

**UNIVERSITÁ POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTÁ DI INGEGNERIA**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE**

*Dipartimento di Scienza e Ingegneria della Materia, dell’Ambiente ed Urbanistica*



**"I conglomerati self heating: stato dell’arte"**

**"The self heating conglomerates: state of art"**

**Relatore:**

*Prof.ssa Francesca Tittarelli*

**Tesi di laurea di:**

*Giorgia Piccirillo*

*Matr. 1078826*

*Anno Accademico A.A. 2019/2020*

## Indice

1. Introduzione
2. Calcestruzzo elettricamente conduttivo
  - 2.1. Materiali elettricamente conduttivi
  - 2.2. Resistività elettrica
  - 2.3. Misure di resistività elettrica
3. Prove sperimentali
  - 3.1. Calcestruzzi conduttivi con fibre d'acciaio e grafite
    - 3.1.1. Materiali utilizzati e preparazione del campione
    - 3.1.2. Misurazione della resistività elettrica
  - 3.2. Conglomerati bituminosi rinforzati con scorie d'acciaio
    - 3.2.1. Materiali utilizzati
    - 3.2.2. Metodi di prova
  - 3.3. Calcestruzzo rinforzato con fibra di carbonio
    - 3.3.1. Materiali utilizzati e preparazione del campione
    - 3.3.2. Test in condizioni di laboratorio
    - 3.3.3. Test di prevenzione e stagionatura
  - 3.4. Calcestruzzo rinforzato con fibre di carbonio nell'ingegneria stradale
    - 3.4.1. Materiali utilizzati
    - 3.4.2. Mix design e preparazione dell'ECON
    - 3.4.3. Metodi di prova
      - 3.4.3.1. Conducibilità elettrica
      - 3.4.3.2. Sensibilità termica
      - 3.4.3.3. Effetto elettrotermico
  - 3.5. Calcestruzzo conduttivo a base di fibre di carbonio riciclate
    - 3.5.1. Materiali utilizzati
    - 3.5.2. Mix design e preparazione dei campioni
    - 3.5.3. Metodi di caratterizzazione
      - 3.5.3.1. Caratterizzazione elettrica
      - 3.5.3.2. Caratterizzazione termica
        - 3.5.3.2.1. Ciclo di riscaldamento di 3h in lastre
        - 3.5.3.2.2. 2 cicli di 8h riscaldamento/16h raffreddamento in lastre

- 3.5.3.2.3. Caratterizzazione termica di banchi in scala reale
- 3.6. Calcestruzzo rinforzato con fibre di carbonio e aggiunta di materiali nano e micro conduttivi
  - 3.6.1. Materiali utilizzati
  - 3.6.2. Metodi sperimentali
    - 3.6.2.1. Effetto del tempo di conduzione sulla resistività del calcestruzzo elettricamente conduttivo
    - 3.6.2.2. Sensibilità alla pressione del calcestruzzo conduttivo sotto carico a compressione
- 3.7. Calcestruzzo conduttivo composito trifase
  - 3.7.1. Materiali utilizzati
  - 3.7.2. Prova di riscaldamento

## 1. Introduzione

Il concetto di città intelligenti è emerso dalle opportunità create dall'era digitale per affrontare le sfide associate al nuovo contesto urbano. L'innovazione digitale offre la possibilità di essere più efficienti ed efficaci, combattendo meglio le sfide nelle singole infrastrutture, nei sistemi infrastrutturali e nell'intera società. Man mano che le “soluzioni intelligenti”, o tecnologie digitali, diventano più comuni nelle nostre città, i cosiddetti “materiali intelligenti” hanno ricevuto una crescente attenzione all'interno della comunità scientifica. Il loro potenziale è percepito come un elemento chiave per portare valore alle nostre aree urbane e tradurlo in una proficua pratica commerciale.

La ricerca sui materiali cementizi utilizzati per l'edilizia civile ed edile è stata tradizionalmente focalizzata sulle caratteristiche di prestazione meccanica e durabilità per ricoprirne la principale funzionalità, quella strutturale. Tuttavia, oggi vi è una richiesta di materiali multifunzionali che non solo sono in grado di coprire i requisiti strutturali, ma incorporano anche caratteristiche aggiuntive che forniscono al materiale risultante una gamma più ampia di applicazioni. La maggior parte delle proprietà funzionali attuali nel calcestruzzo intelligente si basano sull'incorporazione di riempitivi funzionali o aggregati per generare proprietà conduttive nel materiale. Il calcestruzzo conduttivo è stato utilizzato come anodo per l'estrazione elettrochimica di cloruro, schermatura dalle onde elettromagnetiche, calcestruzzo auto-sensibile, protezione catodica, raccolta di energia e controllo elettrotermico, tra gli altri.

Il calcestruzzo elettrotermico si riferisce a quel materiale che raggiunge il riscaldamento per effetto Joule. La ricerca sul calcestruzzo elettrotermico si è concentrata principalmente sulle applicazioni antighiaccio e scioglimento della neve nelle strade e sul riscaldamento elettrico a pavimento interno [1]. Le condizioni meteorologiche avverse, in inverno, possono facilmente portare all'accumulo di neve e alla formazione del ghiaccio sul manto stradale, il che aumenta la probabilità di incidenti stradali e influisce gravemente sulla circolazione. Secondo le statistiche, circa il 15-30% degli incidenti stradali invernali è correlato alla presenza di manto nevoso sulle strade [5]. Le prestazioni degli hub di trasporto come gli aeroporti, durante le avverse condizioni meteorologiche invernali, è un aspetto importante della ricerca in questo settore. Le rigide condizioni meteorologiche invernali possono influire negativamente sull'accessibilità agli hub internazionali e nazionali, con conseguenze economiche potenzialmente gravi durante eventi nevosi significativi [2]. Pertanto, non è solo di importanza sociale ma anche di valore economico, studiare

modalità efficaci di scioglimento della neve e del ghiaccio sulle strade. I metodi tradizionali di rimozione della neve e del ghiaccio includono il metodo meccanico e il metodo di fusione del sale [5, 8, 9, 12]. Il metodo meccanico è estremamente inefficiente, lungo e costoso ed è adatto solo per la rimozione di sezioni difficili. Lo scioglimento chimico della neve è uno dei metodi più utilizzati attualmente. Questo consiste nello scioglimento del ghiaccio e della neve ottenuto spruzzando sostanze chimiche (come il cloruro di sodio e il cloruro di calcio) sulla pavimentazione [5], ma ciò presenta importanti inconvenienti, quali: (i) corrosione delle armature in acciaio delle strutture in calcestruzzo, contaminazione dei suoli e delle acque sotterranee; e (iii) incidenti e costi assicurativi. Inoltre, i sali antigelo hanno un'efficienza molto bassa a temperature basse (inferiori a  $-10^{\circ}\text{C}$ ) [6].

Lo svantaggio dei metodi tradizionali di rimozione della neve e del ghiaccio ha spinto i ricercatori a cercare nuovi metodi e il calcestruzzo elettricamente conduttivo (ECON) è una delle potenziali direzioni di ricerca [3, 12].

## **2. Calcestruzzo elettricamente conduttivo (ECON) [2,5,7,11,12,14,18]**

Negli ultimi anni, sono stati condotti diversi studi sui calcestruzzi elettricamente conduttivi (ECON) per esaminarne l'applicabilità in diversi campi: materiali da costruzione con rilevamento automatico, riflettore di radiazione elettromagnetica e sistemi di pavimentazioni autoriscaldanti. L'ECON è un nuovo tipo di materiale composito caratterizzato da una certa conduttività. I costituenti generali di questo sono cemento, aggregati, acqua e additivi elettricamente conduttivi (ECA); tuttavia, la fonte primaria di conduttività elettrica è la fase ECA che crea un percorso continuo per la conduzione elettrica. La resistenza elettrica del calcestruzzo conduttivo dipende dalla conduttività e dalle proprietà fisiche del materiale, e dall'interazione tra materiali conduttivi e cementanti; inoltre, la proprietà elettrica del materiale conduttivo, la dimensione delle particelle, la forma e la sua distribuzione nel calcestruzzo hanno una grande influenza sulla conduttività di questo.

### **2.1. Materiali elettricamente conduttivi**

Poiché il calcestruzzo si comporta come un materiale dielettrico [1], per ridurre la sua resistività e quindi migliorare la sua conduttività elettrica, vengono aggiunti alla miscela materiali elettricamente conduttivi (ECA).

Gli ECA si dividono principalmente in tre categorie: polvere, fibra e aggregato [5], ed in particolare si ha a che fare con: fibre di acciaio, trucioli di acciaio, fibre di carbonio, polvere di grafite e polvere di nichel [4].

Le **fibre di acciaio [1,7,16]** sono state utilizzate come materiale additivo conduttivo nei primi tempi di produzione del calcestruzzo conduttivo. Quando queste sono presenti nel mezzo alcalino del calcestruzzo, si forma un film passivo che aumenta la resistenza elettrica nel tempo e quindi provoca una diminuzione della resistenza del calcestruzzo elettricamente conduttivo di 60 volte dopo un anno; infatti il flusso di cariche elettriche attraverso il cemento armato con fibre di acciaio, favorisce la corrosione delle fibre e quindi il degrado della funzionalità sia strutturale che termica del materiale. Pertanto non è appropriato utilizzare fibre d'acciaio da sole nel calcestruzzo conduttivo.

Con il continuo sviluppo dell'industria siderurgiche, però, una grande quantità di **scorie d'acciaio [8,9]** viene trattata come rifiuti. Poiché questo ha causato un'enorme pressione sulla produzione e sullo sviluppo delle imprese siderurgiche, ma soprattutto ha provocato inquinamento ambientale, molti paesi si sono occupati di studiare un modo per utilizzare le scorie di acciaio. Inizialmente queste erano utilizzate come materiale di fondo e di base nell'ingegneria stradale, ma, poiché rispetto ad altri materiali di conducibilità termica presentano vari vantaggi come un basso costo, una produzione enorme, un'elevata resistenza e una buona adesione con l'asfalto, ad oggi, vengono utilizzate come aggregato nel calcestruzzo asfaltato in modo tale da migliorarne la conduttività elettrica e consentire la fusione della neve e lo sbrinamento sul marciapiede, il monitoraggio della sicurezza e la gestione intelligente.

Attualmente, la **grafite [5,8,13,16]** è un ECA ampiamente utilizzata per preparare ECON. La grafite è un isomero del carbonio elementare e ha una buona conducibilità elettrica e termica, proprietà chimiche stabili e durata eccellente. Inoltre, la polvere di grafite è più economica rispetto alla fibra di carbonio e ha un buon effetto di dispersione nel conglomerato bituminoso. Come materiale conduttivo, la grafite ha struttura elevata, ampia superficie specifica e buona chimica superficiale. La dimensione delle particelle di grafite, il contenuto di grafite e la resistenza elettrica di contatto sono fattori importanti che determinano la resistività dell'asfalto conduttivo. In generale, la grafite può ridurre efficacemente il valore di resistenza elettrica dell'asfalto, e maggiore è la quantità di grafite, più significativo è l'effetto. Tuttavia, l'aggiunta di grafite può ridurre drasticamente la fluidità della pasta a causa della bassa idrofilia di questa e quindi provocare un indebolimento delle proprietà meccaniche del calcestruzzo d'asfalto, tanto maggiore quanto più è grande la quantità di grafite aggiunta.

Un altro additivo elettricamente conduttivo impiegato con successo per realizzare ECON, è la **fibra di carbonio [5,6,7,11,12,14,16]**. Sebbene l'incorporazione della fibra di carbonio comporti problemi di fluidità della miscela, le proprietà meccaniche di ECON sono migliori. La ragione principale per la scelta delle fibre di carbonio per preparare ECON è che le fibre di carbonio possono ridurre significativamente la resistività del calcestruzzo. La resistività elettrica del normale cemento Portland essiccato all'aria è compresa tra  $6,5 \times 10^5$  e  $11,4 \times 10^5 \Omega\text{cm}$ , mentre la resistività elettrica di ECON con un volume e dosaggi in peso minori della fibra di carbonio può essere ridotta a  $3,6 \times 10 \Omega\text{cm}$ . Il contenuto ottimale di fibra di carbonio nell'ECON è definito da molteplici fattori, il più importante dei quali è il fenomeno della percolazione. Questo consiste nella formazione di una rete continua all'interno del composito cementizio da parte dei materiali ECA; mentre il contenuto in volume di ECA che consente la percolazione è chiamato soglia di percolazione. Per quanto riguarda il comportamento percolativo, il dosaggio effettivo di fibra di carbonio per la produzione di compositi cementizi elettricamente conduttivi è compreso tra lo 0,5% e l'1% sul volume totale e dipende dal tipo di composito (pasta, malta o calcestruzzo), dal formato e dalla lunghezza della fibra. Le fibre di carbonio di lunghezza ridotta e con proporzioni ridotte (rappresentate da un diametro nominale di circa 7-15  $\mu\text{m}$  e una lunghezza di 1-10 mm) si disperdono più facilmente nel calcestruzzo e hanno meno influenza sulla riduzione della lavorabilità. È stato anche scoperto che è possibile ridurre il contenuto di volume di fibre di carbonio da circa il 5% al 3% aumentando la lunghezza di queste da 1 mm a 3 mm. L'aumento della lunghezza della fibra riduce la soglia di percolazione, ma comporta degli svantaggi come la difficoltà di dispersione delle fibre e la perdita di lavorabilità della miscela di calcestruzzo. Quindi il dosaggio della fibra di carbonio dovrebbe essere mantenuto in prossimità della soglia di percolazione, in modo tale da ottenere una conduttività elettrica sufficiente con effetti negativi minimi sulla lavorabilità e sul costo (in quanto le fibre di carbonio costituiscono il componente più costoso di ECON).

Poiché la domanda mondiale di fibre di carbonio vergini spesso supera la capacità di offerta, questo provoca un aumento dei costi sia in termini di energia consumata durante la produzione (fino a 165 kWh / kg), che di prezzo del materiale (fino a 40 £ / kg). Inoltre, la crescente quantità di compositi in fibra di carbonio prodotti solleva preoccupazioni per quanto riguarda lo smaltimento dei rifiuti e il consumo di risorse non rinnovabili, con relativo impatto ambientale negativo. In questo contesto, l'introduzione di **fibre di carbonio riciclate (RCF) [1]** in materiali cementizi conduttivi, potrebbe convertire un prodotto costoso e lo smaltimento dei rifiuti in un materiale riutilizzabile e redditizio con elevata conservazione delle proprietà meccaniche e un risparmio sui costi dal 30 al 40% rispetto alle fibre di carbonio vergine.

Un'altra soluzione proposta per contrastare il costo eccessivo delle fibre di carbonio è l'utilizzo di **fibre ibride [6]**. Queste possono consistere nella combinazione di fibre di carbonio e fibra d'acciaio per ridurre il volume di percolazione al minimo; nel realizzare un ECON con l'aggiunta di un 15% di polvere di grafite e 1,5% di fibre di acciaio; e/o nella combinazione di tre fasi conduttive, ovvero fibre di carbonio, fibre di acciaio e polvere di grafite, ottenendo una resistività minima di circa 320 Ωcm.

## **2.2. Resistività elettrica [4]**

La resistività elettrica del calcestruzzo è una proprietà molto importante del materiale, che può essere definita come la resistenza che il calcestruzzo oppone al flusso di una corrente elettrica attraverso di esso.

Il calcestruzzo è un materiale semiconduttore, ovvero ha una resistività elettrica intorno ai 10<sup>9</sup> Ωm, che cambia al variare di alcune variabili.

La corrente elettrica è trasportata da particelle cariche che fluiscono all'interno dei pori presenti nel calcestruzzo, quindi tutte le variabili come il rapporto acqua/cemento, il tipo di cemento, additivi pozzolanici e il grado di idratazione, che influenzano la struttura del calcestruzzo, influenzano anche la resistività elettrica di questo.

La resistività  $\rho$  è una caratteristica intrinseca di un materiale ed è indipendente dalla geometria del campione. L'equazione che descrive il rapporto tra resistività e resistenza è:

$$\rho = R \cdot K$$

dove R è la resistenza del calcestruzzo; K è un fattore geometrico che dipende dalla forma e dimensione del campione e dalla distanza tra le sonde sul dispositivo di prova.

## **2.3. Misure di resistività elettrica [6,11]**

La resistenza elettrica del calcestruzzo può essere misurata con diversi metodi.

Un metodo di misura generale della resistenza elettrica è il metodo uniassiale a due punte. In questo metodo di prova, viene applicata una certa tensione tra le due superfici parallele del campione di calcestruzzo. Il valore di resistenza (R) è ottenuto dall'Eq. 1, mentre il valore della resistività ( $\rho$ ) è calcolato dall'Eq. (2). Durante il test, un panno inumidito con una soluzione di NaCl viene posto tra il campione di calcestruzzo e l'elettrodo (piastra metallica) per creare un buon collegamento



elettrico. I campioni-elettrodi vengono posti tra due piastre di legno e poi vengono compressi con una pinza.

$$V = I \cdot R$$

$$\rho = R \cdot \frac{A}{L}$$

In queste equazioni, V è la tensione applicata; I sta per la corrente misurata (Amper); R, resistenza elettrica ( $\Omega$ );  $\rho$ , resistività elettrica ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ); A, area superficiale del provino ( $\text{cm}^2$ ) e L è la lunghezza del campione (cm).

Quindi, la resistività elettrica ( $\rho$ ) di tutti i campioni viene calcolata a partire dalla corrente (I) generata applicando quattro diverse tensioni e misurando la resistenza diretta (R).

