



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Relazione Tecnica relativa alla realizzazione di strumentazione per
la determinazione delle proprietà termo-fisiche di una miscela di
sali fusi

L. Rinaldi, S. Sau



RELAZIONE TECNICA RELATIVA ALLA REALIZZAZIONE DI STRUMENTAZIONE PER LA
DETERMINAZIONE DELLE PROPRIETÀ TERMO-FISICHE DI UNA MISCELA DI SALI FUSI

L. Rinaldi ENEA, S. Sau ENEA

Settembre 2010

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Produzione e fonti energetiche

Tema: Nuovo Nucleare da Fissione

Responsabile Tema: Stefano Monti, ENEA

Titolo

Relazione Tecnica relativa alla realizzazione di strumentazione per la determinazione delle proprietà termofisiche di una miscela di sali fusi

Autori: L. Rinaldi, S. Sau

Descrittori

Tipologia del documento: Rapporto tecnico/Technical Report
Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE: tema di ricerca “Nuovo nucleare da fissione”
Argomenti trattati: Reattori nucleari ad acqua,
 Sali fusi

Sommario

Questa relazione è stata emessa nell’ambito del secondo PAR dell’accordo di programma ENEA-MSE e costituisce l’unico deliverable dell’obiettivo H “Tecnologie SFR – Generatore di vapore per reattori SFR” della linea progettuale LP3 “Reattori di quarta generazione”.

Il documento descrive l’attività svolta per:

- la realizzazione e la messa a punto dei sensori di misura miniaturizzati per la determinazione dei valori delle proprietà termofisiche primarie dei sali fusi, sia quelle termodinamiche (calore specifico, dilatazione termica) che quelle di trasporto (conduttività termica, viscosità, diffusività termica)
- l’allestimento di un Laboratorio di misura con acquisizione di un calorimetro a scansione differenziale
- la realizzazione della strumentazione della sezione di prova ‘Simulacro da 300 kW del Generatore di Vapore’ tramite applicazione di termocoppie, al fine di determinare i coefficienti di scambio termico sali fusi/acqua in fascio tubiero immerso

Note

L. Rinaldi,

S. Sau

Copia n.
In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA	<i>Luca Rinaldi</i>		
0	EMISSIONE	28.9.2010	NOME	L. Rinaldi, S. Sau	F. Fabrizi	S. Monti
			FIRMA	<i>Luca Rinaldi</i>	<i>Fabrizi</i>	<i>Monti</i>
REV.	DESCRIZIONE	DATA		REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP3 - 014	0	R	2	12

Indice

1. INTRODUZIONE.....	3
2. REALIZZAZIONE DEI SENSORI DI MISURA MINIATURIZZATI	5
3. ALLESTIMENTO DI UN LABORATORIO DI MISURA.....	7
4. STRUMENTAZIONE DELLA SEZIONE DI PROVA.....	9

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP3 - 014	0	R	3	12

1. INTRODUZIONE

Le azioni svolte per il conseguimento dell'Obiettivo Linea Progettuale n. 3 – H: 'Tecnologie SFR: Generatore di vapore per reattori SFR', inserito nell'Accordo di Programma tra il Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA, hanno riguardato lo sviluppo e la messa a punto, da parte dell'ENEA - Unita Tecnica Fonti Rinnovabili (UTRINN), di strumentazione e sensori di misura miniaturizzati per la determinazione delle proprietà termofisiche primarie e secondarie di una miscela di sali fusi come quella utilizzata come fluido di accumulo e scambio termico principalmente negli impianti a solare termodinamico e impiegata a temperature sino a 550°C.

Questa è una miscela di sali (nitrato di sodio (NaNO_3) e nitrato di potassio (KNO_3) al 60-40%, comuni fertilizzanti usati in agricoltura), che a circa 240°C diventano liquidi e restano stabili fino a più di 550°C. L'uso di questi sali fusi come fluido termovettore di processo è una scelta vincente dai notevoli vantaggi: basso costo; totale compatibilità ambientale; impiego a pressione atmosferica con possibilità di lavoro ad alte temperature; scarsa pericolosità (fluido non combustibile, non deflagrante, non classificabile come nella categoria dei fluidi "molto tossici, tossici e nocivi ai sensi delle D.E. 67/548/CEE e 1999/45/CE e s.m.); facilità di approvvigionamento. A livello mondiale, i maggiori sviluppatori di sistemi di produzione di energia da solare termodinamico si stanno orientando in questa direzione, anche sostenuti dai lusinghieri risultati ottenuti dall'ENEA con l'utilizzo fin dal 2003 di questa miscela sul suo Impianto sperimentale PCS (Prova Componenti Solari) del Centro Ricerche Casaccia.

