



Ricerca di Sistema elettrico

## Il solare termodinamico nella Ricerca di Sistema Elettrico

*D. Mazzei, A. Antonaia, A. Miliozzi,  
G.M. Giannuzzi, R. Di Maggio*

IL SOLARE TERMODINAMICO NELLA RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO. SUPPORTO AI MINISTERI E  
COLLABORAZIONI INTERNAZIONALI

D. Mazzei , A. Antonaia, A. Mlliozzi, G. M. Giannuzzi, R. Di Maggio

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Energia da fonte solare

Obiettivo: Comunicazione e diffusione dei risultati, supporto ai ministeri e collaborazioni internazionali

Responsabile del Progetto: Domenico Mazzei, ENEA

## Indice

1. SOMMARIO .....	5
2. PROGRAMMA DEL WORKSHOP .....	9
2.1 PRESENTAZIONI.....	10
2.1.1 <i>Il solare termodinamico nella ricerca di sistema elettrico</i> .....	10
2.1.2 <i>Coating solare: strategie per migliorare le prestazioni e ridurre i costi</i> .....	14
2.1.3 <i>Studio di sistemi innovativi di accumulo termico</i> .....	25
2.1.4 <i>Sviluppo di materiale cementizio per accumulo termico</i> .....	35

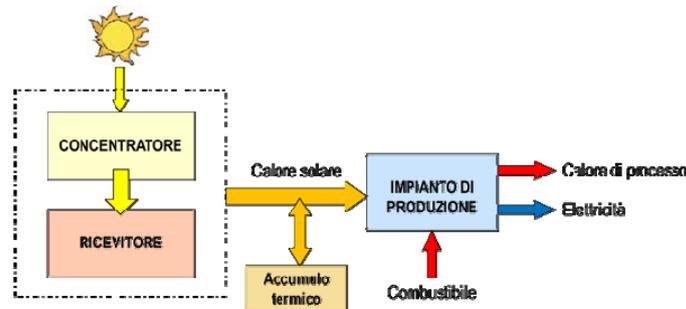


## 1. Sommario

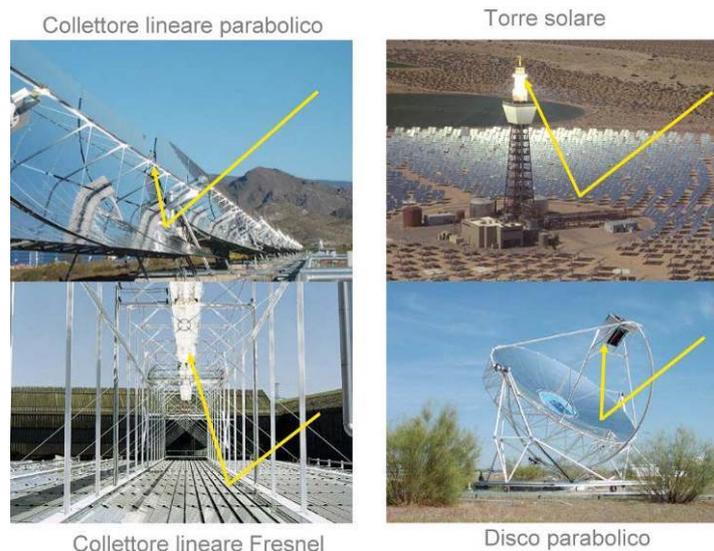
Il Ministero dello Sviluppo Economico ha in corso un Accordo di Programma con l'ENEA per lo svolgimento di attività di ricerca e sviluppo su tematiche strategiche, inerenti il sistema elettrico nazionale, la cui ricaduta è a totale beneficio degli utenti. In questo contesto si inserisce la ricerca su "Energia Elettrica da fonte solare" con la finalità di utilizzare al meglio quella che tra le fonti rinnovabili e a basso impatto ambientale è la più abbondante sulla terra: il sole.

La ricerca ha lo scopo di dare un contributo allo sviluppo di un sistema di produzione dell'energia elettrica sostenibile e a basso costo. Le attività sono articolate in due linee di ricerca, una riguarda lo sviluppo di celle fotovoltaiche innovative e l'altra fa riferimento alla produzione di energia elettrica mediante tecnologia a concentrazione ad alta temperatura: "Solare Termodinamico".

In questi impianti sono presenti opportuni sistemi ottici (concentratori) per raccogliere la radiazione solare e inviarla su un componente (ricevitore), dove viene assorbita e trasformata in calore ad alta temperatura, che, trasferito ad un fluido, può essere eventualmente accumulato o integrato con altra fonte esterna di energia (es. gas o biomassa), ed impiegato per la produzione di energia elettrica o come calore ad alta temperatura in processi industriali.



A seconda della forma dei concentratori, possiamo distinguere tre diverse tipologie di impianti: a disco parabolico, a torre centrale e a collettore lineare parabolici o Fresnel.



Allo stato attuale la tecnologia più diffusa è quella dei collettori parabolici lineari. In questo ambito l'ENEA ha sviluppato una propria originale linea tecnologica ad alta temperatura caratterizzata dall'utilizzo di sali fusi come fluido di processo e come mezzo di accumulo termico.

La collaborazione con l'industria nazionale ha permesso di sviluppare una filiera industriale, portando, tra l'altro, alla realizzazione, in collaborazione con ENEL, dell'impianto "Archimede": 5 MW integrato con un ciclo combinato a gas in Sicilia (Priolo Gargallo SR).



La ricerca sul solare termodinamico ha come obiettivo principale la riduzione dei costi per rendere questi impianti sempre più competitivi rispetto alla produzione elettrica con i tradizionali combustibili fossili. Questo può essere realizzato sia attraverso il miglioramento dell'efficienza dei principali componenti e sistemi che con la semplificazione impiantistica e il miglioramento delle procedure di gestione e manutenzione. L'attenzione deve essere posta, oltre che ai grossi impianti di produzione di energia elettrica, anche a sistemi di piccola e media taglia per la produzione combinata di energia elettrica e termica, eventualmente ibridizzati con un'altra fonte energetica meglio se rinnovabile.

Nell'ambito del programma della Ricerca di Sistema per il triennio 2012-2014, l'attività è stata finalizzata al:

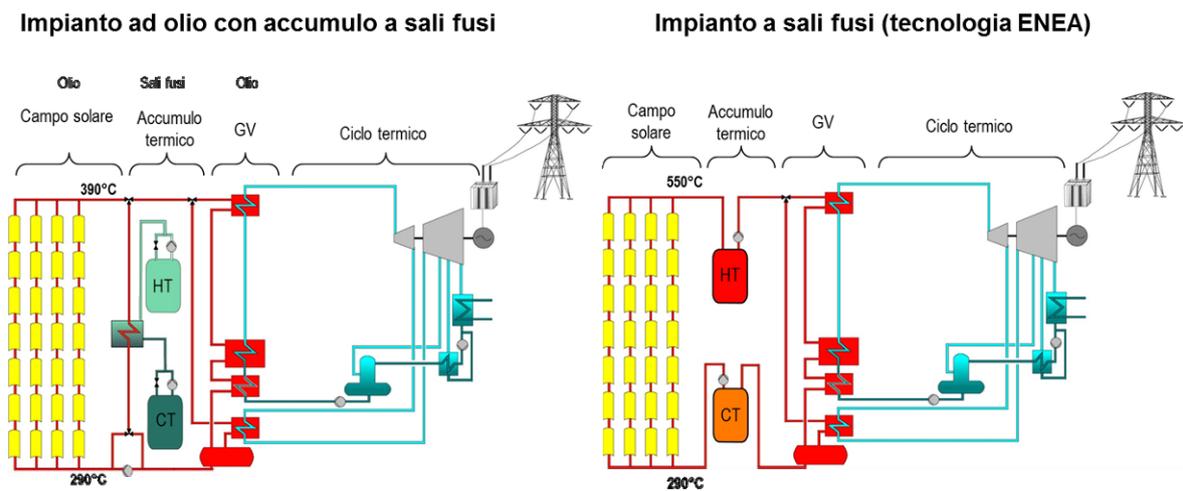
- miglioramento delle prestazioni del tubo ricevitore con lo sviluppo di nuovi coating ad alta efficienza di conversione foto-termica.
- studio, nell'ambito della tecnologia solare a collettori parabolici lineari, di differenti configurazioni impiantistiche per migliorare l'efficienza e produttività e per ridurre i costi di realizzazione e di esercizio. In particolare è stato studiato l'utilizzo di differenti fluidi termici e lo sviluppo di nuovi sistemi di accumulo termico.
- sviluppo di sistemi integrati per applicazioni in impianti di piccola taglia. Verrà progettato un sistema da realizzare nell'impianto sperimentale PCS dell'ENEA Casaccia.

Negli impianti solari termodinamici, con tecnologia a collettori parabolici lineari, il tubo ricevitore è l'elemento fondamentale che svolge la funzione di assorbimento della radiazione solare concentrata e trasferimento del calore al fluido di processo. In particolare esso deve assorbire la maggiore quantità possibile di radiazione solare su di esso concentrata e, allo stesso tempo, deve disperdere verso l'ambiente esterno la minore quantità possibile del calore immagazzinato.

Nell'ottica di ottenere prestazioni sempre più spinte del tubo ricevitore, grandi sforzi vengono condotti per migliorare i parametri foto-termici del coating solare (incremento dell'assorbanza solare e diminuzione delle perdite termiche per irraggiamento). Il laboratorio Film Ottici Speciali del Centro Ricerche ENEA di Portici opera da circa 14 anni sulla tematica dei coating solari da impiegare nella realizzazione di tubi ricevitori per impianti solari termodinamici a collettori parabolici lineari. Nel corso di questi anni sono stati realizzati coating solari innovativi a base di film sottili del tipo CERMET. I materiali e le tecniche per produrli sono stati oggetto di brevetti internazionali. ENEA, attraverso la concessione dei brevetti ed il trasferimento tecnologico, ha consentito la nascita di una strategica realtà industriale italiana (Archimede Solar Energy del gruppo ANGELANTONI) in grado di stare sul mercato con un tubo ricevitore ad altissime prestazioni ed unico, nel panorama mondiale, per impiego ad alta temperatura (550 °C) negli impianti solari a sali fusi. Partendo da questa posizione di assoluto rilievo internazionale nelle attività di sviluppo e trasferimento

tecnologico per la produzione industriale del “tubo ricevitore”, l’ENEA ha puntato, nel triennio 2012-2014, ad un’attività di ricerca che avesse come ambiziosi obiettivi sia un ulteriore miglioramento delle prestazioni del coating solare sia un abbattimento dei costi per la sua produzione.

Nell’ambito degli impianti solari termodinamici, con tecnologia a collettori parabolici lineari, sono presenti due diverse configurazioni impiantistiche in funzione del fluido utilizzato nel campo solare per la raccolta del calore. La prima, quella più diffusa, riguarda impianti che utilizzano un olio diatermico (Therminol VP1), tossico e pericoloso per l’ambiente, che permette una temperatura massima di esercizio di circa 390 °C. La seconda tecnologia, sviluppata dall’ENEA, prevede invece l’utilizzo di una miscela di sali fusi (nitrato di sodio e potassio), alla base dei comuni fertilizzanti per l’agricoltura, non tossica e non dannosa per l’ambiente e che permette di raggiungere temperature operative di circa 550 °C.



La tecnologia a sali fusi sviluppata da ENEA, date le più alte temperature di esercizio, oltre a migliorare il rendimento di conversione elettrica, consente di realizzare sistemi diretti di accumulo termico, in cui lo stesso fluido è utilizzato sia nel campo solare che nel sistema di accumulo. La più elevata temperatura (550 °C invece di 380 °C) permette inoltre di ottenere una capacità di accumulo sensibilmente più elevata, passando da 70 kWh/m<sup>3</sup> nel caso di utilizzo dell’olio a 190 kWh/m<sup>3</sup> con i sali fusi. E quindi a pari energia termica accumulata in un impianto ad olio la dimensione dell’accumulo aumenta del 175%.

Il sale fuso presenta però tra le sue caratteristiche un aspetto negativo rappresentato dall’alta temperatura di solidificazione (240 °C) e quindi, in ogni condizione operativa dell’impianto, il fluido deve essere mantenuto, con un adeguato margine, ad una temperatura superiore a questo valore. Il sale deve essere continuamente mantenuto in circolazione e questo comporta l’utilizzo di parte dell’energia termica accumulata per compensare le perdite termiche e la presenza di sistemi ausiliari di riscaldamento. Per risolvere questo problema l’attività di ricerca è orientata allo studio di miscele alternative che consentono il funzionamento a temperature inferiori della miscela binaria (fino a 120-150 °C), riducendo in questo modo le perdite termiche, migliorando la gestione e manutenzione dell’impianto, con una riduzione dei costi. Un’alternativa ai fluidi termovettori liquidi è l’utilizzo di fluidi gassosi (CO<sub>2</sub>, He, N<sub>2</sub>, aria), che sono già stati presi in esame per gli impianti a torre e mai invece per gli impianti a collettori parabolici lineari.

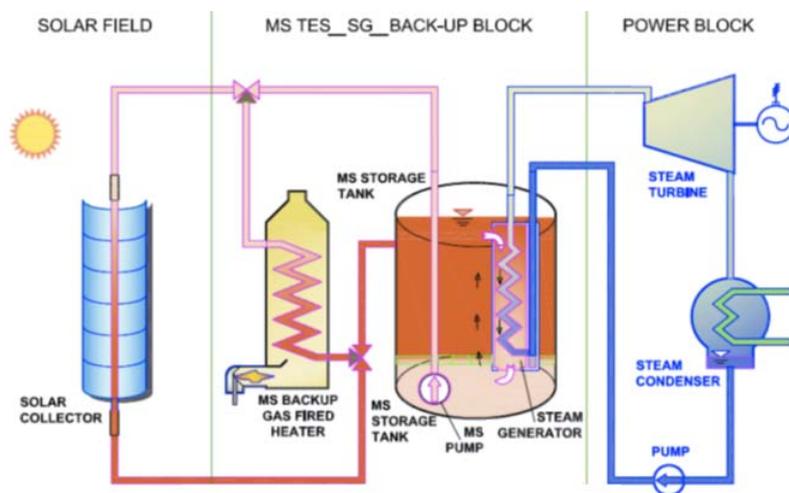
Negli impianti solari termodinamici, per sopperire alla naturale variabilità della fonte primaria di energia (radiazione solare), è quasi sempre presente un sistema di accumulo termico (Thermal Energy Storage), che rappresenta uno degli elementi base per ottenere una riduzione del costo dell’energia prodotta, poiché consente di migliorare il funzionamento dell’impianto, aumentare non solo la sua capacità operativa ma anche di dispacciamento con una migliore integrazione con la rete elettrica.

