

Experimental apparatus for the determination of thermal conductivity and humidity in building materials by means of electrical permittivity measurements

Alessio Perinelli, Francesco Finotti, Arnaldo M. Tonelli,
Leonardo Ricci, Rossano Albatici*

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 acts 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. INTRODUCTION

The Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings [1], recently integrated and updated with the Directive (EU) 2018/844 [2] and with the Italian national laws, including the Decree 26/06/2015 [3], stressed the necessity to decrease heating and cooling energy consumptions for both existing and new buildings. Despite that, there is still a lack of diagnostic tools for verifying the real thermal behaviour of the building envelope. To date, the only references are represented by the International Standard ISO 9869-1:2015 [4], concerning the heat flow meter method, and the ISO 9869-2:2018 [5] that describes the method for measuring the thermal resistance and thermal

Alessio Perinelli

Dipartimento di Fisica,
Università di Trento, via
Sommarive 14, Trento, 38123,
Italia

Francesco Finotti

Geo.Ti.La, corso Bettini 58,
Rovereto, 38060, Italia

Arnaldo M. Tonelli

Geo.Ti.La, corso Bettini 58,
Rovereto, 38060, Italia

Leonardo Ricci

Dipartimento di Fisica,
Università di Trento, via
Sommarive 14, Trento, 38123,
Italia

Rossano Albatici

DICAM, Dipartimento di
Ingegneria Civile, Ambientale e
Meccanica, Università di Trento,
via Mesiano 77, Trento, 38123,
Italia

* Corresponding author

Tel.: +39-0461-282622;

fax: +39-0461-282672;

e-mail: rossano.albatici@unitn.it

transmittance of opaque building elements with a thermal capacity lower than $30 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ on existing buildings with frame structure dwellings, using an infrared (IR) camera. The authors have already probed the possibility of using in-situ thermography in order to evaluate with good approximation the thermal transmittances of opaque building components [6-8]. However, there are still some limitations in this field due essentially to the specific boundary conditions needed. As confirmed by other researches [9-10], a constant thermal gradient of $10\text{-}15^\circ\text{C}$ between internal and external environment is necessary, both before and after the measurement. Therefore, an investigation about the potential relationship between thermal transmittance and electrical impedance of multi-layered panels made of typical building materials has been undertaken [11]. The purpose was to indirectly understand the thermal behaviour of these panels through a rapid, non-destructive and repeatable procedure, without being influenced by outdoor environment conditions and so repeatable throughout the year, at any time. As far as the authors know, the only previous attempt to follow this path was made in 1938 by J. Stuart Johnson [12], within a laboratory environment and considering only components made of brick. The research highlighted some problematic issues such as the need to use high frequency alternating current and the difficulty in reducing potential noises produced by measurement equipment. Moreover, the results, which frequently depended on uncontrollable a priori causes, were hard to read.

For this reason, we decided to pursue a more well-structured step-by-step process of increasing complexity. The starting point was the analysis of samples of homogeneous material, undertaken under laboratory controlled conditions, in order to measure materials permittivity and to compare it with thermal conductivity values.

Permittivity is correlated to the capacitive component of the samples and to their electrical impedance too. This procedure might successfully be used also to determine the humidity of the material.

2. METHODOLOGY

The initial assumption is that the samples under investigation are made of material which can be considered ideal insulator (infinite electric resistance) with null inductive component. Proceeding this way, the impedance associated to the specific sample is exclusively a result of the material dielectric properties. The fact that most of the good electrical conductor materials are also efficient thermal conductors and that bad electrical conductors are characterized by a low thermal conductivity, supports this approach.

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 $30 \text{ kJ/m}^2\text{K}$. 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 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 $10\text{-}15^\circ\text{C}$ 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

Four square panel having a side length of 20cm and 2cm thick, respectively made of fir wood, glass, polystyrene and concrete are examined. Each sample consists of a single material and can be consequently considered as homogenous and isotropic. Thermal properties have been previously defined by the Industrial Engineering Department of the University of Padua through the hot disk method, in order to obtain values which can be related to electrical measurement results. [The authors thank Dr. Manuela Campanale and Dr. Lorenzo Moro of the University of Padua for their kind collaboration.]