L'utilizzo di sali fusi è stato proposto per la loro economicità e compatibilità chimica anche per i reattori nucleari della quarta generazione (GEN. IV). In particolare per i reattori refrigerati a sodio, i sali fusi potrebbero essere utilizzati come fluido refrigerante nel circuito intermedio in sostituzione del sodio.

Infatti con l'interposizione di un circuito intermedio a sali fusi tra il circuito primario a sodio e il secondario ad acqua pressurizzata, si può ottenere un grande vantaggio dal punto di vista della sicurezza rispetto a un ipotetico incidente di rottura di tubazione dell'acqua nel generatore di vapore (GV). Con un circuito intermedio a sali (Na-Na-MS-H₂O), che si interfaccia con il circuito a sodio tramite uno scambiatore di calore 'shell & tube' e con il circuito ad acqua pressurizzata tramite il GV, a fronte di una limitata perdita di energia termica dovuta al doppio passaggio di calore, i vantaggi dal punto di vista della sicurezza sono notevoli: infatti, una rottura di un tubo nello scambiatore di calore sodio/sali pur dando origine ad una reazione esotermica significativa con produzione di gas, non porta conseguenze dannose al reattore in quanto i gas rimangono al massimo confinati nel

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP3 - 014	0	R	4	12

circuito primario a sodio non interagendo con il nocciolo (è quindi da escludere un utilizzo dei sali fusi come circuito).

L'utilizzo dei sali fusi è possibile anche in altri circuiti ausiliari, come quello di asportazione del calore di decadimento nella vasca di stoccaggio degli elementi di combustibile esauriti. In questo caso il circuito sali prevede uno scambiatore di calore all'interno della vasca a sodio e uno scambiatore ad aria per la dispersione del calore verso l'ambiente (Na-MS-Aria).

Per i motivi sopra esposti l'ENEA ha previsto di sviluppare la tecnologia a sali fusi anche per applicazioni nucleari e ha focalizzato la propria attenzione sullo sviluppo di componenti, quali generatori di vapore, scambiatori di calore e pompe.

La presente relazione riporta le azioni svolte in questo ambito dal Lab. Solare Termodinamico dell'Unità Tecnica Fonti Rinnovabili dell'ENEA (UTRINN-STD) per approvvigionarsi e fornirsi delle attrezzature necessarie alla definizione delle proprietà fisiche della miscela di sali fusi.

Infatti, quantunque l'uso di una tale miscela di sali fusi si stia diffondendo in tutto il mondo per diverse applicazioni tecnologiche di avanguardia, in letteratura non sono però ancora disponibili tutte le loro proprietà fisiche, primarie e secondarie, la cui conoscenza (proprietà fisiche primarie, sia quelle termodinamiche (calore specifico, dilatazione termica) che quelle di trasporto (conduttività termica, viscosità, diffusività termica)) è essenziale per descrivere il comportamento dei fluidi stessi quando vengono utilizzati come fluidi termovettori di processo. Inoltre, le correlazioni di scambio termico normalmente esistenti in letteratura non possono essere applicate 'tout court' ai fluidi per le quali non sono state testate. Tra i fluidi non testati, vi sono certamente questi sali fusi, per cui si è reso necessario effettuare studi appositi per la determinazione dei coefficienti di scambio termico (proprietà termofisica secondaria) nelle condizioni reali di esercizio.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP3 - 014	0	R	5	12

2. REALIZZAZIONE DEI SENSORI DI MISURA MINIATURIZZATI

Per la miscela di sali fusi (nitrati di sodio e potassio) utilizzati come fluido di accumulo termico e di scambio termico negli impianti solari a concentrazione, anche se in letteratura compaiono alcuni valori per i componenti puri, permane tuttavia una notevole incertezza sui valori effettivi nel campo di temperatura (200÷550°C) in cui detto composto è utilizzato per le applicazioni nel solare termodinamico sviluppato da ENEA.