Gli attuali TES commerciali accumulano energia termica quasi esclusivamente sotto forma di calore sensibile in un fluido (miscela di sali fusi). Questo metodo è sicuramente molto semplice da gestire ma richiede volumi di accumulo elevati, rendendo tali componenti ancora troppo costosi e sicuramente di

grande impatto visivo verso l'ambiente circostante. Scopo della ricerca condotta nel triennio 2012-2014 è stato quello di indagare soluzioni innovative di accumulo termico che fossero in grado di incrementare la densità di energia accumulata, ovvero ridurre i volumi necessari, ed abbattere i costi di realizzazione del componente.

In particolare si è scelto di indagare due nuove possibili soluzioni: la prima riguarda lo studio di un accumulo termico a calore sensibile utilizzando un materiale cementizio, la seconda invece un accumulo a calore latente, utilizzando un materiale a cambiamento di fase (PCM). In entrambi i casi si è proceduto sia alla "progettazione" del materiale che del sistema di accumulo e quindi a studiarne il comportamento termo-meccanico.

Nell'ambito delle applicazioni del solare termodinamico a sistemi co-generativi di piccola e media taglia, l'ENEA ha sviluppato una tecnologia modulare TREBIOS (TRigenerazione con Energie rinnovabili: BIOmasse e Solare termodinamico), con integrazione di biomasse e di altre componenti rinnovabili.



Rappresenta un'evoluzione della tecnologia ENEA, in cui il classico sistema di accumulo termico a doppio serbatoio è sostituito da un unico serbatoio con il generatore di vapore integrato al suo interno. L'integrazione dei due componenti va nell'ottica della semplificazione impiantistica e della riduzione dei costi specialmente in applicazioni di piccola e media taglia. L'attività di ricerca prevede lo studio, la progettazione, la realizzazione e la sperimentazione di sistemi per generazione di energia elettrica di piccole dimensioni basati sull'uso esclusivo di energia termica da prelevare dal sistema di accumulo, utilizzando il serbatoio a sali fusi presente e disponibile nell'Impianto sperimentale PCS (Prova Componenti Solari) sito nell'area Capanna del Centro Ricerche Casaccia dell'ENEA, nelle vicinanze di Roma.

Il 27 maggio 2015 è stato organizzato presso la sede ENEA di Roma, un workshop per presentare i principali risultati dell'attività di ricerca che ENEA, sta portando avanti nell'ambito dell'Energia Elettrica da Fonte Solare, direttamente nei suoi laboratori o in collaborazione con istituti universitari.

Sono state inoltre invitate anche alcune aziende operanti nel settore, con cui ENEA collabora in vari progetti, per discutere su ricadute e proposte per il sistema industriale.

Di seguito viene riportato il programma del Workshop e le presentazioni effettuate relative al solare termodinamico.

## 2. Programma del workshop



### ENERGIA ELETTRICA DA FONTE SOLARE

Roma, 27 maggio 2015

ENEA - Via Giulio Romano n. 41, Roma

Il Ministero dello Sviluppo Economico ha in corso un Accordo di Programma con l'ENEA per lo svolgimento di attività di ricerca e sviluppo su tematiche strategiche, inerenti il sistema elettrico nazionale, la cui ricaduta è a totale beneficio degli utenti. In questo contesto si inserisce la ricerca su "Energia Elettrica da fonte solare" con la finalità di utilizzare al meglio quella che tra le fonti rinnovabili e a basso impatto ambientale è la più abbondante sulla terra: il sole. La ricerca ha, dunque, lo scopo di dare un contributo allo sviluppo di un sistema di produzione dell'energia elettrica sostenibile e a basso costo. Le attività sono articolate in due linee di ricerca, una sullo sviluppo di celle fotovoltaiche innovative e l'altra sul solare termodinamico.

Questa giornata ha la finalità di presentare i risultati delle attività di ricerca svolte nei laboratori dell'ENEA di Portici e Casaccia in collaborazione con istituti universitari. Tale evento vuole, inoltre, aprire un confronto tra la ricerca e le aspettative delle realtà produttive nazionali del settore. In questo modo si potrà delineare un percorso virtuoso col quale la ricerca sarà in grado di promuovere l'innovazione del settore industriale.

- 8:45 **Registrazione dei partecipanti**
- 9:00 **Apertura lavori e indirizzi di salute**  
MARIA CRISTINA CORAZZA, ENEA
- 9:15 **L'ENEA e la Ricerca di Sistema Elettrico: attività e sviluppi futuri**  
VINCENZO PORPIGLIA, ENEA
- 9:30 **Ricerca su celle fotovoltaiche innovative:** PAOLA DELLI VENERI, ENEA
  - Celle a eterogiunzione a-Si/c-Si - MASSIMO IZZI, ENEA
  - Celle a base di CZTS - ALBERTO MITTIGA, ENEA
  - Light management in celle a film sottile - MARIA LUISA ADDONIZIO, ENEA
- 10:30 **Solare termodinamico:** DOMENICO MAZZEI, ENEA
  - Coating solare: strategie per migliorare le prestazioni e ridurre i costi - ALESSANDRO ANTONAIA, ENEA
  - Studio di sistemi innovativi di accumulo termico - ADIO MILIOZZI, MAURO GIANNUZZI, ENEA
  - Sviluppo di materiale cementizio per accumulo termico - ROSA DI MAGGIO, Università di Trento
- 11:30 *Coffee Break*
- 11:45 **Tavola Rotonda – La fonte solare nella Ricerca di Sistema Elettrico: ricadute e proposte per il sistema industriale**  
*Moderatore:* GIOVANNI BATTISTA ZORZOLI, Coordinamento FREE Fonti Rinnovabili ed Efficienza Energetica  
*Intervengono:*  
LUIGI MAZZOCCHI, RSE  
FEDERICA ANGELANTONI, Archimede Solar Energy  
ALESSANDRO MORBI, ITALCEMENTI  
FRANCESCO ORIOLI, SOLTIGUA  
ANNA BATTAGLIA, 3SUN - ENEL Green Power
- 13:00 **Conclusioni**  
GIANPIERO CELATA, ENEA

## 2.1 Presentazioni

### 2.1.1 Il solare termodinamico nella ricerca di sistema elettrico



AGENZIA NAZIONALE  
PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA  
E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

Accordo di Programma MiSE-ENEA

MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO

**RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO**



## IL SOLARE TERMODINAMICO NELLA RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Domenico Mazzei  
ENEA, UTRINN

Workshop - Roma, 27 Maggio 2015



**Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare**

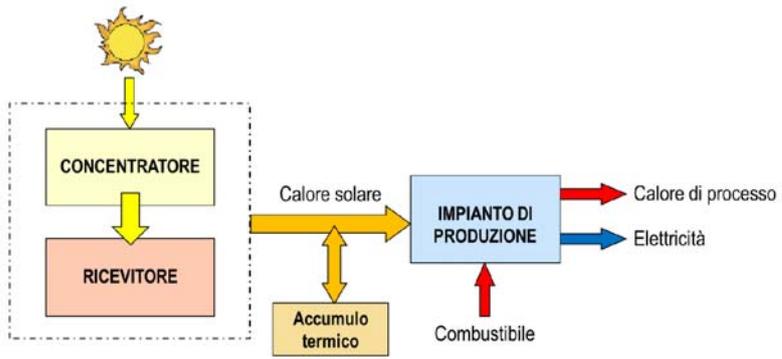
**LP2: Solare termodinamico**



AGENZIA NAZIONALE  
PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA  
E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

Il **solare termodinamico** è una tecnologia nella quale la radiazione solare è l'unica o la principale fonte di calore ad alta temperatura.

Tali impianti utilizzano opportuni sistemi ottici (*concentratori*) per raccogliere la radiazione solare diretta e inviarla su un componente (*ricevitore*), dove viene assorbita e trasformata in calore ad alta temperatura, che, trasferito ad un fluido, può essere impiegato in un ciclo termico per la produzione di energia elettrica o in vari processi industriali.



```

graph TD
    Sun((Sole)) --> C[CONCENTRATORE]
    C --> R[RICEVITORE]
    R -- "Calore solare" --> AT[Accumulo termico]
    AT --> IP[IMPIANTO DI PRODUZIONE]
    Combustibile[Combustibile] --> IP
    IP -- "Calore di processo" --> Out1[Calore di processo]
    IP -- "Elettricità" --> Out2[Elettricità]
    
```

2015
RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO - ACCORDO DI PROGRAMMA MISE- ENEA 2012 - 2014
2

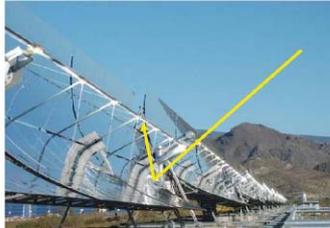
**Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare**

**LP2: Solare termodinamico**

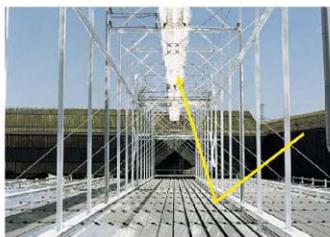


**Le tecnologie:**

Collettore lineare parabolico



Torre solare



Collettore lineare Fresnell



Disco parabolico

**Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare**

**LP2: Solare termodinamico**



Nell'ambito della tecnologia dei collettori parabolici lineari, l'ENEA ha sviluppato una propria originale linea ad alta temperatura caratterizzata dall'utilizzo di sali fusi come fluido termovettore e dall'introduzione di un sistema di accumulo termico.

La collaborazione con l'industria nazionale ha permesso di sviluppare una filiera industriale, portando, tra l'altro, alla realizzazione, in collaborazione con ENEL, dell'impianto "Archimede": 5 MWe integrato con un ciclo combinato a gas in Sicilia (Priolo Gargallo, SR).



## Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare

### LP2: Solare termodinamico



L'attività di ricerca sul solare termodinamico ha come l'obiettivo la riduzione dei costi per rendere questi impianti sempre più competitivi rispetto alla produzione tradizionale con combustibili fossili.

Deve essere finalizzata non solo al miglioramento dell'efficienza dei principali componenti e sistemi ma anche alla ricerca di soluzioni tecnologiche innovative.

L'attenzione deve essere posta, oltre che ai grossi impianti di produzione di energia elettrica, anche a sistemi di piccola e media taglia per la produzione combinata di energia elettrica e termica, eventualmente integrati con un'altra fonte energetica (gas o biomassa).

## Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare

### LP2: Solare termodinamico



#### Attività della ricerca:

- Sviluppo di coating per ricevitori solari
- Studio di sistemi alternativi di accumulo termico
- Sviluppo di sistemi integrati per applicazioni in impianti di piccola taglia

#### Collaborazione con università:

**Università di Perugia**, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

**Università di Padova**, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

**Università di Trento**, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale e Meccanica

**Università di Roma «La Sapienza»**, Dipartimento di Chimica, Materiali e Ambiente

**Università di Roma Tre**, Dipartimento di Ingegneria

## Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare

### LP2: Solare termodinamico



#### Presentazioni:

- **Coating solare: strategie per migliorare le prestazioni e ridurre i costi**

ING. ALESSANDRO ANTONAIA, UTP-FOS - ENEA PORTICI

- **Studio di sistemi innovativi di accumulo termico**

INGG. ADIO MILIOZZI E MAURO GIANNUZZI, UTRINN-PCI - ENEA CASACCIA

- **Sviluppo di materiale cementizio per accumulo termico**

PROF. ROSA DI MAGGIO, UNIVERSITÀ DI TRENTO

## 2.1.2 Coating solare: strategie per migliorare le prestazioni e ridurre i costi



### Coating solare : strategie per migliorare le prestazioni e ridurre i costi

Alessandro Antonaia  
ENEA, UTTP-FOS

Workshop – Roma, 27 Maggio 2015



2015

#### Laboratorio FOS : principali attività nel campo dei coating solari

- Ideazione, fabbricazione e caratterizzazione di coating solari selettivi impiegati in tubi ricevitori per impianti solari termodinamici del tipo a collettori parabolici lineari (Parabolic Trough).
- Test accelerati per la valutazione della durabilità ad alta temperatura di coating solari selettivi
- Sviluppo di processi innovativi con tecnologia del tipo sputtering
- Sviluppo del “concept design” per apparati da vuoto impiegati nella tecnologia di fabbricazione di film sottili.

## Alcune apparecchiature utilizzate per l'attività sui coating solari

### Apparato di sputtering per R&D su coating solari selettivi



- ENEA proprietary design
- Apparato a scansione
- Multicatodo per substrato planare e tubolare
- Alta flessibilità per attività sperimentale
- Approccio funzionale di tipo industriale



Spettrofotometria  
UV-VIS-NIR ed  
ellissometria

Spettrofotometria IR

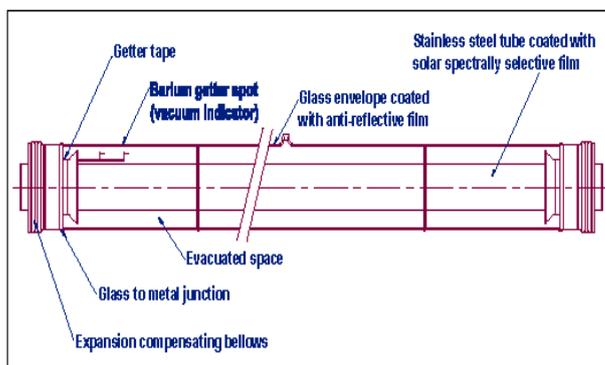


## Tube Ricevitore (HCE – Heat Collector Element)

Il tubo ricevitore è il collettore di calore posizionato lungo la linea focale degli specchi parabolici.