Un altro metodo per ottenere valori di resistività elettrica consiste nell'effettuare le misurazioni utilizzando un dispositivo di prova, disponibile in commercio con il nome Giatec RCON2 <sup>TM</sup>. Tale dispositivo fornisce il valore di resistività elettrica, in  $\Omega\text{m}$ , per un campione cilindrico di cemento 4 x 8 (203 mm di altezza e 101,6 mm di diametro). Il cilindro di cemento viene posizionato tra due elettrodi paralleli, i quali sono alimentati da una sorgente di corrente elettrica (I), ed una spugna umida e un gel conduttivo vengono applicati a ciascuna estremità dei cilindri per assicurare un buon contatto con gli elettrodi. Poi viene misurata la caduta potenziale ( $\Delta V$ ) e la resistenza (R) viene calcolata con la legge di Ohm:

$$\Delta V = RI$$

La resistività elettrica viene quindi calcolata con quest'equazione.

### 3. Prove sperimentali

Poiché i materiali elettricamente conduttivi (ECA) da inserire in una miscela di calcestruzzo per renderlo autoriscaldante sono di diverso tipo (fibre d'acciaio, fibre di carbonio, ecc.), le prove sperimentali condotte cambiano a seconda del tipo di ECA aggiunto.

### **3.1. Calcestruzzi conduttivi con fibre d'acciaio e grafite [15,17]**

Gli obiettivi di questo studio sono due: (1) progettare un conglomerato bituminoso elettricamente conduttivo con una graduale diminuzione della resistività e (2) indagare l'effetto degli additivi conduttivi sulle proprietà meccaniche delle miscele d'asfalto.

#### **3.1.1. Materiali utilizzati e preparazione del campione**

Per la produzione delle miscele d'asfalto, vengono utilizzati:

- basalto;
- riempitivi calcarei;
- legante per asfalto;
- fibre di acciaio e grafite.

Le fibre di acciaio e grafite vengono utilizzate come additivi conduttivi, ovvero vengono aggiunte alla miscela per far sì che questa sia elettricamente conduttiva. In particolare, le fibre di acciaio hanno diametro di  $0,10 \pm 0,02$  mm, basso tenore di carbonio, resistività di  $7 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$  e densità di circa  $7,5 \text{ g} / \text{cm}^3$ ; invece, la polvere di grafite utilizzata passa al setaccio n. 200 (0,075 mm), ha un contenuto di carbonio del 96,1%, una resistività elettrica di  $10^{-4} \Omega \cdot m$  e una densità di circa  $2,2 \text{ g} / \text{cm}^3$ . Inoltre, la polvere di grafite, insieme al calcare, funge da riempitivo nella miscela.

Uno dei principali fattori che influenzano le proprietà del calcestruzzo fibrorinforzato, è l'agglomerazione o il raggruppamento delle fibre durante il processo di miscelazione. La procedura di miscelazione, le dimensioni e la quantità di fibra aggiunta, influenzano la qualità della miscelazione del calcestruzzo rinforzato con fibre. Una procedura di miscelazione ottimale, che consente di ottenere fibre ben distribuite nella miscela di asfalto, si ottiene partendo con la miscelazione degli aggregati con le fibre di acciaio per 90 s, seguito dall'introduzione dell'asfalto liquido e un altro mescolamento di 90 s, ed infine si ha l'aggiunta dei riempitivi e della grafite, alla miscela, seguita da una miscelazione di altri 90 s.

#### **3.1.2. Misurazione della resistività elettrica**

Le misurazioni di resistività elettrica vengono effettuate a temperatura ambiente di  $15^\circ\text{C}$ . Per misurare la conducibilità elettrica, viene utilizzato il metodo a due sonde. Le aree di contatto sui campioni vengono prima verniciate con una vernice d'argento

altamente conduttiva. Poi, su entrambe le estremità dei campioni cilindrici di cemento, vengono posizionati due elettrodi a piastra di rame, i quali sono collegati con un multimetro digitale. Questo viene utilizzato per misurare la resistività inferiore a  $40 \times 10^6 \Omega$ , mentre, per misurare la resistenza superiore a questo valore, viene utilizzato un tester di resistenza. Una volta misurata la resistenza, la resistività del campione si ottiene dall'equazione:

$$\rho = \frac{RS}{L}$$

dove  $\rho$  è la resistenza elettrica ( $\Omega \cdot m$ );  $L$  è la distanza interna degli elettrodi (m);  $S$  è l'area conduttiva dell'elettrodo ( $m^2$ ) e  $R$  è la resistenza misurata ( $\Omega$ ).

Poiché, l'aggiunta di additivi, può trasformare un legante per asfalto isolante in un materiale elettricamente conduttivo, in questo studio vengono effettuate misure di resistività per 7 contenuti di grafite (2%, 6%, 10%, 14%, 18%, 22% e 26% in volume di leganti per asfalto) e per 7 contenuti di fibre d'acciaio (0,1%, 0,2%, 0,4%, 0,6%, 0,8 %, 1.0% e 1.2% in peso di miscela di asfalto). La variazione di resistività con l'aggiunta di cariche conduttive, può essere suddivisa in quattro fasi: fase isolata, fase di transizione, fase conduttiva e fase di eccesso di additivi.

È possibile ottenere una resistività elettrica sufficientemente bassa aggiungendo una quantità sufficiente di grafite o fibra di acciaio. Nonostante un alto contenuto di fibre d'acciaio riesca a rendere conduttivo il calcestruzzo, la conduttività non può essere manipolata solo con l'uso di fibre. Per consentire una manipolazione precisa della conducibilità, la resistività elettrica deve diminuire gradualmente con l'aumento del contenuto di additivi conduttivi e, pertanto, è stata studiata una combinazione di fibre e cariche. Viene fissato un contenuto di fibre di acciaio allo 0,4% e allo 0,6% in peso di miscela, e poi aggiunti diversi volumi di polvere di grafite. La resistività del conglomerato bituminoso contenente acciaio diminuisce gradualmente all'aumentare del contenuto di grafite.

In conclusione, la conduttività elettrica del calcestruzzo asfaltato può essere migliorata con l'aggiunta di fibra di acciaio o grafite. Nonostante sia molto più efficace raggiungere la conduttività desiderata con fibre di acciaio, piuttosto che con polveri di grafite, una combinazione di fibra di acciaio e grafite consente la graduale diminuzione della resistività del conglomerato bituminoso e quindi un maggiore controllo della conduttività.

## **3.2. Conglomerati bituminosi rinforzati con scorie d'acciaio [9]**

Rispetto ad altri materiali di elevata conducibilità termica, le scorie d'acciaio presentano vari vantaggi come un basso costo, una grande produzione, un'elevata resistenza e una buona adesione con l'asfalto.

Gli autori di questo studio si sono concentrati sul testare quali sono gli aggregati rocciosi più efficaci e le scorie d'acciaio con conduttività termiche più elevate, sul misurare la conducibilità termica e le prestazioni ingegneristiche delle miscele di asfalto con diversi contenuti di scorie d'acciaio (per ottenere il contenuto ottimale di queste), ed infine si sono occupati di studiare l'efficienza dello scioglimento della neve di pavimentazioni realizzate con tali miscele.

### **3.2.1. Materiali utilizzati**

Per la realizzazione del campione, sono stati utilizzati:

- Asfalto SBS I-C;
- Aggregato convenzionale;
- Scorie d'acciaio (come aggregato conduttivo termico).

Per confrontare la conducibilità termica delle diverse scorie d'acciaio, in questo studio sono stati utilizzati quattro tipi di scorie provenienti da diversi processi di produzione: scorie d'acciaio (SA) hot-stuffy, SA hot-splah, SA granulato d'acqua e SA di ferro. Inoltre, poiché quando le scorie d'acciaio vengono inserite all'interno del calcestruzzo vanno a sostituire il volume di aggregato, vengono quindi suddivise in cinque diversi contenuti: "SA-0", "SA-4", "SA-6", "SA-8", "SA-10"; questi indicano che le percentuali di fibre d'acciaio inserite all'interno della miscela e che quindi vanno a sostituire parte del volume di questa, sono rispettivamente lo 0%,4%,6%,8% e/o 10%.

### **3.2.2. Metodi di prova**

Le prove condotte in questo studio sono:

#### **(1) Prova di conducibilità termica di rocce e scorie d'acciaio**

La conducibilità termica delle rocce viene misurata con il metodo TPS (Transient Plane Source), utilizzando un dispositivo di conducibilità termica (DRE-2C); inoltre, per realizzare questo test, vengono selezionati sette tipi di aggregati e quattro tipi di scorie d'acciaio.

In primo luogo, il campione di dimensioni 5x5x1 cm, viene tagliato in due parti. Quindi viene posizionata una sonda tra i due stessi campioni e sia la sonda che i campioni, già collocati in una camera ambientale preimpostata per l'isolamento, vengono fissati saldamente sul banco di prova. Infine, la conducibilità termica si ottiene direttamente dal computer. La temperatura dell'esperimento viene fatta variare dalla temperatura ambiente a 50°C; inoltre, per migliorare l'accuratezza dei risultati del test, vengono preparati almeno tre campioni per ciascun aggregato.

Le conducibilità termiche di tutti gli aggregati, subiscono piccoli cambiamenti all'aumentare della temperatura e variano a seconda del tipo di roccia, in particolare la conducibilità termica delle rocce è direttamente influenzata dalla loro composizione di ossidi. Inoltre per le rocce con un'elevata porosità, l'aria, come mezzo termico adiabatico, riduce notevolmente la conducibilità termica della roccia; mentre, in una roccia con una piccola porosità, la conducibilità termica è regolata dalla composizione elementare, dalle specie minerali e dalla distribuzione dei minerali. In generale, maggiore è la densità della roccia, migliore è la conducibilità termica.

La conducibilità termica delle scorie di acciaio è molto maggiore di quella delle rocce. In particolare, la conducibilità termica delle scorie d'acciaio è correlata al tipo di scorie, al metodo di fusione e alla composizione principale dell'ossido. Per quanto riguarda il tipo di scorie, è stato visto che la struttura delle SA hot-stuffy è la più grande, con una forma simile a quella della pietra ordinaria, e si ipotizza che la loro organizzazione interna sia compatta, con densità maggiore. Al contrario, gli altri tipi di scorie, presentano una struttura a nido d'ape, con micropori irregolari, e conseguente riduzione della conduttività termica. Pertanto, le SA hot-stuffy vengono utilizzate come materiale termico nel cemento asfaltato per aumentarne la conduttività.

## **(2) Prova di conducibilità termica della miscela di asfalto**

Per testare la conducibilità termica ( $\lambda$ ) delle miscele di asfalto, viene utilizzato il metodo a filo caldo parallelo, che serve per identificare la migliore sostituzione volumetrica di fibre d'acciaio. Effettuando il test per miscele con le diverse percentuali di SA, è stato visto che la conducibilità termica inizialmente aumenta, per poi diminuire con l'aumentare della sostituzione di SA. In particolare, si raggiunge il picco massimo quando la sostituzione del volume SA è del 6% ed infatti la conducibilità termica aumenta dell'8,33% rispetto al campione di riferimento (SA-0). Anche per SA-4 e SA-8 si ha un aumento rispettivamente del 7,58% e del

3,56% rispetto al campione di riferimento, mentre per SA-10 il valore diminuisce dell'1,24% e ciò sta ad indicare che una quantità eccessiva di fibra d'acciaio ha un effetto dannoso sulla conducibilità termica della miscela d'asfalto. La ragione principale di questo è che la SA non è densa e ciò provoca una maggiore porosità rispetto a quella degli inerti. Inoltre l'aria, come mezzo adiabatico, contribuisce ad una minore conduttività.

**Tabella 1.** Valori di conducibilità termica calcolati

Volume replacement	NO.	$\Delta\theta$ (t)	$\Delta\theta$ (2t)	$\Delta\theta$ (2t)/ $\Delta\theta$ (t)	E	$\lambda$	mean $\lambda$
SA-0	1#	21.6	31.6	1.463	1.282	1.899	1.91888
	2#	21.4	30.2	1.411	1.434	2.144	
	3#	22.4	33.4	1.491	1.199	1.714	
SA-4	1#	22	31	1.4098	1.441	2.094	2.06432
	2#	21.9	30.5	1.393	1.488	2.035	
	3#	22.1	31.5	1.425	1.3898	2.064	
SA-6	1#	22.1	30.7	1.389	1.606	2.325	2.07874
	2#	22.5	32	1.422	1.402	1.9965	
	3#	22.6	32.5	1.4383	1.355	1.9185	
SA-8	1#	24.1	33.5	1.3900	1.551	2.084	1.98713
	2#	22.5	31.5	1.40	1.4854	1.9914	
	3#	24.3	34.8	1.432	1.3724	1.886	
SA-10	1#	22.2	31.6	1.423	1.398	2.015	1.89512
	2#	23.5	34.8	1.481	1.229	1.6745	
	3#	23	33	1.435	1.364489	1.996	

### (3) Prova di scioglimento elettro-termico della neve

per preparare i campioni, le miscele di asfalto vengono prima agitate per tre minuti e poi rovesciate in uno stampo di dimensioni 30x30x9 cm. Una volta realizzati i campioni, questi vengono posti l'uno sopra l'altro: al limite inferiore si ha cemento denso asfaltato (5cm, senza SA), mentre al limite superiore si ha calcestruzzo con asfalto termico conduttivo (4cm, con SA) o con asfalto ordinario (4cm, senza SA). In mezzo a questi viene posizionato un filo riscaldante in fibra di carbonio, mentre 200 g di neve fresca vengono distribuiti uniformemente sulla superficie del campione. Durante il test di scioglimento termico della neve, il filo di riscaldamento viene collegato ad un'alimentazione e la potenza in ingresso viene

controllata da un mini regolatore di tensione. La corrente del filo in ingresso è di 1,25 I, mentre, la potenza di ingresso è di 250 W/m<sup>2</sup>. La temperatura del test, senza radiazioni solari o vento, è di -3°C. Sulla superficie superiore dei campioni, vengono posizionati 3 sensori di temperatura, con la funzione di misurare le variazioni di questa durante il processo di scioglimento della neve.

Il test, quindi, viene effettuato su due tipi di campione: il campione di riferimento, in cui non sono presenti fibre d'acciaio, e il campione con asfalto termico conduttivo, ottenuto inserendo al suo interno fibre SA. Poiché è stato verificato che la conduttività termica ottimale delle miscele d'asfalto si ottiene quando la sostituzione del volume con fibre d'acciaio è del 6%, per questo test, il secondo campione viene realizzato utilizzando, come aggregato termoconduttivo, il 6% di SA.

Prima di iniziare l'esperimento, vengono spruzzati 200 g di neve fresca uniformemente sulla superficie di entrambi i campioni. Dopo un riscaldamento di 65 minuti, si può osservare la differenza tra i due campioni: la superficie del campione di riferimento scioglie solo una parte della neve, mentre la neve sulle miscele d'asfalto conduttive si scioglie completamente. Ciò indica che la sostituzione degli aggregati parziali con fibre d'acciaio nei sistemi di pavimentazione elettrico-termico, svolge un ruolo positivo nello scioglimento della neve e del ghiaccio. Inoltre, è stato osservato che la distribuzione della temperatura superficiale delle miscele d'asfalto con SA, dopo il riscaldamento elettrico per 65 min, è più uniforme rispetto a quella del campione di riferimento. Ciò implica che l'aggiunta delle fibre d'acciaio nelle miscele d'asfalto non solo migliora la conduttività, ma contribuisce anche all'uniformità della distribuzione della temperatura. Durante l'intero test, la variazione della temperatura superficiale, può essere suddivisa in tre fasi. La prima fase consiste nel riscaldamento delle miscele d'asfalto: la temperatura superficiale aumenta quasi con la stessa velocità per entrambe le miscele (è leggermente maggiore per quella con SA); la seconda fase consiste nello scioglimento della neve: viene raggiunto il punto di fusione (0,5-0,8°C), dopodiché la temperatura viene mantenuta costante durante tutta la fase di scioglimento della neve; l'ultima fase consiste nel riscaldamento accelerato: la temperatura aumenta notevolmente col tempo e, a causa dello scioglimento della neve, si forma un flusso di riscaldamento stabile all'interno della miscela di asfalto.

### **3.3. Calcestruzzo rinforzato con fibra di carbonio [3]**

Questa ricerca si focalizza sull'effetto riscaldante prodotto dalla corrente elettrica durante il passaggio attraverso provini in calcestruzzo con l'aggiunta di fibre di carbonio, le quali trasformano un comune calcestruzzo, in uno conduttivo. Vengono studiate, inoltre, due diverse azioni: anti-icing (prevenzione) e sbrinamento (cura).

#### **3.3.1. Materiali utilizzati e fabbricazione del campione**

I campioni di calcestruzzo 30x30x2 cm<sup>3</sup> utilizzati in questa prova, vengono fabbricati utilizzando i seguenti materiali:

- Cemento Portland CEM-I 52,5 R
- Acqua di rubinetto
- Sabbia silicea standard (EN196-1)
- Ghiaia di fiume tonda (3-6 mm)
- Fumi di silice (FS)
- Superfluidificante
- Fibre di carbonio ossidate (FC)

Il dosaggio del calcestruzzo, basato su ricerche precedenti, è:

cemento 5400 g

acqua 2700 g

sabbia 4050 g

ghiaia 6075 g

fumi di silice 540 g

superfluidificante 113,4 g

fibre di carbonio 108 g

il rapporto acqua/cemento è 0,50, il contenuto di FC è 2.0% in peso di cemento e FS/contenuto di cemento è il 10% in peso di cemento.