2.1. MEASUREMENT EQUIPMENT

The apparatus for measuring impedance (Fig. 1) is composed of two square metal plates having a side length of 30cm which are placed concentrically and locked with four nylon rails. Pressing on the sample faces, a large condenser is formed, with the sample working as a dielectric. The circuitry is incorporated in a metal box directly welded on the plate which is grounded. Thanks to two BNC connectors, it is possible to operate the circuitry and immediately read the results.

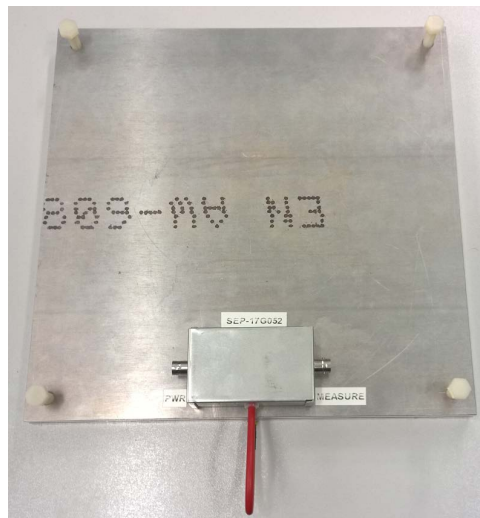


Figure 1. The apparatus with the electric circuit incorporated in the metal box.

The measurement of the resistive component of impedance of the apparatus is quite complicated due to several reasons like, firstly, the difficulty to create a good electrical contact between the plates and the sample. This led to consider the sensor as an exclusively capacitive element, in order to weigh the sample dielectric characteristics. Considering the circuitry, the sensor can be seen as a combination of condensers (C_1 , C_2 , C_x and C_b) positioned as shown in Fig. 2a, each one associated to a portion of the volume between the two plates. Eq.1 provides the total capacity of the sensor C_{tot} .

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, in modo che il valore di conducibilità termica potesse poi essere posto in relazione con i risultati delle misure elettriche. [Gli autori ringraziano

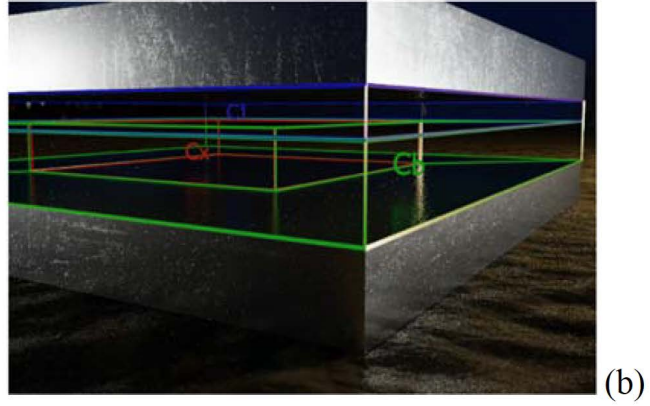
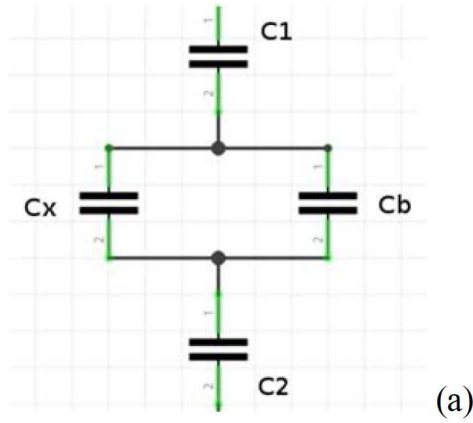


Figure 2. The circuitry associated to the apparatus (a), subdivision of the volume between the two plates of the equipment (b).

The portions of the volume associated to C_1 , C_2 , C_x and C_b (Fig. 2b) are:

- the volume determined by the dimensions of the sample located in the centre of the sensor, which contributes to the total capacity of the sensor itself with C_x ;
- “edge volume”, i.e. the volume with the same height as the sample and with the base equal to the difference between the surface occupied by the samples and the plate area, which contributes with C_b ;
- the volume identified by the air layer which separates the upper plate and the aforementioned volumes, which contributes with C_1 ;
- the volume identified by the air layer which separates the lower plate and the first two depicted volumes, which contributes with C_2 .

The total sensor capacity C_{tot} is equal to:

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

C_2 can be considered infinite since the sample rests on the lower plate.