Esso rappresenta il componente del campo solare con il più alto contenuto tecnologico.

Le prestazioni del ricevitore determinano fortemente le prestazioni globali dell'impianto solare.



Tube in acciaio: **AISI 321**; Lunghezza = 4060 mm, Diametro = 70 mm

Tube di vetro: **Borosilicato**; Diametro 125 mm

## Produttori di Tubo Ricevitore e Tecnologia per Coating Solare

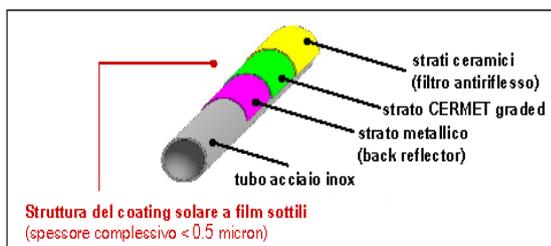
Produttore	Tecnologia Coating Solare	Sviluppo Coating
<b>SCHOTT SOLAR</b> Gruppo SCHOTT - Germany	CERMET* con ossidi Co-sputtering ceramica/metallo	Fraunhofer ISE Germany
<b>RIOGLASS</b> Gruppo ABENGOA - Spain	CERMET* con ossidi Sputtering + Oxidation Glow (MetaMode)	Von Ardenne Germany
<b>ARCHIMEDE SOLAR ENERGY</b> Gruppo ANGELANTONI - Italy	CERMET* con nitruri Co-sputtering ceramica/metallo	ENEA Italy

\* CERMET: Materiali nanocompositi ceramico-metallici



Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare  
LP2: Solare termodinamico

## Tecnologia ENEA consolidata e livelli di eccellenza



Tecnologia innovativa basata sull'utilizzo di un doppio nitruro (AlN-WN) in qualità di strato CERMET – **Brevetto ENEA**

- ✦ processo robusto (ottimo controllo ed elevata replicabilità)
- ✦ ottima stabilità termica ad alta temperatura

**Coating solari ottimizzati per 2 temperature**

1. Con back reflector di  $W_{\alpha} + Ag$  → **Migliore coating solare**, tra tutti quelli disponibili sul mercato, per impianti operanti fino a 400 °C (impianti ad olio diatermico)
2. Con back reflector di  $W_{\alpha}$  → **Unico coating solare** disponibile sul mercato per impianti operanti fino a 550 °C (impianti a sali fusi)

Entrambi i coating solari sono utilizzati, sotto licenza ENEA, dall'azienda Archimede Solar Energy per la produzione di tubi ricevitori ad elevate prestazioni foto-termiche.



Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare  
LP2: Solare termodinamico

## Coating solare ENEA e trasferimento tecnologico

Impianto industriale di sputtering per la fabbricazione del coating solare presso il sito produttivo dell'azienda **Archimede Solar Energy** di Massa Martana (PG).



**Processi e coating solari  
brevettati ENEA**

**Capacità produttiva  
fino a 70.000 tubi ricevitori/anno**

## Progetto B.1.3 : Energia elettrica da fonte solare

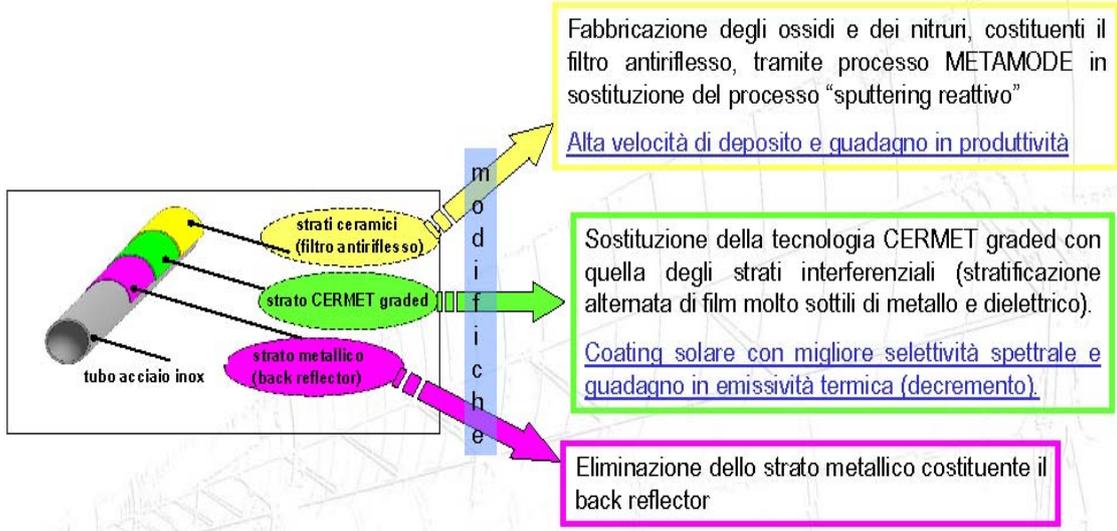
### LP2a : Sviluppo e realizzazione di coating solari di tipo interferenziale

#### Linee di attività nell'ambito dell' AdP MISE-ENEA

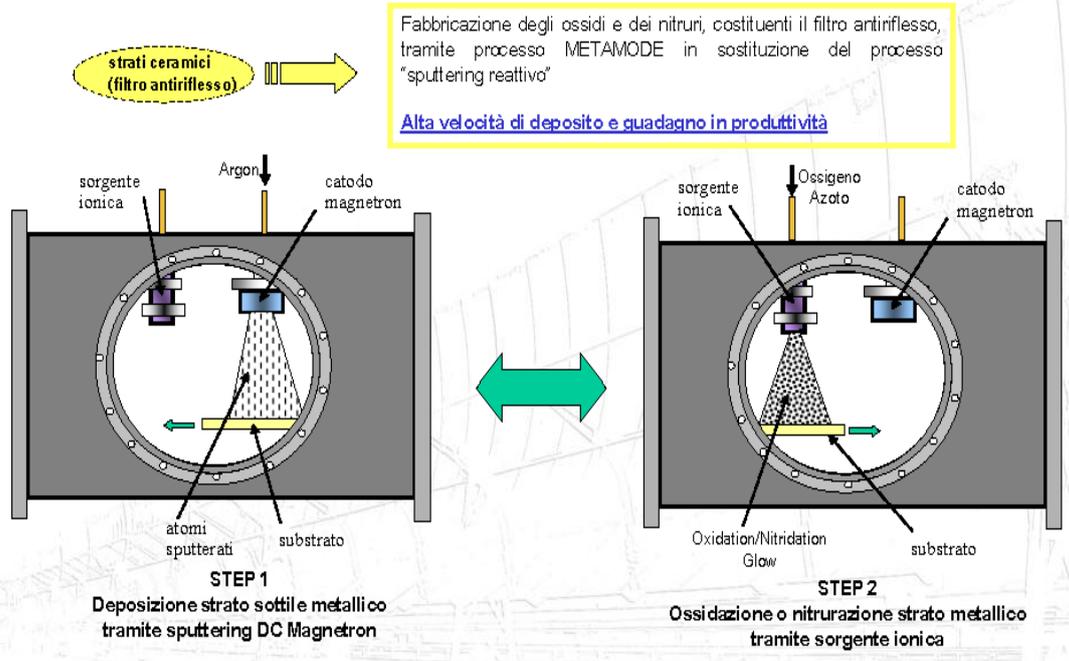
- ❖ Ottimizzazione di film metallici sottili adatti alla realizzazione di coating solari interferenziali
- ❖ Messa a punto della tecnica METAMODE per la deposizione, ad alta velocità di crescita, di ossidi e nitrucci perfettamente stechiometrici

<i>Alessandro Antonaia</i>	<i>Ing. Chimico</i>
<i>Salvatore Esposito</i>	<i>Ing. Elettronico</i>
<i>Antonio Guglielmo</i>	<i>Ing. Meccanico</i>
<i>Anna Castaldo</i>	<i>Chimico</i>
<i>Manuela Ferrara</i>	<i>Ing. Elettronico</i>
<i>Giuseppe Vitiello</i>	<i>Ing. Meccanico</i>
<i>Maria Luisa Addonizio</i>	<i>Chim. Industriale</i>
<i>Antonio D'Angelo</i>	<i>Chim. Industriale (ASE-Angelantoni, distaccato)</i>

## Elementi innovativi nella strategia coating solare nell'ambito del progetto B.1.3



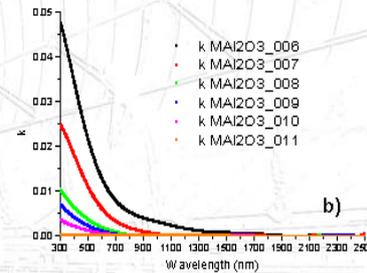
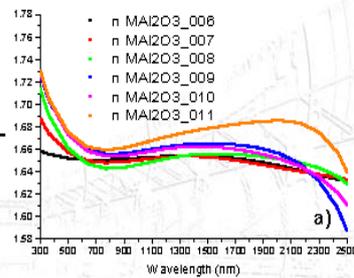
## Allestimento tecnica METAMODE su impianto ENEA



## METAMODE per Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : attività e risultati

Ottimizzazione, fabbricazione e caratterizzazione di ossido di alluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ottenuto mediante tecnica DC Magnetron Sputtering + Oxidation Glow

Campione	Potenziale del cannone (V)	Pressione (µbar)	Velocità di rotazione (rpm)	Velocità di traslazione (mm/min)	Cicli	Spessore (Å)	Velocità di deposizione (Å/ciclo)
MAI2O3_006	100	0.2	60	2000	30	565	18.8
MAI2O3_007	125	0.2	60	2000	30	531	17.7
MAI2O3_008	150	0.2	60	2000	30	517	17.2
MAI2O3_009	175	0.2	60	2000	30	480	16.0
MAI2O3_010	200	0.2	60	2000	30	463	15.4
MAI2O3_011	250	0.2	60	2000	30	436	14.5



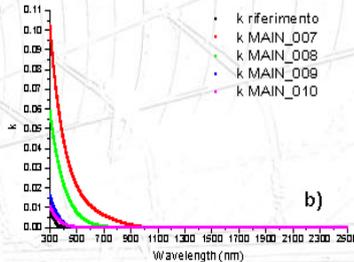
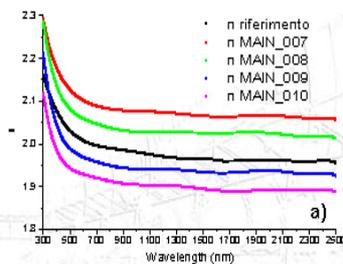
Ottimizzazione di tutti i parametri di processo

Il film di Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> è stato ottimizzato verificando sperimentalmente quale è lo spessore minimo depositato di Al che, dopo il successivo step di ossidazione in plasma, dà luogo ad un materiale dielettrico perfettamente stechiometrico con coefficiente di assorbimento prossimo a zero in tutto lo spettro di interesse.

## METAMODE per AlN : attività e risultati

Ottimizzazione, fabbricazione e caratterizzazione di nitrato di alluminio (AlN) ottenuto mediante tecnica DC Magnetron Sputtering + Nitridation Glow

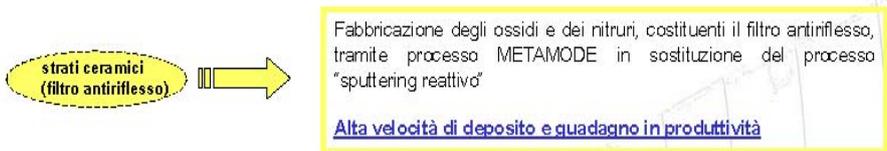
Campione	Potenziale del cannone (V)	Pressione (µbar)	Velocità di rotazione (rpm)	Velocità di traslazione (mm/min)	Cicli	Spessore (Å)	Velocità di deposizione (Å/ciclo)
MAIN_007	125	0.2	60	500	50	322	6.4
MAIN_008	100	0.2	60	500	50	354	7.1
MAIN_009	75	0.2	60	500	50	394	7.9
MAIN_010	50	0.2	60	500	50	417	8.3
MAIN_011	25	0.2	60	500	50	382	7.6



Ottimizzazione di tutti i parametri di processo

Il film di AlN è stato ottimizzato verificando sperimentalmente quale è lo spessore minimo depositato di Al che, dopo il successivo step di nitrazione in plasma, dà luogo ad un materiale dielettrico perfettamente stechiometrico con coefficiente di assorbimento prossimo a zero in tutto lo spettro di interesse.

## METAMODE : Risultati e possibili ricadute su impianti da produzione



- Mediante tecnica METAMODE sono stati messi a punto ossidi e nitrucci di alluminio perfettamente stechiometrici, con strutture prive di difetti e con caratteristiche ottiche eccellenti per la realizzazione del filtro frontale antiriflesso.
- Con tecnica METAMODE è possibile valutare un abbattimento del tempo di deposizione di 2 o 3 volte sulla stazione di un impianto di produzione dedicata alla fabbricazione del filtro antiriflesso.
- Come ultimo step dell'attività ci si propone di ideare il "concept design" di una camera di processo per impianto industriale adatta a condurre la tecnica METAMODE su substrati tubolari.



Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare  
**LP2: Solare termodinamico**

## Filtro interferenziale metallo/dielettrico



**Difficoltà tecnologica**  
 Depositare film molto sottili di metallo a struttura compatta e/o con idonee proprietà ottiche

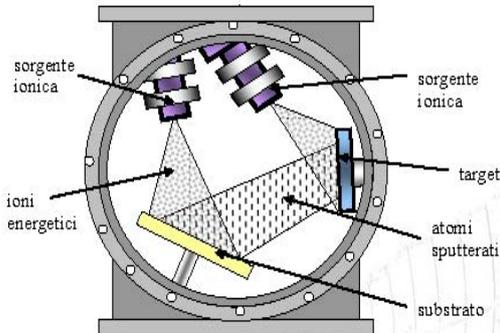


1. Deposizione per tecnica sputtering assistita da sorgente ionica (IBAD)
  2. Deposizione composti metallo-metallo
  3. Deposizione metallo ad alta energia



Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare  
**LP2: Solare termodinamico**

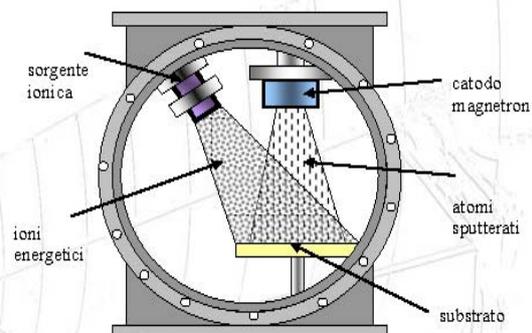
# Sputtering assistito da sorgente ionica (IBAD)



**Configurazione ottimale**

- ▶ Operante con doppia sorgente ionica e pressione <math>< 0.1 \mu\text{bar}</math>

Non idonea per substrati tubolari in apparati industriali



**Configurazione non ottimale**

- ▶ Operante con sorgente ionica + catodo Magnetron e pressione >math>> 1 \mu\text{bar}</math>

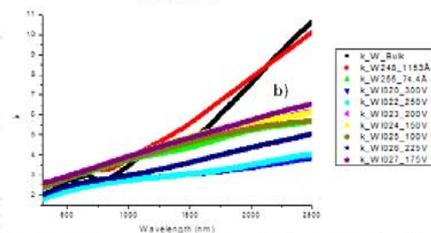
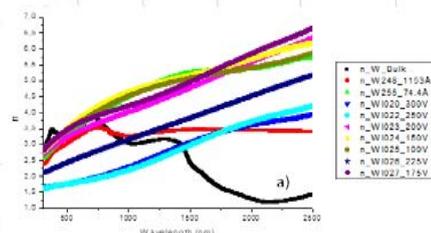
# IBAD : attività e risultati

Sperimentate deposizioni di film sottili di W (circa 80 Å) tramite tecnica IBAD al variare di tutti i parametri operativi : velocità traslazione, velocità rotazione, potenza del cannone ionico

Campione	Potenziale del cannone ionico (V)	Cicli	Spessore (Å)	Velocità di deposizione (Å/ciclo)
W_255	0	4	74.4	18.6
WI_020	300	10	34.1	3.4
WI_022	250	10	50.6	5.1
WI_023	200	10	59.8	6.0
WI_024	150	8	88.3	11.0
WI_025	100	5	84.5	16.9
WI_026	225	12	69.4	5.8
WI_027	175	10	70.4	7.0

I parametri ottici (n,k) dei materiali depositati con IBAD si modificano in modo troppo esiguo, con miglioramenti lontani da quelli attesi.

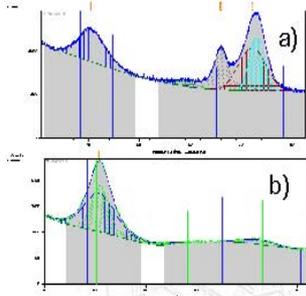
I film sottili metallici così prodotti non sono adatti alla fabbricazione di filtri interferenziali efficaci.



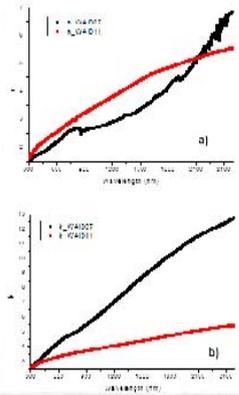
## Compositi metallo-metallo : attività e risultati

La co-deposizione di 2 metalli tramite sputtering può produrre leghe ovvero compositi metallici  
 Variando alcuni parametri di processo si può ottenere l'uno o l'altro materiale finale

La coppia **W-Al** è stata individuata come promettente in termini di proprietà ottiche combinate  
**W** ▶ **bassa** riflettanza nel visibile e **media** riflettanza nell'infrarosso  
**Al** ▶ **alta** riflettanza nel visibile ed **alta** riflettanza nell'infrarosso



Spettri XRD per 2 differenti campioni W-Al  
 a) Il campione prodotto a bassa velocità di rotazione (WAl-007) mostra la struttura di un materiale composito metallo-metallo  
 b) Il campione prodotto ad alta velocità di rotazione (WAl-011) mostra la struttura di una lega metallica

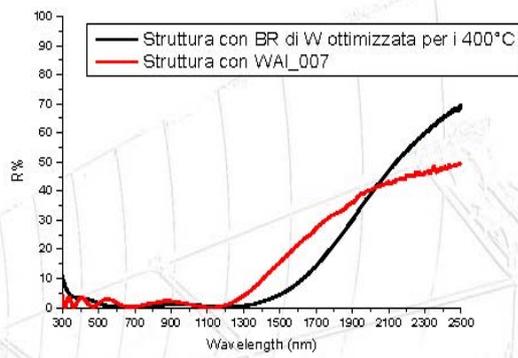
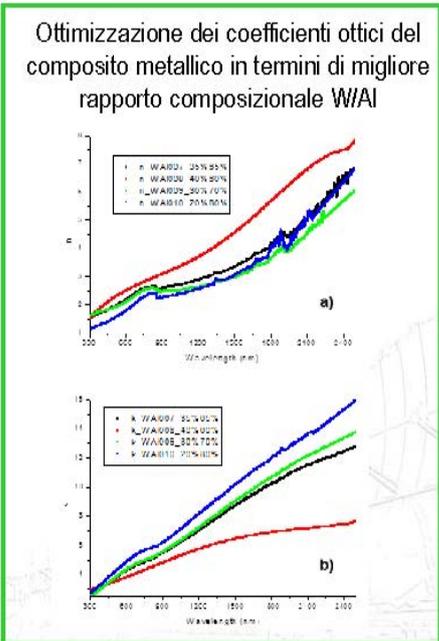


La caratterizzazione ellissometrica indica che i materiali con coefficienti ottici di nostro interesse sono rappresentati dai compositi metallo-metallo



Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare  
**LP2: Solare termodinamico**

## Compositi metallo-metallo : attività e risultati



Riflettanza spettrale di un coating solare interferenziale realizzato utilizzando film sottili del composito W-Al otticamente più promettente.

Il confronto con un coating realizzato con la consolidata tecnologia CERMET mostra che il risultato è lontano dall'obiettivo di progetto.



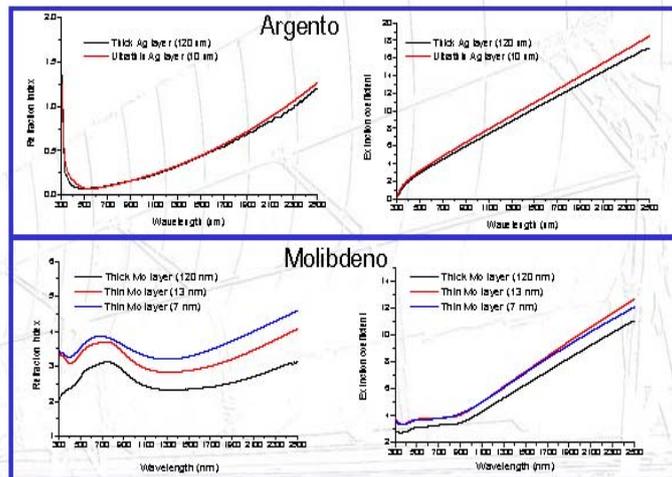
Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare  
**LP2: Solare termodinamico**

## Deposizione metallo sottile mediante sputtering ad alta energia

Per ottenere strutture compatte per film molto sottili sono stati condotti processi di sputtering altamente energetici in termini di alta potenza di catodo e bassa pressione di processo

Sono stati messi a punto i parametri di processo per la deposizione di strati sottili sia di **argento** sia di **molibdeno**.

In entrambi i casi il risultato è stato eccellente. Le proprietà ottiche dei film sottili risultavano del tutto paragonabili a quelle dei film spessi.



## Deposizione metallo sottile mediante sputtering ad alta energia

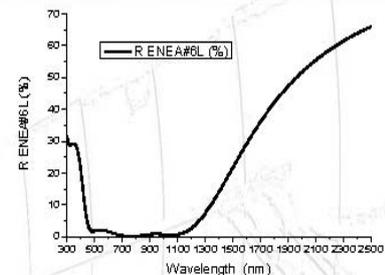
Utilizzando i coefficienti ottici degli strati sottili metallici (Mo, Ag) prodotti con tecnica sputtering condotta ad alta energia, sono state ottimizzate e simulate differenti strutture interferenziali a crescente complessità.

I valori di emissività valutati alla temperatura di 550 °C sono decisamente più bassi di quelli che normalmente si ottengono per coating solari prodotti con tecnologia CERMET.

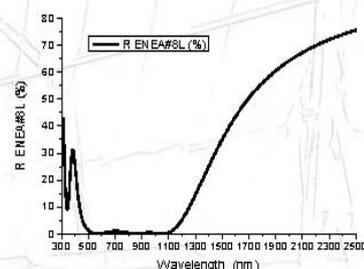
**Abbiamo dimostrato che la tecnologia del filtro interferenziale può realmente migliorare le prestazioni fototermiche dei coating solari.**

Design: ENEA #BL		
Layer	Material	Thickness (nm)
1	SiO <sub>2</sub>	63.69
2	AIN	52.22
3	Mo	7.00
4	AIN	67.20
5	Mo	13.00
6	AIN	69.27
Substrate	steel	

Design: ENEA #BL		
Layer	Material	Thickness (nm)
1	SiO <sub>2</sub>	69.96
2	AIN	49.71
3	Mo	7.00
4	AIN	62.91
5	Ag	10.00
6	AIN	150.31
7	Mo	7.00
8	AIN	46.68
Substrate	steel	

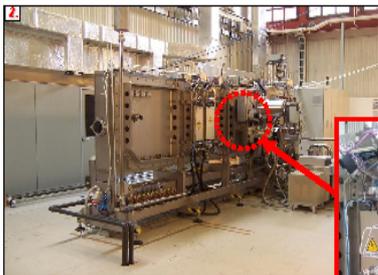


Assorbimento solare > 93%  
Emissività a 580°C < 10%



Assorbimento solare > 91%  
Emissività a 580°C < 7%

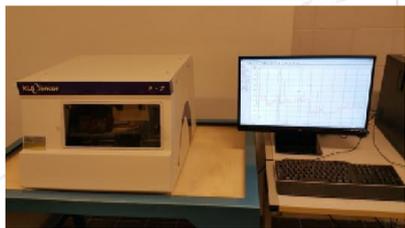
## Integrazioni e nuove acquisizioni nell'ambito dell' AdP MSE-ENEA



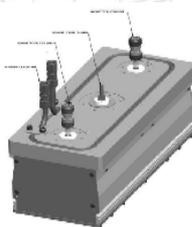
Integrazione IBAD / METAMODE  
su preesistente impianto di Sputtering  
~ 80 k€



Catodo magnetron sputtering  
operante a pressioni molto  
basse ( $\leq 0.5 \mu\text{bar}$ )  
~35 k€



Profilometro per misure accurate di spessore per  
film anche molto sottili ( $\leq 30 \text{ \AA}$ )  
~ 50 k€



Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare  
LP2: Solare termodinamico

## Coating solari : Futuri obiettivi di ricerca e sviluppo

- Miglioramento del coating solare interferenziale depositando film sottili metallici con processi di sputtering ancora più energetici
- Coating solare a base di strati CERMET del tipo doppio carburo per migliorare la stabilità chimico-strutturale a temperature molto elevate ( $> 600 \text{ }^\circ\text{C}$ )
- Coating solare a base di leghe metalliche altamente inerti rispetto a processi ossidativi da utilizzare per receiver operante a media–alta temperatura ( $> 450 \text{ }^\circ\text{C}$ ) senza involucro di vetro

Alcuni o tutti questi obiettivi di ricerca potranno essere proposti nel prossimo piano triennale del programma **Ricerca di Sistema Elettrico**



Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare  
LP2: Solare termodinamico

### 2.1.3 Studio di sistemi innovativi di accumulo termico



## Studio di sistemi innovativi di accumulo termico

Adio Miliozzi, Giuseppe Mauro Giannuzzi  
ENEA, UTRINN-PCI

Workshop - Roma, 27 Maggio 2015



### Il sistema di accumulo termico



#### Solare Termodinamico Obiettivo generale



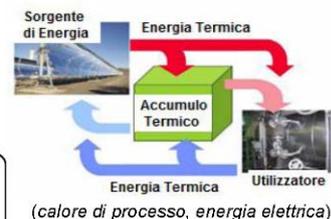
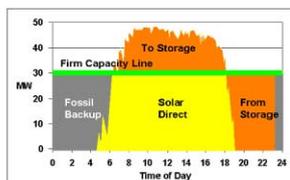
Rendere l'energia solare a concentrazione competitiva con le altre forme di energia  
(\$0.21/kWh nel 2010 → \$0.06/kWh nel 2020)

#### Il Sistema di Accumulo Energia Termica (TES)

Il Sistema TES è una opzione che permette di accumulare energia termica per renderla disponibile in periodi successivi.

##### Vantaggi:

- stabilizzare la produzione dell'impianto in condizioni di variabilità della sorgente (nuvole, radiazione solare ridotta),
- spostare la produzione in periodi più favorevoli (rispondere a picchi e/o vendere a tariffe più convenienti),
- estendere l'operatività dell'impianto anche in periodi dove il sole è assente (incremento del fattore di utilizzo) senza ricorrere a combustibili fossili
- ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub>



(calore di processo, energia elettrica)

#### Sforzo innovativo (obiettivi)

temperature operative  
200 - >600 C

efficienze > 95%

costo TES  
15-20\$/kWh.