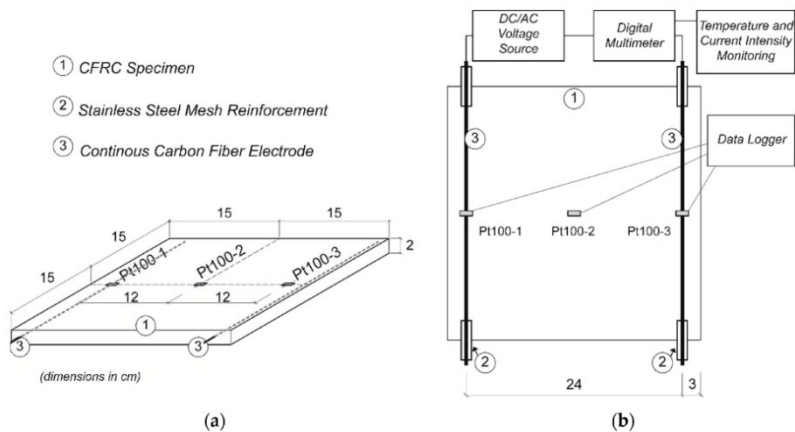
Per migliorare la dispersione delle fibre e la lavorabilità del composito (principali inconvenienti che si presentano quando si inseriscono le fibre di carbonio con cemento composito) sono state prese le seguenti misure:

- 1) Alla miscela viene aggiunto il 2,1% in peso di superfluidificante cementizio a base di carbossilato;



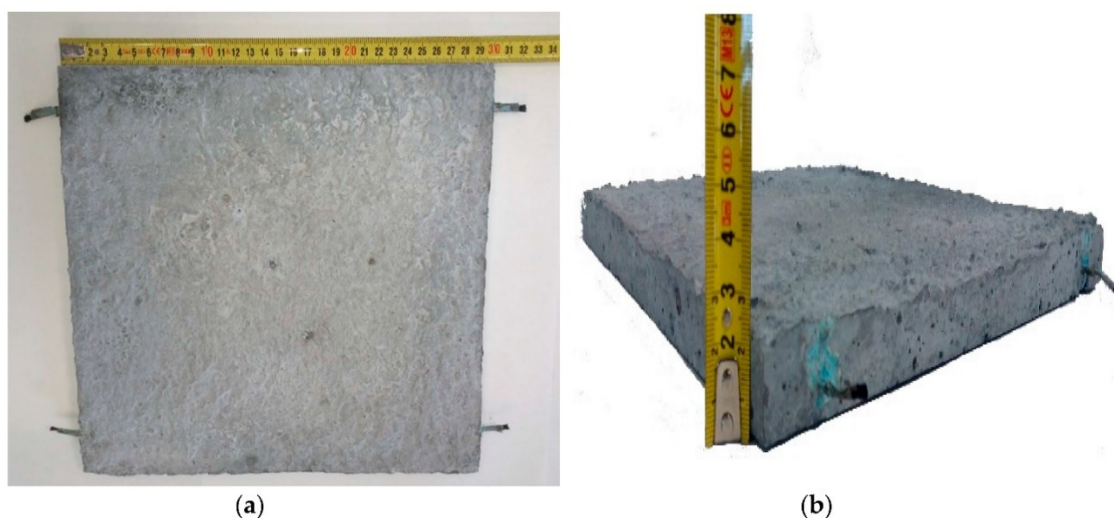
- 2) Al fine di migliorare la dispersione, il trattamento di ossidazione delle fibre di carbonio, viene condotto ponendo le fibre in un forno a 400°C, con un flusso d'aria di 10 mL/min per 4 ore;
- 3) Le fibre di carbonio ossidate vengono versate in acqua e poi vengono sottoposte ad un trattamento a ultrasuoni per 10 minuti, effettuato tramite un dispositivo ad ultrasuoni.

Una volta ottenuta la miscela finale, questa viene versata in stampi in acciaio inox in cui sono già stati posizionati degli elettrodi. Gli elettrodi sono fabbricati con fibre di carbonio poliacrilonitrile continue, avvolte insieme ad una rete di acciaio inossidabile dello spessore di 0,9 mm nelle parti terminali, e la loro posizione è mostrata nella figura 1.



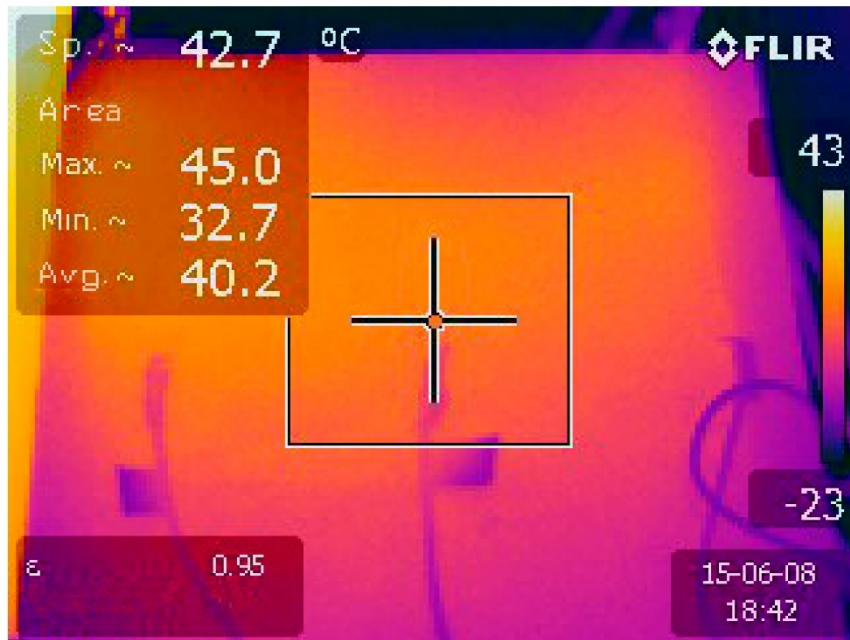
**Figura 1.** (a) Geometria del campione e posizione dei sensori di temperatura, Pt100; (b) Predisposizione sperimentale per la prova di autoriscaldamento.

La figura 2, invece, mostra l'aspetto del campione dopo la fabbricazione: (a) vista dall'alto, (b) spessore.



**Figura 2.** Aspetto del campione dopo la fabbricazione: (a) vista dall'alto; (b) spessore.

Variazioni della temperatura superficiale dei provini, vengono registrate continuamente da sensori di temperatura RTD, distribuiti come mostrato in figura 1 e collegati a un datalogger. Inoltre, viene utilizzata una termocamera per controllare la distribuzione di temperatura lungo la superficie del campione, come mostrato in figura 3.



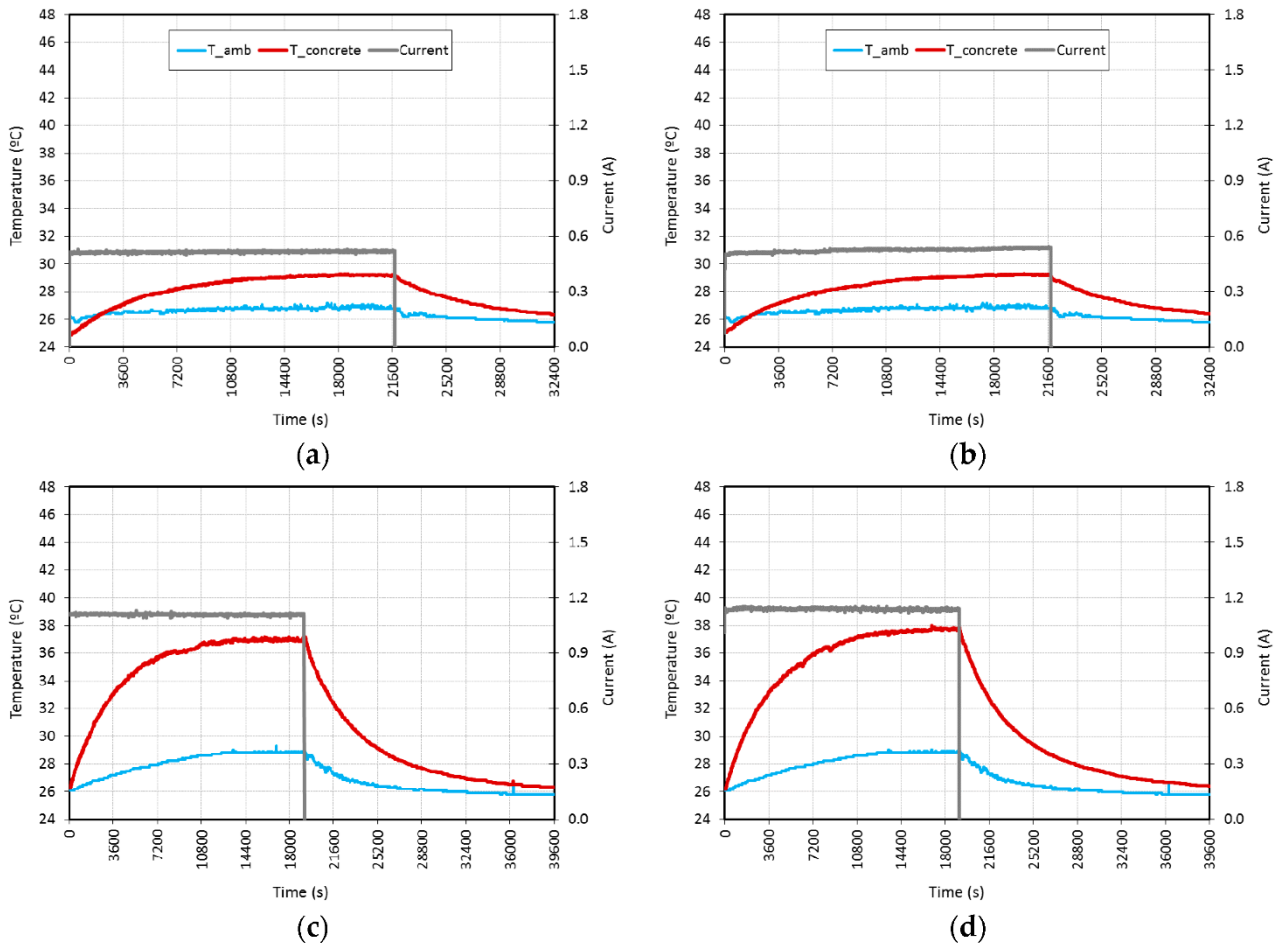
**Figura 3.** Temperatura del campione controllata con una telecamera IR

### 3.3.2. Test in condizioni di laboratorio

Prima del test vero e proprio, i campioni vengono conservati in condizioni di laboratorio, circa 21°C e 55% di umidità relativa per 14 giorni, e tenuti all'interno della stessa camera di laboratorio fino alla fine dei test, per motivi di sicurezza.

I campioni in condizioni di laboratorio, vengono testati con tensioni fisse di 10, 20 e 25 V, e una volta raggiunto un valore stabile di temperatura, l'alimentazione viene spenta.

La figura 4 mostra la temperatura ambiente e la temperatura media del provino (asse sinistro, in °C) e la corrente elettrica (asse destro, in A), per fonti di alimentazione CA e CC, a tensioni fisse di 10 V, 20 V e 25 V rispetto al tempo (asse orizzontale, in s), il tutto monitorato durante le prove.



**Figura 4.** Variazione della resistività elettrica con la temperatura: (a) 10 V CA; (b) 10 V CC; (c) 20 V CA; (d) 20 V CC; (e) 25 V CA; (f) 25 V CC.

L'incremento di temperatura è simile per i tre tipi di corrente, approssimativamente di 3°C a 10 V, 11°C a 20 V e 17°C a 25 V.

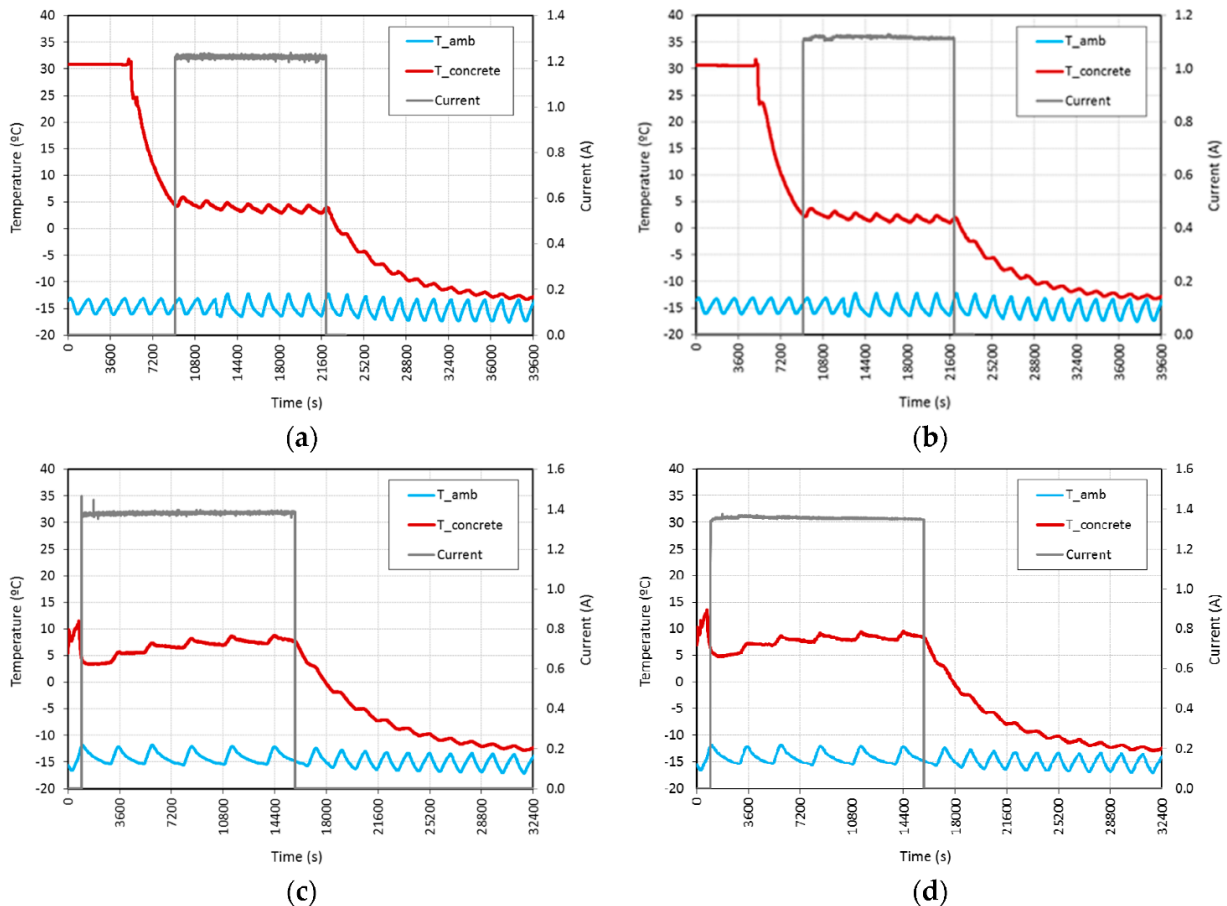
La resistività elettrica media misurata nei test in AC è 52,8  $\Omega \cdot \text{cm}$  a 10 V, 49,1  $\Omega \cdot \text{cm}$  a 20 V e 48,2  $\Omega \cdot \text{cm}$  a 25, mentre per i test CC è di 49,7  $\Omega \cdot \text{cm}$  per 10 V, 45,3  $\Omega \cdot \text{cm}$  per 20 V e 45,7  $\Omega \cdot \text{cm}$  per 25 V.

### 3.3.3. Test di prevenzione e stagionatura

Dopo le prove in condizioni di laboratorio, i provini vengono esposti alle stesse correnti alternate o dirette per prove di prevenzione e cura. Per queste prove, le tensioni vengono fissate a 20 e 25 V, ed inoltre viene utilizzato un congelatore, con temperatura media di -15°C.

Nei test di prevenzione, i campioni a una temperatura ambiente di circa 25°C vengono messi all'interno del congelatore. Quando questi hanno raggiunto circa +5°C,

entrambe le sorgenti di alimentazione (CA e CC) vengono collegate a una tensione fissa. Con una tensione di 20 V, sia CA che CC riescono a mantenere la temperatura del provino al di sopra di 0°C per tutta la durata del test; con 25 V, la temperatura di entrambi i provini aumenta di circa 3°C rispetto ai valori iniziali. Infine, dopo aver raggiunto la temperatura costante, le fonti di alimentazione sono state disattivate.



**Figura 5.** Prove di prevenzione eseguite a tensioni fisse di: (a) 20 V CA; (b) 20 V CC; (c) 25 V CA; (d) 25 V CC.

Al termine del test di prevenzione si può osservare che la variazione tra temperatura ambientale iniziale e temperatura finale dei provini è notevolmente più alta rispetto ai valori ottenuti dai test in condizioni di laboratorio.