Hence:

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

If C_1 is much higher than the sum of C_x and C_b , i.e. if the upper plate is very close to the upper face of the sample, then:

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

Referring to the circuitry, Z_s impedance associated to the sensort is equal to:

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

with i representing the intensity of the circuit current.

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.

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.

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 ;

The circuitry built for this study, shown in Fig.3, is a classical divider circuit composed of a resistor R and the sensor Z_s described above. A sinusoidal signal with potential difference V_{in} supplies the circuit and is taken as a reference by a 'lock-in' tool to detect phase signals. The signal at the output of the V_{out} circuit is thus monitored to measure amplitude A and phase difference ϕ . The C_{tot} capacity of the circuitry can therefore be derived as:

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

where F is the frequency in Hertz to which the circuitry is powered.

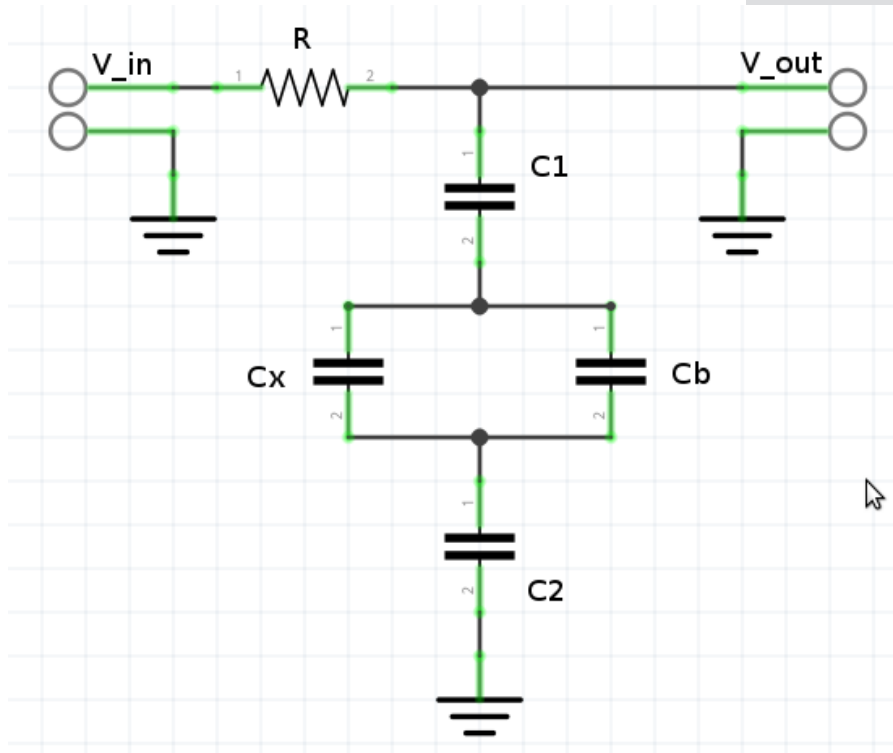


Figure 3. Circuit diagram.

2.2 MEASUREMENT PROCEDURE - FIRST PHASE

During the first phase of the experimentation, in order to test the assessed methodology, only one sensor is used and the measurement have been repeated twice, with and without sample. The distance between the two plates, which are close enough to suppose $C_1 \gg C_x + C_b$, is maintained, using some shims to extract the sample from the equipment. Hence, after positioning the sample in the centre of the sensor, amplitude A and phase difference ϕ are measured at difference frequencies. As mentioned before, measurements are repeated keeping the same configuration and without the sample (only air is present). Following this methodology, the only capacitive component that influences C_{tot} values is C_x .

- 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:

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

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.

When the sample c is present:

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

When the sample is missing and his volume is filled by air a:

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

Considering the difference between the total capacities of the sensor Z_s with and without the sample, the dependence on the edge capacity C_b is eliminated.

Using (3):

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

The volume identified by C_x has the size of the sample, surface S and thickness

1. The capacities C_c and C_a are respectively:

$$C_c = (\epsilon_0 \epsilon_r (\text{sample})) * S / l \quad (9)$$

$$C_a = (\epsilon_0 \epsilon_r (\text{air})) * S / l \cong \epsilon_0 * S / l \quad (10)$$

where ϵ_0 is the dielectric constant of the vacuum (vacuum permittivity).

Since the relative dielectric constant of air $\epsilon_r (\text{air}) = 1.0006 \approx 1$ it is possible to replace (10) in (9) and approximate C_c as follows:

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

where ϵ_r is the relative permittivity of the sample.

