0,422	0,484	0,408	0,457
8000	0,561	0,664	0,658	0,741	0,734	0,762	0,767	0,835	0,405	0,483	0,437	0,485
8500	0,620	0,681	0,714	0,793	0,790	0,762	0,855	0,898	0,461	0,507	0,499	0,538
9000	0,644	0,649	0,711	0,775	0,761	0,707	0,846	0,885	0,463	0,478	0,512	0,536
9500	0,605	0,612	0,584	0,605	0,636	0,650	0,686	0,701	0,422	0,466	0,464	0,464
10000	0,596	0,632	0,494	0,507	0,708	0,675	0,589	0,604	0,499	0,495	0,386	0,395
10500	0,602	0,626	0,507	0,516	0,648	0,652	0,607	0,610	0,438	0,494	0,407	0,411
11000	0,657	0,634	0,499	0,505	0,668	0,667	0,627	0,619	0,416	0,488	0,414	0,404
11500	0,604	0,617	0,435	0,440	0,676	0,657	0,533	0,521	0,406	0,463	0,351	0,336
12000	0,637	0,650	0,461	0,464	0,722	0,685	0,516	0,501	0,462	0,499	0,360	0,346
12500	0,645	0,624	0,481	0,481	0,733	0,656	0,506	0,493	0,488	0,481	0,358	0,341
13000	0,676	0,576	0,541	0,548	0,751	0,612	0,563	0,561	0,541	0,450	0,387	0,383
WT2 retro	P4r	P4r_sat	P4r_int	P5r	P5r_sat	P5r_int	P6r	P6r_sat	P6r_int			
7000	0,531	0,509	0,526	0,747	0,714	0,660	0,781	0,814	0,720			
7500	0,496	0,445	0,492	0,755	0,675	0,638	0,742	0,695	0,691			
8000	0,516	0,483	0,534	0,787	0,736	0,705	0,741	0,714	0,726			
8500	0,609	0,540	0,579	0,858	0,810	0,753	0,818	0,767	0,777			
9000	0,635	0,536	0,553	0,848	0,808	0,723	0,814	0,759	0,747			
9500	0,573	0,473	0,469	0,687	0,656	0,580	0,667	0,638	0,596			
10000	0,415	0,452	0,459	0,571	0,618	0,595	0,516	0,601	0,567			
10500	0,461	0,437	0,435	0,589	0,563	0,494	0,546	0,569	0,522			
11000	0,433	0,445	0,431	0,583	0,567	0,494	0,519	0,569	0,508			
11500	0,389	0,369	0,355	0,482	0,467	0,424	0,444	0,481	0,425			
12000	0,391	0,368	0,357	0,450	0,438	0,401	0,458	0,489	0,431			
12500	0,376	0,369	0,361	0,430	0,438	0,412	0,466	0,510	0,457			
13000	0,410	0,401	0,406	0,488	0,486	0,447	0,538	0,581	0,536			

