

# APPARATO SPERIMENTALE PER LA DETERMINAZIONE DELLA CONDUCIBILITÀ TERMICA E DELL'UMIDITÀ IN MATERIALI PER L'EDILIZIA TRAMITE MISURE DI PERMITTIVITÀ ELETTRICA

Alessio Perinelli<sup>a</sup>, Francesco Finotti<sup>b</sup>, Arnaldo M. Tonelli<sup>b</sup>, Leonardo Ricci<sup>a</sup>, Rossano Albatici<sup>c\*</sup>

<sup>a</sup> Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Trento, via Sommarive 14, Trento, 38123, Italia

<sup>b</sup> Geo.Ti.La, corso Bettini 58, Rovereto, 38060, Italia

<sup>c</sup> DICAM, Dipartimento di Ingegneria Civile Ambientale e Meccanica, Università degli Studi di Trento, via Mesiano 77, Trento, 38123, Italia

---

## Highlights

Relationship between thermal conductivity and electrical permittivity for different building materials is defined. A novel test apparatus for laboratory activity has been designed and realized based on a special capacitive sensor where the material sample act as dielectric. The first measurement approach has been refined by considering parallel measurements consisting in the comparison of the frequency of two oscillators. Electrical permittivity shows to be well correlated to the moisture content and variation of the material under investigation.

## Abstract

The on-site measurement of the thermal properties of existing building envelopes is of utmost importance to fairly accurately calculate the thermal loss by transmission to the outside environment and so to define the building overall energy performance. This paper presents a preliminary investigation concerning the use of a new indirect method for measuring the thermal characteristics of building materials throughout the year based on the analysis of the material electrical properties. The main goal is to identify a relationship between thermal transmittance, moisture content and electrical impedance through relative electrical permittivity measurements.

## Keywords

Thermal conductivity, Moisture content, Electrical permittivity, Building materials

---

## 1. INTRODUZIONE

La necessità di contenere i consumi energetici per riscaldamento e raffrescamento degli edifici esistenti e di nuova realizzazione, necessità diventata cogente a seguito della Direttiva 2010/31/UE NZeb (Nearly Zero energy buildings) [1] recentemente integrata e aggiornata con la Direttiva 2018/844/UE [2], e delle successive leggi nazionali, fra cui il Decreto Interministeriale 26 giugno 2015 detto “requisiti minimi” [3], ha reso evidente la mancanza di strumenti diagnostici per la verifica in campo del reale comportamento termico dell’involucro edilizio. L’unico riferimento attualmente esistente è la norma UNI ISO 9869-1:2015 [4] relativa alla termoflussimetria, mentre è stata recentemente pubblicata la ISO 9869-2:2018 [5] relativa all’uso della termoflussimetria all’infrarosso per la rilevazione della resistenza termica e della trasmittanza termica di elementi opachi in edifici a telaio con ridotta capacità termica, inferiore a 30 kJ/m<sup>2</sup>K. Anche gli autori hanno da tempo intrapreso ricerche riguardanti la possibilità di utilizzare la termografia in campo per risalire con buona approssimazione alla trasmittanza termica di elementi opachi di involucro [6-8]. Tuttavia, permangono

---

\* Corresponding author. Tel.: +39-0461-282622; fax: +39-0461-282672; e-mail: rossano.albatici@unitn.it

alcune limitazioni all'uso di questo sistema dovute essenzialmente alle particolari condizioni al contorno necessarie per avere risultati di buona affidabilità, fra cui la principale riguarda la necessità di avere un gradiente termico minimo di 10-15°C costante fra ambiente interno ed esterno sia prima sia durante la misura, come confermato anche da altre ricerche del settore [9-10]. È stata quindi intrapresa una ricerca relativa alla possibilità di individuare in opera una relazione fra trasmittanza termica e impedenza elettrica di pannelli stratificati realizzati con materiali tipicamente utilizzati in edilizia [11] in modo da ricavare per via indiretta il loro comportamento termico attraverso una procedura rapida, non distruttiva, ripetibile e, soprattutto, indipendente dalle condizioni ambientali esterne e quindi realizzabile in qualunque momento dell'anno. L'unico tentativo antecedente di percorrere questa strada noto agli autori, è stato fatto nel 1938 da J. Stuart Johnson [12], in situazione di laboratorio e solo su elementi in laterizio a corpo unico. La ricerca ha posto in evidenza alcune problematiche fra cui la necessità di utilizzare corrente alternata ad alta frequenza, la difficoltà nel diminuire possibili rumori dovuti alla strumentazione di misura, la difficoltà nella lettura dei dati la cui variabilità non sempre era riconducibile a fattori ben controllabili a priori.

Per tale motivo si è ritenuto necessario affrontare un processo di ricerca più articolato costituito da fasi di lavoro successive di complessità crescente, partendo dall'analisi di campioni di materiale omogeneo e andando a valutare in prima istanza, in condizioni di laboratorio e quindi con condizioni al contorno note e controllate, le proprietà dielettriche dei materiali misurando la permittività elettrica relativa per confrontarla con i valori di conducibilità termica. La permittività elettrica è legata alla componente capacitiva dei campioni e dunque contribuisce al valore di impedenza ad essi associata. Questo sistema può essere efficacemente utilizzato anche per risalire al valore di umidità del materiale.