Consequently, by replacing (11) in (8), the difference in measured capacity

ΔC_{tot} results:

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

from which it is possible to derive ϵ_r as:

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

The resistance R of the circuit was chosen equal to $1M\Omega$ in order to maximize its sensitivity. To avoid any external interference during the measurements the equipment was placed in a Faraday cage (Fig. 4).

The circuit was powered at different frequencies with the function generator provided inside the Stanford Research Systems lock-in tool, model SR830 DSP. The measurements of the amplitude of the input voltage V_{in} and of the output voltage V_{out} , those of the phase shift of the input signal with respect to the synchronization signal ϕ_0 and the correspondent for the output signal ϕ_{out} , were collected.

The frequencies at which measurements were made are in the range $300 \div 1500\text{Hz}$ at 100Hz intervals and the amplitude of the input signal has been

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 ϕ . Si può quindi ricavare la capacità C_{tot} del circuito come:

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

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

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 $C_i \gg C_x + C_b$ (come definito in precedenza). Vengono quindi misurate l'ampiezza A e la differenza di fase ϕ 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 ϵ_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 ϵ_r è la permittività relativa del campione. Conseguentemente, sostituendo

set at 1V peak-to-peak. After estimating C_a as described in (10), the C_{tot} total capacity measurements of the equipment in the configuration with and without samples were collected. Finally, the relative permittivity ϵ_r was calculated with (13).

(11) in (8), la differenza di capacità misurata ΔC_{tot} risulta:

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

da cui è possibile ricavare ϵ_r come:

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

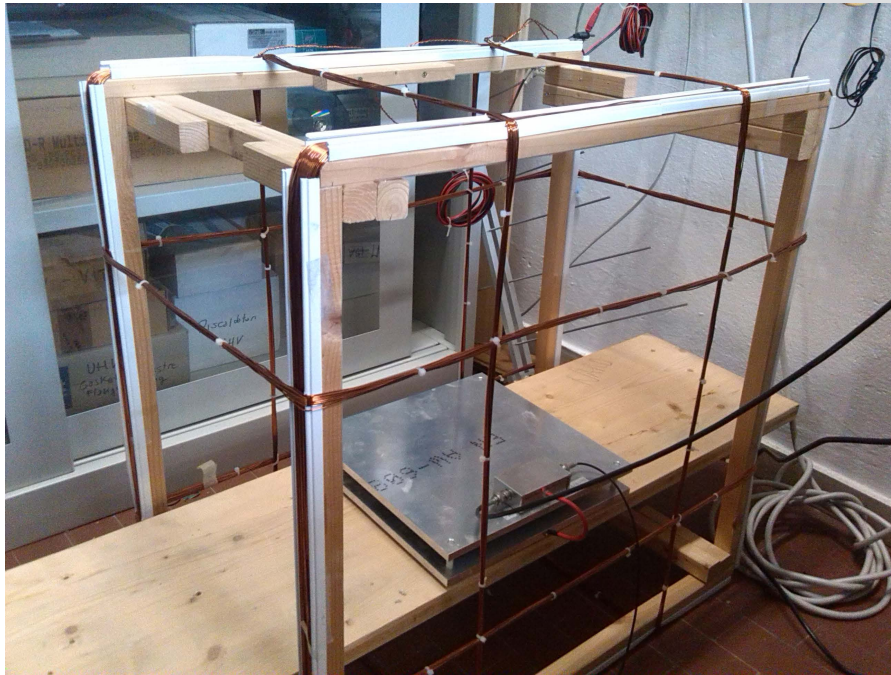


Figure 4. The apparatus placed in a Faraday cage.

2.3 MEASUREMENT PROCEDURE - SECOND PHASE

During the second phase, two in-parallel measurement sensors have been used in order to collect data with and without the sample simultaneously (Fig. 5).

This process allows to remove every uncertainty due to measurement repetitions, in particular those correlated to boundary condition variations (environment temperature and humidity). It is also possible to test a sample and a referenced capacity at the same time.

Even the sensor and the measurement procedure have been improved. The instrumentation is now composed of two identical capacitors, both made of two square aluminium plates having a side length of 30cm, distant 3cm one from the other and fixed together using spacers and plastic screws. The capacitors are located on a rocker arm with equal sides hanging on a wooden structure. Each of them is the capacitive element of a relaxation oscillator. By measuring the period of the oscillators, it is possible to estimate the dielectric constant of the sample located in the capacitor. In order to improve the electromagnetic isolation of the sensor (which in the previous equipment

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 ϕ_0 e il corrispettivo per il segnale in uscita ϕ_{out} .

