

RELAZIONE TECNICA



INDAGINE IN SITU MEDIANTE METODI ACUSTICI

ABSIDE CHIESA DI SAN NICOLA IN CARCERE

LABORATORIO DI ACUSTICA APPLICATA AI BENI CULTURALI – LARCH
18 – 22 MARZO 2019

Dr.ssa Paola CALICCHIA
Ing. Sara DE SIMONE
Versione 2 del 15 luglio 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 presenza di umidità nella muratura dell'abside della Chiesa di San Nicola in Carcere, Roma.

METODO DI INDAGINE

Nell'ambito del Progetto ADAMO (Tecnologie di Analisi, DiAgnostica e MOnitoraggio per la conservazione e il restauro di beni culturali), si è svolta un'indagine mediante metodi acustici sulla parete affrescata dell'abside della Chiesa di San Nicola in Carcere, in Roma, nei giorni 18 – 22 marzo 2019.

La finalità dell'indagine è di verificare la presenza di acqua nella muratura dell'abside, e la potenzialità di impiegare metodi acustici non invasivi per tale finalità. Le misure acustiche non in contatto si basano sulla valutazione dell'energia acustica riflessa dalla superficie e sulla dipendenza di tale quantità dalle proprietà elastiche della parete studiata. Dunque si intende correlare la risposta acustica alla variazione delle proprietà strutturali della muratura a causa della presenza di acqua.

La configurazione della strumentazione consiste in una sorgente acustica e un ricevitore (microfono omnidirezionale), montati coassiali, sistemati di fronte la parete affrescata, come mostrato in Fig. 1a. Il sistema di controllo e acquisizione, come mostrato in Fig. 1b, rileva il segnale dell'onda sonora diretta e dell'onda riflessa dalla superficie e lo elabora per estrarre l'informazione sull'assorbimento acustico.

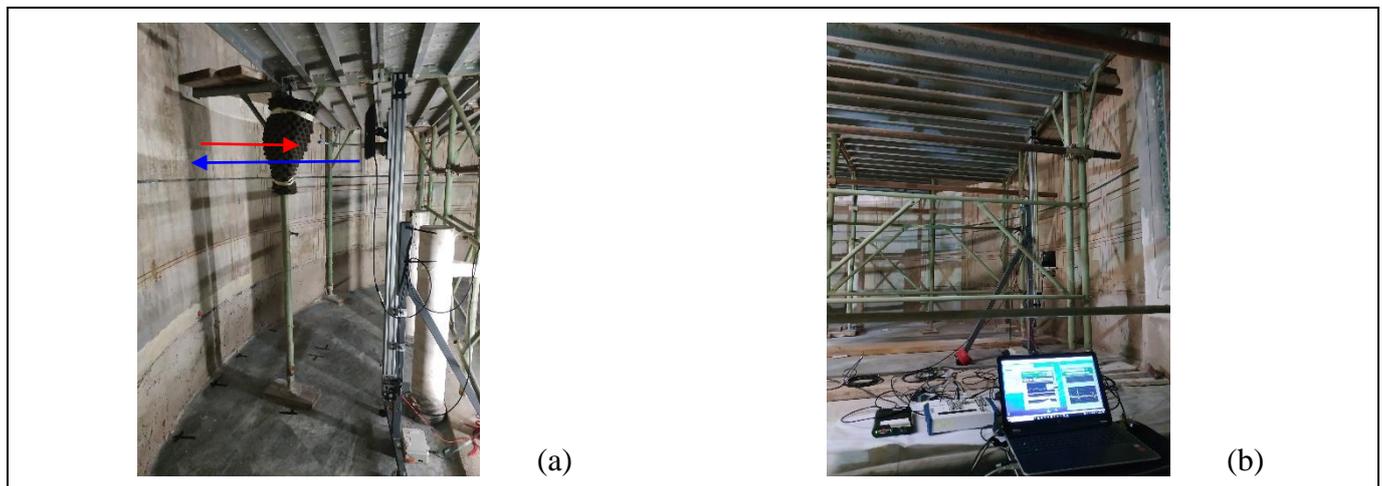
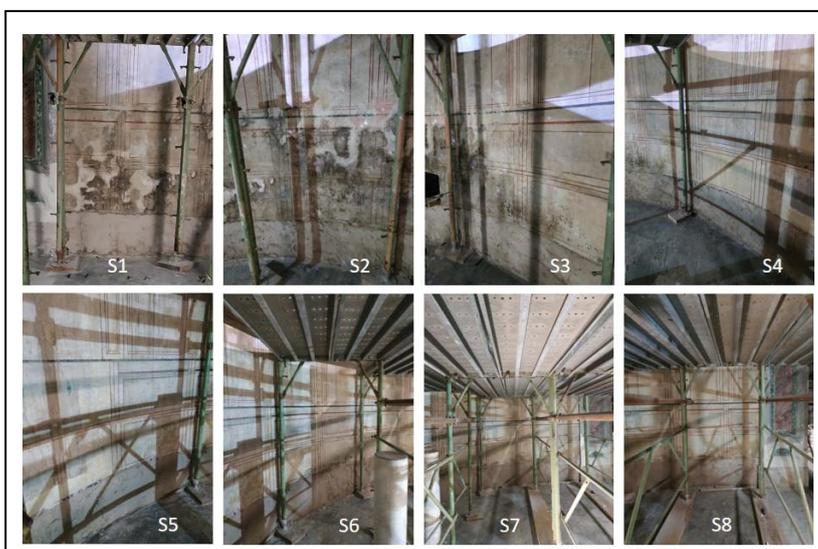