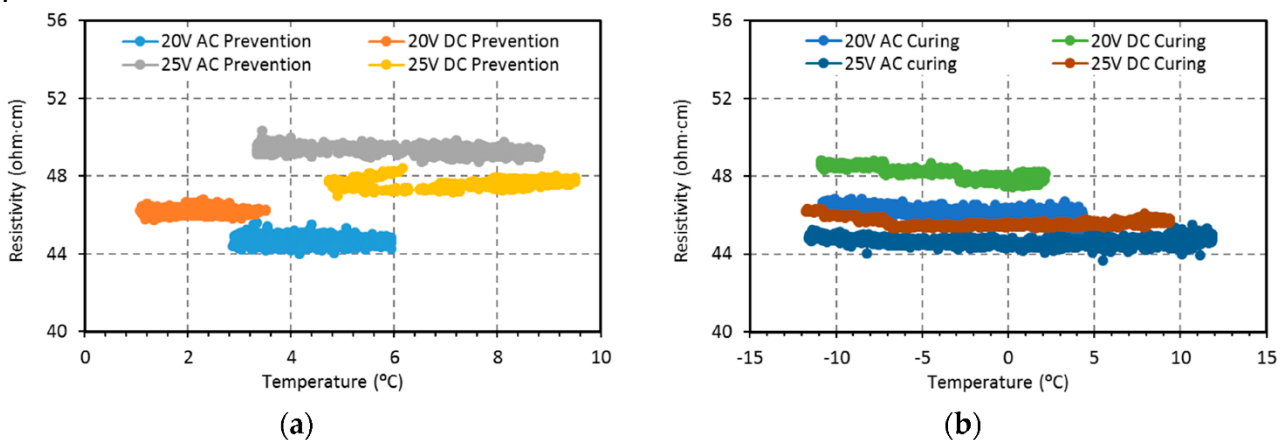
Durante le prove di stagionatura, i campioni vengono conservati in congelatore per 24 ore, raggiungendo la temperatura interna di questo, ovvero -15°C. Quindi entrambe le fonti di alimentazione (CA e CC) vengono collegate a una tensione fissa e dopo circa 4 ore, vengono disattivate. Le temperature sono monitorate fino a quando i campioni raggiungono di nuovo la stessa temperatura che si ha all'interno del congelatore.

A causa dell'elevata conducibilità dei provini, la corrente elettrica monitorata aumenta con la tensione fissa. La resistenza elettrica ( $Z$ ) di un materiale può essere espressa come:

$$Z = \Psi \times L / S$$

dove  $\Psi$  è la resistività elettrica media di un'area della sezione trasversale;  $L$  è la distanza tra gli elettrodi; e  $S$  è l'area di una sezione trasversale parallela agli elettrodi. La resistenza elettrica media per tutti i test è  $17,9 \pm 0,9 \Omega$ .

La Figura 6 mostra la resistività elettrica calcolata rispetto alla temperatura media del provino monitorata ogni 5 s, per 20 V e 25 V, CA e CC, prove di prevenzione e polimerizzazione.



**Figura 6.** Variazione della resistività elettrica con la temperatura: (a) 20 V e 25 V, AC e DC, test di prevenzione; (b) 20 V e 25 V, CA e CC, prova di polimerizzazione.

### 3.4. Calcestruzzo rinforzato con fibre di carbonio applicato nell'ingegneria stradale [5]

Questo studio si occupa dell'applicazione del calcestruzzo elettricamente conduttivo (ECON), modificato con fibra di carbonio, nell'ambito dell'ingegneria stradale. Nello specifico, l'ECON viene prima preparato in laboratorio, successivamente ne vengono studiate le proprietà ed infine viene selezionata un rapporto di miscela per l'applicazione pratica di questo nell'ambito dell'ingegneria stradale.

#### 3.4.1. Materiali utilizzati

I materiali utilizzati sono:

- Cemento Portland ordinario;
- Fumo di silice;
- Sabbia di fiume;
- Ghiaia artificiale;
- Superfluidificante a base di policarbossilato;
- Metilcellulosa;
- Fibra di carbonio a taglio corto.

Nello specifico, il cemento Portland ordinario viene utilizzato come materiale cementizio, mentre il fumo di silice, come materiale cementizio secondario; la sabbia di fiume viene selezionata come aggregato fine, con una dimensione delle particelle inferiore a 5 mm, mentre la ghiaia artificiale come aggregato grosso, con una dimensione delle particelle di 5-15 mm; il superfluidificante viene utilizzato il modo tale da poter ridurre il contenuto d'acqua ed, in particolare, al dosaggio consigliato dello 0,6-0,8%, il tasso di riduzione dell'acqua è  $\geq 25\%$ ; la metilcellulosa viene utilizzata come disperdente per le fibre di carbonio, che, invece, vengono scelte come aggregati elettricamente conduttivi (ECA).

TABELLA 2. Composizione chimica di cemento Portland ordinario (OPC) e fumi di silice (%)

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CL <sup>-</sup>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	Loss
OPC	20.27	3.16	0.68	63.65	3.47	/	3.21	1.36	0.41	0.11	0.04	0.27	3.19
Silica fume	92.10	0.85	0.72	0.47	1.20	0.02	/	/	/	/	/	/	4.00

TABELLA 3. Parametri di prestazione della sabbia

Modulo di finezza	Densità apparente (g/cm <sup>3</sup> )	Assorbimento dell'acqua (%)	Contenuto di fango (%)
2.46	1.56	1.5	0.6

TABELLA 4. Parametri di prestazione della ghiaia

Densità apparente secca (g/cm <sup>3</sup> )	Assorbimento dell'acqua (%)	Valore di schiacciamento (%)	di Grado adsorbimento	di Particelle simili ad aghi (%)
2.9	0.5	13.4	5	12.1

TABELLA 5. Parametri di prestazione della fibra di carbonio

Nome del prodotto	Diametro del monofilamento (µm)	Densità (g/cm <sup>3</sup> )	Contenuto di carbonio (%)	Resistività di volume (Ω·m)	Forza di estensione (GPa)	di Modulo elastico a trazione (GPa)	Duttilità (%)	Piroconduttività (W/m·k)
WD-3	7.0	1.6	≥95.0	1.5	3.8	226.0	1.5	10.0

### 3.4.2. Mix design e preparazione dell'ECON

Uno dei principali fattori che limitano l'applicazione in pratica dell'ECON è il costo elevato del calcestruzzo causato dalle fibre di carbonio. Questo studio, quindi, si occupa di osservare l'effetto delle fibre di carbonio di diverse lunghezze sulle proprietà del calcestruzzo conduttivo, ed infatti, si prevede che la quantità di fibre viene ridotta modificandone la lunghezza, in modo da ridurre anche il costo del calcestruzzo mantenendo, però, la stessa conducibilità.

Sebbene il calcestruzzo fibrorinforzato abbia diversi vantaggi, la procedura di miscelazione presenta alcune difficoltà, in quanto la fibra è difficile da disperdere. Per riuscire a disperdere la fibra, vengono utilizzati il fumo di silice e l'etere di cellulosa: le particelle dei fumi di silice sono fini e sferiche e agiscono come lubrificanti all'interno della pasta cementizia, in modo tale da migliorare la lavorabilità delle miscele di calcestruzzo; l'etere di cellulosa aumenta la porosità del calcestruzzo, aumentando, di conseguenza, la lavorabilità di questo.



Pertanto, la miscela è progettata come è elencato in tabella 6 (la lunghezza della fibra di carbonio CF - 2 # è 9 mm, le altre sono 3 mm).

TABELLA 6. Proporzione della miscela di calcestruzzo conduttivo (kg / m3)

No.	OPC	Fumi di silice	Sabbia	Ghiaia	Acqua	Rapporto acqua-legante	Fibre di carbonio	Rapporto di volume fibre di carbonio	Superfluidificante	Solvente	Antischiuma
CF-0	449	90	538	1.079	243	0,45	0	0	0	0	0
CF-1	440	88	528	1,057	286	0,55	6	0,375	6	3	2,7
CF-2#	431	86	517	1,035	330	0,65	12	0,750	9	3	2,9
CF-2	431	86	517	1,035	330	0,65	12	0,750	9	3	2,9
CF-3	422	84	507	1,014	373	0,75	18	1,125	12	5	3,1
CF-4	414	83	497	0,994	412	0,85	24	1,500	15	5	3,4

Per preparare il campione, il calcestruzzo deve essere prima di tutto miscelato, cosa che avviene all'interno di una betoniera, e per far sì che la fibra di carbonio si disperda in modo uniforme nella matrice, viene effettuato il metodo di miscelazione semisecco. Dopo la miscelazione, il calcestruzzo fresco viene gettato in uno stampo di dimensioni 100x100x100 mm. Una volta realizzati i campioni, una parte di questi viene utilizzata per i test di conduttività elettrica. Questa tipologia di campioni viene realizzata in laboratorio, ma campioni di ECON possono essere ricavati anche sul campo. La miscelazione del calcestruzzo sul campo avviene tramite un miscelatore; il metodo di miscelazione è, però, lo stesso. Viene realizzato un manto stradale inserendo gli elettrodi nell'ECON alla stessa profondità e spaziatura dei campioni di laboratorio. Poi, a 28 gg, vengono tagliati provini di dimensioni 100x100x100 mm, da sottoporre a diverse prove, tra cui quelle di conduttività.

### 3.4.3. Metodi di prova

#### 3.4.3.1. Conducibilità elettrica

La conducibilità del calcestruzzo ECON viene misurata con il metodo a due elettrodi. Come elettrodi vengono utilizzate delle aste di carbonio di lunghezza 8 cm e diametro 6 mm. La conducibilità del campione viene testata dopo un'essiccazione al 40% di



umidità relativa e 40°C per 48 ore. La resistività viene calcolata utilizzando le seguenti formule:

$$R = \frac{U}{I}$$
$$\rho = \frac{R \cdot S}{L}$$

dove,  $\rho$  rappresenta la resistività del campione;  $R$ , la resistenza;  $S$ , l'area della sezione trasversale;  $L$ , la distanza tra gli elettrodi;  $U$ , la tensione applicata; e  $I$  la corrente.

La resistività del campione diminuisce con l'aumento del contenuto di fibra di carbonio, questo perché la fibra di carbonio, integrata dalla conduzione di ioni ed elettroni del materiale della matrice, contribuisce alla formazione di una rete conduttiva all'interno del calcestruzzo, ossia va ad aumentare la conduttività elettrica di questo. Quando il contenuto di fibra di carbonio è basso e, quindi, lo spazio tra le fibre è troppo grande, la conduttività del provino dipende principalmente dalla matrice e ciò comporta una scarsa conduttività elettrica; al contrario, con l'aumento delle fibre di carbonio, queste si vanno a sovrapporre l'una sull'altra, facendo sì che esistano contemporaneamente la conduzione ionica e l'effetto tunnel e portando a una migliore conduttività dell'ECON.

Non è solo la quantità di fibre di carbonio che influisce sulla conduttività del calcestruzzo, infatti anche la lunghezza di queste ha un effetto significativo sulla resistività. L'aumento della lunghezza delle fibre può ridurre l'effetto schermante dell'aggregato e aumentare la probabilità di sovrapposizione della connessione delle fibre, ossia ad un aumento della lunghezza delle fibre, corrisponde una diminuzione della resistività.

### **3.4.3.2. Sensibilità termica**

Una variazione di resistività può derivare anche dalla variazione di temperatura. All'aumentare della temperatura del calcestruzzo, all'interno dei provini si verificano due comportamenti opposti: coefficiente di temperatura positivo (PTC) e coefficiente di temperatura negativo (NTC).

Il comportamento PTC consiste nell'aumento della distanza tra le particelle conduttive, che provoca una diminuzione della probabilità di contatto tra queste, all'aumentare della temperatura; ossia l'effetto PTC si riferisce ad un aumento della resistività dell'ECON.

Il comportamento NTC, invece, si riferisce all'aumento della concentrazione delle particelle conduttive con l'aumento della temperatura. L'espansione delle ECA aumenta lo spazio di contatto e la probabilità di presenza di particelle conduttive, con conseguente diminuzione della resistività.

Nel calcestruzzo elettricamente conduttivo, la rete conduttiva formata dalla fibra di carbonio provoca un effetto PTC leggermente più debole dell'effetto NTC, e quindi la resistività diminuisce con l'aumentare della temperatura. Si può anche osservare che CF-2# ha resistività più bassa rispetto agli altri campioni, questo perché aumentando la lunghezza delle fibre, si ha anche un aumento della loro capacità di interlacciamento, ossia si ha una maggiore connessione del mezzo conduttivo (fibre di carbonio), che comporta una riduzione della resistività dell'ECON.

### **3.4.3.3. Effetto elettrotermico**

La valutazione dell'effetto elettrotermico dell'ECON, avviene osservando come varia la temperatura di questo se sottoposto ad un'alimentazione elettrica.

Mentre per i calcestruzzi ordinari, sottoposti ad alimentazione, la temperatura cambia di poco, per gli ECON la temperatura aumenta con la durata dell'alimentazione. In particolare, durante i primi 150 min, la temperatura del provino aumenta in modo lineare e rapido con l'elettrificazione, dopodiché, la velocità di aumento della temperatura tende ad appiattirsi. Inoltre, poiché la resistività del calcestruzzo elettricamente conduttivo diminuisce all'aumentare del contenuto di fibre di carbonio, secondo la legge di Ohm e la definizione di potenza elettrica, maggiore è il contenuto di fibra di carbonio e più veloce è l'aumento della temperatura.

Si può osservare che il CF-2# è quello che ha temperatura più alta e che aumenta maggiormente con la durata dell'alimentazione. Questo perché la conversione dell'energia elettrica in termica, secondo la legge di joule, è direttamente proporzionale al prodotto di tensione, corrente e tempo e poiché il calcestruzzo CF-2# ha resistività più bassa, ciò vuol dire che a parità di tensione ha corrente più alta e, quindi, anche un maggior aumento di temperatura.

In conclusione, in questo articolo, viene preparato un ECON di resistività  $0,10 \Omega \cdot \text{cm}$ , modificando la lunghezza e il contenuto di fibre di carbonio, e poi applicando i risultati nell'ambito dell'ingegneria stradale.

Dagli esperimenti condotti in questo studio, infatti, si ottiene che l'ECON modificato con fibra di carbonio, oltre ad avere buone proprietà conduttive, presenta anche buone proprietà meccaniche, come la resistenza a rottura a trazione, che migliora all'aumentare del contenuto di fibre, e la resistenza a compressione.

### **3.5. Calcestruzzo conduttivo a base di fibre di carbonio riciclate [1]**

Questo studio si occupa di verificare le capacità di riscaldamento del calcestruzzo conduttivo modificato con fibre di carbonio riciclate e che può essere utilizzato per applicazioni antighiaccio e autoriscaldanti.

#### **3.5.1. Materiali utilizzati**

I materiali utilizzati per questo studio sono:

- Cemento CEM I 52.5R;
- Aggregati silicei;
- Carbonato di calcio;
- Superfluidificante a base di policarbossilato;
- Modulatore di viscosità base di nanoparticelle;
- Fibre di carbonio.

Gli aggregati silicei hanno distribuzione granulometrica compresa tra 0 e 5 mm; il carbonato di calcio viene utilizzato per contribuire ad una maggiore compattezza e lavorabilità della miscela; mentre per migliorare la conduttività elettrica e termica della matrice del calcestruzzo, vengono utilizzate fibre di carbonio riciclate e fibre di carbonio micronizzate.

La fibra di carbonio viene prodotta da un processo di riciclaggio primario di guarnizioni, pezzi difettosi o materiali compositi rinforzati con fibra carbonio deteriorati. Questi residui derivano principalmente da aziende che si occupano della produzione di compound per l'industria aerospaziale, automobilistica e simili. La fibra di carbonio viene ottenuta per triturazione e successiva pirolisi per eliminare le resine

polimeriche. Le fibre di carbonio micronizzate presentano granulometrie di  $d_{90} = 0,425$  e  $d_{20} = 0,300$  mm.

In tabella 7 ritroviamo le proprietà dei materiali carboniosi utilizzati.

[Tabella 7:](#) Proprietà delle fibre di carbonio riciclate e micronizzate

	<b>Proprietà</b>	<b>Valori</b>
<i>Fibre di carbonio riciclate</i>	Contenuto di fibre di carbonio (%)	100
	Densità (kg/m <sup>3</sup> )	1800
	Lunghezza nominale (mm)	6/12
	Diametro (µm)	7
	Resistenza alla trazione (MPa)	4150
	Modulo di Young (GPa)	252
	Conduttività elettrica (S·cm <sup>-1</sup> )	100-1000
<i>Fibre di carbonio micronizzate</i>	Contenuto di carbonio (min %)	95
	Contenuto di ceneri (max %)	6
	Umidità (max %)	0.5
	Densità (g/ml)	0.65-0.85

### 3.5.2. Mix design e preparazione dei campioni

Le composizioni di calcestruzzo progettate, con diversi contenuti di fibre di carbone, sono 2. La prima miscela è costituita da un calcestruzzo ad altissime prestazioni, con 9 kg di fibre di carbonio riciclate per m<sup>3</sup> di calcestruzzo per aumentare la conduttività elettrica e termica del materiale (denominato RCF); la seconda, incorpora, in più, 36 kg di fibre di carbonio micronizzate per m<sup>3</sup> di calcestruzzo, per aumentare ulteriormente la conduttività del materiale (indicato come R+MCF).

In tabella 8 sono descritte le composizioni dei calcestruzzi utilizzati.

[Tabella 8:](#) Composizione dei calcestruzzi

<b>Materiali</b>	<b>RCF</b>	<b>R+MCF</b>
Cemento [kg/m <sup>3</sup> ]	800	800
Sabbia [kg/m <sup>3</sup> ]	1161	1161
Limestone filler [kg/m <sup>3</sup> ]	200	200
Acqua [kg/m <sup>3</sup> ]	110	110
Superfluidificante [% bcw <sup>a</sup> ]	3.7	3.7
Nano silice [% bcw]	7.1	7.1
Fibre di carbonio riciclate [kg/m <sup>3</sup> ]	9	9
Fibre di carbonio micronizzate [kg/m <sup>3</sup> ]	-	36

<sup>a</sup>: in peso di cemento

In questo studio, i campioni vengono realizzati nelle tipiche forme adottate nell'industria dei prefabbricati, ovvero campioni prismatici e lastre.