##### Svantaggi:

- incremento dei costi sia capitale che operativi e di manutenzione

## Classificazione dei sistemi di accumulo termico



### intervallo di temperatura operativo

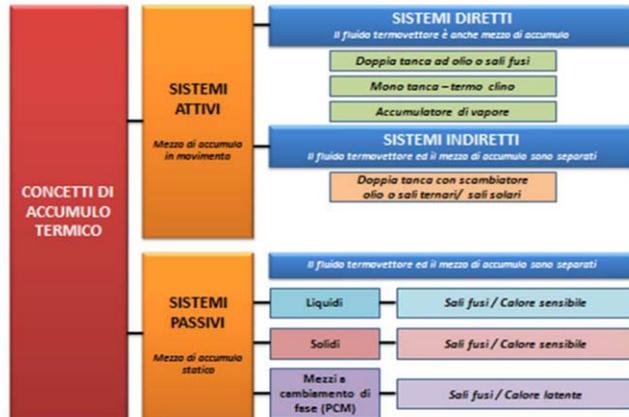
- HTTES (High temperature thermal energy storage) : oltre i 300°C.
- MTTES (Medium temperature thermal energy storage) : 150°C- 300°C.
- LTTES (Low temperature thermal energy storage) : 10°C-150°C.
- CTES (Cold temperature thermal energy storage) : sotto i 20°C.

### Durata dell'accumulo

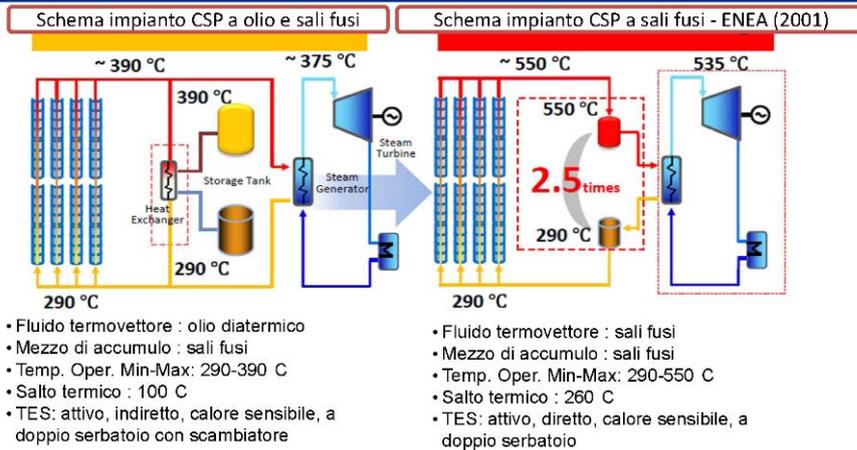
- breve termine,
- lungo termine
- stagionale.

### metodo di accumulo di calore:

- ✓ **Calore sensibile (SHTES)**  
sono quelli più commerciali e di comune utilizzo. Richiedono grandi volumi, hanno un importante impatto ambientale e costi elevati.
- ✓ **Calore latente (LHTES)**  
elevata densità di energia accumulata, ridotte dimensioni e costi. Necessità di ricerca per risolvere alcune problematiche come ad esempio la bassa diffusività termica dei materiali di accumulo. Buone prospettive nel medio-breve periodo.
- ✓ **Termochimico (TCES)**  
i valori più elevati di densità energia accumulata, in fase di ricerca iniziale. Competitivi nel lungo periodo.



## L'accumulo termico nella tecnologia ENEA



### Risultati tecnologia ENEA:

- ridurre le dimensioni del sistema di accumulo termico incrementando la differenza di temperatura del ciclo termico;
- eliminare lo scambiatore di calore tra HTF e sistema di accumulo (accumulo di tipo diretto)

### Costi del TES

Accumulo indiretto olio-sale solare	60-80 \$/kWh
Accumulo diretto con sale solare	30-40 \$/kWh
Target dichiarato	15-20 \$/kWh (2020)

### Nuove soluzioni tecnologiche per:

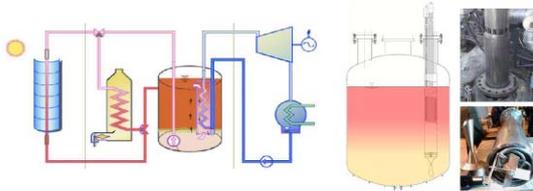
- Ridurre il costo dei componenti
- Ridurre le dimensioni del TES
- Aumentare la densità di energia accumulata

**Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare**  
**LP2b: Studio di sistemi alternativi di accumulo termico**

**Sistemi di accumulo a Media e Alta Temperatura**

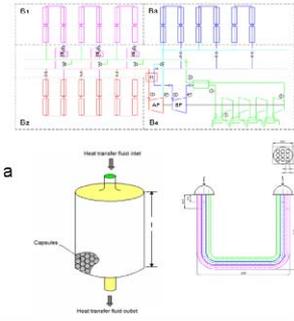
Calore Sensibile  
Alta Temperatura (550 C)

Sali fusi : serbatoio unico, GV integrato



Calore Sensibile  
Alta Temperatura (550 C)

Impianto solare a collettori parabolici lineari con fluido gassoso e accumulo termico a materiale solido.  
Ciclo di Brayton.  
Accumulo: indiretto, passivo  
Mezzo di accumulo: sfere di allumina



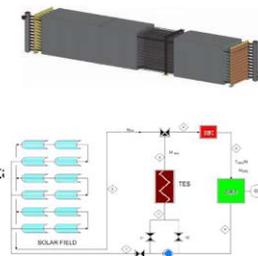
Calore Latente  
Media Temperatura (150-300 C)

Impianti di piccola taglia in multi-generazione (ORC, Cooling, acqua sanitaria, ...). Calore di processo.  
Impianti con olio diatermico, acqua, ...  
Mezzo di accumulo: Sali nitrati con nanoparticelle  
Elevata densità di energia accumulata



Calore Sensibile  
Media Temperatura (150-300 C)

Mezzo di accumulo: cemento  
Basso costo del mezzo di accumulo  
Possibile incremento della capacità termica tramite PCM



**Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare**  
**Accumulo termico a calore latente**

**TES a calore latente (LHTES-MTTES)**

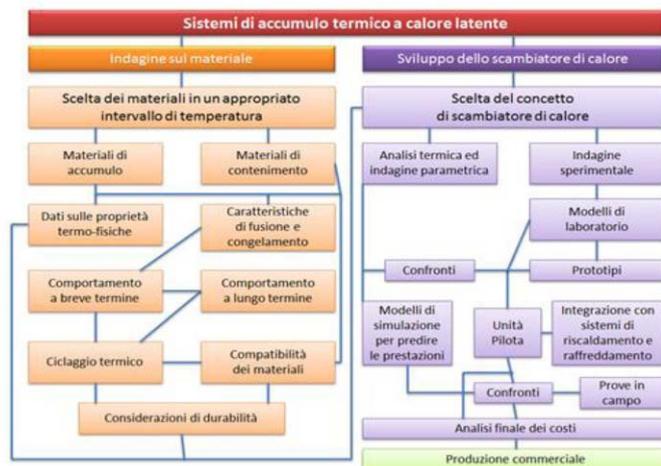
Sfruttare il calore latente di fusione per aumentare la capacità termica del HSM  
1 kg di sali solari,  $\Delta T = 100\text{ C}$  → 170 kJ di calore sensibile  
Se avviene un cambio di fase solido-liquido → + 110 kJ di calore latente  
La capacità di accumulo del mezzo è quasi raddoppiata.

LHTES: tipo passivo e indiretto

Tre componenti principali:

- un **mezzo di accumulo (PCM)**, la cui temperatura di cambiamento di fase sia in accordo con la temperatura del fluido termovettore;
- un **sistema di contenimento** opportuno, compatibile con il PCM;
- una **superficie di scambio termico** (scambiatore di calore) che garantisca un efficiente trasferimento di calore tra fluido termovettore e PCM e viceversa.

Lo sviluppo di un LHTES passa attraverso lo studio e la progettazione di ciascuno di questi componenti.



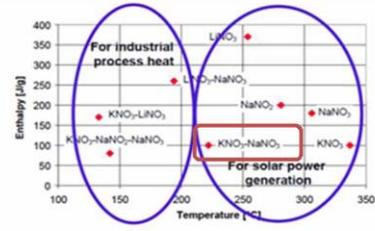
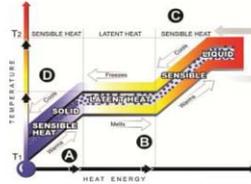
**Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare**  
**Accumulo termico a calore latente: studio dei materiali**



**LHTES: Materiali a cambiamento di fase (PCM)**

Proprietà **termofisiche**, cinetiche, **chimiche** ed economiche.

- **Temperatura di cambiamento di fase** appropriata all'intervallo di temperature desiderato;
- **Elevato calore latente per unità di massa;**
- **Elevato calore specifico;**
- **Elevata conducibilità termica sia in fase solida che liquida;**
- **Stabilità** (bassa variazione di densità) durante il cambio di fase ;
- **Elevata densità;**
- **Piccole variazioni di volume;**
- **Bassa pressione di vapore.**
- **Sotto-raffreddamento limitato od assente** durante il congelamento;
- **Sufficiente rateo di cristallizzazione.**
- **Stabilità chimica;**
- **Nessuna decomposizione chimica;**
- **Compatibilità con i materiali di contenimento;**
- **Non velenoso, non infiammabile e non esplosivo.**
- **Abbondante;**
- **Disponibile;**
- **A basso costo.**



**$KNO_3-NaNO_3$  Sali Solari :**

**Basso costo, Elevata capacità termica, Bassa conducibilità termica**

**PCM e nanoparticelle (Nano-Fluid PCM – NFPCM)**

1-2%wt di particelle con dimensioni nanometriche in un liquido si ottiene un nuovo fluido (detto nanofluido) con proprietà termo fisiche «anomale» superiori a quelle previste dalla normale teoria delle miscele

- un incremento significativo della conducibilità termica e del calore specifico ;
- un trasferimento di calore più efficiente;
- una elevata stabilità alla sedimentazione a causa delle dimensioni e del peso limitati;
- una frizione ed erosione delle superfici dei condotti trascurabili.



**Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare**  
**Accumulo termico a calore latente: studio dei materiali**

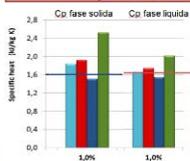


PCM	NFPCM
miscela di sali $NaNO_3$ - $KNO_3$ (60:40)	Sali + 1% $SiO_2$
	Sali + 1% $TiO_2$
	Sali + 1% $Al_2O_3$
	Sali + 1% $SiO_2-Al_2O_3$ (86% silice -14% alumina)

**1 metodo:**  
**Miscelazione in soluzione acquosa**  
 Dispersione in bagno ultrasuoni e evaporazione



**2 metodo:**  
**Miscelazione ad alta temperatura**  
 Miscelazione in un estrusore bivate co-rotante



**NFPCM MIGLIORE : 1wt%  $SiO_2-Al_2O_3$**

- Buona dispersione nanoparticelle
- Incremento calore specifico: 57-22% (solido-liquido)
- La T fusione diminuisce di 10°C
- Il calore di fusione  $\Delta H$  aumenta del 15%

- Buona dispersione a 300°C, 200rpm, 30 min
- Incremento del calore specifico (18-21%)
- Il calore di fusione  $\Delta H$  aumenta del 2%
- Tempi più brevi per la produzione del nanofluidi

**Produzione di NFPCM (SS+1wt.%  $SiO_2-Al_2O_3$ ) in grandi quantità (15kg per sperimentazione)**

**1 metodo:**  
**Miscelazione ad alta temperatura**



**2 metodo:**  
**Miscelazione in soluzione acquosa**



**Miscelazione con 3 agitatori diversi:**

- 1) DISPERMAT
- 2) AGITATORE A PALETTE
- 3) MAGNETIC STIRRER



**Metodo 2:**

- Aumenta: calore specifico, calore di fusione, conducibilità termica
- Diminuisce la T fusione.
- I risultati sono stati migliori con maggiori quantità prodotte fino a 300g/L.
- Il NFPCM di 100g con AGITATORE (500rpm) ha il maggiore aumento del Cp (29%)

## Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare

### Accumulo termico a calore latente: attività sperimentale

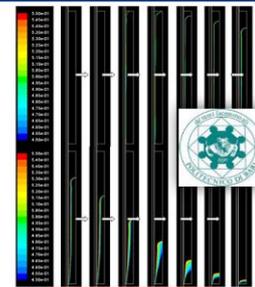
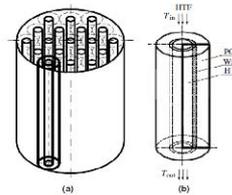


#### Studio, progettazione e realizzazione di LHTES elementari

Semplice configurazione di tipo *"tube and shell"* in cui il tubo centrale può presentare un sistema di alettatura metallico.