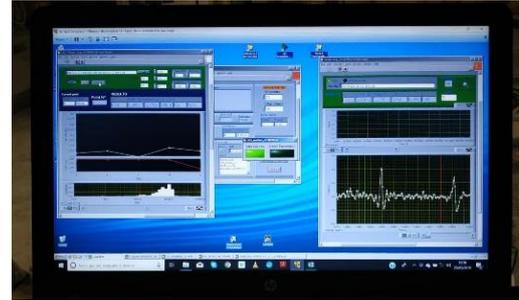
Tab.4: Misure sul provino WT2

WT2	P4-P4_sat(%)	P4-P4_6_sat(%)	P4-P4_int(%)	P5-P5_sat(%)	P5-P5_6_sat(%)	P5-P5_int(%)	P6-P6_sat(%)	P6-P6_6_sat(%)	P6-P6_int(%)
7000	-7,85%	-4,69%	-18,02%	7,14%	9,65%	1,95%	-6,69%	1,75%	-5,92%
7500	-10,59%	-4,57%	-19,28%	-1,14%	6,39%	-5,30%	-14,93%	3,10%	-8,47%
8000	-18,25%	-17,17%	-31,96%	-3,77%	-4,46%	-13,64%	-19,50%	-7,92%	-19,98%
8500	-9,85%	-15,08%	-27,78%	3,57%	-8,18%	-13,59%	-9,83%	-8,17%	-16,57%
9000	-0,83%	-10,42%	-20,48%	7,10%	-11,25%	-16,40%	-3,15%	-10,54%	-15,77%
9500	-1,26%	3,51%	-0,01%	-2,32%	-7,98%	-10,19%	-10,47%	-9,93%	-9,93%
10000	-5,98%	17,13%	14,96%	4,70%	16,85%	14,70%	0,81%	22,54%	20,78%
10500	-3,94%	15,80%	14,30%	-0,68%	6,27%	5,79%	-12,98%	6,89%	6,00%
11000	3,55%	24,08%	23,19%	0,26%	6,25%	7,31%	-17,18%	0,51%	3,03%
11500	-2,02%	27,97%	27,17%	2,80%	21,16%	22,85%	-14,12%	13,66%	17,35%
12000	-2,06%	27,52%	27,17%	5,11%	28,62%	30,66%	-8,13%	22,07%	25,04%
12500	3,21%	25,38%	25,41%	10,53%	30,93%	32,78%	1,44%	26,59%	30,02%
13000	14,85%	20,07%	18,92%	18,55%	25,04%	25,33%	16,78%	28,39%	29,17%
WT2 retro	P4r-P4r_sat(%)	P4r-P4r_int(%)	P5r-P5r_sat(%)	P5r-P5r_int(%)	P6r-P6r_sat(%)	P6r-P6r_int(%)			
7000	4,12%	0,81%	4,47%	11,63%	-4,19%	-8,91%			
7500	10,23%	0,78%	10,63%	15,48%	6,40%	7,99%			
8000	6,37%	-3,44%	6,51%	10,40%	3,58%	9,28%			
8500	11,47%	5,06%	5,61%	12,28%	6,24%	10,68%			
9000	15,61%	12,83%	4,79%	14,75%	6,73%	10,48%			
9500	17,49%	18,27%	4,46%	15,65%	4,44%	7,19%			
10000	-8,90%	-10,62%	-8,34%	-4,32%	-16,50%	-5,32%			
10500	5,22%	5,69%	4,41%	16,11%	-4,20%	3,42%			
11000	-2,65%	0,47%	2,70%	15,34%	-9,67%	2,41%			
11500	5,13%	8,72%	3,18%	11,97%	-8,36%	0,25%			
12000	5,80%	8,52%	2,66%	10,94%	-6,66%	-8,73%			
12500	1,90%	3,86%	-2,05%	4,06%	-9,49%	-18,71%			
13000	2,00%	0,87%	0,46%	8,44%	-8,04%	-19,19%			

 Tab.5: valori di variazione percentuale tra $r^{\text{ratio}}_{\text{secco}}$ e $r^{\text{ratio}}_{\text{(saturo o intermedio)}}$

2 - METODO DELLA RISPOSTA IMPULSIVA

Impiegando un segnale acustico a larga banda nell'intervallo audio (1 – 15) kHz, si sono scansionati 3 profili verticali L1, L2, L3, corrispondenti ai 9 punti identificati in Fig.3. Per ogni punto si è valutata *La risposta impulsiva* $h(t - \tau)$ che caratterizza la risposta della parete allo stimolo sonoro.



Il segnale composto di pressione acustica può essere descritto come:

$$p(t) = p_i(t) + p_r(t) = p_i(t) + L_b p_i(t) \otimes h(t - \tau)$$

con p_i pressione onda incidente, p_r pressione onda riflessa e L_b fattore di spreading geometrico. L'elaborazione del segnale basata sull'algoritmo del Cepstrum, definito come l'inversa della Trasformata di Fourier del logaritmo naturale del power spectrum ci permette di estrapolare la *risposta impulsiva* $h(t - \tau)$,

$$C(t) = IFFT[\ln|P(f)|^2] = C_i(t) + L_b h(t - \tau) + \text{higher order terms},$$

Nel dominio delle frequenze, la FFT delle quantità sopra indicate determina i due coefficienti:

$$r(f) = \left(1/L_b^2\right) \left(|P_r(f)|^2 / |P_i(f)|^2\right) = |H(f)|^2$$

$$\alpha(f) = 1 - r(f)$$

Infine, per ciascun punto di misurazione (i) la quantità Σ viene calcolata come la quantità totale di energia riflessa sull'intero intervallo di frequenza

$$\Sigma_i = \int_{\Delta f} df |H_i(f)|^2.$$

Poiché il punto più riflettente (R) viene generalmente assunto come riferimento, la percentuale di assorbimento di energia acustica ABS% viene calcolata per ciascun punto analizzato (i) rispetto al riferimento:

$$ABS\%_i = (\Sigma_R - \Sigma_i) / \Sigma_R.$$

Per i due provini WT1 e WT2 sono state eseguite diverse sessioni di misura, per ogni linea L1, L2, L3 sono state seguite 6 ripetizioni indipendenti tra di loro. Il valore ABS% ottenuto è calcolato sulla media delle ripetizioni effettuate e l'errore U è stato valutato per avere una indicazione sia sulla riproducibilità della misura sul provino stabile sia in un provino sottoposto a imbibimento.