Il processo di miscelazione dei vari componenti dei calcestruzzi, avviene in una mescolatrice planetaria. Innanzitutto, vengono miscelati aggregati, riempitivo calcareo e cemento per 60 secondi, poi viene aggiunta l'acqua e miscelata per 180 secondi. La nano-silice e il superfluidificante vengono quindi incorporati alla miscela e omogeneizzati per ulteriori 180 secondi ciascuno. Le aggiunte carboniose vengono inserite nella miscela dopo aver incorporato l'acqua e gli additivi, in quanto ulteriori ricerche hanno dimostrato che questa procedura fornisce una buona dispersione delle fibre nella matrice cementizia.

A questo punto, vengono realizzati campioni prismatici, di dimensioni 40x40x160 mm, dalle miscele indicate in tabella 8, per caratterizzare le proprietà elettriche dei calcestruzzi. Questi campioni incorporano 6 gambi filettati in acciaio inossidabile di 6 mm di diametro e 30 mm di lunghezza, che fungono da elettrodi. Il posizionamento di questi elettrodi viene effettuato dopo aver compattato il calcestruzzo fresco negli stampi.

La figura 7a mostra uno schema del posizionamento degli elettrodi sui provini.

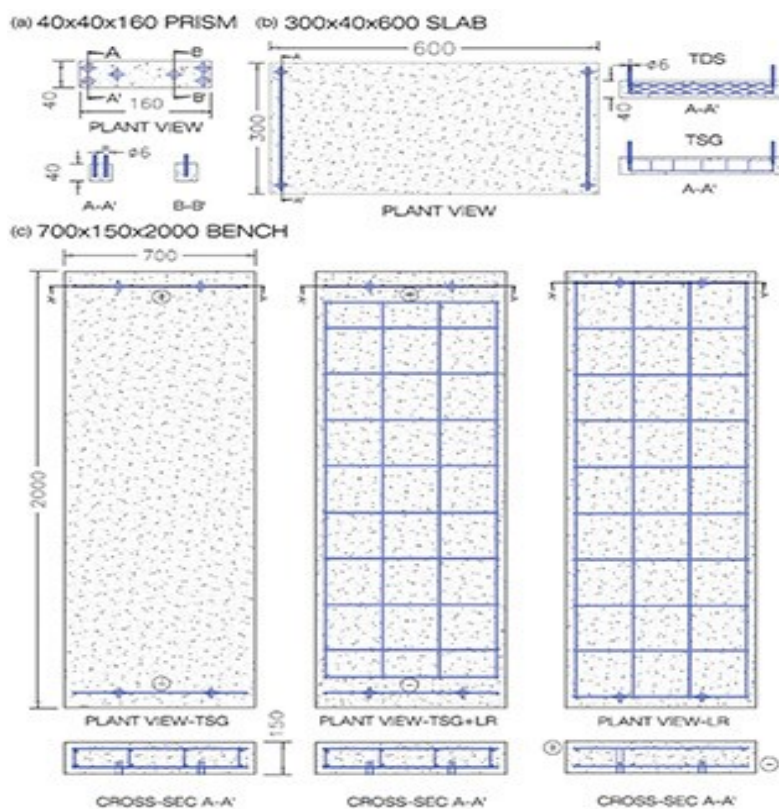


Figura 7. Schema del posizionamento degli elettrodi sui provini. Tutte le dimensioni in mm.

Dalle miscele indicate in Tabella 8, vengono realizzate anche delle lastre, di dimensioni 300x600x40 mm, per caratterizzare il comportamento termico dei campioni più grandi. In questo caso, sulle lastre, vengono incorporati gli elettrodi in due diverse disposizioni. La figura 7b mostra uno schema di posizionamento degli elettrodi sulle lastre. Il posizionamento di questi elettrodi viene effettuato dopo aver compattato il calcestruzzo fresco negli stampi. Tutti i campioni vengono lasciati negli stampi per 24 ore con agenti stagionanti liquidi e, successivamente, mantenuti in condizioni di temperatura ( $20^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$ ) e umidità ( $70\pm 10\%$ ) controllate fino al test.

Infine, vengono realizzati 3 lastre più grandi, di dimensioni 700x2000x150 mm, per valutare la capacità di riscaldamento del materiale in condizioni di scala reale. Ogni lastra presenta una diversa distribuzione degli elettrodi, rappresentati in figura 7c. La configurazione più semplice consiste in griglie quadrate trasversali (STG) presenti su entrambi i bordi della lastra; la seconda lastra incorpora rinforzi longitudinali, superiori e inferiori, per aumentare la conducibilità elettrica dell'elemento, senza che questi siano collegati agli elettrodi in ingresso (TSG); nella terza lastra la configurazione TSG viene direttamente sostituita dal rinforzo longitudinale superiore e inferiore e, in quest'ultima configurazione, viene ridotta drasticamente la distanza tra gli elettrodi.

La figura 8 rappresenta l'aspetto visivo di queste lastre fabbricate in scala reale.



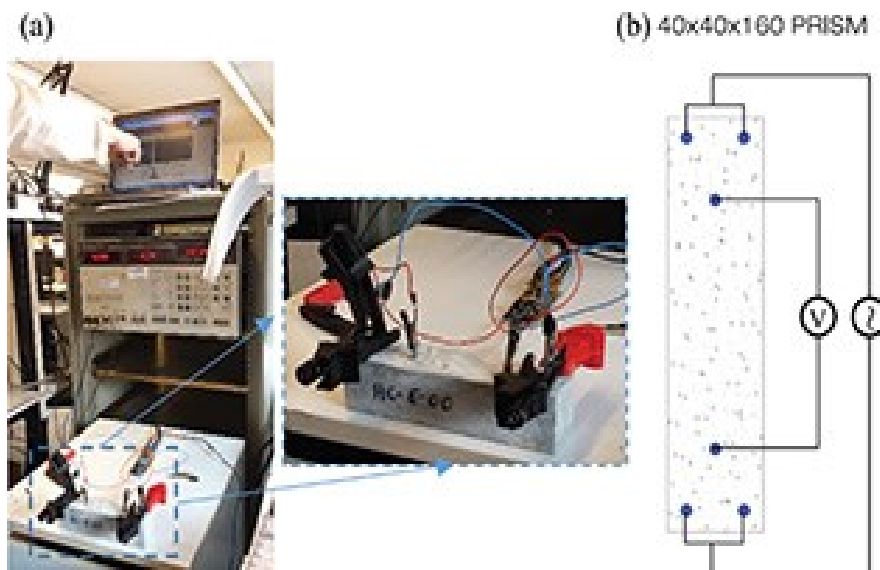
**Figura 8.** Aspetto visivo delle lastre a grandezza naturale realizzate per la caratterizzazione termica.

### 3.5.3. Metodi di caratterizzazione

#### 3.5.3.1. Caratterizzazione elettrica

La caratterizzazione della conducibilità elettrica viene eseguita su prismi  $40 \times 40 \times 160$  mm utilizzando un Analizzatore di Impedenza HP 4192A e un amplificatore di strumentazione, per poter effettuare misure con 4 sonde, le quali hanno una tensione effettiva di 1 V.

La figura 9 mostra l'assetto sperimentale e la configurazione adottata per eseguire la caratterizzazione elettrica.



**Figura 9.** (a) Apparecchiature di misurazione e (b) configurazione 4w per la caratterizzazione elettrica.

Le misurazioni vengono ottenute con una scansione in frequenza da 10 Hz a 1 MHz, fornendo impedenza elettrica ( $Z$ , in  $\Omega$ ) e fase ( $\phi$ , in  $^\circ$ ). L'impedenza elettrica è descritta dall'equazione (1) ed è composta da una parte reale (resistenza elettrica,  $R$ ) e da una parte immaginaria (reattanza,  $X$ ).  $R$  e  $X$  si ottengono rispettivamente dall'equazione (2) e dall'equazione (3).

$$Z = R + jX \quad (1)$$

$$R = Z \cos\left(\frac{\phi\pi}{180}\right) \quad (2)$$

$$X = -Z \sin\left(\frac{\phi\pi}{180}\right) \quad (3)$$

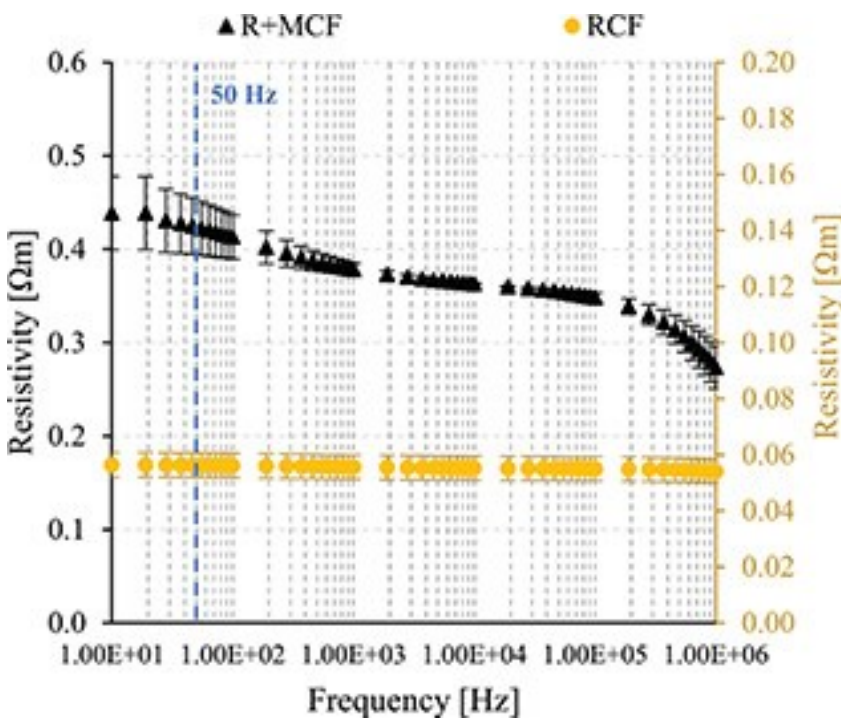
Una volta ottenuta la resistenza elettrica, è possibile calcolare la resistività elettrica del materiale  $\rho$  [ $\Omega \cdot \text{m}$ ]. Questa proprietà sta ad indicare la resistenza elettrica, specifica di ogni materiale, che si oppone al flusso elettrico e può essere calcolata



come mostrato nell'equazione (4), dove  $S$  è la sezione trasversale [ $m^2$ ] e  $L$  è la lunghezza [ $m$ ].

$$\rho = R S / L \quad (4)$$

La figura 10 mostra la variazione di resistività elettrica all'interno della gamma di frequenze valutate per entrambe le miscele di calcestruzzo utilizzate in questo studio (RCF e R+MCF). I risultati per i campioni con le fibre di carbonio riciclate e micronizzate sono rappresentate nell'asse verticale nero mentre i campioni con solo fibre di carbonio riciclate sono rappresentati nell'asse verticale giallo. Le barre di errore incluse corrispondono alla deviazione standard  $+ 1 / -1$  associata ai 3 campioni testati per ciascun materiale. Un'ulteriore linea blu tratteggiata viene aggiunta a 50 Hz per individuare la frequenza standard della rete elettrica.



**Figura 10.** (a) Allestimento sperimentale per le prove di caratterizzazione termica e (b) Posizionamento di termocoppie in lastre piccole e grandi.

I campioni RCF presentano una resistività elettrica costante di  $0,055 \Omega m$ , indipendentemente dalla frequenza applicata; i campioni R + MCF, invece, presentano resistività elettriche comprese tra  $0,27$  e  $0,44 \Omega m$ . La riduzione della resistività con l'aumento della frequenza viene associata ai materiali isolanti e può essere causata da effetti di polarizzazione. In questo caso, il comportamento della

miscela R + MCF mostra effetti di polarizzazione, nonostante l'incorporazione di MCF consenta di ridurre significativamente la resistività, e questo evidenzia una differenza nel meccanismo conduttivo elettrico tra R + MCF e RCF.

Alla frequenza di 50 Hz, che è quella applicata durante le prove di riscaldamento, il materiale R + MCF ha una resistività di 0,42  $\Omega\text{m}$ . Questo valore è 7,6 volte superiore a quello ottenuto per RCF e indicano che l'aggiunta di fibre di carbonio micronizzate, nonostante siano un materiale altamente conduttivo, provoca un aumento molto significativo della resistività. Ciò suggerisce che l'aggiunta di MCF ostacola la distribuzione omogenea dei prodotti carboniosi all'interno della matrice del calcestruzzo e interrompe la continuità elettrica del materiale.

### **3.5.3.2. Caratterizzazione termica**

La caratterizzazione termica dei materiali cementizi conduttivi viene suddivisa in due fasi differenti: la prima fase, valuta la capacità termica delle lastre 300x600x40 mm modificando la durata dei cicli di riscaldamento e la tensione applicata; la seconda fase valuta la capacità di riscaldamento delle 3 lastre prefabbricate a grandezza naturale.

Per quanto riguarda la prima fase, la durata dei cicli di riscaldamento è di 3 ore e di 48 ore. Per il test di 3 ore, ai provini viene applicata una tensione costante, durante tutto il ciclo di riscaldamento, tramite le diverse configurazioni di elettrodi incorporate. Il test di 48 ore, invece, comprende 2 cicli di 8 ore di riscaldamento seguiti da un periodo di 16 ore di raffreddamento. Sia per i test di 3 ore, che per quelli di 48 ore, vengono applicate diverse tensioni, in modo da poter valutare differenti velocità di riscaldamento (11/18/25 V nei cicli di 3 ore e 25/33 V nei cicli di 48 ore).

La caratterizzazione termica delle diverse configurazioni viene valutata in termini di aumento di temperatura al centro della lastra, gradiente di temperatura tra il centro dell'elemento e l'elettrodo di ingresso e resistenza elettrica del materiale durante tutta la prova. La resistenza elettrica viene stimata in base alla tensione effettiva ( $V_{eff}$ ) e alla corrente ( $I_{eff}$ ) monitorate durante le prove. Poiché la tensione e la corrente sono in fase, la resistenza elettrica ( $R$ ) può essere calcolata dalla legge di Ohm:

$$R = V_{eff} / I_{eff}$$

La caratterizzazione termica copre aspetti importanti richiesti nelle miscele di calcestruzzo per applicazioni autoriscaldanti, che sono il raggiungimento di

determinate velocità di riscaldamento, l'uniformità della distribuzione della temperatura all'interno dell'elemento e la capacità del materiale di sostenere tensioni diverse per lunghi periodi di tempo senza influenzare le sue proprietà di riscaldamento. Inoltre, il consumo energetico calcolato dall'equazione seguente, viene riportato in ogni test.

$$P_{eff} = V_{eff}/I_{eff}$$

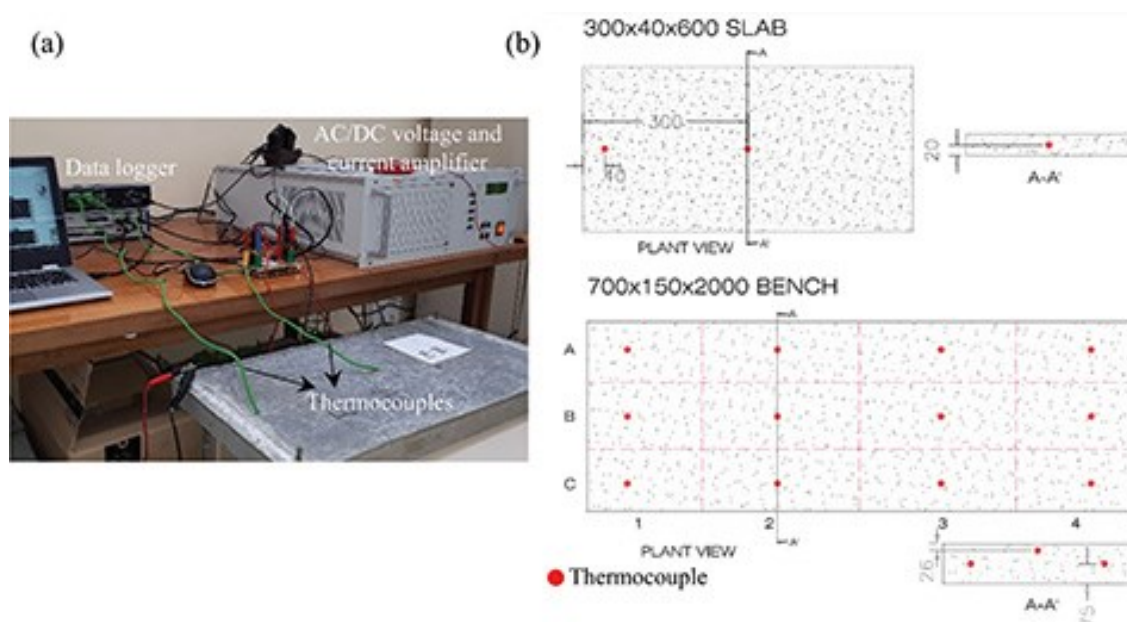
Per quanto riguarda la seconda fase, che consiste nel valutare la capacità di riscaldamento di 3 lastre fabbricate a grandezza naturale, la durata dei cicli di riscaldamento è di 3 ore e le tensioni applicate vengono fatte variare da 2 a 21 V. Questi valori corrispondono alla massima tensione (e quindi alla massima capacità di riscaldamento) sostenuta dal materiale prima del degrado delle proprietà conduttive e termiche.

La tabella 9 riassume la distribuzione delle prove di riscaldamento eseguite e le tensioni valutate sui diversi provini valutati. Tutti i test sono stati eseguiti alla frequenza di 50 Hz.