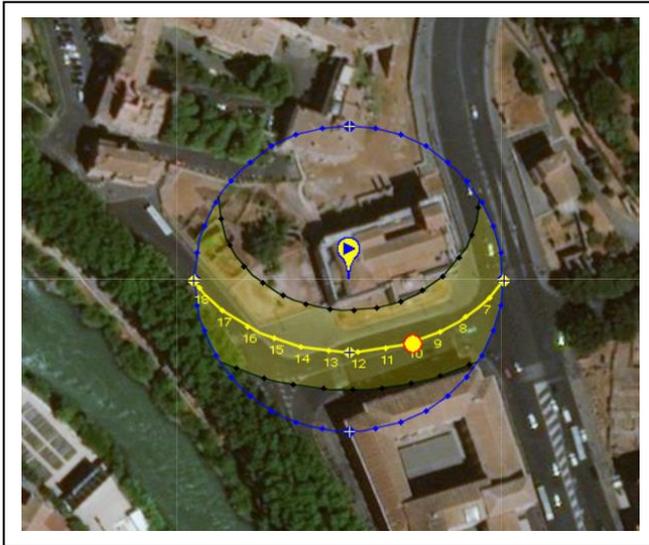
Fig. 1: Strumentazione acustica di fronte l'affresco studiato (a); sistema di controllo e acquisizione (b).



L'area di analisi della semi-circonferenza dell'abside è stata suddivisa in otto settori, identificati come S1 – S8, con la numerazione crescente da sinistra a destra in senso orario. La suddivisione in otto settori è stata anche determinata e guidata dalla presenza dell'impalcatura. La sequenza dei settori è mostrata in Fig. 2.

Fig. 2: Area di analisi composta da otto settori, da S1 a S8.

Condizioni ambientali



Durante l'indagine i valori di temperatura T e di umidità relativa $RH\%$ dell'ambiente interno, in prossimità della strumentazione tecnica, sono stati monitorati in quanto rilevanti ai fini della misura stessa. Come riferimento dell'irraggiamento esterno, in Fig. 3 è riportato il percorso del sole durante le giornate in cui si è svolta l'indagine.

La lettura nell'ambiente interno è stata effettuata con un termo-igrometro commerciale Velleman WS8461 (risoluzione $T \pm 1^\circ C$, $RH \pm 1\%$). La temperatura è risultata stabile durante i cinque giorni, attorno a $13^\circ C$. L'umidità relativa ha toccato valori molto elevati, ed è variata secondo il grafico mostrato in Fig. 4.

Fig. 3: Percorso del sole durante le giornate di misura.