## **2. METODOLOGIA**

L'ipotesi di partenza è che i materiali costituenti i campioni considerati siano isolanti ideali (resistenza elettrica infinita) e che la componente induttiva sia nulla. In questo modo l'impedenza associata ad ogni campione risulta dipendente in maniera esclusiva dalle proprietà dielettriche del materiale. A favore di questo approccio c'è la considerazione che la maggior parte dei materiali si comportano in maniera coerente: materiali considerati buoni conduttori di elettricità sono solitamente anche buoni conduttori termici, viceversa cattivi conduttori di elettricità solitamente sono anche cattivi conduttori termici.

Sono stati presi in considerazione quattro campioni sotto forma di piastrelle a pianta quadrata di 20cm di lato e 2cm di altezza, realizzati in legno di abete, vetro, polistirolo e calcestruzzo. Ogni campione è composto da un solo materiale, dunque può essere considerato omogeneo e isotropo. Le proprietà termiche sono state preliminarmente determinate dal Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova col metodo del hot disk<sup>1</sup>, in modo che il valore di conducibilità termica potesse poi essere posto in relazione con i risultati delle misure elettriche.

---

<sup>1</sup> Gli autori ringraziano la dott.ssa Manuela Campanale e il dott. Lorenzo Moro dell'Università di Padova per la loro cortese collaborazione.

## 2.1 Il sensore e il circuito realizzati per la misura

L'apparato per la misura dell'impedenza (Fig. 1) è composto da due piastre metalliche a base quadrata di 30cm di lato che, posizionate concentricamente e vincolate da quattro guide in nylon, premono sulle due facce del campione creando così una sorta di grosso condensatore dove il campione funge da dielettrico. Il circuito è inserito in una custodia metallica direttamente saldata sulla piastra collegata a massa, rendendolo così schermato. Grazie a due connettori BNC è possibile alimentare il circuito e leggere la risposta dell'apparato.

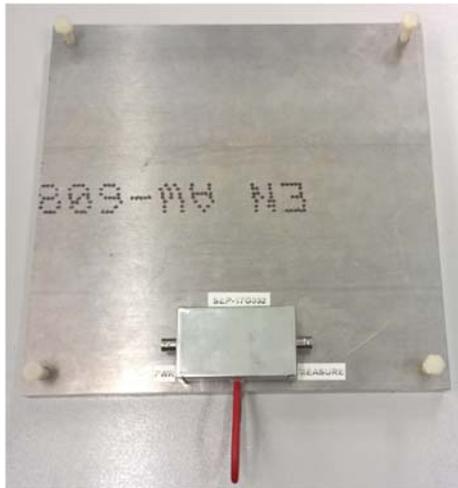


Figura 1. L'apparato di misura utilizzato con il circuito inserito nella custodia metallica

La misura della componente resistiva dell'impedenza associata al sensore risulta problematica per vari motivi, su tutti la difficoltà nel creare un buon contatto elettrico tra piastre e campione. Si è scelto in prima istanza di considerare il sensore un componente squisitamente capacitivo, così da misurare le proprietà dielettriche del campione. Da un punto di vista circuitale il sensore può essere visto come una combinazione di condensatori ( $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_x$  e  $C_b$ ) sistemati come in Fig. 2a, ognuno associato ad una porzione del volume compreso tra le piastre dell'apparato. È dunque possibile individuare una capacità totale  $C_{tot}$  per il sensore come in Eq. 1.

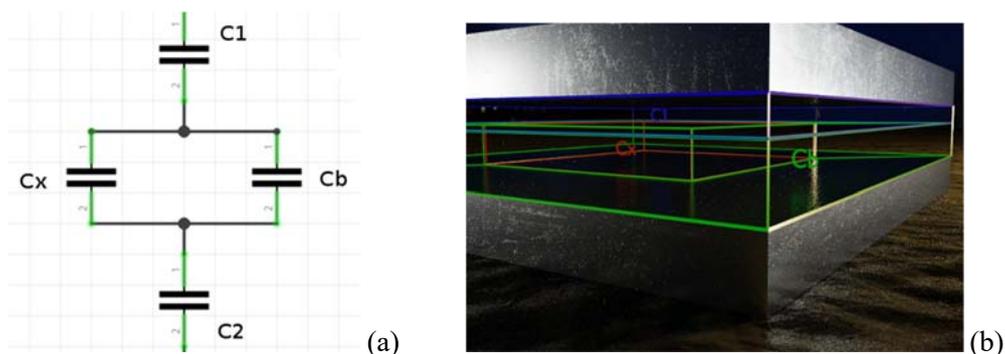


Figura 2. Circuito associato al sensore (a), suddivisione dei volumi fra le due piastre dell'apparato (b)

Le porzioni di volume associate a  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_x$  e  $C_b$  (Fig. 2b) sono:

- il volume individuato dalle dimensioni del campione collocato nel centro del sensore che contribuisce alla capacità totale del sensore con  $C_x$ ;

- il volume di bordo, cioè quello di altezza pari all'altezza del campione e con superficie pari all'eccedenza tra superficie del campione e superficie della piastra, che contribuisce con  $C_b$ ;
- il volume individuato dallo strato di aria compreso fra la piastra superiore ed i volumi descritti in precedenza, che contribuisce con  $C_1$ ;
- l'equivalente al precedente riferito alla piastra inferiore, che contribuisce con  $C_2$ .