Indagine conoscitiva sui fenomeni in gioco valutare i vantaggi e gli svantaggi

Problema : promozione della conducibilità termica



CFD - Fluent

#### Studio, progettazione e realizzazione impianto ATES

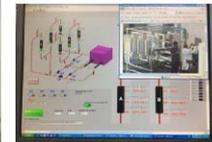
##### Caratteristiche impianto

- HTF: olio diatermico Therminol66
- Sistema risc./raffr. Julabo
- T max 300 C - Portata max 10 l/min
- 2 linee di prova - 3 accumulatori in serie
- 9 termocoppie primo accumulatore
- 14 termocoppie lungo il piping
- 1 termocoppia per T parete esterna del TES
- 1 termocoppia per T ambiente
- Un misuratore di portata
- Inversione del flusso e ricircolo (4 elettrovalvole)
- Acquisizione e controllo tramite Labview

##### ATES (Advanced Thermal Energy Storage)



Nuova Steim (Narni)



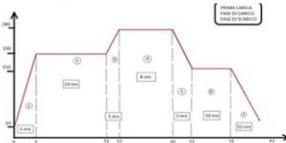
## Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare

### Accumulo termico a calore latente: attività sperimentale

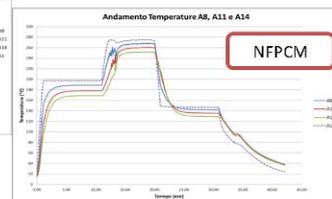
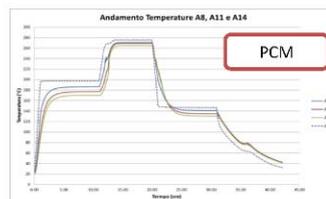


#### Campagna sperimentale

Tipo Accumulatore	n.	Tubo	Sali solari	Nano particelle	ID Prova	n.
A	3	liscio	si	no	1	3
B	3	alettato	si	no	2	3
C	3	liscio	si	si	3	2
D	3	alettato	si	si	4	2
<b>Totali</b>	<b>12</b>					<b>10</b>



#### Elaborazione ed analisi dei dati



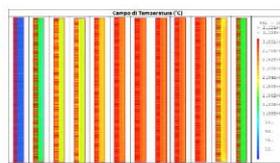
#### Simulazioni numeriche e confronto numerico-sperimentale



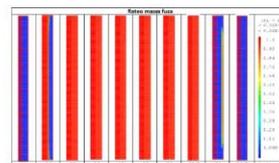
Codice CAST3M (free - CEA Saclay Paris)

Risorse di calcolo e relativo supporto tecnico  
**CRESCO/ENEAGRID High Performance Computing** (<http://www.cresco.enea.it>)  
 "CRESCO/ENEAGRID HPC" è finanziato da ENEA e da programmi di ricerca Europei.

Temperature



Analisi FEM 1D, 2D



Fase liquida

**Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare**  
**Accumulo termico a calore latente: principali risultati**



**Mezzo di Accumulo**

**PCM**

la bassa conducibilità (diffusività) termica è compensata, in fase liquida ed in assenza di limitazioni fisiche (alette), dall'innesco di moti convettivi che facilitano lo scambio termico.

**NFPCM**

a fronte di una sostanziale invarianza della diffusività termica, risulta incrementata la capacità termica (15-20%) e l'effusività termica.  
 la fase di carico è lenta (6 ore, +30%): comportamento puramente conduttivo all'interno del liquido, probabilmente dovuto alla maggiore viscosità del mezzo che ostacola l'innesco dei moti convettivi.

**Scambiatore**

Tubi alettati: è evidente il ruolo di promozione della conducibilità termica esercitato dalle alette, i tempi risultano essere più contenuti e sostanzialmente indipendenti dal mezzo di accumulo;

La fase di carico della prova con tubo liscio e PCM ha tempi confrontabili con quelli dei TES con tubi alettati. Lo scambio termico è prevalente di tipo convettivo

**Simulazione FEM**

Le analisi (scambio termico puramente conduttivo) non tengono conto degli eventuali fenomeni convettivi nel mezzo di accumulo. Analisi CFD sarebbero più indicate, purché siano correttamente individuati i parametri di calcolo.

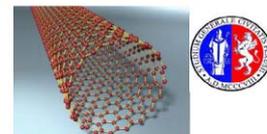
Analisi 1D e 2D: sostanzialmente equivalenti, anche se la seconda è sicuramente più precisa.

Le differenze nei bilanci energetici tra calcolo e sperimentazione sono piuttosto evidenti: superiori perdite verso l'esterno e masse in gioco nella sezione di test.

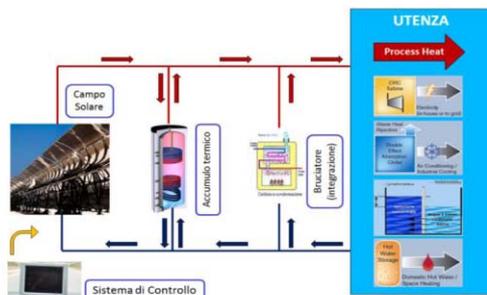
**Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare**  
**Accumulo termico a calore latente: attività in corso**



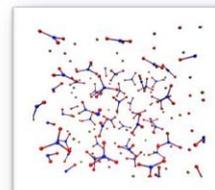
- Sviluppo di NFPCM con nanoparticelle metalliche e CNTs
- Sviluppo di cementi con capsule di PCM o NFPCM come mezzo di accumulo termico
- Analisi di durabilità dei NFPCM (ciclaggio carico-scarico)
- Simulazione dinamica molecolare: sale e nanoparticelle
- Sviluppo modelli semplificati per simulare in comportamento del LHTES
- Sviluppo metodi di analisi per integrazione impianto



Dinamica molecolare



Integrazione d'impianto



## Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare

### Accumulo termico a calore latente: disseminazione



**Bari, 30 Giugno – 3 Luglio 2013**  
Effect of nanoparticles on heat capacity of phase change materials based on molten salts for thermal energy storage applications  
Manila Chieruzzi, Gian Filippo Cerritelli, Adio Miliozzi, José M. Kenny



**Sevilla, 8–13 Settembre 2013**  
Phase change materials based on molten salts and nanoparticles for thermal energy storage  
Manila Chieruzzi, Gian Filippo Cerritelli, Adio Miliozzi, José M. Kenny

#### Nanoscale Research Letters. 10/2013

Effect of nanoparticles on heat capacity of nanofluids based on molten salts as PCM for thermal energy storage  
Manila Chieruzzi, Gian F Cerritelli, Adio Miliozzi and José M Kenny



**Venezia, 24-26 Nov. 2014**  
Use of nanoparticles for enhancing the heat capacity of nanofluids based on molten salts as phase change materials for thermal energy storage  
Manila Chieruzzi, Adio Miliozzi, José M. Kenny

**20-23 Luglio 2015, South Africa**  
CFD Analysis of melting process in a shell-and-tube latent heat storage for concentrated solar power plants  
S.M. Camporeale, F. Fornarelli, B. Fortunato, L. Magliocchetti, A. Miliozzi, G. Santo, M. Torresi

**Roma, 9-11 Set. 2015**  
Analisi sperimentale sullo scambio termico in sistemi di accumulo passivi a calore latente utilizzando sali fusi per applicazioni in impianti solari a concentrazione.  
R. Liberatore, A. Miliozzi, T. Crescenzi, E. Veca

**Submitted to Nanoscale Research Letters**  
A new phase change material based on potassium nitrate salt with silica and alumina nanoparticles for thermal energy storage  
M. Chieruzzi, A. Miliozzi, José M. Kenny

## Studio del comportamento di calcestruzzi ad alta temperatura



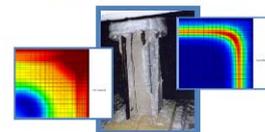
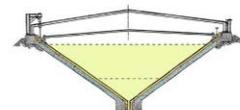
**2013 SOLTECA:** Studio concettuale e sperimentale di un modulo di accumulo termico per impianti solari termodinamici. (UNITN-UNIPD)  
**Fin. CARITRO**

**2011 ELIOSLAB-OR4:** Progettazione di massima di un serbatoio conico per sali fusi a 550 °C. (ITALCEMENTI-UNIPD)  
**Fin. Legge 297/99 Art. 12 – Ricerca MIUR**

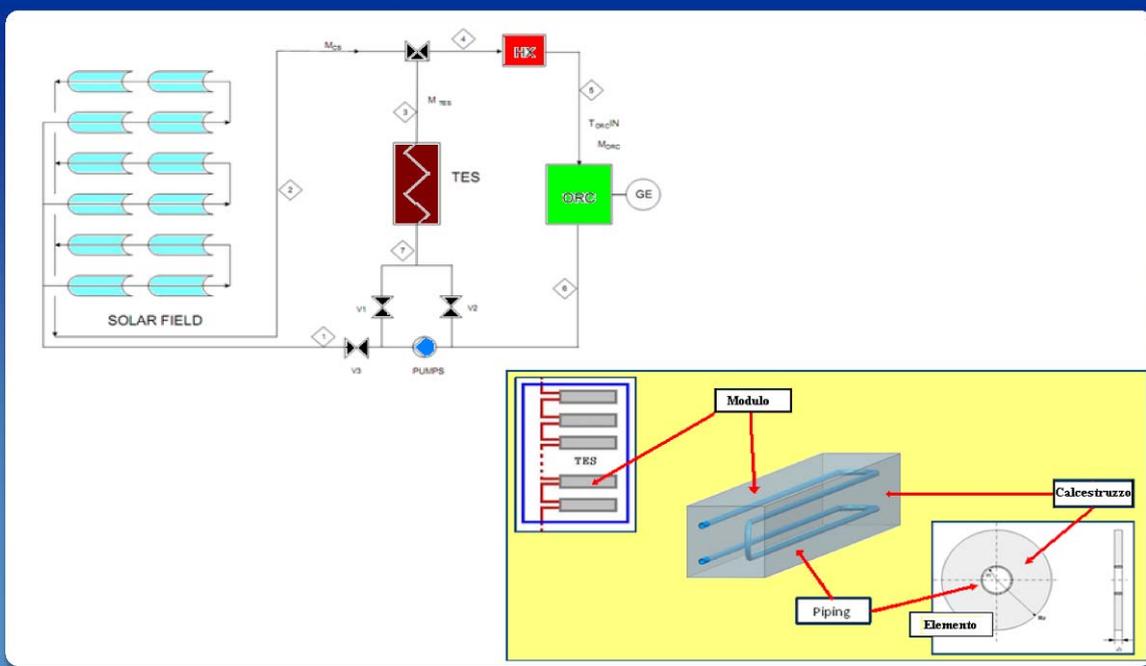
**2002 UpTun:** Improving The Level Of Fire Safety In Existing Tunnels (ITALCEMENTI-UNIPD-POLIMI)  
**Fin. UE 5th FWP**

**1999 HITECO:** Understanding and industrial applications of high performance concretes in high temperatures environment (UNIPD-POLIMI)  
**Fin. UE FP4**

**1995 FISA- EU Research on severe accidents:** High Resistance concrete behaviour under low velocity impacts and extreme temperature (PENLY) (UNIPD-POLIMI)  
**Fin- EU Council Decision 91/626 Euratom**



**Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare**  
**Accumulo termico in materiale cementizio**



2015

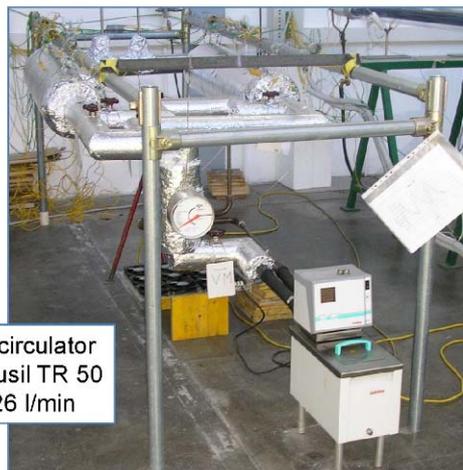
Accordo di Programma MISE - ENEA "RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO"

15

**Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare**  
**Accumulo termico in materiale cementizio: attività sperimentale**

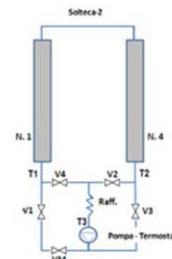


**Sperimentazione di un elemento di accumulo termico: PAR 2013**



Julabo heating circulator  
 Silicone Oil : Alusil TR 50  
 Max: 250 C/ - 26 l/min

- Mescola a conducibilità migliorata
- Lunghezza elemento 1 m



Università di Padova, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale  
 Università di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale e Meccanica

2015

Accordo di Programma MISE - ENEA "RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO"

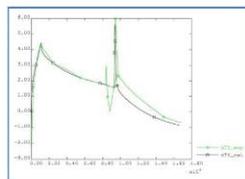
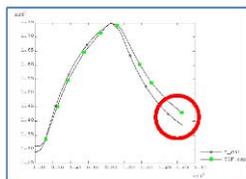
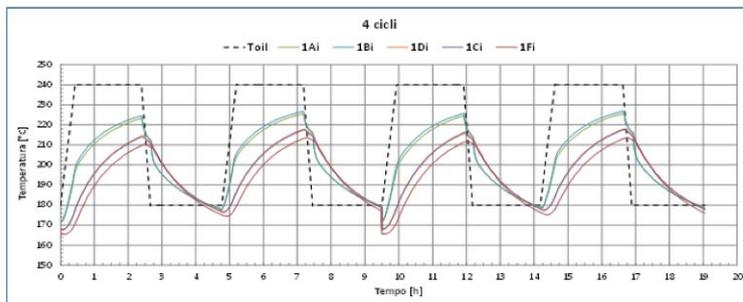
16

**Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare**

**Accumulo termico in materiale cementizio: attività sperimentale**



**Sperimentazione di un elemento di accumulo termico: PAR 2013**



**Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare**

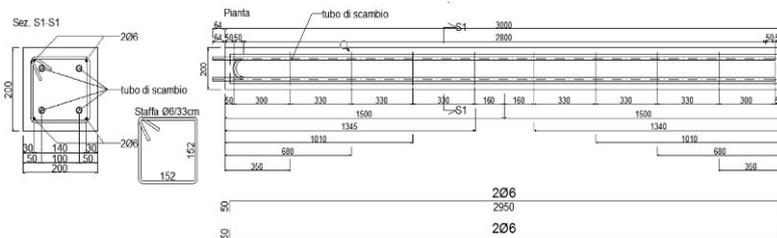
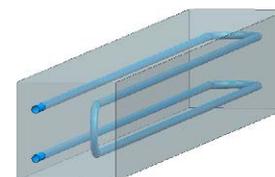
**Accumulo termico in materiale cementizio: attività sperimentale**



**Attività in corso**

*Si è sviluppato e verrà testato un nuovo prototipo di modulo di accumulo di calore di maggiori dimensioni e con struttura simile a quella prevista per applicazioni industriali.*

*E' stato effettuato il dimensionamento strutturale e termoidraulico del modulo.*



**AISI 304**  
**L: 12 m**  
**D: 14 mm**

**Peso: 300 kg**  
**En.Ac. 6,4 kWh**  
**Cost. 18 €/kWh**

*È in corso la realizzazione di due moduli identici, utilizzando mix differenti di calcestruzzo, uno sviluppato autonomamente dall'Italcementi, l'altro sviluppato dall'Università di Trento (UNITN) nell'ambito del PAR 2013.*

**Università di Padova**  
**Università di Trento**  
**Italcementi**

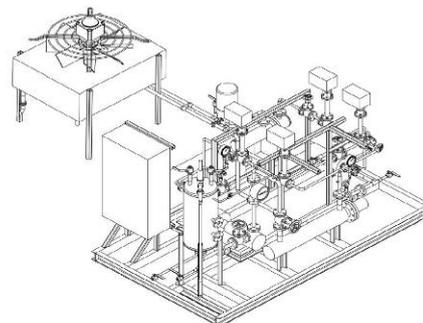
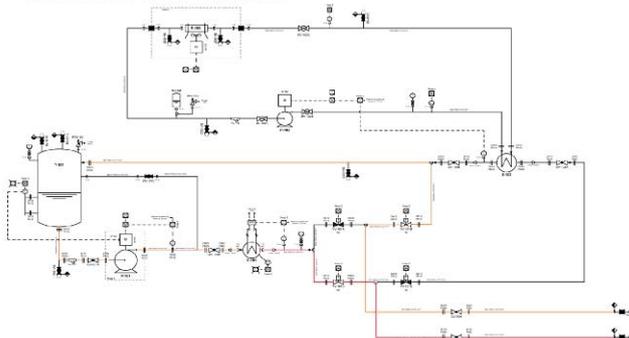
**Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare**

**Accumulo termico in materiale cementizio: attività sperimentale**

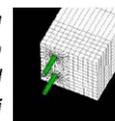


**Attività in corso**

Per la sperimentazione è stato progettato e realizzato un circuito in grado di operare alle temperature attese (~300 C), con potenza termica massima di circa 21 kW. La sperimentazione verrà effettuata presso i laboratori della Casaccia.



