



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



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Studio di fattibilità per un impianto a sodio per shock termici e ratchetting sui materiali

M. Angiolini, R. Calvigioni, G. Console, F. Giannetti, L. Gramiccia, P.C. Incalcaterra, A. Naviglio, L. Scotto, G. Tiranti



STUDIO DI FATTIBILITÀ PER UN IMPIANTO A SODIO PER SHOCK TERMICI E RATCHETTING
SUI MATERIALI

G. Console, F. Giannetti, L. Gramiccia, A. Naviglio, L. Scotto – CIRTEN, M. Angiolini, R. Calvigioni, G. Tiranti - ENEA

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Governo, Gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Nuovo nucleare da fissione: collaborazioni internazionali e sviluppo competenze in materia nucleare

Responsabile Progetto: Paride Meloni, ENEA

Titolo

Studio di fattibilità per un impianto a sodio per shock termici e ratchetting sui materiali.

Descrittori

Tipologia del documento: Rapporto tecnico

Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE: tema di ricerca “Nuovo nucleare da fissione”

Argomenti trattati:
 Ingegneria nucleare
 Tecnologia dei reattori nucleari
 Tecnologia dei metalli liquidi (sodio)

Sommario

Nella prospettiva di avviare attività sperimentali di ricerca nell'ambito dei reattori di IV generazione refrigerati a sodio, si è effettuato uno studio di fattibilità di un impianto a sodio di piccola taglia finalizzato a prove di shock termico su materiali di interesse per futuri reattori. Particolare attenzione si è posta alla semplicità di conduzione dell'impianto, in quanto una delle sue principali finalità dovrebbe essere un graduale riavvicinamento agli aspetti peculiari della gestione di impianti a sodio, con la conseguente ricostruzione di competenze nello specifico settore: pertanto ci si è orientati verso una facility di ridotte dimensioni, con un contenuto di sodio limitato a circa 60 kg. Il documento riporta sia il contributo ENEA, che ha prodotto le specifiche di dettaglio dell'impianto con riferimento alle precedenti esperienze del CNEN/ENEA ed in particolare al progetto PRM/CBR (cosiddetto “progetto Brasile”, 1983), sia la successiva elaborazione di CIRTEN (UNIROMA1) che ha effettuato la progettazione di massima.


Note

AUTORI : M. Angiolini, R. Calvigioni, G. Console (*), F. Giannetti (*),
 L. Gramiccia(*), P.C. Incalcaterra, A. Naviglio (*), L. Scotto (*), G. Tiranti

(*) : CIRTEN


Copia n.
In carico a:

| | | | | | | |
|------|-------------|-----------|-----------|-------------------|--------------|-----------|
| 2 | | | NOME | | | |
| | | | FIRMA | | | |
| 1 | | | NOME | | | |
| | | | FIRMA | | | |
| 0 | EMISSIONE | 12-9-2011 | NOME | P.C. Incalcaterra | M. Tarantino | P. Meloni |
| | | | FIRMA | | | |
| REV. | DESCRIZIONE | DATA | REDAZIONE | CONVALIDA | APPROVAZIONE | |

| | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------|----------------------|------------------|-----------------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione NNFISS – LP3 - 028 | Rev. 0 | Distrib. L | Pag. 2 | di 74 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------|----------------------|------------------|-----------------|

(This page has been intentionally left blank)

INDICE

| | | |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | RUOLO DELL'IMPIANTO E SUE POSSIBILITA' SPERIMENTALI | 6 |
| 1.1 | Ruolo dell'impianto | 6 |
| 1.2 | Descrizione delle esperienze di shock termico | 6 |
| 1.3 | Esperienze su pompe elettromagnetiche | 7 |
| 1.4 | Esperienze su strumentazione speciale ovvero dedicata ad impianti a sodio | 7 |
| 1.4.1 | DEFINIZIONE DEL PROCESSO DI IMPIANTO | 7 |
| 2 | Serbatoio di alimento SA | 8 |
| 3 | Serbatoio di caricamento e di drenaggio (SD) | 9 |
| 4 | Apparecchiature e tubazioni sul circuito per circolazione, caricamento e drenaggio del sodio | 10 |
| 5 | Refrigeratore Sodio-Aria | 11 |
| 5.1 | Ipotesi di progetto | 11 |
| 5.2 | Dimensionamento del refrigeratore sodio - aria | 12 |
| 5.3 | Calcolo del coefficiente di scambio termico globale | 12 |
| 5.3.1 | Coefficiente di scambio sodio lato tubo | 13 |
| 6 | Pompa elettromagnetica | 16 |
| 6.1 | Calcolo delle perdite di carico | 16 |
| 7 | Riscaldatore Elettrico | 18 |
| 7.1 | Descrizione | 18 |
| 7.2 | Procedura di calcolo | 21 |
| 7.2.1 | Dettagli del modello utilizzato | 21 |
| 7.3 | Calcolo del coefficiente di scambio termico h | 23 |
| 8 | Coibentazione | 26 |