Inoltre vi sono alcune notevoli discrepanze tra le correlazioni empiriche normalmente utilizzate per i fluidi più comunemente utilizzati, quali aria, acqua, oli, polimeri, e i risultati sperimentali relativi alla miscela. Tale fatto sembra indicare una non validità di tali correlazioni nella loro applicazione a un fluido particolare come la miscela di sali fusi, o una conoscenza erronea delle proprietà termofisiche utilizzate nell'effettuare le valutazioni. È quindi importante procedere alla determinazione diretta delle grandezze implicate nello sviluppo della tecnologia solare termodinamica.

In particolare, per la misura della conduttività termica della miscela liquida è stato scelto di utilizzare il metodo della sonda ("probe method"), considerato il più adatto per l'effettuazione di misure relativamente veloci (circa 20 min) e accurate. Il metodo consiste nel generare calore in una sottile sonda (probe) mediante passaggio di corrente in un riscaldatore, e misurare l'andamento della temperatura nel tempo all'interno della sonda stessa con un termometro che può essere il riscaldatore stesso (se è un filo di platino si comporta come termoresistenza oltre che come generatore di corrente) o una sottile termocoppia inserita all'interno della sonda. Le sonde di diametro 0,6 mm hanno ottime caratteristiche meccaniche e un'accuratezza relativa nelle misure su materiali di riferimento (glicerina) dell'ordine dell'1%. Considerato che si devono effettuare misure nel campo di temperatura 200 ÷ 550°C, le sonde sono state realizzate con materiali adatti alle condizioni di esercizio.

Sono in corso di verifica due soluzioni, per ciascuna delle quali sono state realizzate due sonde miniaturizzate come prototipo (in tutto n. 4 sonde prototipiche), da sperimentare e provate nelle condizioni di misura richieste, e n. 4 sonde miniaturizzate definitive per ogni soluzione (ulteriori n. 8 sonde, definitive) per l'esecuzione delle campagne di misura vere e proprie.

La 1^a soluzione da testare consiste in una bacchetta di bifilare o quadrifilare di allumina con un filo di platino inserito in modo che compia due percorsi (nel tubo bifilare) o quattro (nel tubo quadrifilare) con le saldature per le connessioni elettriche a quattro terminali esterne e inglobate in cemento di allumina (vedi figura 1.1).

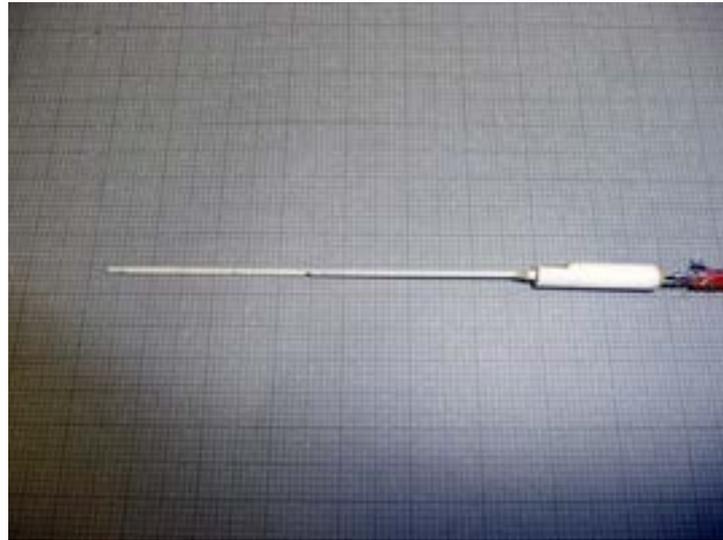


Fig. 1.1 – Particolare dell’intera sonda ; si noti al centro la cava realizzata per raggiungere i fili di platino inseriti nel corpo della sonda stessa

L’ulteriore soluzione da provare è realizzata tramite un elemento di filo di Pt bifilare inglobato in un involucro esterno in acciaio inossidabile riempito di ossido di magnesio: il cavo viene già fornito tal quale; per ottenere la sonda è stato necessario estrarre i capi del filo di Pt ed effettuare le saldature con i terminali esterni (vedi figura 1.2, in cui è riportato uno dei prototipi di una sonda miniaturizzata di questo tipo).