[Tabella 9.](#) Test eseguiti per la caratterizzazione termica

<b>Campioni</b>	<b>3h di riscaldamento</b>	<b>2 cicli: 8h riscaldamento/16h raffreddamento</b>
S_TDS_RCF	11/18/25 V	25 V
S_TSG_RCF	11/18/25 V	25 V
S_TDS_R+MCF	11/18/25 V	-
S_TSG_R+MCF	11/18/25 V	-
BENCH_TSG_RCF	21 V	-
BENCH_TSG+LR_RCF	11 V	-
BENCH_LR_RCF	2 V	-

La figura 11a presenta l'assetto sperimentale adottato durante questi test. Le variazioni di temperatura vengono registrate da termocoppie di tipo K incorporate nel materiale. La figura 11b mostra l'esatta posizione delle termocoppie poste nelle lastre più piccole e in quelle a grandezza naturale. Per le lastre  $300 \times 600 \times 40$  mm, queste vengono poste nella sezione centrale, a 1 cm di distanza dall'elettrodo di ingresso e al centro di tutti i provini; le lastre più grandi, invece, incorporano 12 termocoppie disposte su tutta la lastra. Le linee rosse tratteggiate presenti in figura 11b, stanno ad indicare una griglia quadrata virtuale utile per rendere più facile l'identificazione dei sensori e l'analisi dei risultati. I sensori in prossimità dei bordi longitudinali (file A e C) vengono posti nella sezione mediana del banco mentre quelli situati nella zona centrale (fila B) vengono disposti più vicini alla superficie esterna superiore.



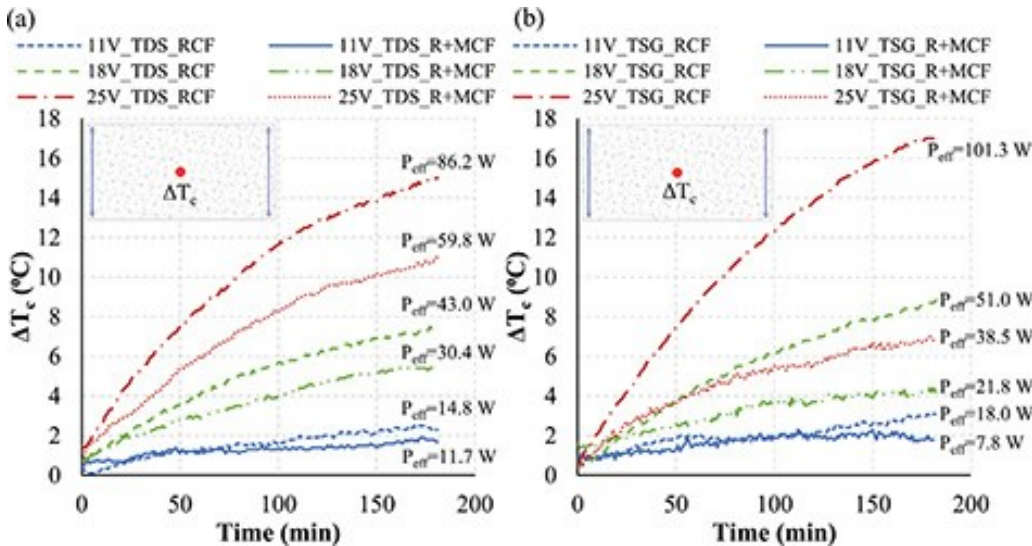
**Figura 11.** (a) Allestimento sperimentale per le prove di caratterizzazione termica e (b) Posizionamento di termocoppie in lastre più piccole e in quelle a grandezza naturale.

### 3.5.3.2.1. Ciclo di riscaldamento di 3h in lastre

La prima serie di prove prevede l'applicazione di tre diverse tensioni effettive (11, 18 e 25 V), per 3 h, su lastre di cemento rettangolari, con entrambi i tipi di smaltimento degli elettrodi (TSG e TDS) e aggiunte carboniose (RCF e R + MCF).

La Figura 12 presenta le curve di riscaldamento ottenute per tutti i provini testati in base alla configurazione degli elettrodi adottata. In particolare, in Figura 12a ritroviamo i campioni con configurazione di elettrodo TDS, mentre la Figura 12b presenta i campioni con configurazione TSG. Le variazioni di temperatura presentate, corrispondono ai valori registrati al centro del provino, essendo, questa, la zona più

rappresentativa del reale potenziale di riscaldamento del materiale. La Figura 12 include i valori di consumo energetico medio registrati in ogni test. Questi valori vengono mantenuti costanti per tutta la durata del test di riscaldamento, con una deviazione standard massima di +1 di 0,9 W. La temperatura ambiente durante i test era compresa tra 19 e 21 °C.



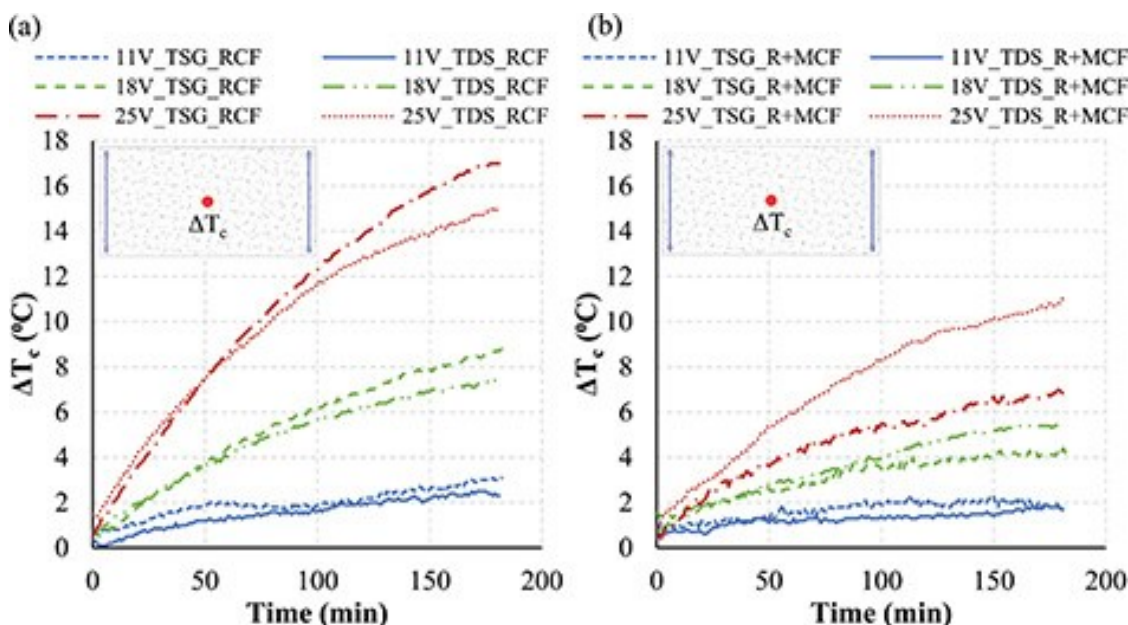
**Figura 12.** Variazione della resistività elettrica con la frequenza.

I valori positivi registrati all'inizio della prova, indicano che la regione interna dell'elemento in calcestruzzo ha temperatura iniziale più alta di quella dell'ambiente. Le curve di riscaldamento descrivono un aumento lineare della temperatura nel tempo, seguito da un secondo stadio caratterizzato da una diminuzione della velocità di riscaldamento. La durata del primo stadio diminuisce con l'intensità della tensione applicata, mentre la riduzione della velocità di riscaldamento, durante il secondo stadio, è più evidente per le alte tensioni. In generale, i risultati mostrano velocità di riscaldamento crescenti con la tensione applicata. Le variazioni di temperatura registrate alla fine dell'intervallo di prova sono comprese tra 7 - 17, 4 - 8.5 e 2 - 3 °C, rispettivamente per 25, 18 e 11 V. Questi valori riflettono che la prestazione di riscaldamento (incremento della temperatura per volt applicato) non è costante per i diversi potenziali adottati in questo studio. Per la configurazione ad alta tensione, le prestazioni di riscaldamento sono comprese tra 0,28-0,68 °C / V, mentre per la configurazione a bassa tensione, le prestazioni di riscaldamento diminuiscono a 0,17-0,28 °C / V.

Inoltre, è possibile effettuare un confronto tra le potenze termiche associate alle due aggiunte carboniose introdotte nell'impasto di calcestruzzo. In media, le temperature raggiunte, al termine del test, dal materiale con fibre di carbonio riciclate e scaglie di grafite, sono inferiori del 25 e 50% rispetto a quelle raggiunte dal materiale con sole

fibre di carbonio, rispettivamente per le configurazioni degli elettrodi TDS e TSG. Questi risultati, quindi, suggeriscono che l'incorporazione aggiuntiva di scaglie di grafite nella miscela peggiora significativamente le prestazioni del materiale per applicazioni di riscaldamento, specialmente se viene adottata la configurazione dell'elettrodo TSG.

In Figura 13 ritroviamo la stessa serie di risultati, riorganizzati in modo tale da consentire una valutazione più chiara dell'influenza dello smaltimento degli elettrodi (TDS o STG) sulla capacità di riscaldamento delle lastre RCF (Figura 13a) e R + MCF (Figura 13b). La Figura 13a mostra curve di riscaldamento simili, per entrambe le configurazioni di elettrodi, in campioni con solo fibra di carbonio rinforzata, e ciò sta ad indicare che lo smaltimento dell'elettrodo gioca un ruolo minore sulle prestazioni di riscaldamento del materiale RCF. Al contrario, per R + MCF, non viene mantenuta la stessa tendenza (Figura 13b). In questo caso, i campioni con configurazione dell'elettrodo TDS mostrano curve di riscaldamento più elevate rispetto ai campioni con smaltimento TSG, per tutte le tensioni valutate, e questi risultati suggeriscono che, in materiali a bassa conduttività, l'incremento della superficie in acciaio consente un trasferimento più efficiente delle cariche elettriche tra elettrodo e calcestruzzo conduttivo.



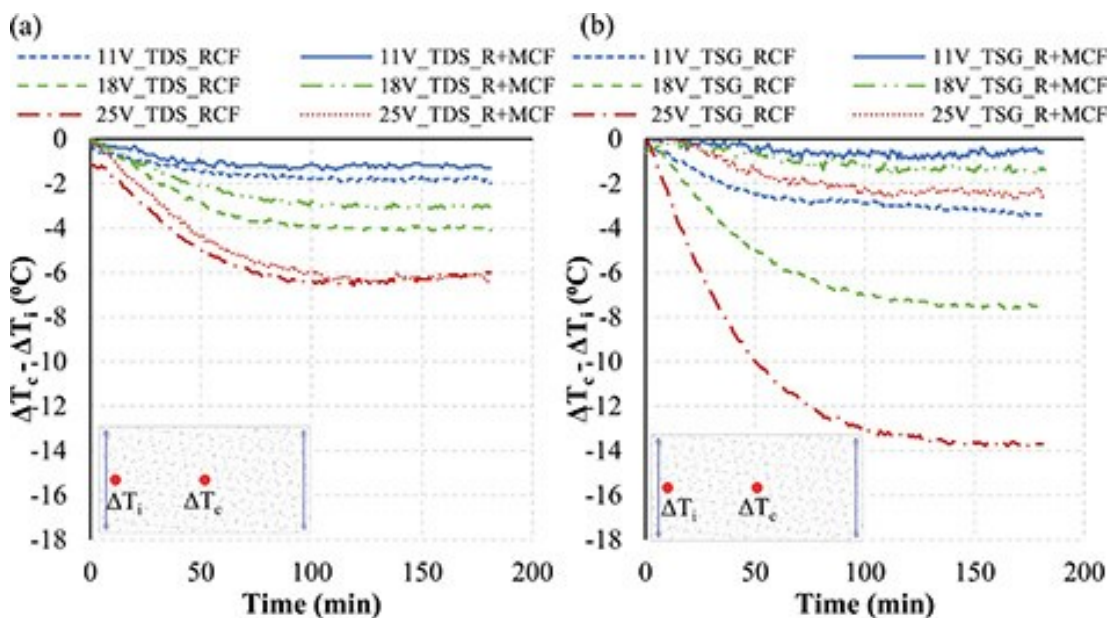
**Figura 13.** Curve di riscaldamento basate sul materiale (RCF e R + MCF) per la configurazione degli elettrodi (a) TDS e (b) TSG.

Lo sviluppo delle miscele di calcestruzzo autoriscaldante non comprende solo la valutazione delle velocità di riscaldamento, ma anche la valutazione della distribuzione della temperatura all'interno dell'elemento, in quanto questa potrebbe



compromettere la funzionalità della struttura e generare elevate sollecitazioni interne che potrebbero influenzare le prestazioni strutturali dell'elemento.

La Figura 14a e la Figura 14b illustrano l'influenza della tensione e dell'aggiunta carboniosa sul gradiente di temperatura registrato tra il centro della lastra ( $\Delta T_c$ ) e vicino all'elettrodo di ingresso ( $\Delta T_i$ ), rispettivamente per la configurazione TDS e TSG. Indipendentemente dalla disposizione degli elettrodi, i gradienti di temperatura sono caratterizzati da un rapido aumento seguito da un secondo stadio in cui la perdita di temperatura tende ad un valore costante, soprattutto per le medie e alte tensioni. Come previsto, i risultati mostrano cali di temperatura crescenti con la tensione applicata, suggerendo che i gradienti di temperatura aumentano in maniera proporzionale alla velocità di riscaldamento.

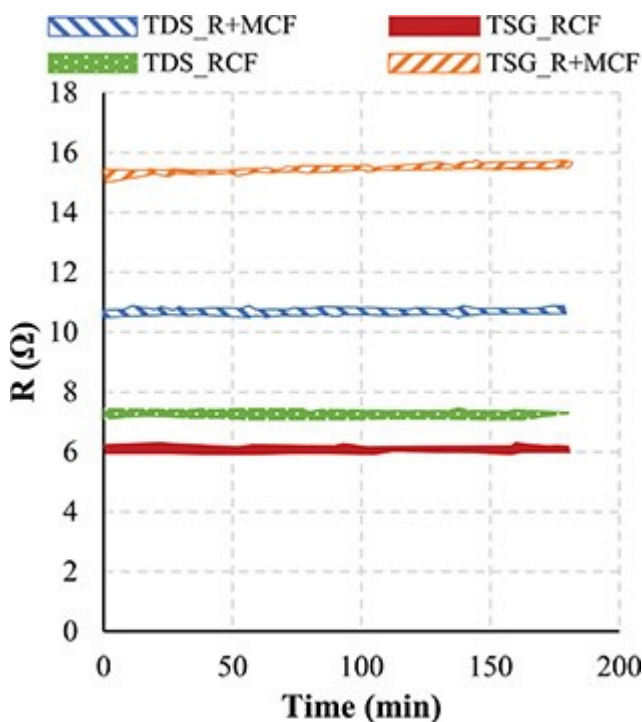


**Figura 14.** Curve di riscaldamento basate sulla configurazione degli elettrodi (TDS e TSG) per (a) RCF e (b) R + MCF.

La Figura 14a mostra una minore influenza del tipo di aggiunta carboniosa sui gradienti di temperatura registrati durante la prova. Quindi, i cali di temperatura registrati nei provini con configurazione dell'elettrodo TDS sono principalmente attribuiti all'intensità della tensione applicata. D'altra parte, la Figura 14b mostra cali di temperatura molto maggiori nei campioni RCF rispetto alle lastre R + MCF. Questi risultati sembrano essere correlati alla piccola superficie di trasmissione del calore della configurazione dell'elettrodo TSG, rispetto al TDS. La piccola area di contatto della configurazione TSG richiede un materiale cementizio altamente conduttivo per distribuire in modo efficiente le cariche elettriche in tutto il provino. In caso contrario, vengono generati picchi di temperatura locale elevati vicino alla posizione

dell'elettrodo e il gradiente di temperatura aumenta in modo significativo, specialmente per le configurazioni ad alta tensione.

Infine, la Figura 15 mostra l'evoluzione della resistenza elettrica dei provini testati. I risultati mostrano valori costanti per tutta la durata del test, indipendentemente dalla tensione applicata. I valori ottenuti vanno da 6 a 15,7  $\Omega$ , rispettivamente per la configurazione del materiale TSG\_RCF e TSG\_R + MCF. Come previsto, i valori di resistenza elettrica sono inversamente proporzionali alla capacit  di riscaldamento del materiale al centro della lastra.



**Figura 15.** Cadute di temperatura registrate tra l'elettrodo di ingresso e il centro della lastra nelle configurazioni degli elettrodi (a) TDS e (b) TSG.

### 3.5.3.2.2. 2 cicli di 8h di riscaldamento/16h di raffreddamento in lastre

La seconda serie di prove prevede l'applicazione di alta tensione (25 V) su lastre di cemento con aggiunta di fibra di carbonio riciclata (RCF) ed entrambi i tipi di smaltimento degli elettrodi (TSG e TDS), durante 2 cicli continui di 8 h di riscaldamento / 16 h di raffreddamento. Questa configurazione di prova consente lo studio delle prestazioni dei diversi campioni sotto cicli di riscaldamento ripetitivi e lunghi con velocit  di riscaldamento elevate, che potrebbero essere rappresentative delle condizioni reali sul campo. La temperatura ambiente durante i test era compresa tra 24 e 28  $^{\circ}\text{C}$ .



La figura 16a mostra l'evoluzione della temperatura registrata al centro del provino rispetto alla temperatura ambiente, per tutta la durata del test. Il primo ciclo di riscaldamento presenta le stesse tendenze descritte per i test di 3 ore in entrambe le configurazioni degli elettrodi, con un rapido aumento della temperatura seguito da valori costanti di questa. I campioni TSG\_RCF non seguono un profilo di riscaldamento naturale vicino alla prima regione di temperatura costante, ed infatti, questi, subiscono un arresto improvviso, indicando un possibile deterioramento del materiale. Gli incrementi di temperatura registrati raggiungono i 18 °C al termine del periodo di riscaldamento di 8 ore, valore simile a quello ottenuto durante le prove di 3 ore alla stessa tensione. Durante il periodo di disconnessione, il materiale subisce una rapida diminuzione della temperatura seguita da temperatura costante alla temperatura ambiente.