La sperimentazione sarà affiancata da un'attività di simulazione numerica, svolta prevalentemente dall'Università di Padova, mediante la quale verranno messi a punto opportuni modelli di calcolo al fine non solo di analizzare il comportamento termico del modulo, ma anche di evidenziare eventuali criticità e degrado funzionale e/o strutturale dei moduli stessi.



**Progetto B.1.3: Energia elettrica da fonte solare**

**Accumulo termico in materiale cementizio: disseminazione**



- **Tesi ENEA-Università di Roma La Sapienza, 2012.** "Studio ed analisi di sistemi di accumulo termico in materiali cementizi per impianti solari a concentrazione di piccola taglia". Michele Santoro.
- **INTECH, "Engineering application of Solar Energy",** Chapter 6: "Conceptual Study of a Thermal Storage Module for Solar Power Plants with Parabolic Trough Concentrators", V. A. Salomoni, C. E. Majorana, G.M. Giannuzzi, R. Di Maggio, F. Girardi, D. Mele and M. Lucentini
- **Materials and Design 51 (2013) 989-997** – "Effect of nylon fibres on mechanical and thermal properties of hardened concrete for energy storage systems", O. B. Ozger, F. Girardi, G.M. Giannuzzi, V.A. Salomoni, C. E. Majorana, L. Fambri, N. Baldassino, R. Di Maggio.
- **Solar Energy 103 (2014) 303-315** – "Thermal storage of sensible heat using concrete modules in solar power plants". V.A. Salomoni, C. E. Majorana, G.M. Giannuzzi, A. Miliozzi, R. Di Maggio, F. Girardi, D. Mele, M. Lucentini.

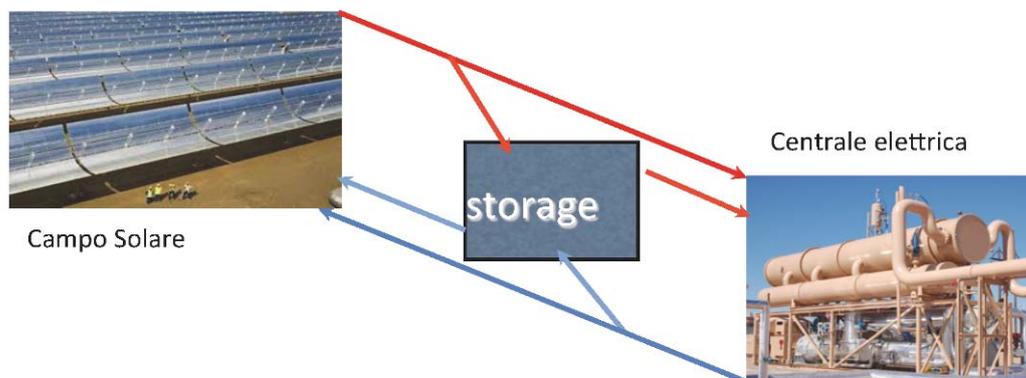
## 2.1.4 Sviluppo di materiale cementizio per accumulo termico

ENERGIA ELETTRICA DA FONTE SOLARE - Roma, 27 maggio 2015 - ENEA

# Sviluppo di materiale cementizio per accumulo termico

Rosa Di Maggio, DICAM, UNITN

F. Girardi (UNITN), G.M. Giannuzzi (ENEA), V. Salomoni & E. Majorana (UNIPD) & Gianni Cestaro (Cestaro srl)



## Progetto SolTeCa

- Il progetto SolTeCa finanziato dalla Fondazione CARITRO (Cassa di Risparmio di Trento e Rovereto) contestualizza la progettabilità di TES solidi nel contesto Italiano;
- Il principale obiettivo è lo sviluppo di un'appropriata miscela di calcestruzzo per ottimizzare le proprietà chimico-fisiche, durabilità e performance tra 80 e 300 °C;
- Altro obiettivo è progettazione termica di un modulo di accumulo per l'integrazione in un sistema CSP di piccola taglia (0.5 -5 MWe).

## Progetto SolTeCa 2

- Il Progetto SolTeCa 2 è stato finanziato nell’ambito dell’ Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA. Nell’ambito del Piano Annuale di Realizzazione 2013 e 2014 del progetto “ENERGIA ELETTRICA DA FONTE SOLARE” è stato stipulato un accordo di collaborazione tra ENEA e UNITN per attività di ricerca per lo studio del comportamento termico di prototipi in calcestruzzo.
- Il principale obiettivo è lo sviluppo di calcestruzzi ad alta conducibilità con cui produrre unità di accumulo strumentate per una campagna sperimentale di misura.

## Perchè il calcestruzzo?

Table 1  
Properties of solid storage media (Herrmann et al., 2003).

Storage medium	Temperature		Average density (kg/m <sup>3</sup> )	Average heat conductivity (W/m K)	Average heat capacity (kJ/kg K)	Volume specific heat capacity (kW h <sub>t</sub> /m <sup>3</sup> )	Media costs per kg (US\$/kW h <sub>t</sub> )	Media costs per kW h <sub>t</sub> (US\$/kW h <sub>t</sub> )
	Cold (°C)	Hot (°C)						
Sand-rock-mineral oil	200	300	1700	1.0	1.30	60	0.15	4.2
Reinforced concrete	200	400	2200	1.5	0.85	100	0.05	1.0
NaCl (solid)	200	500	2160	7.0	0.85	150	0.15	1.5
Cast iron	200	400	7200	37.0	0.56	160	1.00	32.0
Cast steel	200	700	7800	40.0	0.60	450	5.00	60.0
Silica fire bricks	200	700	1820	1.5	1.00	150	1.00	7.0
Magnesia fire bricks	200	1200	3000	5.0	1.15	600	2.00	6.0

Herrmann, U., Geyer, M., Kearney, D., 2003. Overview on thermal storage systems. Workshop on Thermal Storage for Trough Power Plants, Feb. 20–21, Golden, CO, USA.

## Accumulo di energia termica

Un processo di accumulo prevede tre passaggi da ripetersi ciclicamente:

- carica
- immagazzinamento
- scarica

$$\kappa = \lambda * \rho * c_p \quad (\text{conducibilità termica})$$

dove  $\lambda$  = diffusività termica

$$Q = \rho * c_p * Vol * \Delta T \quad (\text{energia termica immagazzinata})$$

## Accumulatori in calcestruzzo

Project WESPE (Platform Solar de Almeria PSA, Spain): with a modular test unit of 350 kWhth with concrete as storage material and temperatures around 350°C



The properties of normal concrete are about:

Concrete	Density $\rho$	Specific Heat $c_p$	Storage capacity $\rho * c_p$	Thermal conductivity $\lambda$	CTE $\alpha$	Cost
Normal	$\sim 2000 \frac{kg}{m^3}$	$\sim 900 \frac{J}{kgK}$	$\sim 1900 \frac{kJ}{m^3K}$	$\sim 1 \frac{W}{m K}$	$\sim 10^{-5} \frac{1}{K}$	$\sim 100 \frac{\text{€}}{m^3}$

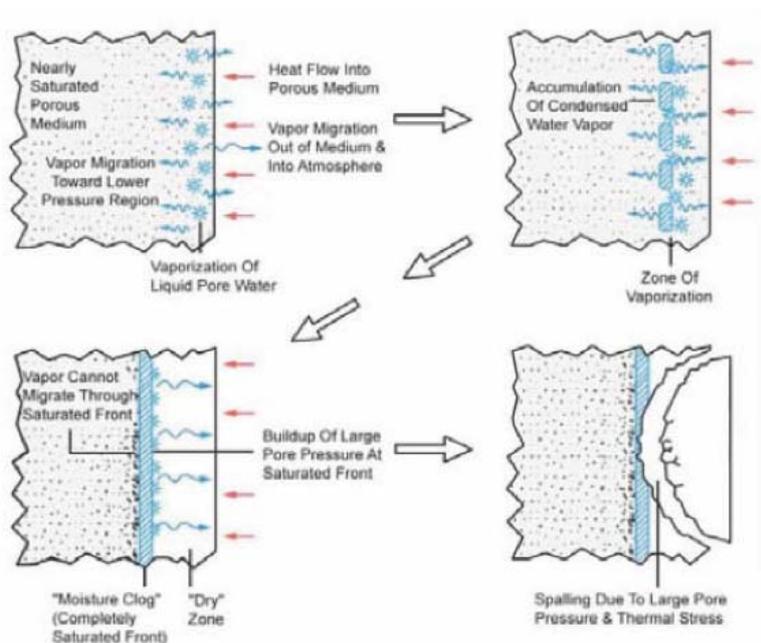
Concrete	Density $\rho$	Specific Heat $c_p$	Storage capacity $\rho * c_p$	Thermal conductivity $\lambda$	CTE $\alpha$	Cost
High Temp.	$2400 \frac{kg}{m^3}$	$970 \frac{J}{kgK}$	$2328 \frac{kJ}{m^3K}$	$1.2 \frac{W}{m K}$	$10.5 * 10^{-6} \frac{1}{K}$	$137 \frac{\text{€}}{m^3}$

Design characteristics and parameters.

<i>Plant characteristics</i>		
Nominal radiation	(W/m <sup>2</sup> )	700
Solar multiple		2
Plant thermal power	(kW)	4500
$m_{nomTES}$	(kg/s)	11.33
$v_{fluid}$	(m/s)	1
Heat-transfer fluid		H <sub>2</sub> O
Charge time ( $t_c$ )	(h)	1
<i>Concrete parameters</i>		
$\rho$	(kg/m <sup>3</sup> )	2660
$c_p$	(J/kg °C)	800
$k$	(W/m °C)	2
<i>Storage extreme temperatures</i>		
$T_{in\_charge}$	(°C)	175
$T_{out\_charge}$	(°C)	125
$T_{in\_discharge}$	(°C)	80
$T_{out\_discharge}$	(°C)	130
Complete charge level		90% $\Delta T$

V.A. Salomoni, C.E. Majorana, G.M. Giannuzzi, A. Miliozzi, R. Di Maggio, F. Girardi, D. Mele, M. Lucentini, Thermal storage of sensible heat using concrete modules in solar power plants Solar Energy 103 (2014) 303–315

## Comportamento del calcestruzzo in temperatura

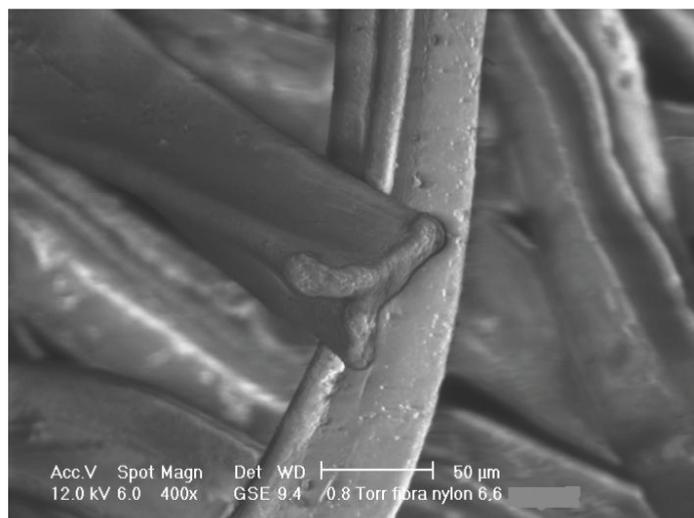


## Permeabilità ai gas

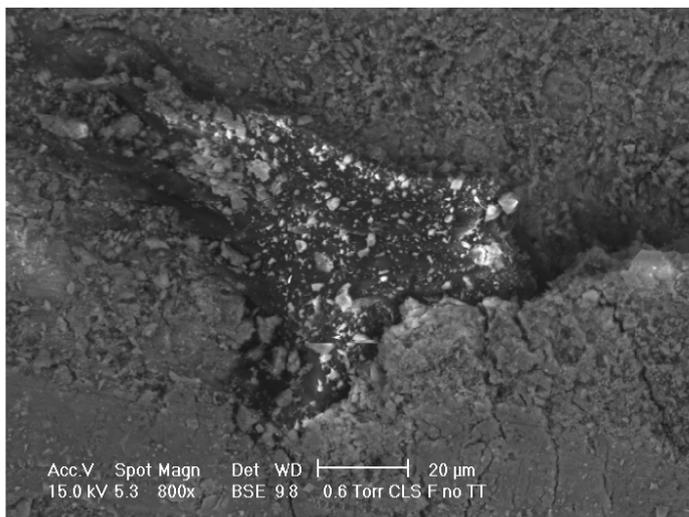
Campioni	Coefficiente di permeabilità specifica [10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> ]	
		Dopo 4h a 300°C
C	3.6 ± 0.3	98 ± 13
FC	80.6 ± 0.5	403 ± 13