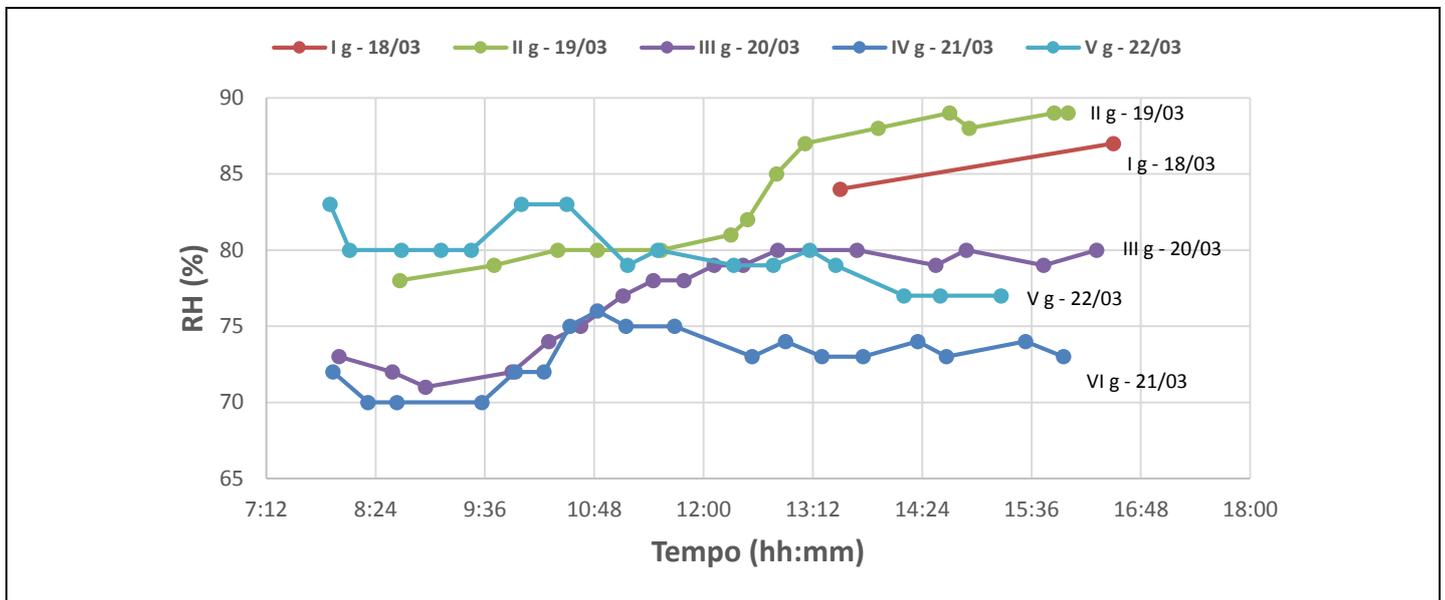


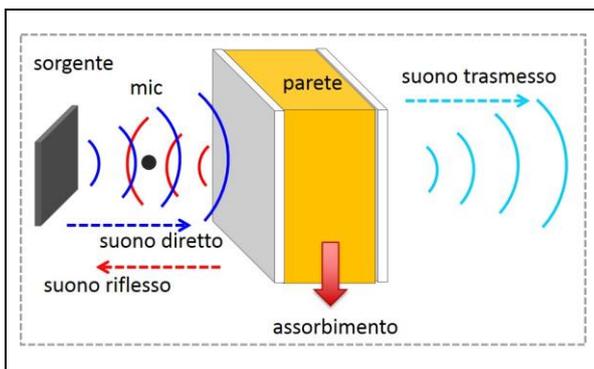
Fig. 4: Grafico dell'andamento dell'umidità relativa all'interno dell'abside durante la campagna di misura.

Risultati

L'indagine è stata condotta misurando la riflessione dell'onda sonora dalla parete negli otto settori, 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 Fig. 5 mostra 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 r_p

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

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

La presenza di acqua di risalita all'interno della muratura ne modifica le proprietà elastiche, riducendone la rigidità D e dunque la velocità di propagazione dell'onda sonora c . Questo ha come effetto la riduzione dell'impedenza acustica Z rilevante per il calcolo del coefficiente di riflessione r_p . La riflessione sarà attenuata rispetto alla muratura secca, con un coefficiente di riflessione della pressione acustica più basso, come mostrato in Eq. 2:

$$r_p^u = \frac{Z_u - Z_0}{Z_u + Z_0} < r_p^s = \frac{Z_s - Z_0}{Z_s + Z_0} \quad (\text{Eq. 2})$$

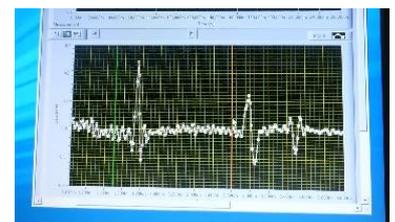
Di conseguenza la percentuale di assorbimento acustico della parete umida sarà maggiore rispetto alla parete secca, $ABS\%^u > ABS\%^s$, come sintetizzato nella Tab. 1.