Per il provino WT1 sono state effettuate due sessioni di misura, una ad agosto e una a ottobre, in Fig 10 riportiamo le mappe dell'assorbimento acustico, mentre in Tab.6 i dati a questa associati

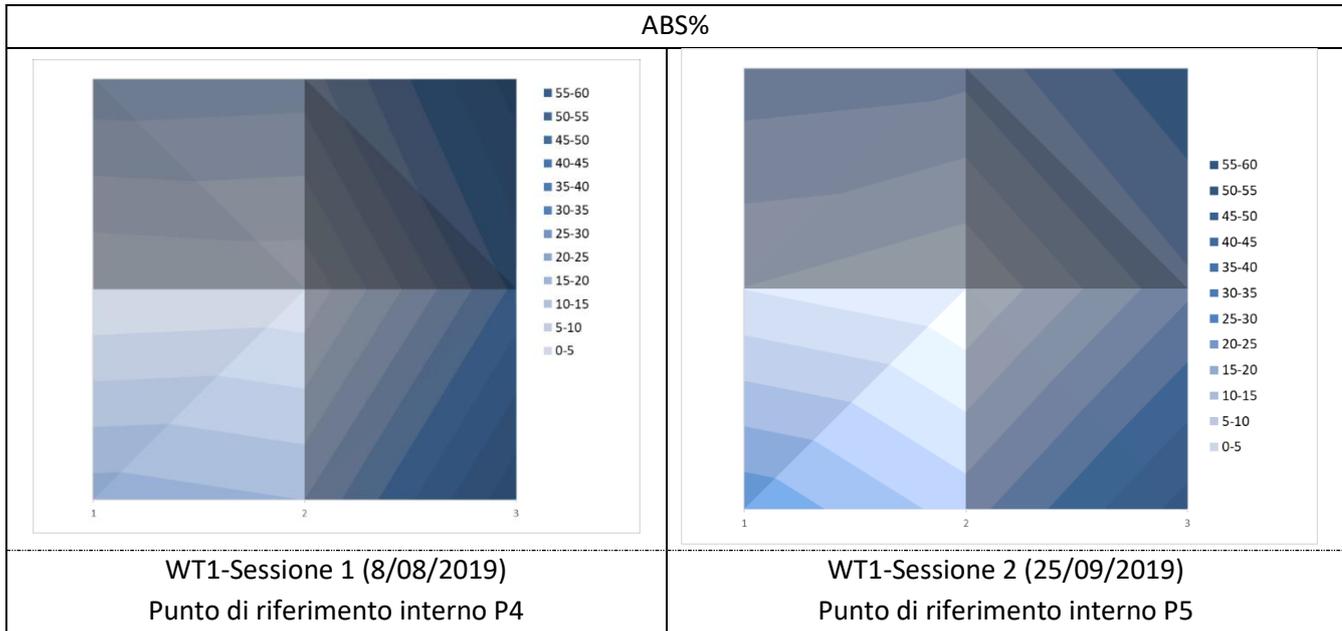
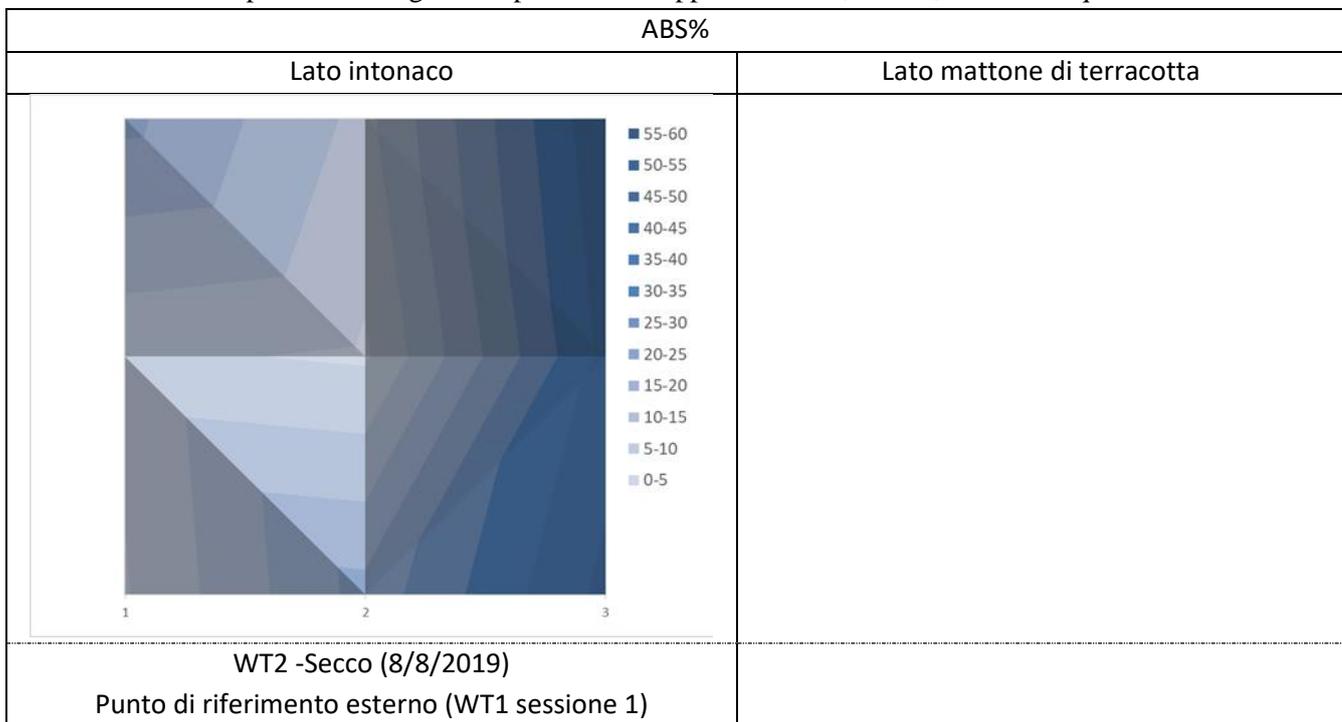