La capacità totale del sensore sarà quindi  $C_{tot}$ :

$$1/C_{tot} = 1/C_1 + 1/C_2 + 1/(C_x + C_b) \quad (1)$$

La capacità  $C_2$  può essere considerata tendente all'infinito per il fatto che il campione viene appoggiato alla piastra inferiore, quindi:

$$C_{tot} = [C_1 (C_x + C_b)] / [(C_x + C_b + C_1)] = (C_x + C_b) / [1 + (C_x + C_b) / C_1] \quad (2)$$

Se la capacità  $C_1$  è sufficientemente alta rispetto alla somma di  $C_x + C_b$ , cioè se la piastra superiore è molto vicina alla superficie superiore del campione, allora  $C_{tot}$  si semplifica:

$$C_{tot} = C_x + C_b \quad (3)$$

Da un punto di vista circuitale l'impedenza  $Z_s$  associata al sensore sarà:

$$Z_s = i / (\omega C_{tot}) \quad (4)$$

con  $i$  la corrente nel circuito.

Il circuito realizzato per l'analisi è un classico circuito partitore, rappresentato in Fig. 3, composto da una resistenza  $R$  e dal sensore  $Z_s$  appena descritto. Un segnale sinusoidale di potenziale  $V_{in}$  alimenta il circuito e viene preso come riferimento da uno strumento 'lock-in' di rivelazione di segnali in fase. Il segnale all'uscita del circuito  $V_{out}$  viene così monitorato per misurarne ampiezza  $A$  e differenza di fase  $\phi$ . Si può quindi ricavare la capacità  $C_{tot}$  del circuito come:

$$C_{tot} = (\sqrt{(a^2 - 2A \cos \phi + 1)}) / \omega R a = (\sqrt{(a^2 - 2A \cos \phi + 1)}) / 2\pi F R A \quad (5)$$

dove  $F$  è la frequenza in Hertz a cui viene alimentato il circuito.

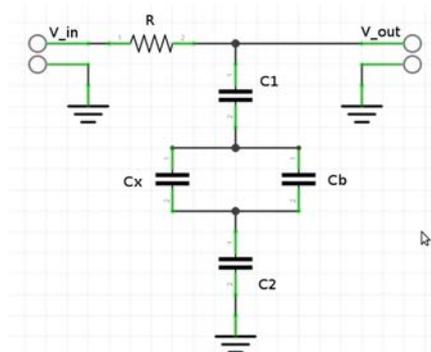


Figura 3. Schema del circuito considerato

## 2.2 Procedura di misura – prima fase della sperimentazione

In una prima fase della sperimentazione, al fine di testare la metodologia proposta, viene utilizzato un solo sensore e le misure sono ripetute due volte, con e senza campione. Il sensore è configurato in modo da

mantenere le piastre a distanza costante utilizzando degli spessori per poter sfilare il campione dall'apparato, ma sufficientemente vicine da poter ipotizzare  $C_1 \gg C_x + C_b$  (come definito in precedenza). Vengono quindi misurate l'ampiezza  $A$  e la differenza di fase  $\phi$  nel circuito a frequenze diverse dopo aver sistemato il campione al centro del sensore. Come detto, le misure vengono ripetute mantenendo invariata la configurazione dell'apparato ma senza il campione presente (misura con sola aria). In questo modo, l'unica componente capacitiva che influenza i differenti valori di  $C_{tot}$  nelle due misure sarà  $C_x$ .

Quando il campione  $c$  è presente nel sensore:

$$C_x = C_c \quad (6)$$

Quando il campione non è presente, il volume da lui prima occupato viene riempito da aria  $a$ :

$$C_x = C_a \quad (7)$$

Considerando la differenza tra le capacità totali del sensore  $Z_s$  calcolate con e senza il campione si elimina la dipendenza dalla capacità di bordo  $C_b$  e utilizzando (3) risulta:

$$\Delta C_{tot} = C_c - C_a \quad (8)$$

Il volume individuato da  $C_x$  ha le dimensioni del campione, di superficie  $S$  e spessore  $l$ . Le capacità  $C_c$  e  $C_a$  sono rispettivamente:

$$C_c = (\epsilon_0 \epsilon_{r(\text{campione})}) * S / l \quad (9)$$

$$C_a = (\epsilon_0 \epsilon_{r(\text{aria})}) * S / l \cong \epsilon_0 * S / l \quad (10)$$

con  $\epsilon_0$  costante dielettrica del vuoto.