Tab. 1: Quadro riassuntivo del comportamento acustico del muro umido e del muro secco.

MURO UMIDO		MURO SECCO
c velocità del suono nel materiale abbassata		c velocità del suono nel materiale elevata
Z_u impedenza acustica abbassata		Z_s impedenza acustica elevata
Riflessione bassa		Riflessione elevata
Assorbimento elevato		Assorbimento basso
$ABS\%^U$	$>$	$ABS\%^S$

1 - METODO DELLA RISPOSTA IMPULSIVA

Impiegando un segnale acustico a larga banda nell'intervallo audio (1 – 15) kHz, si sono scansionati 14 profili verticali distribuiti non uniformemente negli otto settori, estrapolando poi la risposta della parete allo stimolo sonoro denominata *risposta impulsiva*. I profili coprono un'altezza (163,5 – 53,5) cm da terra e sono identificati dal numero del settore S_n e dal numero della linea verticale L_m . I risultati sono riportati nella Tab. 2.



Tab. 2: Valori di ABS% per i 14 profili.

Y (cm)	S1_L1	S1_L2	S2_L1	S2_L2	S3_L1	S3_L2	S4_L1	S4_L2	S5_L1	S5_L2	S6_L1	S6_L2	S7_L1	S8_L1
163,5	30	35	30	36	21	29	18	19	29	22	19	18	13	19
158,5	29	34	29	35	21	28	17	23	31	26	21	13	10	24
153,5	27	32	27	34	23	28	19	20	22	26	24	15	17	19
148,5	28	29	26	33	23	28	18	21	27	25	24	13	10	21
143,5	26	29	26	33	18	27	15	20	26	28	24	13	10	25
138,5	21	29	27	33	17	26	15	17	23	26	22	18	5	22
133,5	23	30	29	35	21	28	18	16	24	24	24	17	5	23
128,5	23	32	29	33	19	28	17	17	27	27	23	12	6	22
123,5	23	33	30	34	24	29	19	18	27	26	25	17	5	25
118,5	21	33	29	35	23	28	18	17	27	27	26	20	5	25
113,5	23	32	29	34	21	27	18	20	27	28	26	17	5	24
108,5	27	32	28	36	23	29	20	20	29	26	27	15	0	24
103,5	28	34	30	33	22	28	21	19	28	24	25	13	7	24
98,5	26	32	31	36	23	25	19	17	29	26	24	15	7	19
93,5	24	34	32	34	23	24	18	16	28	26	22	17	8	19
88,5	21	32	30	34	24	27	19	18	30	26	22	18	6	22
83,5	24	31	31	39	25	28	20	19	29	26	23	18	6	22
78,5	25	34	30	36	26	28	18	16	28	26	24	17	5	22
73,5	25	32	29	36	23	28	19	16	30	26	25	19	0	23
68,5	23	33	31	34	22	25	20	17	28	26	24	18	2	22
63,5	23	35	33	30	25	25	19	17	32	27	21	14	3	23
58,5	21	36	29	40	19	23	15	14	29	23	30	18	0	27
53,5	22	33	31	37	23	25	26	24	34	30	27	17	10	38
X (cm)	37,0	55,0	170,0	203,0	250,0	335,0	440,0	510,0	600,0	650,0	786,0	860,0	946,0	1067,5