Le frequenze a cui sono state effettuate le misure sono comprese nel range $300 \div 1500\text{Hz}$ a intervalli di 100Hz e l'ampiezza del segnale in ingresso è stato impostato a 1 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 ϵ_r come in (13).

2.3 PROCEDURA DI MISURA - SECONDA FASE DELLA SPERIMENTAZIONE

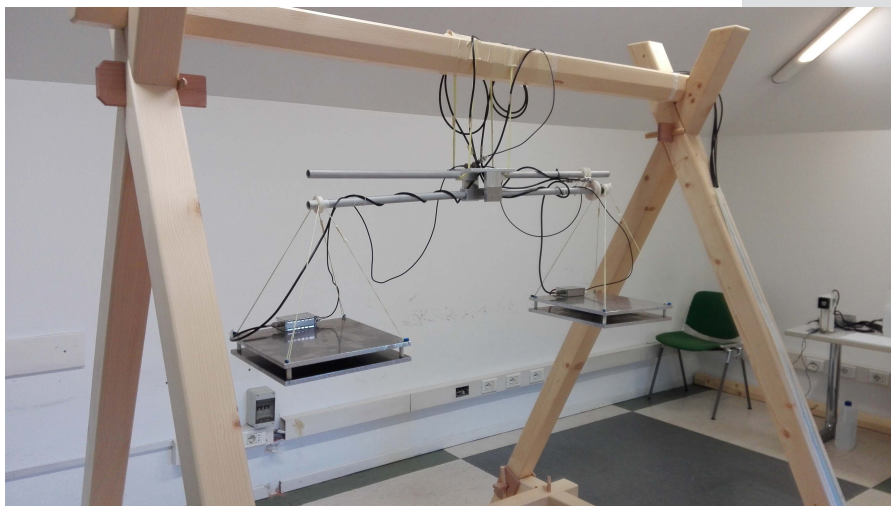


Figure 5. The new apparatus made of two in-parallel measurement sensors.

was guaranteed by the Faraday cage), a third thinner plate is fixed below the pair of plates and grounded as the upper plate. Fig. 6 shows the new operating system.

Since it is a time-measurement (that is, of the period of the oscillators), this system is more accurate than the previous one, in which the detection was carried out in phase by means of a lock-in amplifier.

In order to compare the dielectric constant measurement ϵ_r of the sample with the time variation of its water content, the weight of the latter is measured simultaneously with the oscillator periods. To this end, the two capacitors constitute the plates of a scale with equal arms. A load cell is attached to one of the two arms to measure the weight difference between the two arms. The load cell consists of a Wheatstone bridge read by an ADC (Analog to Digital Converter). The period measurement is undertaken using an FPGA (Field Programmable Gate Array), measuring the time T_N each oscillator takes to perform $N = 1280$ oscillations and then calculating the average period T_N / N . Since the oscillation frequency of the oscillators with (or without) the sample is about 3.5 kHz (2.3 kHz), the acquisition takes about half a second. The 24 bits produced by the ADC that reads the load cell are acquired by the same FPGA together with the measurement of the periods. The data are transmitted from the FPGA to a computer as soon as they are available. The system has been properly calibrated both in weight and in capacitance. During acquisition, the temperature and relative humidity of the testing environment are recorded by an independent system every 5 minutes.

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).

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.

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 ϵ_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 capacitori costituiscono i

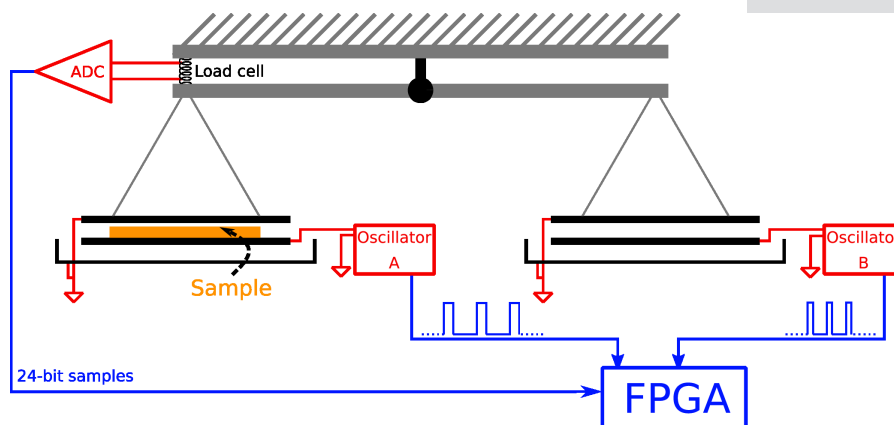


Figure 6. The operating principle of the new measuring system.