Fig.10: Mappe ABS%, provino WT1

Per il provino WT2 sono state effettuate le misure sia durante la fase asciutta, sia dopo l'imbibimento totale sulle due facce del provino. In Fig.11 si riportano le mappe acustiche , in Tab,7 i valori a queste associati



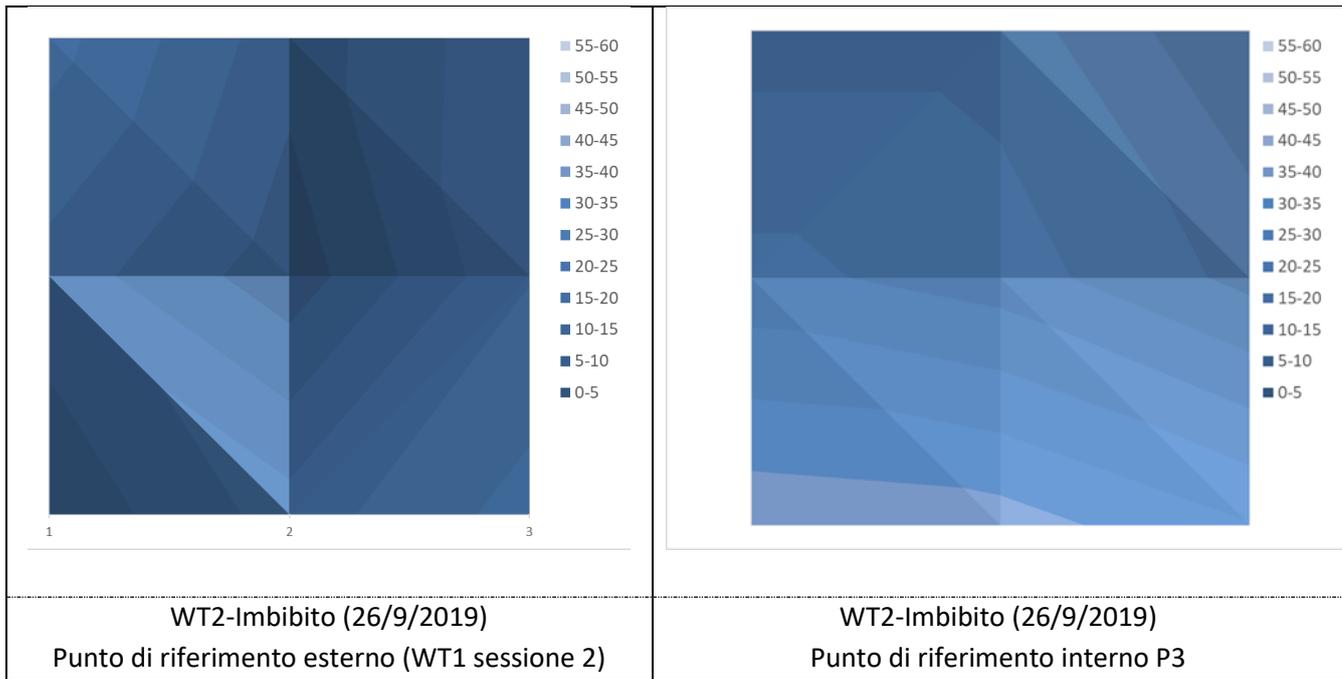


Fig.11: Mappe ABS%, provino WT2

Nelle seguenti tabelle, i dati sono riportati come ABS%, assieme all'incertezza di misura U espressa come incertezza estesa secondo la norma UNI CEI 70098:2016 con fattore di copertura relativo ad un intervallo di fiducia del 95%, ed errore relativo Err Rel.

WT1	ABS%					
	Sessione 1 (8/08/2019)			Sessione 2 (25/09/2019)		
	ABS%	U	Errore Rel	ABS%	U	Errore Rel
P1	22,855	2,009	9%	28,973	2,570	9%
P2	19,942	2,520	13%	17,837	3,515	20%
P3	48,785	1,909	4%	37,197	2,457	7%
P4	Punto di referenza			0,751	0,004	5,181
P5	1,036	2,720	263%	Punto di referenza		
P6	31,292	1,905	6%	18,925	3,231	17%
P7	18,482	2,325	13%	18,040	1,484	8%
P8	17,608	2,328	13%	16,757	1,507	9%
P9	42,446	1,681	4%	29,298	3,013	10%

Tab.6: Valori ABS% con errore, nei nove punti di misura sul provino WT1

WT2	ABS%					
	Secco – Lato intonaco			Secco – Lato mattonella		
	ABS%	U	Errore Rel	ABS%	U	Errore Rel
P1	21,336	1,845	9%			
P2	8,617	1,918	22%			
P3	39,173	2,053	5%			
P4	5,985	1,768	30%			
P5	4,286	3,082	72%			
P6	36,416	2,697	7%			
P7	4,599	1,968	43%			
P8	21,818	2,543	12%			