Dato che la costante dielettrica relativa dell'aria  $\epsilon_{r(\text{aria})} = 1.0006 \approx 1$  è possibile sostituire (10) in (9) e approssimare  $C_c$  come segue:

$$C_c = C_a \epsilon_r = C_a (\epsilon_r - 1) + C_a \quad (11)$$

dove  $\epsilon_r$  è la permittività relativa del campione.

Conseguentemente, sostituendo (11) in (8), la differenza di capacità misurata  $\Delta C_{tot}$  risulta:

$$\Delta C_{tot} = C_a (\epsilon_r - 1) \quad (12)$$

da cui è possibile ricavare  $\epsilon_r$  come:

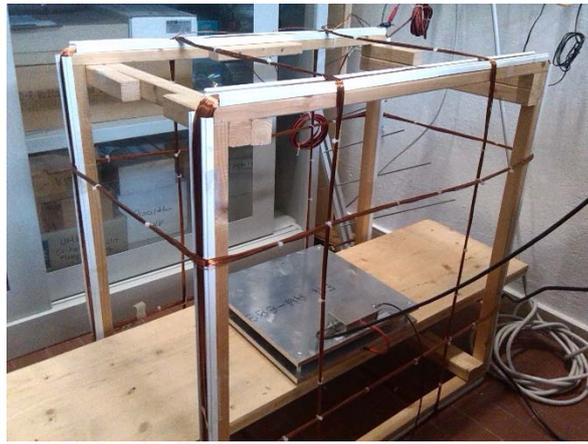
$$\epsilon_r = (\Delta C_{tot}) / C_a + 1 \quad (13)$$

La resistenza  $R$  del circuito è stata scelta pari a  $1M\Omega$  in maniera tale da massimizzarne la sensibilità. Per evitare qualsiasi interferenza esterna durante le misure l'apparato è stato inserito all'interno di una gabbia di Faraday (Fig. 4).

Il circuito è stato alimentato a frequenze diverse con il generatore di funzioni presente all'interno dello strumento lock-in Stanford Research Systems, modello SR830 DSP. Sono state raccolte le misure di ampiezza della tensione in ingresso  $V_{in}$ , di quella in uscita  $V_{out}$ , dello sfasamento del segnale in entrata rispetto al segnale di sincronizzazione  $\phi_0$  e il corrispettivo per il segnale in uscita  $\phi_{out}$ .

Le frequenze a cui sono state effettuate le misure sono comprese nel range  $300 \div 1500\text{Hz}$  a intervalli di  $100\text{Hz}$  e l'ampiezza del segnale in ingresso è stato impostato a  $1\text{ V}$  picco-picco. Si è poi risaliti alle misure di capacità totale  $C_{tot}$  dell'apparato nella configurazione con e senza campioni dopo aver stimato  $C_a$  come descritto in (10).

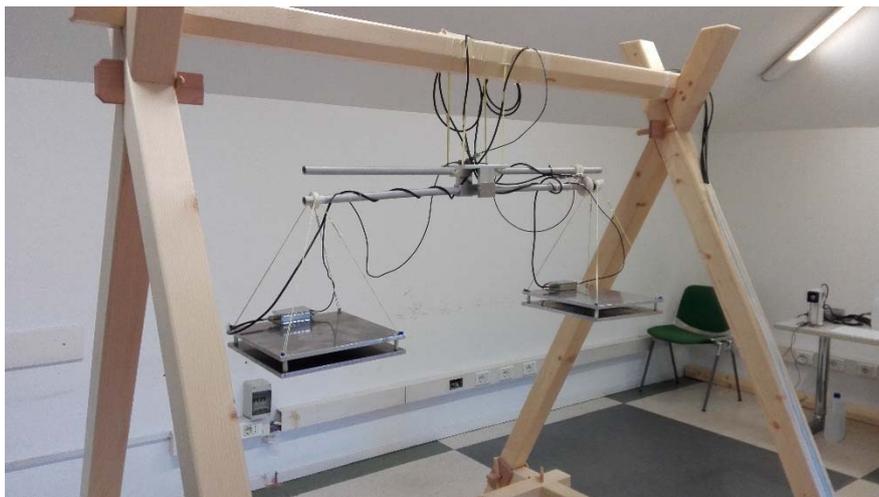
Infine si è giunti alla permittività relativa  $\epsilon_r$  come in (13).



*Figura 4. L'apparato di misura inserito nella gabbia di Faraday*

### ***2.3 Procedura di misura – seconda fase della sperimentazione***

In una seconda seconda fase, sono stati utilizzati due sensori di misura in parallelo, in modo da poter effettuare le misure con e senza campione in contemporanea (Fig. 5).



*Figura 5. L'apparato di misura inserito con due sensori in parallelo*

Questo permette di eliminare le incertezze sulla misura dovute alla sua ripetizione, soprattutto con riferimento alle variazioni delle condizioni al contorno (temperatura e umidità dell'ambiente), potendo misurare contemporaneamente sia il campione sia una capacità di riferimento.