Fig. 1.2 - Particolare di un sensore miniaturizzato: è distinguibile il punto di saldatura dei due fili di platino del riscaldatore all’interno della guaina. Si vede bene il diametro della guaina di 0,6 mm, in riferimento ai quadrati della carta millimetrata di lato 1 mm

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP3 - 014	0	R	7	12

3. ALLESTIMENTO DI UN LABORATORIO DI MISURA

È stato completato l'allestimento ed è in funzione presso l'ENEA, Unità UTRINN – STD del CR Casaccia, un laboratorio per la misura delle proprietà chimico-fisiche dei fluidi termici di interesse per le applicazioni sopra già descritte.

Il gruppo di ricerca impegnato in queste attività ha una vasta esperienza pregressa nello studio sulle miscele di sali con basso punto di fusione (miscele di nitrati di metalli alcalini); per approfondire ulteriormente il know-how in maniera funzionale alle sperimentazioni tecnologiche che si stanno effettuando in altre unità dell'ENEA sul solare termodinamico, è stato deciso di completare l'equipaggiamento del laboratorio con l'acquisizione di un Calorimetro a scansione differenziale (DSC) con sensore MultiSTRA FRSS. Questa strumentazione è andata ad integrare la strumentazione già presente presso il Laboratorio e specificatamente la termobilancia con sensore DTA già in possesso del gruppo di ricerca (vedi figura 2.1).



Fig. 2.1 – DSC (a sinistra) e termobilancia

In particolare, il calorimetro e la termobilancia sono utilizzati per effettuare le seguenti misure, in un intervallo di temperatura che può andare dalla temperatura ambiente fino a 600 °C, relative alla miscela binaria di sali fusi utilizzata dall'ENEA:

- punti di inizio liquefazione e solidificazione della suddetta miscela, ma anche delle altre varie miscele (binarie, ternarie o quaternarie) di sali; tali punti sono poi utilizzati per tracciare i relativi diagrammi di fase e per la determinazione dei punti di eutettico;
- capacità termica;

- stabilità termica delle miscele in varie condizioni (questa misura si può effettuare, in linea di principio, fino a 1000°C) ;
- calori di fusione/ solidificazione o cambiamento di fase.

Un particolare ed innovativo sistema è in fase di assemblaggio per la misura della conducibilità termica fino a 600 °C (vedi schema in Fig. 2.2)

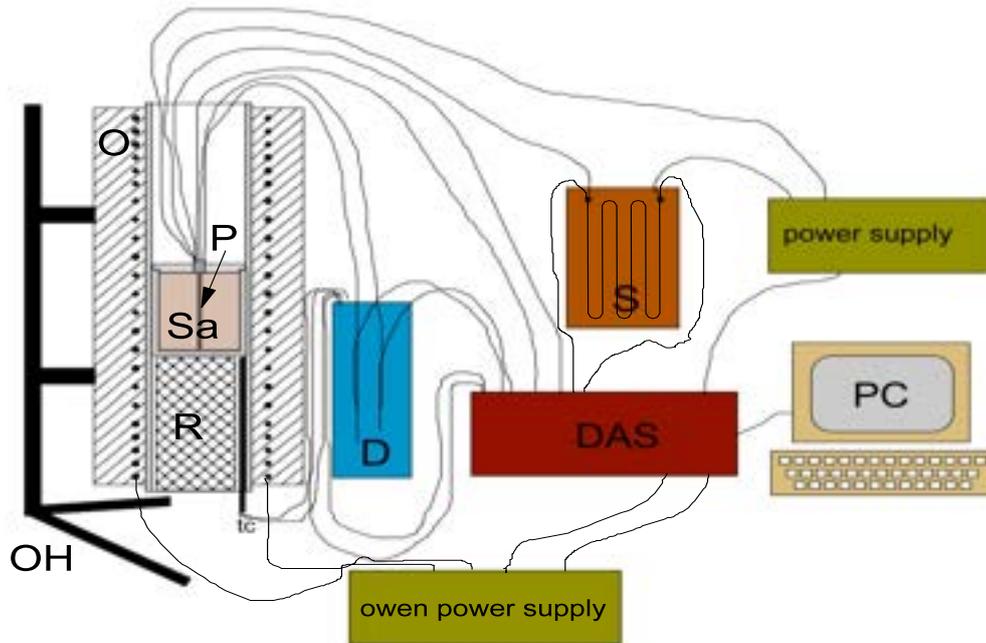


Fig. 2.2 – Schema per l'apparato in corso di allestimento per la misura della conducibilità termica di miscele di sali fusi. (R=refrattario, O=forno, P=sonda contenente il campione (Sa), DAS= scheda acquisizione dati, D=Dewar, S= shunt)

Nel laboratorio è anche presente un reometro con una camera termostatica per effettuare misure di viscosità fino a 500 °C.