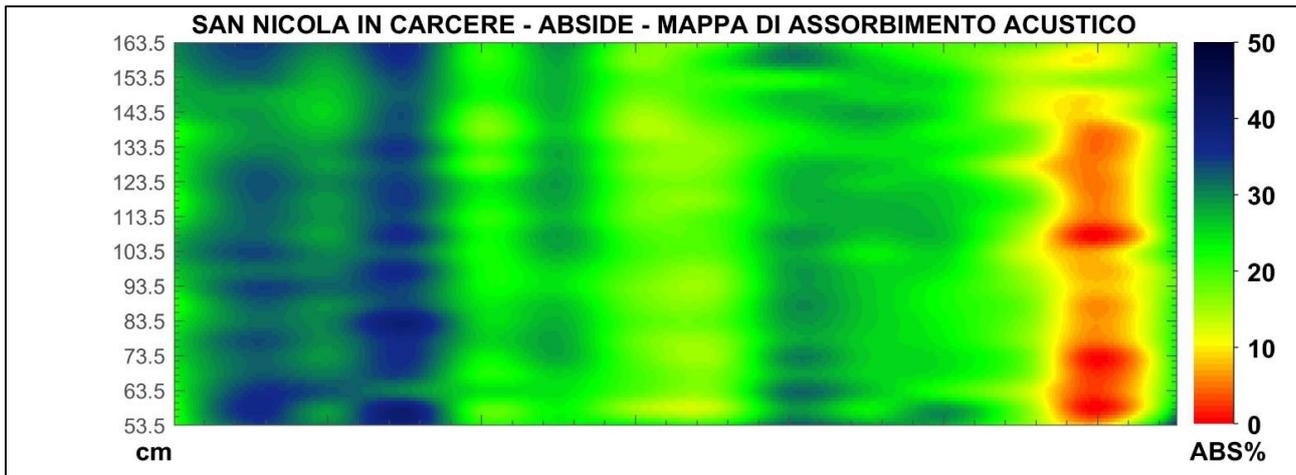
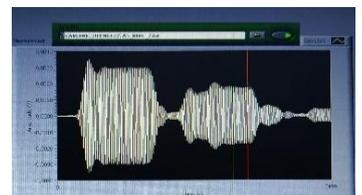


Fig. 6: Mappa di assorbimento acustico, ABS% espresso in percentuale.

La mappa di assorbimento acustico offre una visione estesa dell'area analizzata, anche se non sono rispettate le proporzioni. Nel settore centrale di destra il metodo rileva anche la presenza di zone distaccate, avendo intenzionalmente selezionato dei profili vicino a delle evidenti fessurazioni dell'intonaco. Le zone con livelli di colore tendente al blu presentano criticità maggiori, indicando la parte di muratura umida, raggiungendo valori di assorbimento acustico vicini al 40%.

2 - METODO DEL RAPPORTO TRA AMPIEZZE

Il secondo metodo impiega toni puri, a specifiche frequenze, misurando l'ampiezza dell'onda diretta e l'ampiezza della riflessione dalla parete. Dal loro rapporto si ricava il coefficiente di riflessione e successivamente la percentuale di assorbimento, rispetto al valore di riflessione massima (corrispondente alla muratura secca).



La misura è stata eseguita solo su alcuni punti ritenuti più significativi. Nello specifico, 3 punti sono sul lato sinistro dove è presente una vasta zona umida (nel settore S1), 3 punti sono nella zona centrale asciutta (nel settore S4), e uno un po' laterale sulla destra in una zona intermedia (nel settore S6).

I risultati elaborati in termini di percentuale di assorbimento ABS% sono di seguito riportati nella Fig. 7 integrati nella mappa precedente. I valori di ABS% appaiono notevolmente aumentati nel settore S1, rispetto ai punti negli altri due settori.