Anche il sensore e la modalità di misura sono state migliorate. L'apparato risulta ora costituito da due capacitori identici, ciascuno formato sempre da due lastre quadrate in alluminio di 30 cm di lato, distanti 3 cm l'una dall'altra e fissate tra loro mediante distanziali e viti in plastica, posizionati su un bilanciere a lati uguali appeso a una struttura in legno. Ciascun capacitore costituisce l'elemento capacitivo di un oscillatore a rilassamento. Misurando il periodo degli oscillatori è possibile stimare la costante dielettrica del campione di materiale presente nel capacitore. Al fine di migliorare l'isolamento elettromagnetico del sensore (che nel precedente apparato era garantito dalla gabbia di Faraday), una terza lastra più sottile è fissata al di sotto della

coppia di piatti e messa a terra come la lastra superiore. In Fig. 6 è riportato il nuovo schema di funzionamento dell'apparato di misura.

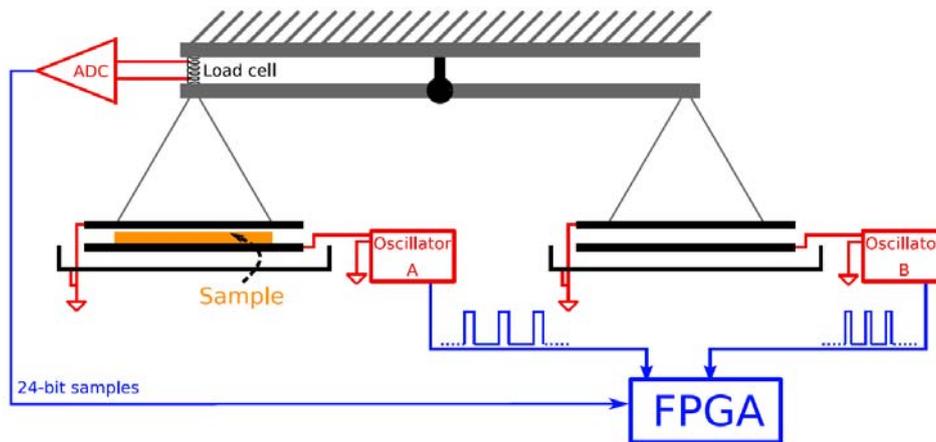


Figura 6. Schema di funzionamento del nuovo apparato di misura.

Poichè basato sulla misura di un tempo (cioè del periodo degli oscillatori), questo sistema è più preciso del metodo utilizzato in precedenza, in cui si effettuava la rivelazione in fase mediante un lock-in amplifier. Al fine di correlare la misura di costante dielettrica  $\epsilon_r$  del campione con la variazione del tempo del suo contenuto d'acqua, il peso di quest'ultimo viene misurato contemporaneamente alla misura dei periodi degli oscillatori. A tal fine, i due condensatori costituiscono i piatti di una bilancia a bracci uguali. A uno dei due bracci è agganciata una cella di carico che consente di misurare la differenza di peso tra i due bracci. La cella di carico consiste in un ponte di Wheatstone letto da un ADC (Analog to Digital Converter). La misura di periodo è effettuata mediante un FPGA (Field Programmable Gate Array), misurando il tempo  $T_N$  impiegato da ciascun oscillatore a compiere  $N = 1280$  oscillazioni e calcolando poi il periodo medio  $T_N/N$ . Poichè la frequenza di oscillazione degli oscillatori in assenza (presenza) del campione è di circa 3.5 kHz (2.3 kHz), l'acquisizione impiega circa mezzo secondo. I 24 bit prodotti in output dall'ADC che legge la cella di carico vengono acquisiti dalla medesima FPGA parallelamente alla misura dei periodi. I tre dati sono trasmessi dall'FPGA a un computer non appena sono disponibili. Il sistema è stato opportunamente calibrato sia in peso che in capacità. Durante l'acquisizione, la temperatura e l'umidità relativa del laboratorio vengono registrate da un sistema indipendente ogni 5 minuti.

#### 4. RISULTATI E DISCUSSIONE

Per brevità di trattazione, vengono di seguito riportati direttamente i grafici della permittività  $\epsilon_r$  dei quattro campioni in funzione della frequenza in Hertz (Fig. 7), misurata con il primo apparato.

Per il calcestruzzo, sono state eseguite due prove, con provino secco e con provino umido dopo tre giorni di bagno in contenitore pieno di acqua.