3. RESULTS AND DISCUSSION

For the sake of brevity, the graphs of the permittivity ϵ_r of the four samples as a function of the frequency in Hertz (Fig. 7), measured with the first instrumentation, are reported below.

Considering concrete, two tests were undertaken, with dry and wet (after three days of bathing in a container full of water) test specimens.

It should be noted that basically the values are constant with the variation of the frequency considered. The trends found were interpolated with a constant function to find the reference value of ϵ_r for each investigated material.

As mentioned above, it is reasonable to think that the resistive and inductive components of the impedance associated with the samples tend respectively to infinity ($R_c \rightarrow \infty$) and zero ($L_c \rightarrow 0$) because of the nature of the materials itself of which they are composed. The approximation made for this preliminary analysis is therefore to consider the materials as if they had only capacitive properties.

The following table (Tab. 1) shows the reference permittivity values obtained for the different samples, with the relative thermal conductivity values measured in laboratory.

It's possible to notice that ϵ_r of the polystyrene is very close to that of the air, since the volume of polystyrene consists mainly of air. In a similar way, comparing ϵ_r of dry and wet concrete, the presence of water contributes significantly to the increase in permittivity. Although the number of samples is insufficient to draw definitive conclusions, a correlation between the thermal and electrical properties of the materials is noted, as highlighted in the graph in Fig. 8.

We chose to interpolate the graph with a linear function of angular coefficient (or proportionality constant between λ and ϵ_r) k_m and intercept $q = 1$. The latter

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 . Poiché 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.

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

Per brevità di trattazione, vengono di seguito riportati direttamente i grafici della permittività ϵ_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.

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 ϵ_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