Infine, è importante rilevare che le miscele di sali basso fondenti come quella oggetto della presente sperimentazione possono trovare utilizzo non solo nell'ambito della produzione di energia solare a concentrazione ma anche, come già detto nell'Introduzione, come fluidi di scambio termico ausiliario nei reattori nucleari di ultima generazione. In questo ambito l'ENEA partecipa ad un progetto europeo in cui, oltre alle succitate proprietà chimico-fisiche, viene studiata anche la compatibilità fra le miscele fuse di sali e il sodio.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	NNFISS – LP3 - 014	0	R	9	12

4. STRUMENTAZIONE DELLA SEZIONE DI PROVA

Per effettuare la determinazione del coefficiente di scambio termico in uno scambiatore di calore a fascio tubiero immerso in una miscela di sali fusi, si è pensato di poter economizzare la spesa utilizzando una Sezione di Prova già a disposizione del Laboratorio Solare Termodinamico, simulante un Generatore di Vapore in piccola scala da immergere nel serbatoio di accumulo sali dell’Impianto sperimentale PCS del CR Casaccia.

Al fine di ottenere lo scopo, è stato necessario realizzare solamente la strumentazione della SdP acquisendo e installando opportunamente n. 62 termocoppie (TC) in Cr-Al (tipo K) e guaina in INCONEL, con i diametri, le lunghezze e i modi di posizionamento di seguito indicati e illustrati da fotografie.

Posizione A

Sono state installate n. 30 TC, delle quali 20 da $\phi = 1$ mm, e 10 da $\phi = 1$ mm con testa laminata a 0,5 mm, in 10 posizioni di misura diverse ad intervalli uguali lungo il fascio tubiero del GV, ogni punto di misura composto di 3 TC (2 da $\phi = 1$ mm, 1 da $\phi = 1$ mm laminata a 0,5 mm), vedi figure n. 3.1 e 3.2. Sono state posizionate sul tubo elicoidale più interno del fascio tubiero, composto di tre tubi elicoidali concentrici e con angolo di inclinazione alternativamente opposto. Queste TC sono dedicate alla misura della temperatura nel canale di passaggio dei sali fusi all’interno del fascio tubiero e sulla superficie dei tubi di scambio termico, per determinare il coefficiente di scambio termico che si stabilisce tra la parete dei tubi e i sali fusi stessi.

Da ognuno dei 10 punti di misura le 3 TC sono state unite a mazzo insieme e indirizzate verso la virola più interna per poi farle passare in un’apposita cava realizzata nella parete esterna della virola stessa, vedi figure n. 3.3 e 3.4; in questa cava sono state ammazzettate con le altre TC di ciascun punto di misura man mano che procedevano verso la flangia di uscita del GV, attraverso la quale sono state fatte uscire tutte e 30 insieme.

Posizione B

Sono state installate n. 10 TC da $\phi = 1$ mm, posizionate a coppie in 5 punti di misura distribuiti ad intervalli uguali lungo una generatrice della virola esterna. Esse sono state poste, per ogni coppia, una sulla parete esterna di detta virola e una in corrispondenza ad essa ma sulla parete interna del lamierino costituente l’involucro più, in modo da misurare la differenza di temperatura che si stabilisce a cavallo del coibente contenuto nel meato circolare, di 0.001 m di spessore, che si è venuto a costituire tra la virola esterna e il lamierino.

Le TC sono state posizionate lungo una generatrice della virola cilindrica esterna in modo da corrispondere, una volta che la SdP sia montata e installata nel serbatoio

dei sali fusi, in direzione del centro del serbatoio stesso; le coppie di TC si trovano a circa 260 mm di distanza una dall'altra e sono state bloccate nella posizione desiderata tramite fascette metalliche saldate a punti in modo da bloccare la testa di ciascuna TC nel punto voluto e renderla aderente alla superficie dove è posta. Tutte le TC sono state raggruppate in un mazzetto e condotte man mano verso l'uscita in alto della SdP.