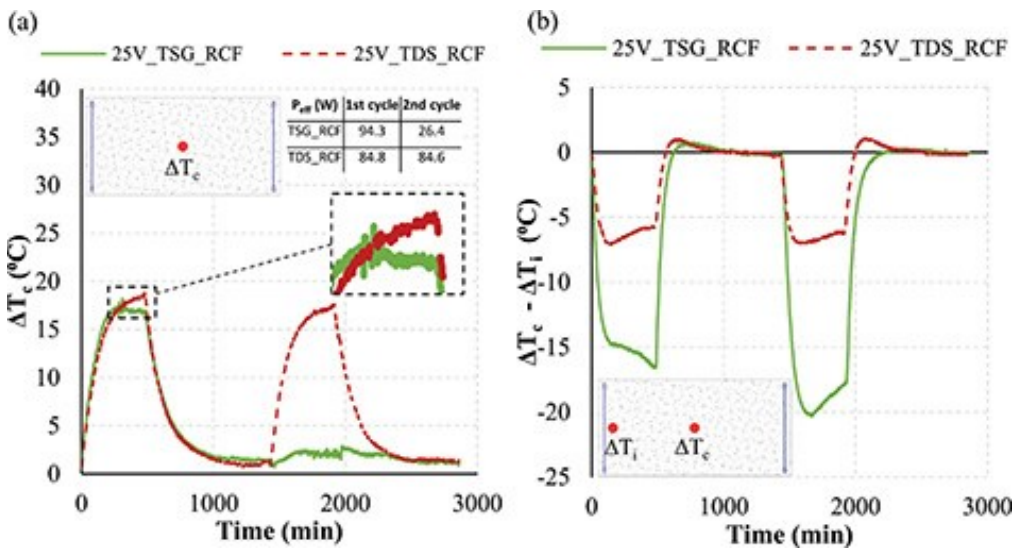


Figura 16. Evoluzione della resistenza elettrica.

La seconda sequenza di riscaldamento, 24 ore dopo l'inizio del test, mostra comportamenti diversi per le configurazioni degli elettrodi TDS e TSG. Le lastre di cemento con elettrodi TDS presentano le stesse velocità di riscaldamento e raffreddamento di quelle descritte per il primo ciclo, suggerendo l'assenza di degrado delle proprietà conduttive e autoriscaldanti del materiale dopo 8 ore di applicazione ad alta tensione. Tuttavia, le lastre con la configurazione degli elettrodi TSG non sono in grado di indurre un riscaldamento significativo durante l'intero ciclo. Questo comportamento indica che le proprietà conduttive del materiale potrebbero essere completamente deteriorate, forse a partire dalla regione di temperatura costante del primo ciclo di riscaldamento (come detto in precedenza).

La Figura 16b mostra il gradiente di temperatura registrata tra il centro della lastra ( $\Delta T_c$ ) e vicino all'elettrodo di ingresso ( $\Delta T_i$ ) per la configurazione TDS e TSG. In generale, i gradienti di temperatura aumentano rapidamente durante le prime ore

delle fasi di riscaldamento e diminuiscono rapidamente durante le fasi di raffreddamento. I gradienti di temperatura massimi registrati per elettrodi TDS e STG durante il primo ciclo sono rispettivamente 7 e 17 °C. É da notare che anche se entrambe le configurazioni degli elettrodi hanno raggiunto velocità di riscaldamento simili (Figura 16a), i gradienti di temperatura per elettrodi TSG sono 2,4 volte superiori rispetto a quelli TDS. Questi risultati confermano le migliori prestazioni dei TDS quando si tratta di ridurre al minimo i gradienti di temperatura all'interno del campione.

La degradazione delle proprietà conduttive nei provini TSG\_RCF viene confermata durante la seconda fase di riscaldamento. La figura 16a mostra che questa miscela non registra alcun aumento rilevante di temperatura al centro della lastra durante questo periodo. D'altra parte, il gradiente di temperatura rappresentato in Figura 16b indica che la termocoppia situata vicino all'elettrodo d' ingresso ha registrato un aumento della temperatura durante la seconda fase di riscaldamento, ovvero, il calcestruzzo vicino all'elettrodo di ingresso viene riscaldato, ma le proprietà conduttive del materiale non sono sufficienti per riscaldare il centro della lastra.

Infine, la Figura 17 mostra la resistenza elettrica durante il primo ciclo di riscaldamento per i campioni TSG\_RCF e TDS\_RCF. I campioni con configurazione dell'elettrodo TDS presentano una resistenza costante durante i due cicli di riscaldamento, indicando che i campioni sono stati in grado di sostenere la temperatura massima in modo costante per lunghi periodi di tempo e senza alcuna degradazione. D'altra parte, i campioni con elettrodi TSG mostrano un aumento della resistenza elettrica dalla seconda ora del ciclo di riscaldamento. Ciò suggerisce una riduzione crescente delle proprietà conduttive del materiale nel tempo e la successiva incapacità di generare calore al centro del provino.

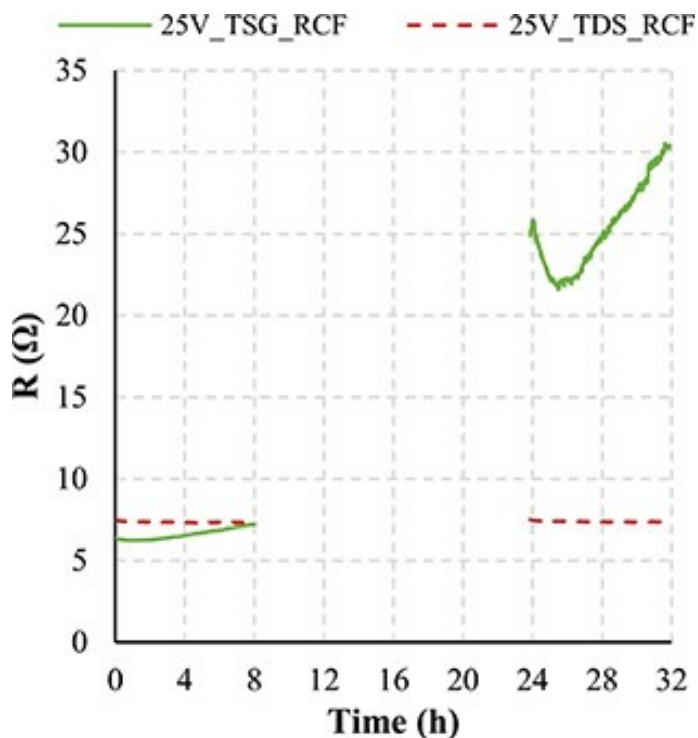


Figura 17. (a) Evoluzione della temperatura al centro della lastra e (b) Calo della temperatura.

### 3.5.3.2.3. Caratterizzazione termica di lastre in scala reale

La Figura 18 presenta i risultati associati alla caratterizzazione termica di lastre in scala reale con configurazioni di elettrodi TSG, TSG + LR e LR. Tutti i test vengono eseguiti a temperatura ambiente compresa tra 26 e 29 °C. Il profilo completo della temperatura, per ciascuna delle 12 termocoppie disposte, viene visualizzato solo per la prima configurazione, per mostrare i tipici profili di evoluzione della temperatura registrati (Figura 18). Poiché la grande quantità di termocoppie incorporate ostacola l'interpretazione dei grafici, i risultati vengono presentati in Figura 19-Figura 21 come mappe istantanee del riscaldamento dopo 30 min / 1 h / 2 h / 3 h dall'inizio del test. La temperatura rappresentata è la differenza tra la temperatura registrata dal sensore e la temperatura ambiente.

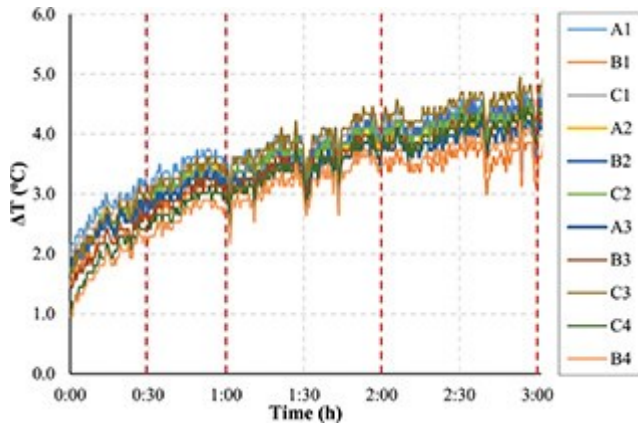


Figura 18. Evoluzione completa della temperatura sulla lastra TSG\_RCF con 21 V.

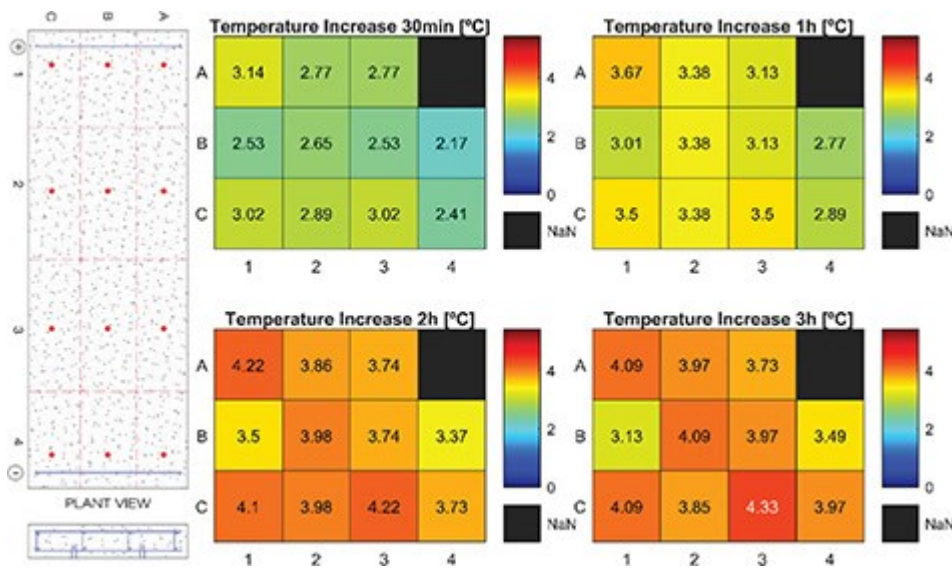


Figura 19. Mappe di riscaldamento a 30min / 1h / 2h / 3h sulla lastra TSG\_RCF con 21 V.

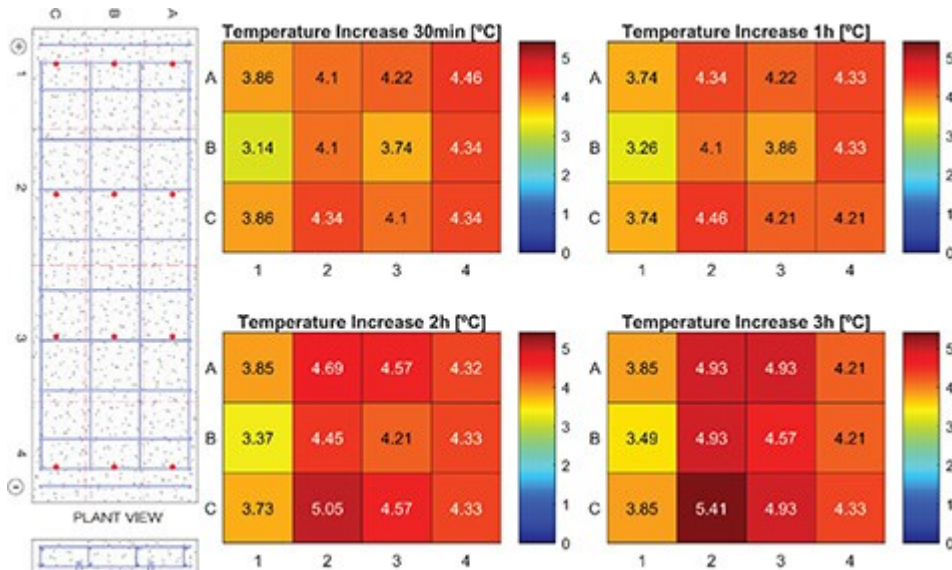


Figura 20. Mappe di riscaldamento a 30min / 1h / 2h / 3h sulla lastra TSG + LR\_RCF con 11

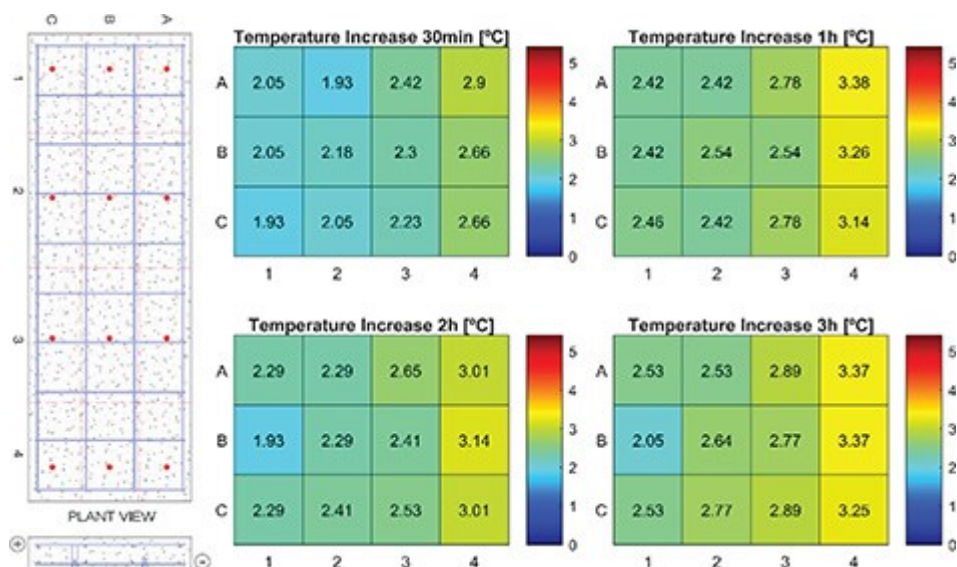


Figura 21. Mappe di riscaldamento a 30min / 1h / 2h / 3h sulla lastra LR\_RCF con 2 V.

La lastra con la configurazione di elettrodi TSG e senza rinforzo in acciaio raggiunge incrementi di temperatura tra 2,1-3,1 °C dopo 30 min a 21 V (Figura 19). Il valore di temperatura più grande si ottiene vicino all'elettrodo di ingresso (1A) mentre la temperatura più bassa si registra alle termocoppie situate vicino all'elettrodo di uscita (4B, 4C). L'abbassamento della temperatura tra queste posizioni è limitato a meno di 1 °C, che è una variazione di temperatura molto bassa considerando la distanza tra gli elettrodi (quasi 2 m). Durante il periodo di riscaldamento di 1 ora - 2 ore, le variazioni di temperatura aumentano più lentamente, raggiungendo temperature comprese tra 3,4-4,2 °C. Dopo 2 ore di riscaldamento, la lastra sembra aver raggiunto il suo massimo potenziale di riscaldamento a questa tensione, poiché la temperatura si mantiene costante. Il consumo energetico medio registrato durante questo test è di 25,9 W, con una deviazione standard +1 di soli 0,08 W.

La lastra con un rinforzo longitudinale aggiuntivo (STG + LR, Figura 20) raggiunge incrementi di temperatura di 3,1-4,5 °C dopo soli 30 min di applicazione a 11 V. Quindi, i profili di temperatura aumentano leggermente fino alla fine del test, dove l'aumento della temperatura varia da 3,5-5,4 °C. I gradienti di temperatura registrati tra le posizioni più calde e quelle più fresche aumentano da 1,3 (a 30 min) a 1,9 °C (a 3 h). Il consumo energetico medio registrato durante questo test è di 26,1 W, con una deviazione standard +1 di soli 0,08 W.

Infine, la lastra che utilizza il rinforzo longitudinale stesso come elettrodi di ingresso e uscita, mostra aumenti di temperatura da 1,9-2,9 °C dopo 30 min a 2 V (Figura 21). La temperatura continua ad aumentare leggermente fino a 2,4-3,4 °C dopo 1 h di applicazione della tensione. A questo punto la temperatura raggiunta viene

mantenuta fino alla fine del periodo di riscaldamento. Anche se l'aumento di temperatura mostrato da questa configurazione di elettrodi è inferiore alle temperature raggiunte nei banchi precedenti, le prestazioni di riscaldamento di questo banco sono notevolmente superiori se si considera la tensione applicata. L'aumento di temperatura per volt applicato ( $^{\circ}\text{C} / \text{V}$ ) di questa configurazione è 7,5 volte maggiore rispetto al banco TSG\_RCF e 3 volte maggiore di quello TSG + LR\_RCF. In termini di consumo elettrico, questa configurazione ha registrato un consumo medio, durante il test, di soli 7,7 W, con una deviazione standard +1 di 0,06 W.