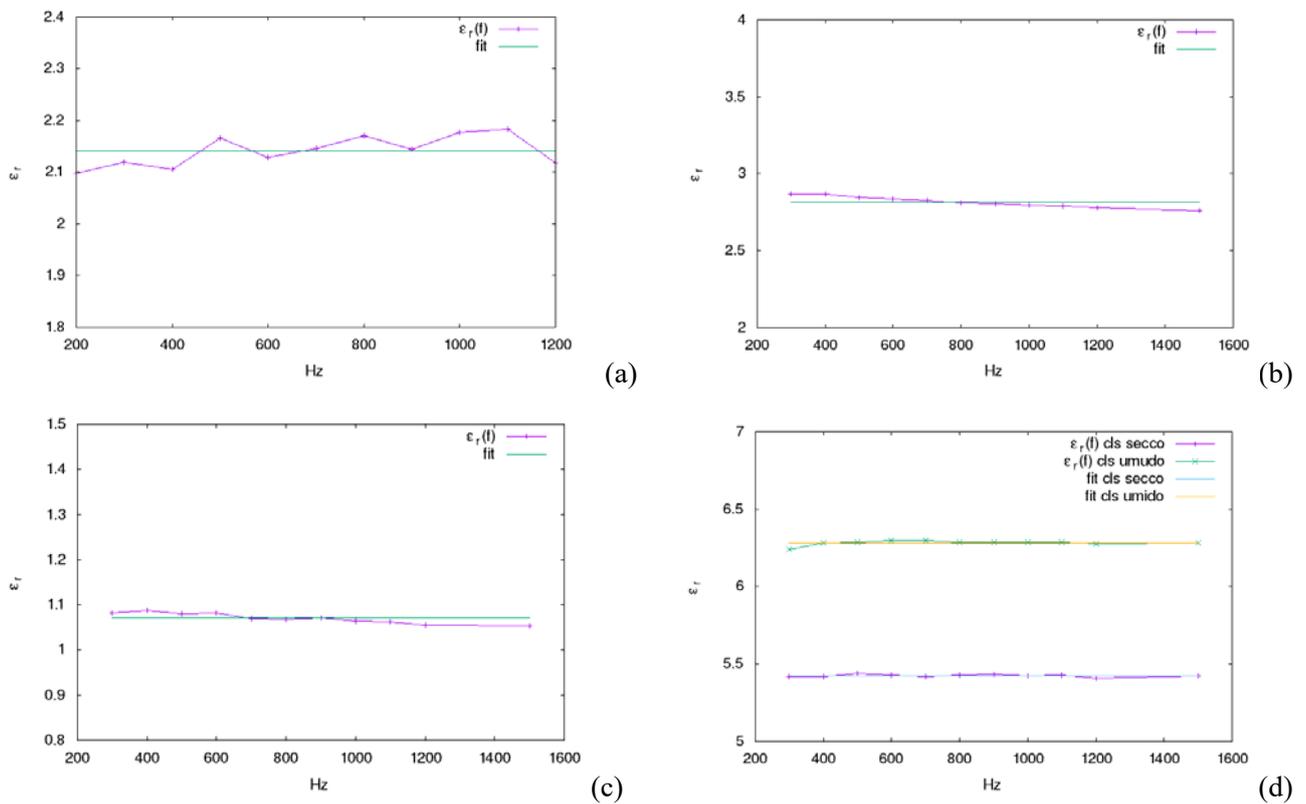


Figura 7. Grafico della permittività  $\epsilon_r$  dei quattro campioni in funzione della frequenza considerata: (a) legno di abete, (b) vetro, (c) polistirolo, (d) calcestruzzo secco e umido (curva superiore)

Si nota che i valori sono sostanzialmente costanti al variare della frequenza considerata. Pertanto gli andamenti riscontrati sono stati interpolati con una funzione costante per trovare il valore di riferimento di  $\epsilon_r$  per ogni materiale considerato.

Come espresso sopra, è ragionevole pensare che le componenti resistiva e induttiva dell'impedenza associata ai campioni siano tendenti rispettivamente a infinito ( $R_c \rightarrow \infty$ ) e a zero ( $L_c \rightarrow 0$ ) in virtù della natura dei materiali di cui essi sono composti. L'approssimazione fatta per questa analisi preliminare è dunque quella di considerare i materiali analizzati come se avessero proprietà squisitamente capacitive.

Nella seguente tabella (Tab. 1) sono riportati i valori di permittività di riferimento ottenuti per i vari provini, con i relativi valori di conducibilità termica misurati in laboratorio.

campione	$\lambda$ [W/m <sup>2</sup> K]	$\epsilon_r$
polistirolo	0.0348	$1.070 \pm 0.003$
legno abete	0.1718	$2.141 \pm 0.009$
vetro	1.0240	$2.82 \pm 0.01$
cls secco	1.6070	$5.425 \pm 0.002$
cls umido	---	$6.283 \pm 0.004$

Tabella 1. Valori di conducibilità termica e di permittività elettrica dei quattro materiali considerati

È possibile notare come l' $\epsilon_r$  del polistirolo sia molto vicino a quello dell'aria, in corrispondenza del fatto che la percentuale maggiore di volume del polistirolo è occupata da aria. In maniera simile confrontando l' $\epsilon_r$  del

calcestruzzo umido e del calcestruzzo secco si nota come la presenza dell'acqua contribuisca significativamente all'aumento della permittività.

Nonostante il numero di campioni sia insufficiente per poter trarre delle conclusioni definitive, si nota comunque una certa correlazione tra le proprietà termiche ed elettriche dei materiali, fenomeno evidenziato nel grafico in Fig. 8.