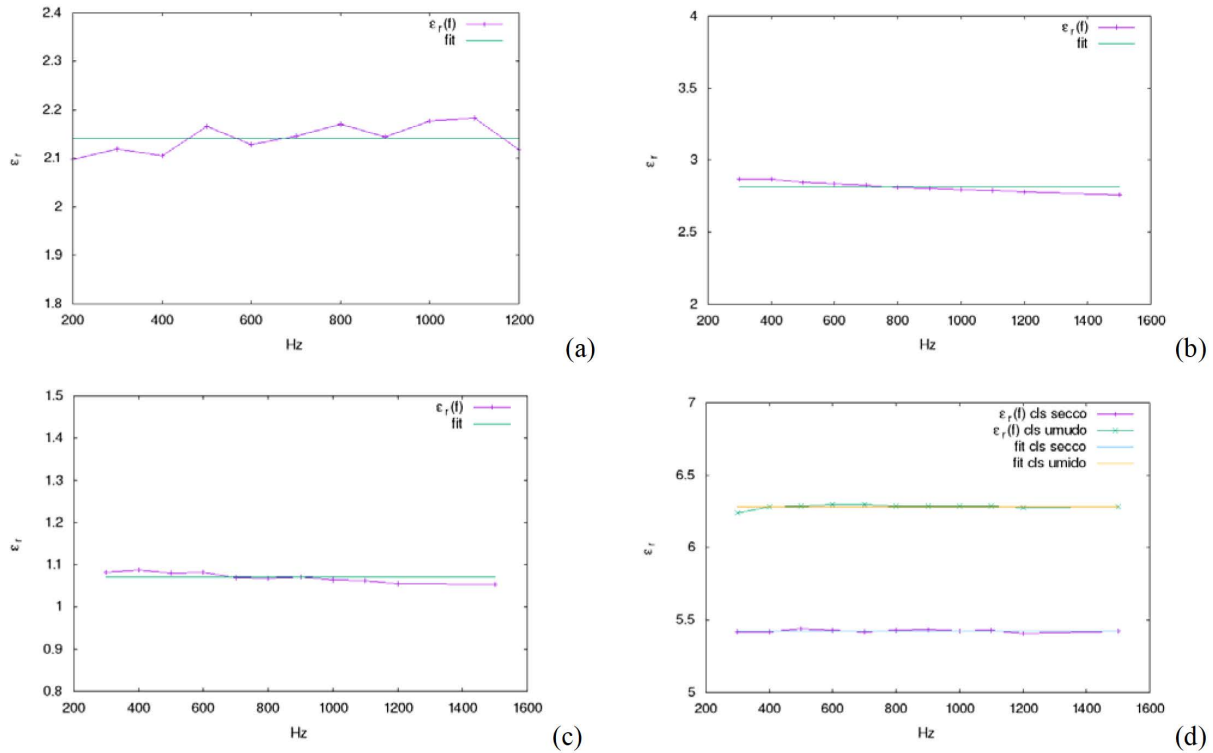


Figure 7. Plot of permittivity ϵ_r of the four samples according to the frequency considered:
(a) fir wood, (b) glass, (c) polystyrene, (d) dry and moist concrete (upper curve).

value is defined since the thermal conductivity of the vacuum must be zero. The ratio between thermal conductivity and electrical permittivity is therefore equal to:

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

where

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

The equipment composed of the two sensors and the rocker arm has been used to correlate permittivity and moisture content of the material. For this purpose, a series of ever more refined measurements have been made on wet concrete, evaluating the variation of its electrical properties during its drying. The wet sample is initially placed in one of the two capacities. The period of

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.

È possibile notare come l' ϵ_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' ϵ_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

sample	λ [W/m ² K]	ϵ_r
polystyrene	0.0348	1.070 ± 0.003
fir wood	0.1718	2.141 ± 0.009
glass	1.0240	2.82 ± 0.01
dry concrete	1.6070	5.425 ± 0.002
moist concrete	---	6.283 ± 0.004

Table 1. Thermal conductivity and electrical permittivity of the four materials considered.

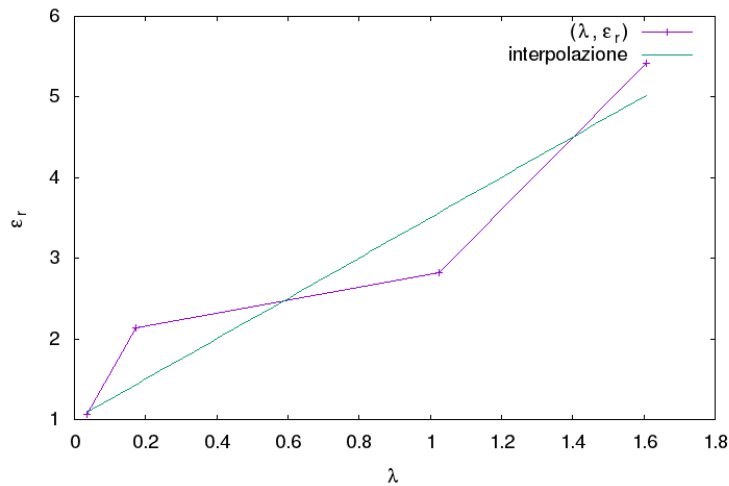


Figure 8. The correlation between thermal conductivity (λ) and relative electrical permittivity (ϵ_r) of the samples.

the two oscillators and the output of the load cell are measured continuously for several days, necessary for the complete evaporation of the water and its equilibrium with the surrounding environment. Fig. 9 shows some preliminary results collected in 10 days. Data are presented in terms of water mass and dielectric constant of the sample ϵ_r . The raw data, i.e. the period values and the output of the ADC, were processed by applying a running average with a subset of 100 samples.

The preliminary results show that the equipment is promising and represents an improvement of the measurement method used before. Both the equipment and the analysis are being further developed. For example, measurements can be corrected for ambient temperature and humidity. It has already been observed that the fluctuations of the measured weight value, visible in particular for $t = 144 \div 240$ hrs in Fig. 9b, are consistent with the fluctuations of the temperature recorded in the room, not reported here. Therefore, in a future improvement of the analysis the weight data will be corrected considering the environment temperature.

Moreover, the estimation of the dielectric constant of the sample reported in Fig. 9a is comparable, but lower, than the nominal value of concrete (≈ 4.5 , while with the first equipment an average value equal to 5.4 was recorded, see Fig. 7c).