| | | |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 8.1 | Numeri adimensionali e correlazioni | 27 |
| 8.2 | Spessore di coibentante e dispersione termiche del circuito di circolazione, e del circuito di drenaggio | 28 |
| 8.2.1 | Condizioni di progetto: | 28 |
| 8.3 | Coibentazione di serbatoi cilindrici | 31 |
| 8.4 | Serbatoio di drenaggio e carico SD | 32 |
| 8.5 | Serbatoio di alimento e di espansione SA | 33 |
| 8.6 | Coibentazione del riscaldatore elettrico | 34 |
| 8.7 | Coibentazione refrigeratore | 35 |
| 8.8 | Linea argon | 36 |
| 9 | Calcolo delle perdite termiche | 36 |
| 9.1 | Calcolo della potenza termica necessaria per il preriscaldamento del sodio nel serbatoio di drenaggio SD | 37 |
| 9.2 | Calcolo della potenza termica necessaria per il preriscaldamento del circuito a vuoto | 38 |
| 9.3 | Calcolo della potenza termica necessaria per portare il circuito dalla temperatura di 400 ai 600°C | 38 |
| 10 | Tracciamento elettrico | 40 |
| 10.1 | Tubazione da \varnothing 34.6mm (circuito di ricircolazione) | 40 |
| 10.2 | Tubazione da \varnothing 60.3 mm (linea di drenaggio) | 41 |
| 10.3 | Tubazione da \varnothing 48.3 mm (refrigeratore) | 42 |
| 10.4 | Serbatoio di Alimento ed espansione (SA) | 43 |
| 10.5 | Serbatoio di Drenaggio (SD) | 44 |
| 11 | Specifiche materiali e correlazioni | 46 |
| 11.1 | Caratteristiche termo-fluidodinamiche del sodio. | 46 |

| | | |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 11.1.1 | Densità | 46 |
| 11.1.2 | Conducibilità termica | 46 |
| 11.1.3 | Viscosità dinamica | 47 |
| 11.1.4 | Viscosità cinematica | 47 |
| 11.1.5 | Calore specifico | 48 |
| 12 | Riferimenti | 53 |
| 13 | ALLEGATO 1: Specifiche tecniche di un circuito a sodio per prove termomeccaniche e per test su piccoli componenti | 54 |

1 RUOLO DELL'IMPIANTO E SUE POSSIBILITA' SPERIMENTALI

1.1 *Ruolo dell'impianto*

Ruolo fondamentale dell'impianto è quello di permettere l'organizzazione di un ampio ventaglio di prove sperimentali su provini, strumentazione innovativa e componenti di piccole dimensioni per la loro caratterizzazione nei circuiti a sodio liquido, con evidente riferimento alle applicazioni nei reattori veloci a sodio. Tra gli scopi principali dell'impianto rientrano:

- caratterizzazione di materiali strutturali (thermal ratchetting, thermal striping, shock termici)
- progettazione e test di sensori e strumentazione di controllo
- addestramento di personale per la conduzione di impianti sodio
- acquisizione di tecniche d'intervento e manutenzione di impianti al sodio
- acquisizione della metodologia di progettazione di circuiti al sodio, principalmente per quanto riguarda gli aspetti normativi e di sicurezza
- acquisizione di tecniche e metodologie di progettazione
- organizzazione di campagne di prova
- sezioni di prova per esperienze di shock termico su provini/componenti di piccole dimensioni
- strumentazione specifica per impianti al sodio (sonde di livello continue e discontinue; misuratori di portata sodio, pompe elettromagnetiche con porte compatibili con le dimensioni e gli scopi dell'impianto, misuratori di pressione differenziale, sensori elettrochimici, generatori e trasduttori di ultrasuoni, ecc)
- valvole per sodio.

1.2 *Descrizione delle esperienze di shock termico*

Qui di seguito vengono indicate in linee generali alcune esperienze di shock termico in sodio statico ed in sodio fluente, di cui l'ENEA sta valutando la fattibilità e l'opportunità nell'ambito di un più ampio coinvolgimento in progetti europei sullo studio dei materiali, e che dovrebbero essere effettuate sull'impianto in oggetto.


L'esecuzione di queste prove richiederà, di volta in volta, la realizzazione di apposite sezioni di prova: esse non rientrano nei limiti dello studio richiesto a CIRTEN, che dovrà tuttavia prevederne l'applicabilità alla configurazione impiantistica che vorrà proporre.