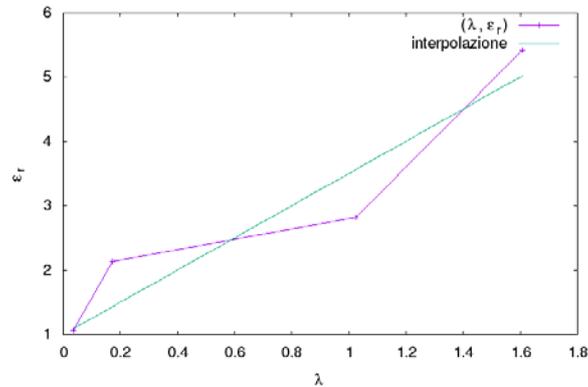


Figura 8. Relazione fra conducibilità termica ( $\lambda$ ) e permittività elettrica relativa ( $\epsilon_r$ ) dei campioni

Si è scelto di interpolare il grafico con una funzione lineare di coefficiente angolare (o costante di proporzionalità tra  $\lambda$  e  $\epsilon_r$ )  $k_m$  e termine noto  $q = 1$ . La forzatura ad uno del termine noto è dovuta al fatto che la conducibilità termica del vuoto deve essere nulla.

Si ha quindi che il rapporto fra conducibilità termica e permittività elettrica risulta pari a:

$$\lambda = (\epsilon_r - 1)/k_m = k_\lambda (\epsilon_r - 1) \quad (14)$$

con

$$k_\lambda = 0.40 \pm 0.05 \text{ [W/mK]}$$

La sperimentazione con l'utilizzo dell'apparato di misura con doppia capacità e bilancere è stato per ora utilizzato al fine di correlare la permittività del materiale con il contenuto di umidità dello stesso. A tal fine, sono state fatte una serie di misure, via via raffinate, sul calcestruzzo bagnato, valutando la variazione delle sue caratteristiche elettriche con il procedere dell'asciugatura dello stesso.

Il campione impregnato d'acqua viene inizialmente inserito in una delle due capacità. Il periodo dei due oscillatori e l'output della cella di carico vengono campionati continuamente per un periodo di tempo di alcuni giorni, necessario alla completa evaporazione dell'acqua fino al raggiungimento dell'equilibrio con l'ambiente circostante. In Fig. 9 sono mostrati alcuni risultati preliminari acquisiti in 10 giorni. I dati sono presentati in termini di massa d'acqua e di costante dielettrica relativa del campione  $\epsilon_r$ . I dati grezzi, cioè i valori di periodo e l'output dell'ADC, sono stati processati applicando una media mobile con una finestra di 100 campioni.

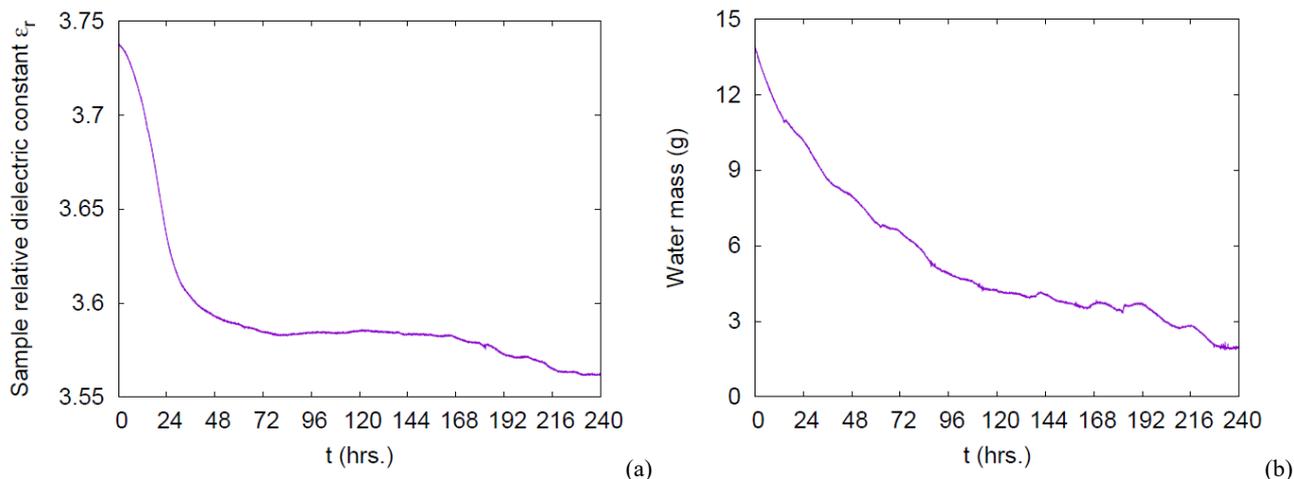


Figura 9. Risultati di una singola acquisizione di 10 giorni. (a) Costante dielettrica relativa  $\epsilon_r$  del campione in funzione del tempo. (b) Massa di acqua contenuta nel campione in funzione del tempo