Posizione C

Sono state installate n. 3 TC da $\phi = 1$ mm all'interno di ciascuno dei tre tubi del fascio tubiero, alla fine del loro tratto rettilineo che costituisce il 'downcomer' del fascio stesso.

Le TC sono state inserite dall'alto attraverso un apposito passaggio in un raccordo SWAGELOK con riduzione 'CONAX' dotata di ogiva ad 1 foro in lava, materiale idoneo a sopportare pressioni e temperature (60 bar e 300 °C) dell'acqua che passa all'interno dei tubi. Le TC sono state spinte all'interno dei tubi in modo da trovarsi più vicino possibile alla curva dei tubi stessi, e tenute circa al centro della sezione di passaggio tramite mollette metalliche applicate nei pressi della testa delle TC stesse. Queste TC hanno lo scopo di misurare la temperatura di ingresso dell'acqua di alimento del GV nel punto più vicino possibile all'inizio del tratto elicoidale dei tubi, tratto in cui inizia lo scambio di calore con i sali contenuti nel GV stesso.

Posizione D

Su un idoneo tubo di acciaio da $\frac{3}{4}$ " sono state installate n. 15 TC da $\phi = 1,5$ mm poste a circa 0,1 m una dall'altra lungo una stessa generatrice indirizzata verso l'interno del serbatoio per misurare l'andamento della temperatura assiale (stratificazione) dei sali fusi.

Tutte le TC sono state appoggiate sul tubo di supporto e tenute in posizione da fascette metalliche saldate a punti; le loro teste sono piegate ad angolo retto in modo da formare una 'L' con braccio piccolo di 10 mm, formando così una sorta di 'pettine' di TC.

Posizione E

Le temperature assolute di ingresso e di uscita nei tubi strumentati che costituiscono il fascio tubiero sono misurate con 4 TC da $\phi = 2$ mm. La misura della temperatura di ingresso è comune ai tre tubi strumentati ed è misurata tramite una sola TC inserita nel barilotto comune all'ingresso dei tubi stessi.

Le 3 temperature di uscita dai tubi sono invece misurate in maniera separata; ogni TC è stata inserita ovviamente all'uscita di ciascun tubo, posizionata nel raccordo a croce SWAGELOK per mezzo di un connettore CONAX dotato di ogiva in lava.