Per le prove statiche la sezione di prova suddetta sarà costituita da una camera a tenuta, nella quale saranno alloggiare:

- a) un'apposita tanica con copertura mobile
- b) un'apparecchiatura di sollevamento

Essa consentirà test di shock termici e di deformazione residua tramite immersione di provini in sodio caldo e loro successivo raffreddamento con una corrente di argon secondo appropriate matrici sperimentali.

La temperatura del sodio nella tanica di prova potrà essere compresa nel range 400 – 600 °C.

| | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 028 | 0 | L | 7 | 74 |

Per le prove di shock termico con sodio fluente ENEA sta progettando una sezione di prova tubolare (che non è oggetto dell'attività CIRTEN) precaricabile con martinetti idraulici ed opportunamente preriscaldata tramite riscaldatori elettrici.

1.3 Esperienze su pompe elettromagnetiche

Le connessioni dell'impianto permettono di realizzare un circuito di circolazione sodio che può essere equipaggiato con pompe elettromagnetiche di prova per realizzare esperienze sulle stesse con portate di sodio compatibili con le caratteristiche dell'impianto.

1.4 Esperienze su strumentazione speciale ovvero dedicata ad impianti a sodio

L'impianto sperimentale dovrà essere progettato per consentire anche prove di caratterizzazione di strumentazione dedicata ad impianti al sodio, con particolare attenzione a quella strumentazione attualmente in fase di sviluppo. A titolo esemplificativo, l'interesse della ricerca per la strumentazione innovativa si orienta verso:

- flussimetri ultrasonici
- sistemi di visione ad ultrasuoni per rilevamenti in tank
- misure di densità da misure di velocità di ultrasuoni
- misure densità di micro bolle gassose
- sensori di livello (mutua induttanza)
- misure di contaminazione da idrogeno (mass spectrometers, diffusion membranes, sensori elettrochimici)
- misure di impurità disciolte (cold traps).

1.4.1 DEFINIZIONE DEL PROCESSO DI IMPIANTO

La parte circuitale dedicata specificatamente alla circolazione del sodio assicura essenzialmente due funzioni:

- * Innalzare la temperatura del sodio presente nell'impianto (serbatoio principale, che funge anche da volume di espansione, tubazioni di collegamento, pompa elettromagnetica e relativi componenti in linea) dal valore di preriscaldamento (150° C) al valore di prova (max 600°C).

Tale incremento di temperatura è ottenuto tramite il riscaldatore elettrico.

Il mantenimento della temperatura di prova può ottenersi tramite l'intervento del riscaldatore ed eventualmente dell'aerotermostato su comando di un regolatore settato alla temperatura da mantenere. E' comunque possibile ottenere lo stesso risultato con un opportuno dimensionamento della tracciatura elettrica.

- * Possibilità di eseguire esperienze su componenti, strumentazione e sensori quali le pompe elettromagnetiche, misuratori di portata e di pressione differenziale, generatori e trasduttori di ultrasuoni, etc.