The discrepancy is caused by an inaccurate estimation of the sample volume: although the sample has an irregular thickness, the porosity of the sample itself has not been evaluated. In the future these effects will be considered and it will be possible to obtain more reliable evaluations of the dielectric constant.

le proprietà termiche ed elettriche dei materiali, fenomeno evidenziato nel grafico in Fig. 8.

Si è scelto di interpolare il grafico con una funzione lineare di coefficiente angolare (o costante di proporzionalità tra λ e ϵ_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 bilanciere 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 ϵ_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.

I risultati preliminari dimostrano come l'apparato sia promettente

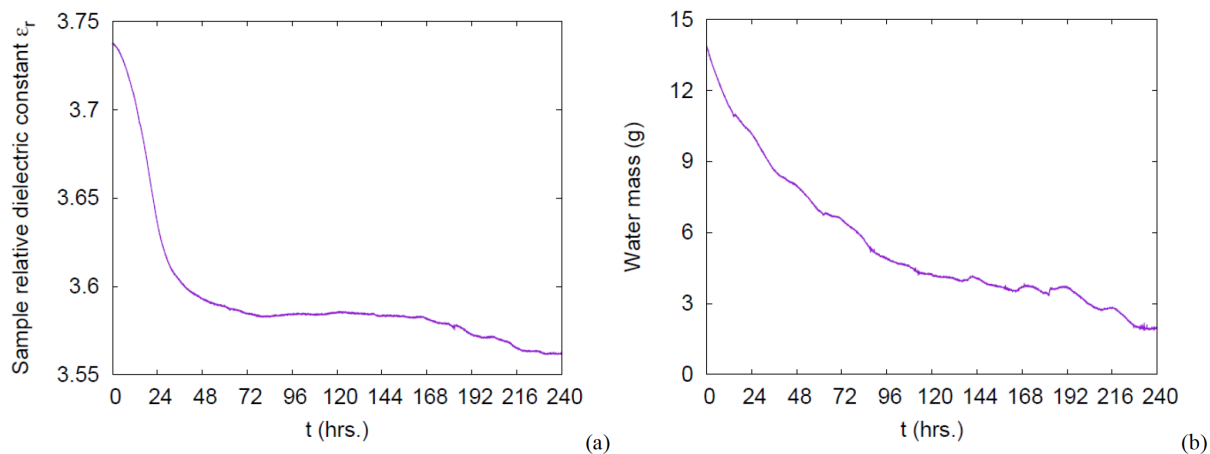


Figure 9. The results of a single 10-days acquisition. (a) Relative dielectric constant ϵ_r of the sample as a function of time. (b) Mass of water contained in the sample as a function of time

4. CONCLUSIONS

The research in this article shows a relationship between thermal conductivity and electrical permittivity of four tested samples, according to a linear law with a defined slope coefficient. A relatively simple instrumentation for its measurement can be easily realized. Similarly, by appropriately refining the measurement, it is also possible to relate the electrical permittivity of the samples with their water content, monitoring the trend over time. What is proposed, however, is a first step in a broader and more complex research. The possibility of defining the thermal transmittance of the building envelope by means of a law that correlates it to the electrical properties of the envelope itself should be investigated more. Further developments must consider the resistive and inductive components of the samples too, in order to fully assess their impedance. The number of samples considered must also be increased to prove the relationship between the two quantities considered (even if not necessarily linear), even in the case of multi-material, stratified or mixed samples. Finally, a measuring apparatus that can be easily transportable and used on site under real conditions should be improved.

5. REFERENCES

- [1] Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council, *on the energy performance of buildings (recast)*. European Union: Brussels, 2010, <<https://eur-lex.europa.eu>>. (Last viewed: 5/5/2019)
- [2] Directive 2018/844/EU of the European Parliament and of the Council, *amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency*. European Union: Brussels, 2018, <<https://eur-lex.europa.eu>>. (Last viewed: 5/5/2019)
- [3] Interministerial Decree 26 June 2015, *Application of energy performance calculation methodologies and definition of minimum prescription and requirements for buildings*, 2015, <www.sviluppoeconomico.gov.it/index.php/it/>. (Last viewed: 5/5/2019)
- [4] UNI ISO 9869-1:2015, *Thermal insulation -- Building elements -- In-situ measurement of*

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 (≈ 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.

4. 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

thermal resistance and thermal transmittance - Part 1: Heat flow meter method. Milan: 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.

alla trasmittanza termica di elementi di involucro per il tramite di una legge che la correla 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.