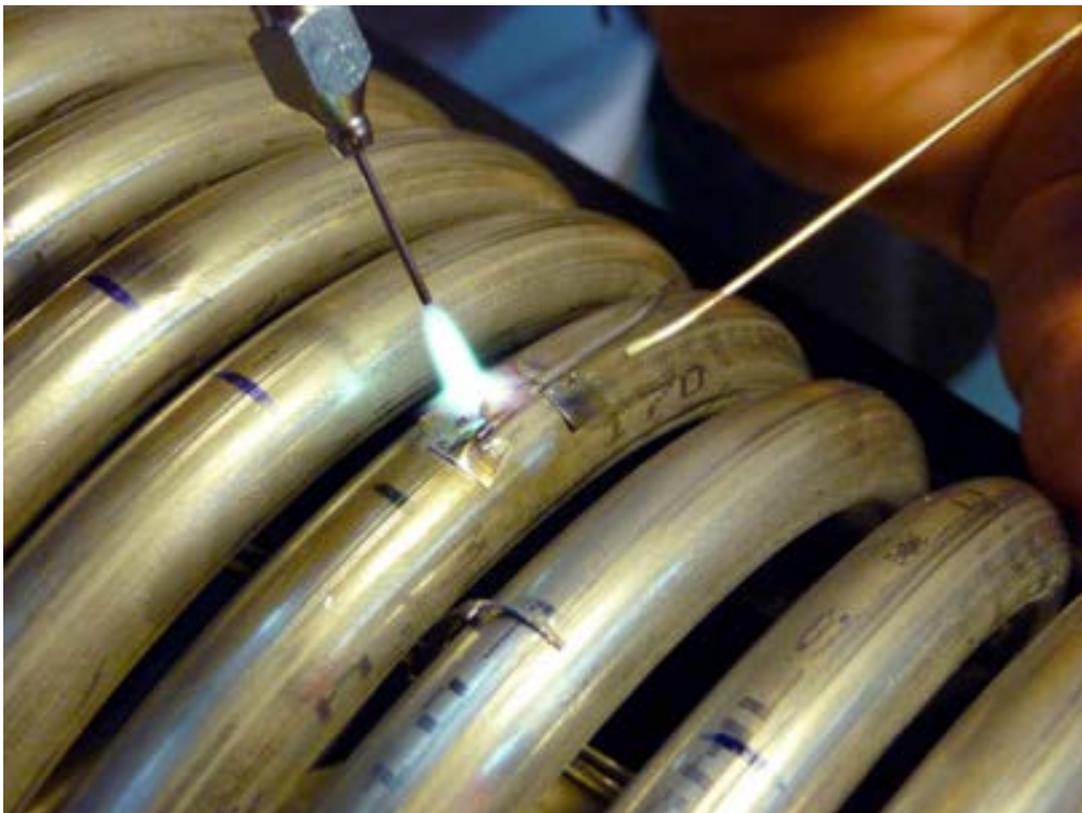


Foto 3.1 – Particolare del fissaggio di una TC sul tubo della Sezione di prova



Foto 3.2 – Dettaglio di un punto di misura completo sul tubo della Sezione di Prova



Foto 3.3 – Particolare del passaggio delle TC ammazzettate all'interno della spirale

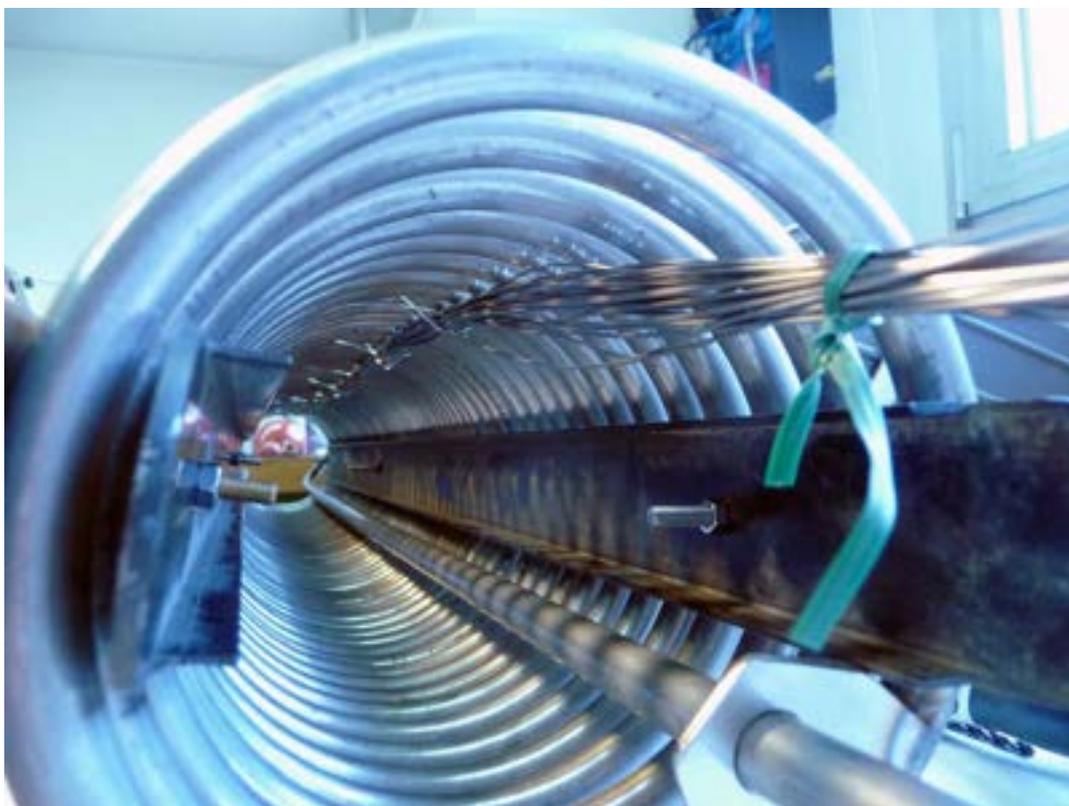


Foto 3.4 – Particolare dell'uscita del mazzetto di TC