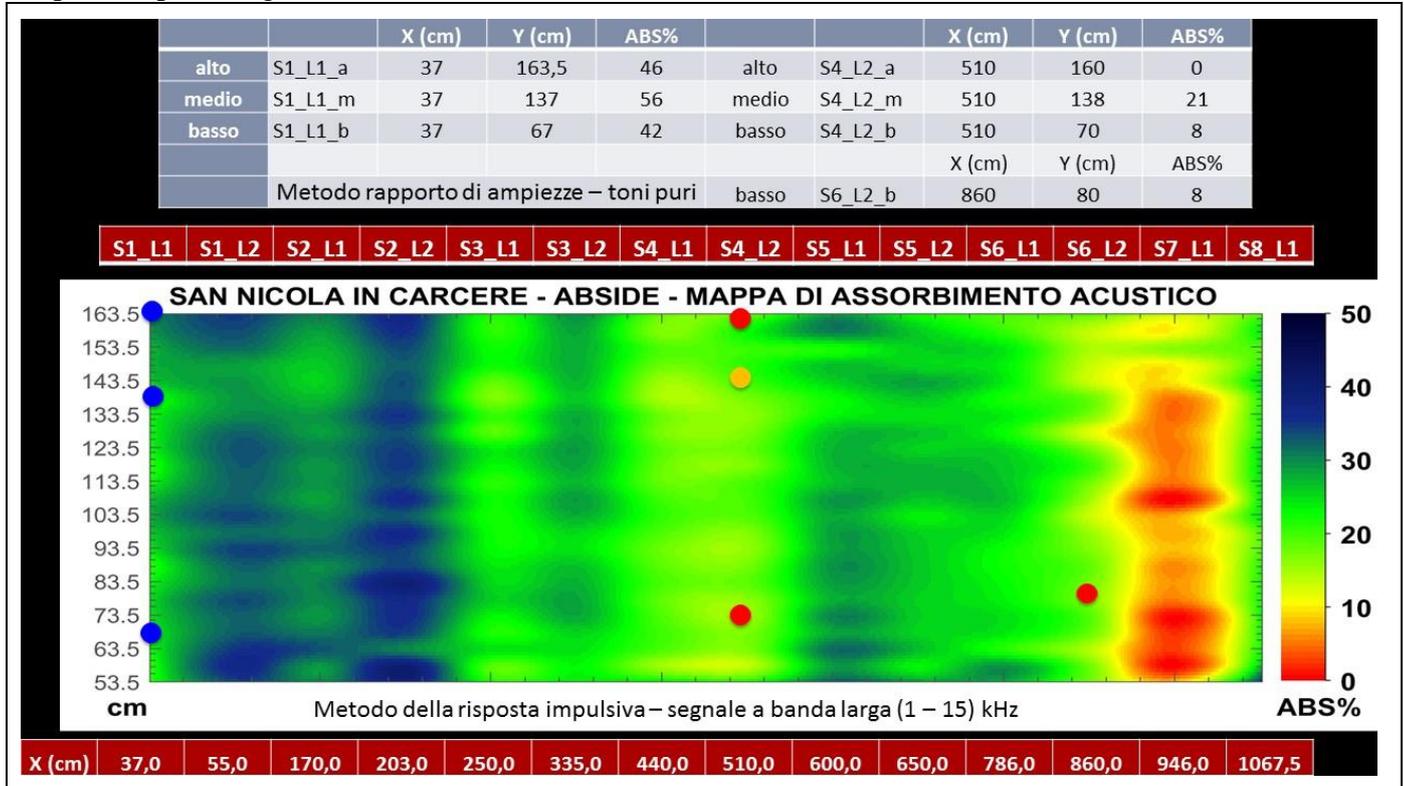


Fig. 7: Integrazione dei dati mediante il metodo del rapporto tra ampiezze, valori numerici nella tabella nella parte superiore, e integrati nella mappa precedentemente mostrata in Fig. 6.

Conclusioni

L'indagine è stata basata su un approccio consistente con le proprietà acustiche delle murature umide e secche. I due metodi sperimentali, simili tra di loro, non sono mai stati impiegati per tale finalità prima d'ora. I risultati appaiono coerenti con le aspettative, almeno da un punto di vista qualitativo:

- nelle zone dove ci sono evidenze di muratura umida, con presenza di muffe ed efflorescenze di sali, sono stati riscontrati valori di assorbimento acustico ABS% più elevato;
- nelle zone che appaiono non affette da tale problema, zona centrale, sono stati riscontrati valori di assorbimento acustico ABS% molto limitato;
- in aggiunta il primo metodo (*metodo della risposta impulsiva*), impiegato in maniera relativamente più estesa, ha rilevato zone lievemente distaccate e con fessurazioni nella zona centrale destra.

Questa analisi ancora non presenta in maniera diretta la correlazione tra la percentuale di assorbimento acustico e la percentuale di umidità. Le evidenze finora raccolte saranno oggetto di successivi approfondimenti integrandole con test di laboratorio su appositi provini al fine di ottenere una calibrazione della mappa, e comprendere dove possibile se si rileva umidità superficiale e/o in profondità.

Dr.ssa Paola CALICCHIA

Ing. Sara DE SIMONE