P9	41,466	1,803	4%			
	Imbibito – Lato intonaco			Imbibito – Lato mattonella		
	ABS%	U	Errore Rel	ABS%	U	Errore Rel
P1	27,067	1,817	7%	12,850	0,345	3%
P2	11,990	1,522	13%	12,857	1,137	9%
P3	24,296	1,584	7%	Punto di referenza		
P4	18,062	2,746	15%	21,580	0,518	2%
P5	6,964	1,367	20%	17,579	0,661	4%
P6	24,700	1,526	6%	8,518	0,962	11%
P7	11,002	2,279	21%	38,773	1,094	3%
P8	22,245	1,246	6%	37,401	1,126	3%
P9	32,167	1,253	4%	30,295	1,703	6%

Tab7: Valori ABS% con errore, nei nove punti di misura sul provino WT2

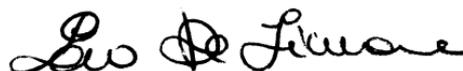
OSSERVAZIONI:

- Le misure sono stabili e ripetibili nei due provini WT1 e WT2
- La presenza nella sessione 1 del WT1 di un errore U pari al 263% non dipende dalla qualità della misura ma dalla scelta del punto di riferimento interno
- I valori di ABS% elevati si trovano sempre nella parte destra del provino, pertanto si ipotizza una eventuale non perfetta aderenza di lieve entità.
- La variazione del valore di ABS% nel provini WT” a secco e imbibito non è tale da permette delle valutazioni indicative sulla relazione tra quantità di umidità presente e assorbimento acustico. Per avere dei dati significativi bisognerà aver dei dati maggiori e soprattutto servirà una gamma di tipologie di provini di diverso materiale.

Dr.ssa Paola CALICCHIA



Ing. Sara DE SIMONE



Dr.ssa Paola Calicchia, Ing. Sara De Simone