O.B. Ozger, F. Girardi, G.M. Giannuzzi, V.A. Salomoni, C.E. Majorana, L. Fambri, N. Baldassino, R. Di Maggio Effect of nylon fibres on mechanical and thermal properties of hardened concrete for energy storage systems, *Materials and Design* 51 (2013) 989–997

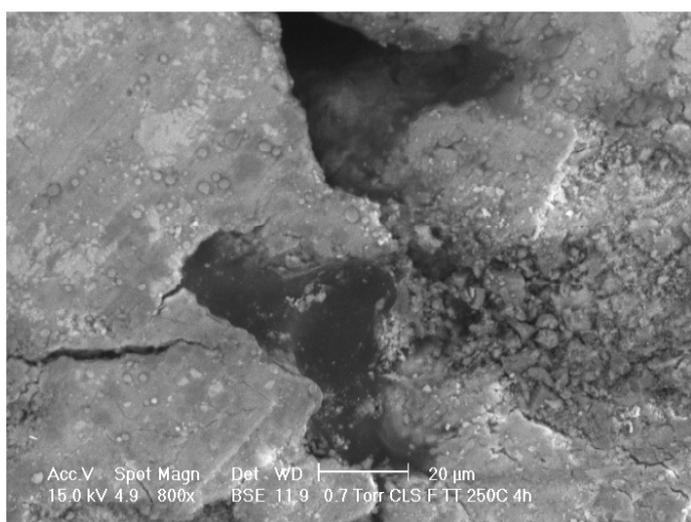
## Fibre poliammidiche di riciclo



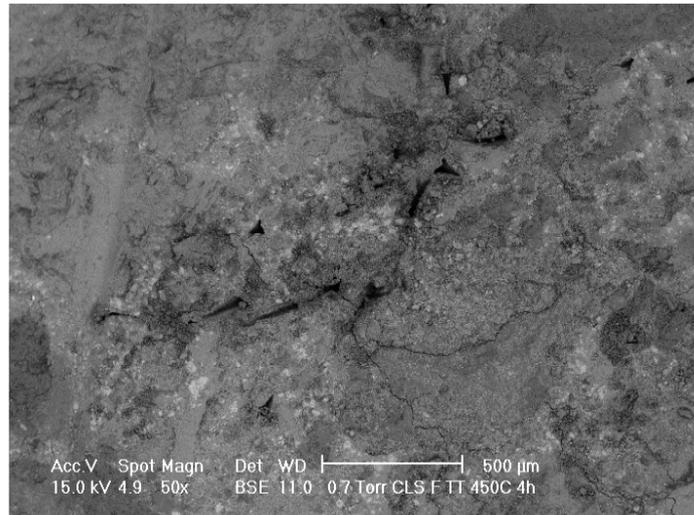
## Calcestruzzo con fibre a T<sub>Ambiente</sub>



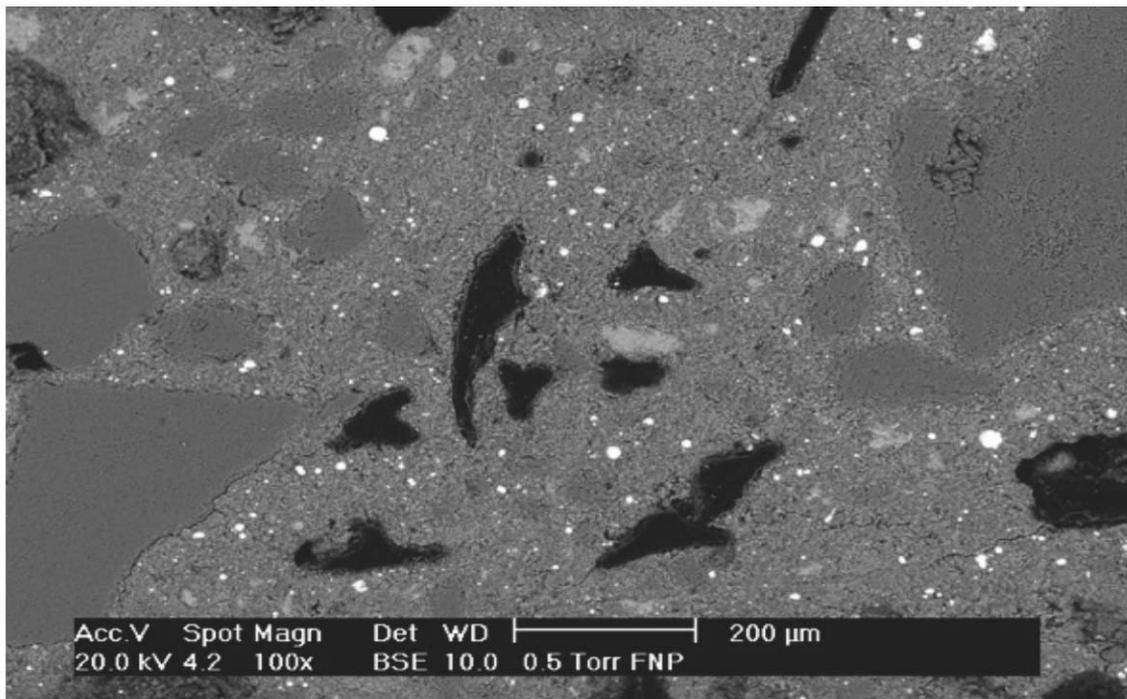
## Calcestruzzo con fibre a 250°C



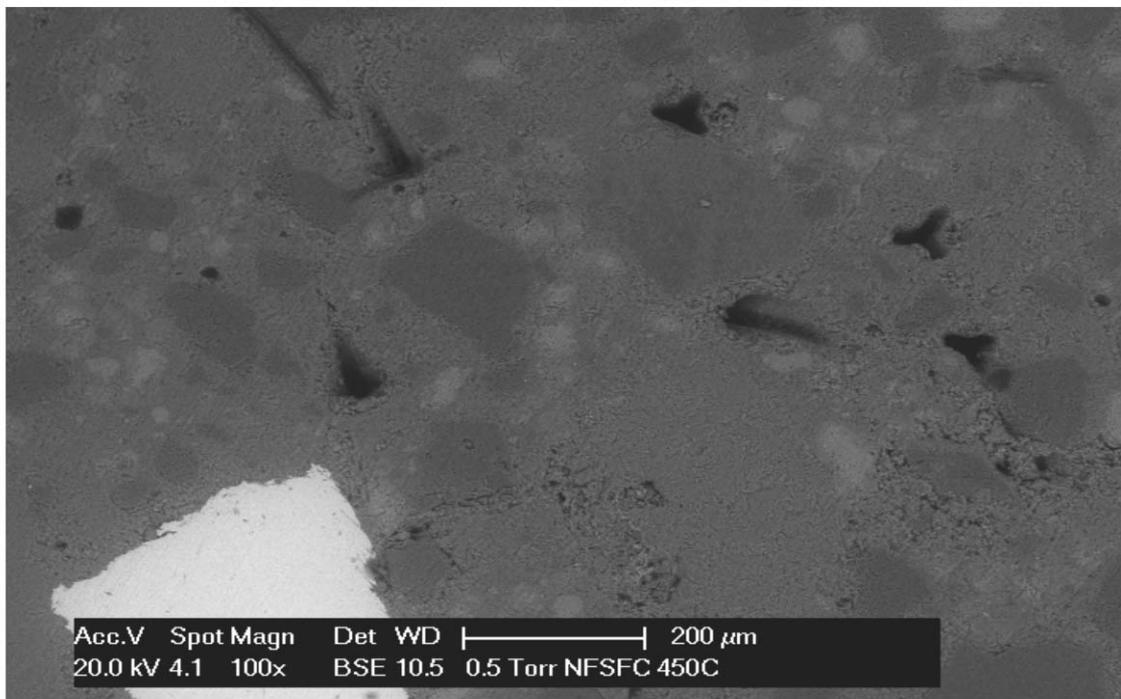
## Calcestruzzo con fibre a 450°C



## Conducibilità termica



## Conducibilità termica



## Conducibilità termica

Campioni	Conducibilità termica (W/mK)	Conducibilità termica dopo 4 h a 300°C (W/mK)
C	1.02 ± 0.02	0.99 ± 0.03
FC	1.30 ± 0.02	1.16 ± 0.03
SFC	2.01 ± 0.01	1.73 ± 0.02
NFPC	2.21 ± 0.01	2.01 ± 0.03
NFSFC	2.74 ± 0.11	2.13 ± 0.21

F. Girardi, G.M. Giannuzzi, V.A. Salomoni, C.E. Majorana, R. Di Maggio, Effect of metallic addition on thermal properties of hardened concrete for energy storage systems, Cement and Concrete Composite, submitted (2015)

## Permeabilità ai gas

Campioni	Coefficiente di permeabilità specifica [10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> ]	
		Dopo 4h a 300°C
C	3.6 ± 0.3	98 ± 13
FC	80.6 ± 0.5	403 ± 13
SFC	32.0 ± 0.4	745 ± 12
NFPC	82 ± 4	693 ± 23
NFSFC	4.0 ± 0.3	426 ± 71

F. Girardi, G.M. Giannuzzi, V.A. Salomoni, C.E. Majorana, R. Di Maggio, Effect of metallic addition on thermal properties of hardened concrete for energy storage systems, Cement and Concrete Composite, submitted (2015)

## Accumulo termico con Phase Change Materials (PCM)

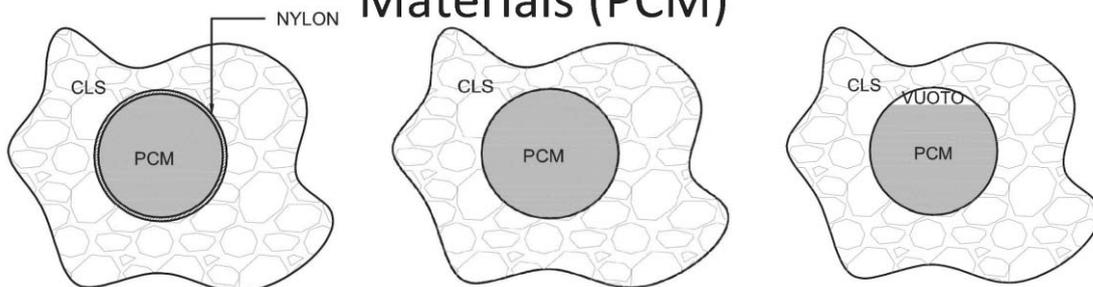


Fig. [7]-PCM prima del riscaldamento.

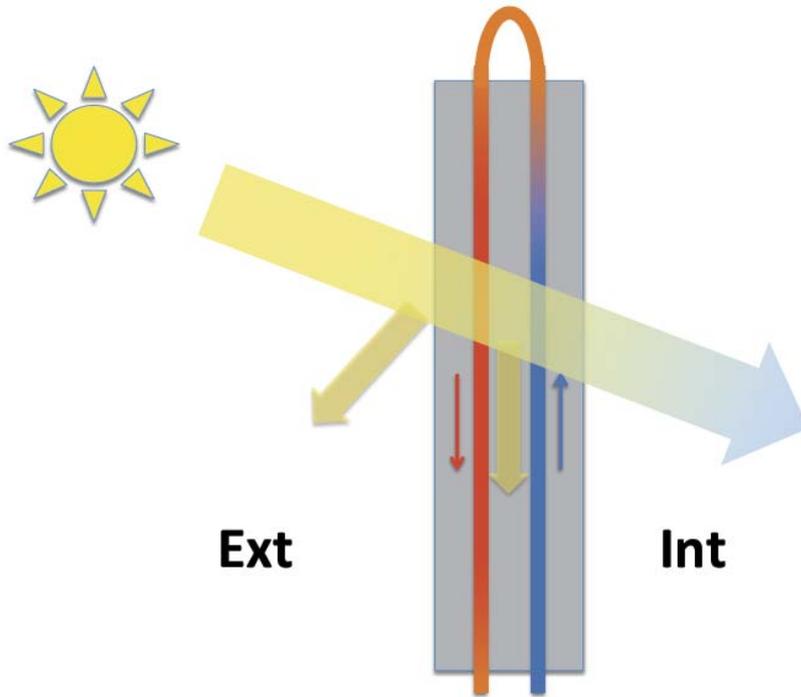
Fig. [8]-PCM liquida alla massima temperatura di esercizio.

Fig. [9]-PCM solida dopo il primo ciclo termico.

CLS + PCM	Costo al metro cubo	Quantità al metro cubo dopo ritiro	Quantità al metro cubo materie prime	Quantità totale	Costo opera
	[€/m <sup>3</sup> ]	[1/m <sup>3</sup> ]	[1/m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[€]
CLS ALLUMINOSO + 10%GRAFITE	200	0,845	0,930	9514,787	15.246.642
NYLON PA66 (ρ=1370)	1041,2	0,026	0,026	266,1479	
Zn-Al (96/4 wt%) AG40B	9819,03	0,130	0,130	1330,739	

CLS	Costo al metro cubo	Quantità al metro cubo dopo ritiro	Quantità al metro cubo materie prime	Quantità totale	Costo opera
	[€/m <sup>3</sup> ]	[1/m <sup>3</sup> ]	[1/m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[€]
CLS ALLUMINOSO + 10%GRAFITE	200	1,000	1,100	163884,4	3.327.385
CLS ALLUMINOSO	140	1,000	1,200	36539,04	7.307.808

## Pareti a controllo solare



Sistema “smart” per l’accumulo di energia termica per la generazione di energia elettrica con turbina tipo ORC