I risultati preliminari dimostrano come l'apparato sia promettente e rappresenti un miglioramento rispetto al metodo di misura impiegato in precedenza. Sia l'apparato che l'analisi sono in fase di ulteriore sviluppo. Per esempio, è possibile correggere le misure in funzione della temperatura e umidità ambientali. È già stato osservato che le fluttuazioni del valore di peso misurato, visibili in particolare per  $t = 144 \div 240$  hrs in Fig. 9b, sono coerenti con le fluttuazioni della temperatura registrata nella stanza, non riportate qui. Pertanto, in un futuro miglioramento dell'analisi i dati del peso saranno corretti tenendo conto della temperatura ambientale. Inoltre, la stima della costante dielettrica relativa del campione riportata in Fig. 9a è confrontabile, ma più bassa, rispetto al valore nominale del cemento ( $\cong 4.5$ , mentre con il primo apparato si era registrato un valore medio pari a 5.4, vedi Fig. 7c). La discrepanza è attribuibile a una stima imprecisa del volume del campione: da un lato, il campione presenta uno spessore irregolare, e dall'altro, non è stata valutata la porosità del campione stesso. In futuro questi effetti verranno tenuti in considerazione e sarà possibile ottenere stime più accurate della costante dielettrica.

## 5. CONCLUSIONI

La ricerca riportata nel presente articolo mostra che vi è una relazione fra conducibilità termica e permittività elettrica dei campioni analizzati secondo una legge lineare con coefficiente angolare noto, e che è possibile realizzare un apparato sperimentale relativamente semplice per la sua misurazione. Analogamente, raffinando opportunamente la misura, è possibile anche porre in relazione la permittività elettrica del campione con il suo contenuto d'acqua, monitorandone la variazione del tempo in maniera continua e precisa. Quanto proposto è tuttavia un primo iniziale passo di una ricerca più ampia e complessa che investiga la possibilità di risalire alla trasmittanza termica di elementi di involucro per il tramite di una legge che la correli alle proprietà elettriche degli stessi. Ulteriori fasi della ricerca dovranno considerare anche le componenti resistive ed induttive dei campioni, necessarie per conoscere in maniera completa l'impedenza degli stessi. Va inoltre aumentato il numero dei campioni considerati per provare che ci sia una relazione certa e conoscibile (anche non necessariamente lineare) tra le due grandezze considerate. Va inoltre provato che tale rapporto persiste anche

in caso di campioni composti da più materiali, stratificati o amalgamati. Infine, va messo a punto un apparato di misura che possa essere agevolmente trasportato e utilizzato in opera, su edifici in condizioni reali di impiego.

## 6. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio, *sulla prestazione energetica nell'edilizia (rifusione)*. Brussel: Unione Europea, 2010, <<https://eur-lex.europa.eu>>. (Ultima consultazione: 5/5/2019)
- [2] Direttiva 2018/844/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio, *modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica*. Brussel: Unione Europea, 2018, <<https://eur-lex.europa.eu>>. (Ultima consultazione: 5/5/2019)
- [3] Decreto Interministeriale 26 giugno 2015, *Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici*, 2015, <[www.sviluppoeconomico.gov.it/index.php/it/](http://www.sviluppoeconomico.gov.it/index.php/it/)>. (Ultima consultazione: 5/5/2019)
- [4] UNI ISO 9869-1:2015, *Isolamento termico - Elementi per l'edilizia - Misurazione in situ della resistenza termica e della trasmittanza termica - Parte 1: Metodo del termoflussimetro*. Milano: Ente Italiano di Normazione (UNI); 2015
- [5] ISO 9869-2:2018, *Thermal insulation -- Building elements -- In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance Infrared method for frame structure dwelling*. Brussels: European Committee for Standardization (CEN); 2018
- [6] Albatici R.; Tonelli A.M., Infrared thermovision technique for the assessment of thermal transmittance value of opaque building elements on site. *Energy and Buildings*, 42 (2010), p. 2177–2183.
- [7] Albatici R.; Passerini F.; Tonelli A.M.; Gialanella S., Assessment of the thermal emissivity value of building materials using an infrared thermovision technique emissometer. *Energy& Buildings*, 66 (2013), p. 33–40.
- [8] Albatici R.; Tonelli A.M.; Chiogna M., A comprehensive experimental approach for the validation of quantitative infrared thermography in the evaluation of building thermal transmittance. *Applied Energy*, 141 (2015), p. 218–228.
- [9] Fokaides P.A.; Kalogirou S.A., Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-value) in building envelopes. *Applied Energy*, 88 (2011), p. 4358–65.
- [10] Dall'O G.; Sarto L.; Panza A., Infrared screening of residential buildings for energy audit purposes: results of a field test. *Energies*, 6 (2013), p. 3859–78.
- [11] Albatici R.; Cristofolini M.; Tonelli A.M., Comparison between thermal transmittance and electrical impedance in building walls. In: *Proceeding of the 40th IAHS World Congress on Housing - Sustainable Housing Construction*. ITeCons, Coimbra, Portugal. 2014, pp. 1-10.
- [12] Stuart Johnson J., Correlation of electrical and thermal properties of building brick. *Journal of the American Ceramic Society*, 21 (1928), n. 3, p. 79-85.