Analogamente a tutte le altre lastre valutate, i gradienti di temperatura registrati tra le posizioni più calde e quelle più fresche sono limitati a valori intorno a  $1^{\circ}\text{C}$ , per tutta la durata del test. A differenza delle lastre più piccole, i gradienti di temperatura registrati nelle lastre a scala reale, non compromettono né il comfort né le prestazioni strutturali a causa delle sollecitazioni termiche. Questi risultati indicano che, se l'aumento di temperatura è limitato a  $3\text{-}4^{\circ}\text{C}$  rispetto alla temperatura ambiente, i gradienti di temperatura possono essere mantenuti a intervalli accettabili e, pertanto, la tecnologia sviluppata può essere potenzialmente utilizzata per le applicazioni antighiaccio, nell'arredo urbano, in climi in cui le temperature più basse rimangono nell'intervallo di  $-3$  o  $-4^{\circ}\text{C}$ .

In sostanza, questo documento presenta un ampio studio sperimentale, da campioni di laboratorio su piccola scala a lastre in scala reale, sull'attuale capacità del calcestruzzo conduttivo da utilizzare per applicazioni antighiaccio e autoriscaldanti.

### **3.6. Calcestruzzo rinforzato con fibra di carbonio e aggiunta di materiali nano e micro conduttivi [10]**

Negli ultimi anni, con lo sviluppo di materiali in nanoscala, sempre più ricercatori hanno prestato attenzione non solo al calcestruzzo contenente fibre di carbonio, di acciaio e nerofumo, ma hanno anche iniziato a studiare il composito di calcestruzzo contenente materiali nano e micro conduttivi. Tra questi materiali su nanoscala, il fumonero di carbonio, i nanotubi di carbonio e le nanofibre di carbonio, sono materiali conduttivi soddisfacenti, ed infatti, in questo studio, vengono utilizzate le nanofibre di carbonio e il fumonero di carbonio, per migliorare le proprietà del calcestruzzo elettricamente conduttivo.

### 3.6.1. Materiali utilizzati

I materiali utilizzati in questo studio sono:

- Cemento Portland ordinario;
- Aggregato da frantumazione;
- Sabbia di fiume;
- Sodio dodecil solfato;
- Tributyl fosfato;
- Fibre di carbonio;
- Nano fibre di carbonio e nerofumo.

Le fibre di carbonio utilizzate in questo studio, vengono tagliate a base di pece isotropica, con una lunghezza di 6 mm e il loro dosaggio è dello 0,4% in peso di cemento. L'aggregato di frantumazione, con dimensione massima delle particelle di 10 mm, viene utilizzata come aggregato grosso, mentre, la sabbia di fiume, viene utilizzata come aggregato fine. Il sodio dodecil solfato, nella stessa quantità delle nanofibre di carbonio, viene utilizzato come disperdente di queste; il tribul fosfato, nella quantità dello 0,03% in peso di cemento, invece, viene utilizzato come antischiuma. Inoltre, per regolare la lavorabilità del calcestruzzo fresco, viene utilizzato un agente riducente dell'acqua, nella quantità dello 0,5% in peso di cemento e il rapporto acqua-legante è fissato a 0,50. Le nanofibre di carbonio vengono utilizzate nella quantità di 0,2%, 0,4%, 0,6% in peso di cemento, mentre il nerofumo viene utilizzato nella quantità di 0,4%, 0,6%, 0,8% in peso di cemento.

Le proprietà delle nanofibre di carbonio e del nerofumo sono riportate rispettivamente nelle Tabelle 10 e 11.

**Tabella 10:**

Proprietà delle nanofibre di carbonio

Contenuto (%)	Diametro (nm)	Lunghezza ( $\mu\text{m}$ )	Superficie specifica ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	Morfologia delle particelle	Densità apparente ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Conduttività elettrica (s/cm)
99.9	150–200	10–0	>20	Filamentosa	0.043	150

**Tabella 11:**

Proprietà del nerofumo

Contenuto (%)	Diametro (nm)	Superficie specifica ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	Morfologia delle particelle	Densità ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
---------------	---------------	--	-----------------------------	------------------------------------



99.9	40	500	Sferica	0.09
------	----	-----	---------	------

### 3.6.2. Metodi sperimentali

Nei test di resistività, la misurazione della resistività elettrica a corrente continua (CC) viene effettuata nell'asse di sollecitazione del provino, utilizzando il metodo a quattro elettrodi. I quattro contatti dell'elettrodo vengono posizionati simmetricamente rispetto al punto medio lungo la lunghezza del campione: i contatti esterni (120 mm di distanza dal punto medio) vengono impostati allo scopo di far passare la corrente; i contatti interni (a 90 mm dal punto medio) vengono impostati per misurare la tensione.

La resistività del calcestruzzo può essere calcolata come segue:

$$\rho = \frac{US}{IL}$$

Dove U sta ad indicare la tensione di prova [V]; I, la corrente di prova [A]; S, l'area della sezione trasversale del provino [cm<sup>2</sup>]; L, la distanza tra i due contatti esterni [cm].

Il coefficiente di variazione della resistività, invece, viene calcolato come:

$$\eta = \frac{\rho_i}{\rho_0}$$

Dove  $\rho_i$  sta ad indicare la resistività del calcestruzzo in un certo stato, mentre  $\rho_0$ , la resistività del calcestruzzo nello stato iniziale.

Il coefficiente sensibile alla deformazione viene calcolato come:

$$\beta = \frac{(\rho_0 - \rho_i)}{\rho_0(u_i - u_0)}$$

Dove  $\rho_i$  è la resistenza del calcestruzzo in un certo stato;  $\rho_0$ , la resistività del calcestruzzo nello stato iniziale;  $u_i$ , la tensione del calcestruzzo in un certo stato; e  $u_0$ , la tensione del calcestruzzo nello stato iniziale.

In questo studio, i campioni vengono posti in un forno di essiccazione termostatico a 30 ° C per 1 giorno, e quindi a 20 ° C per 1 giorno, per simulare l'ambiente asciutto;



mentre, per simulare un ambiente umido, vengono sottoposti a polimerizzazione per 1 giorno nella stanza di stagionatura alla temperatura di 20 °C e umidità del 98%.

### **3.6.2.1. Effetto del tempo di conduzione sulla resistività del calcestruzzo elettricamente conduttivo**

Nella fase iniziale, indipendentemente dall'uso di nanofibre di carbonio o di fumonero, la resistività del calcestruzzo diminuisce leggermente con l'aumento del tempo di conduzione. Tuttavia, quando il tempo di conduzione è > 15 min, la resistività del calcestruzzo diventa stabile, il che può essere dovuto all'effetto di polarizzazione.

### **3.6.2.2. Sensibilità alla pressione del calcestruzzo conduttivo sotto carico a compressione**

La resistività del calcestruzzo conduttivo avente un basso contenuto di materiali nano e micro conduttivi, varia di poco con l'aumento del contenuto di questi, in quanto, in ambiente secco, quando il contenuto di fibra di carbonio è basso, la principale forma di conduzione elettrica all'interno del calcestruzzo è la conduzione elettrica per effetto tunnel. L'aggiunta di materiali nano e micro conduttivi, fa compattare maggiormente il calcestruzzo elettricamente conduttivo, rendendo più difficile la conduzione e facendo sì che la resistività di tale calcestruzzo sia superiore a quella del calcestruzzo conduttivo senza materiali nano e micro conduttivi. Tuttavia, con il continuo aumento di materiali nano e micro conduttivi, lo spazio occupato da questi all'interno del calcestruzzo si allarga, portando alla formazione di più percorsi di conduzione interni che si vanno a sovrapporre, provocando la riduzione della resistività. Si può anche vedere, che la resistività del calcestruzzo conduttivo contenente nanofibre di carbonio aumenta gradualmente con l'aumento del dosaggio dell'aggiunta, tranne per il fatto che c'è un leggero calo al dosaggio dello 0,4%, mentre il calcestruzzo contenente nano nerofumo presenta una forte diminuzione della resistività al dosaggio dello 0,6%. Con l'aumento del carico di compressione, il coefficiente di variazione della resistività del calcestruzzo conduttivo contenente nano nerofumo cambia di poco. Una possibile ragione è che all'interno del calcestruzzo, sotto carico, si verifichi la sovrapposizione delle fibre di carbonio e delle nanofibre di carbonio. In questo caso, la conduzione elettrica per effetto tunnel, si trasforma in conduzione elettrica sovrapposta, il che porta ad un'evidente variazione del coefficiente di resistività. In conclusione, in ambiente secco, la sensibilità alla

pressione del calcestruzzo conduttivo con aggiunta di nanofibre di carbonio, è più significativa di quella con aggiunta di nano nerofumo.

### **3.7. Calcestruzzo conduttivo composito trifasico [16]**

In seguito all'osservazione delle proprietà conduttive del calcestruzzo conduttivo in fibra d'acciaio, fibra di carbonio e fibra di acciaio e grafite, in questo studio viene proposto un calcestruzzo conduttivo composito trifasico, che presenta come materiali conduttivi al suo interno, polvere di grafite, fibra di acciaio e fibra di carbonio.

La polvere di grafite viene utilizzata per il suo alto contenuto di carbonio, che può migliorare significativamente la conduttività del calcestruzzo cementizio. La fibra di acciaio può migliorare la resistenza alla compressione e alla flessione del calcestruzzo, per compensare la bassa resistenza causata dalla grafite, ma, quando la fibra di acciaio viene utilizzata solo come materiale conduttivo, la sua conduttività diminuisce dopo un periodo di tempo a causa della ruggine. La fibra di carbonio può agire come un ponte conduttivo per indurre l'effetto di cortocircuito, che può migliorare significativamente la conduttività del calcestruzzo.

#### **3.7.1. Materiali utilizzati**

I materiali grezzi utilizzati in questo studio sono:

- Cemento Portland;
- Aggregato grosso;
- Sabbia;
- Superfluidificante;
- Antiruggine;
- Idrossi-propil-metilcellulosa.

Per quanto riguarda l'aggregato grosso, la dimensione massima delle particelle di questo è di 16 mm, in quanto particelle grandi bloccano il percorso conduttivo ed inoltre, durante il processo di miscelazione, la fibra di carbonio è più facilmente usurabile.

La sabbia viene utilizzata, invece, come aggregato fine.

Il superfluidificante viene utilizzato in quanto consente di ridurre il contenuto d'acqua del 20% in un dosaggio dell'1% di cemento.

L'antiruggine è importante per prevenire la corrosione della fibra d'acciaio; mentre l'idrossi-propil-metilcellulosa svolge la funzione di agente disperdente della fibra di carbonio e viene introdotta in una dose dello 0,4% della massa di cemento.

I materiali conduttivi utilizzati, come detto in precedenza, sono:

- Polvere di grafite;
- Fibra d'acciaio;
- Fibra di carbonio.

Vengono scelti questi tre materiali conduttivi, in quanto l'aggiunta di polvere di grafite nel calcestruzzo rinforzato con fibre di acciaio può diminuire la resistività e la resistenza del calcestruzzo, mentre per quanto riguarda il calcestruzzo conduttivo in fibra di carbonio, un grande dosaggio di fibra di carbonio è difficile da disperdere ed è costoso.

La proporzione della miscela del calcestruzzo conduttivo trifase è mostrata in Tabella 12.

Tabella 12. Proporzione della miscela del calcestruzzo conduttivo trifase

Numero	Quantità dei materiali costituenti il calcestruzzo (kg/m <sup>3</sup> )				Rapporto di sabbia (%)	Rapporto acqua-cemento	Volume della fibra d'acciaio (%)	Volume della fibra di carbonio (%)	Contenuto di grafite (%)
	Acqua	Cemento	Sabbia	Ghiaia					
1	215	490	636	880	42	0.44	1.0	0.4	4
2	215	490	629	869	42	0.44	1.2	0.4	6
3	215	490	615	850	42	0.44	1.0	0.3	6
4	215	490	610	842	42	0.44	1.2	0.3	4

La resistività del gruppo # 1 è minore di quella degli altri perché il primo è miscelato in maniera artificiale, ma senza l'utilizzo di una betoniera, mentre gli altri tre gruppi vengono miscelati utilizzando questa. La miscelazione artificiale (usata per #1) riduce l'abrasione della fibra di carbonio causata da aggregati grossolani, facendo sì che la resistività diminuisca maggiormente, ma, per motivi tecnici, non è possibile utilizzare questo tipo di miscelazione per la costruzione delle autostrade. La miscelazione all'interno di una betoniera, avviene aggiungendo dispersioni acquose di fibra di carbonio all'interno di questa e controllando il tempo di miscelazione che, per ridurre l'abrasione della fibra di carbonio, non dovrebbe superare i 100 s.

### 3.7.2. Prova di riscaldamento

Per la prova di riscaldamento, i campioni di calcestruzzo conduttivo composito trifasico vengono avvolti con materiali isolanti (polistirolo).

I campioni vengono posti in un congelatore per oltre 5 ore fino a quando non viene raggiunta una temperatura costante. Una volta attivata l'alimentazione, viene generato calore a causa della resistenza elettrica dei materiali conduttivi. La temperatura superficiale del campione di calcestruzzo viene misurata, utilizzando un termometro a raggi infrarossi, ogni 30 min e il processo di misurazione viene eseguito rapidamente.

I risultati della prova di riscaldamento sotto 27 e 44 volt di corrente alternata sono riportati in Tabella 13.

Tabella 13. Risultati della prova di riscaldamento

Tempo (min)	0	30	60	90	120	150
Temperatura sotto 27 V (°C)	-9.5	-8.0	-6.4	-4.6	-3.0	-0.8
Temperatura sotto 44 V (°C)	-13.8	-9.1	-3.2	3.5	8.0	-

La temperatura del calcestruzzo conduttivo sale a 8,7 ° C dopo 2,5 h sotto 27 V e la temperatura superficiale del provino aumenta ad una velocità di circa 1,5 ° C ogni 30 min. Per 44 V, invece, la temperatura del calcestruzzo conduttivo sale a 21,8 ° C dopo 2 h e la temperatura superficiale aumenta ad una velocità di circa 5,5 ° C ogni 30 min. Durante il test, la corrente elettrica tende ad aumentare insieme al tempo di accensione, e ciò indica che la resistività diminuisce all'aumentare della potenza in ingresso durante il processo sperimentale. Questo può essere attribuito al fatto che le reti conduttive formate dalla fibra si sovrappongono tra loro, in modo tale che gli elettroni della fibra di carbonio, polvere di grafite e fibra di acciaio entrino in contatto. Inizialmente, la temperatura è bassa, la conduzione elettronica è debole e la corrente è piccola; con l'aumentare della temperatura del campione, gli elettroni si attivano, facendo sì che si verifichino conduzione ionica ed effetto tunnel, i quali vanno a migliorare la conduzione.

Bassa resistività e alta densità di potenza determinano l'effetto di riscaldamento. Sulla base degli effetti del riscaldamento a diverse tensioni del calcestruzzo conduttivo composito trifasico, è possibile utilizzare questo tipo di calcestruzzo per ottenere lo sbrinamento delle pavimentazioni.

## Bibliografia

- [1] “Conductive concrete made from recycled carbon fibres for self-heating and de-icing applications in urban furniture” (2020); G. Faneca, T. Ikumi, J. M. Torrents, A. Aguado, I. Segura.
- [2] “Energy-efficient design of a carbon fiber-based self-heating concrete pavement system through finite element analysis” (2020); S. M. Sajed Sadati, Kristen S. Cetin, Halil Ceylan, Sunghwan Kim.
- [3] “Highly conductive carbon fiber reinforced concrete for icing prevention and curing” (2016); O. Galao, L. Banòn, F. J. Baeza, J. Carmona, P. Garcés.
- [4] Effect of different metal micro powders on electrical resistivity of cementitious composites” (2019); Salam R. Armoosh, Meral Oltulu.
- [5] “Properties and road engineering application of carbon fiber modified-electrically conductive concrete” (2020); S. Liu, Y. Ge, M. Wu, H. Xiao, Y. Kong.
- [6] “Development of electrically conductive concrete and mortars with hybrid conductive inclusions” (2020); R. Fulham-Lebrasseur, L. Sorelli, D. Conciatori.
- [7] “Electrically conductive concrete: a laboratory-based investigation and numerical analysis approach” (2020); H. Dehghanpour, K. Yilmaz, F. Afshari, M. Ipek.
- [8] “Research of properties on graphite conductive slag in asphalt concrete” (2020); J. Sun, A. Bieliatynskiy, K. Krayushkina, O. Akmaldinova.
- [9] “Utilization of steel slags to produce thermal conductive asphalt concretes for snow melting pavements” (2020); W. Jiao, A. Sha, Z. Liu, W. Jiang, L. Hu, X. Li.
- [10] “Effect of nano and micro conductive materials on conductive properties of carbon fiber reinforced concrete” (2020); J. Han, D. Wang, P. Zhang.
- [11] “Investigation of specimen size, geometry and temperature effects on resistivity of electrically conductive concretes” (2020); H. Dehghanpour, K. Yilmaz.
- [12] “Smart materials for heated concrete pavement systems” (2018); A. Sassani.
- [13] “Preparation, properties and microstructure of graphite powder-containing conductive concrete” (2019); S. H. Liu, M. Q. Wu, M. J. Rao, L. H. Li, H. L. Xiao.
- [14] “Development of carbon-fiber-modified electrically conductive concrete for implementation in Des Moines international airport” (2018); A. Sassani, H. Ceylan, S. Kim, A. Arabzadeh, P. C. Taylor, K. Gopalakrishnan.

- [15] "Electrical and mechanical properties of asphalt concrete containing conductive fibers and fillers" (2016); H. Wang, J. Yang, H. Liao, X. Chen.
- [16] "Three-phase composite conductive concrete for pavement deicing" (2015); J.Wu; J. Liu; F. Yang.
- [17] "Preparation of steel fiber/graphite conductive concrete for grounding in substation" (2014); D. Zhang, H. Le, X. Yan, T. Yuan, J. Li.
- [18] "Conductivity and mechanical properties study of steel fiber reinforced graphite conductive concrete" (2011); S. Su, Y. Yan, X. Yu.