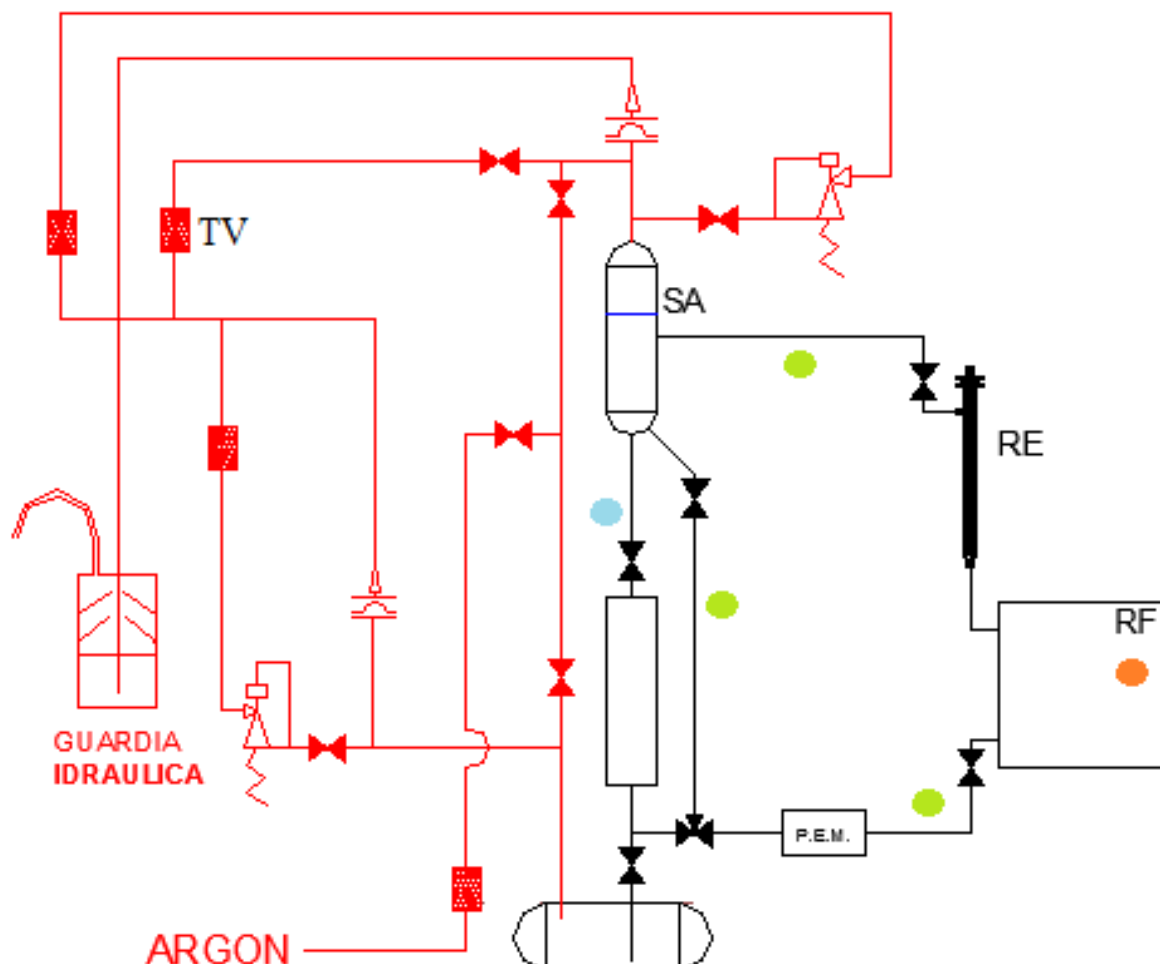


Figura 1 (schema del circuito di circolazione, della linea di drenaggio e del circuito argon)

2 Serbatoio di alimento SA

Il serbatoio in oggetto dovrà essere installato su un apposita struttura alla quota di 2,5 m dal serbatoio di drenaggio: tale differenza di quota garantisce l'instaurarsi di una portata di sodio per caduta tra il serbatoio SA ed il serbatoio di drenaggio, sufficiente per permettere l'effettuazione di prove di shock termico nella relativa sezione di prova.

Il serbatoio di alimento possiede anche la funzione di consentire la dilatazione termica del sodio del circuito dalla temperatura di caricamento di 400°C fino alla temperatura d'esercizio massima 600°C, e di permettere la taratura di piccoli componenti quali sonde di livello, misuratori di portata, misuratori di pressione differenziale, pompe elettromagnetiche.

Descrizione:

| | |
|------------------------------------------|-------------------------------------|
| * Tipo: Serbatoio ad asse verticale | |
| * Altezza totale del serbatoio | 1.04 m |
| * Diametro esterno del mantello | 0.27 m |
| * Massa di sodio | 26 kg |
| * Volume di sodio alla temp di esercizio | 0.0320 m ³ alla T=600 °C |
| * Capacità volumetrica del serbatoio | 0.0501 m ³ |
| * Massa del serbatoio | 40.2 kg |
| * Materiale di costruzione | acciaio AISI 316 |
| * Pressione di progetto | 1,50 bar assoluti |
| * Temperatura di progetto | 600 °C |
| * Vuoto di 10 torr (1333 Pa) | 200 °C. |

Il serbatoio è provvisto di tracciatura elettrica in grado di mantenerlo alla temperatura di 400°C.

3 Serbatoio di caricamento e di drenaggio (SD)

Il serbatoio in oggetto è installato in un'apposita fossa di raccolta situata sotto l'impianto, costituisce il punto più basso del circuito sodio ed ha le seguenti funzioni principali:

contenere la quantità di sodio necessaria per il caricamento ed il drenaggio dell'impianto;

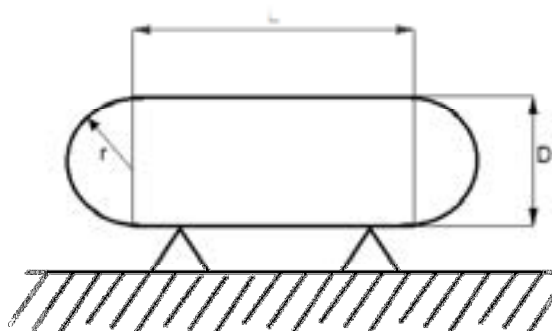
garantire una quantità minima di sodio a caricamento ultimato;

permettere lo svolgimento delle esperienze di shock termico nell'apposita sezione;

permettere la purificazione di tutto il sodio prima del caricamento dell'impianto.

Tipo : Serbatoio ad asse orizzontale

- | | |
|--------------------------------------|------------------------------------------|
| * Lunghezza totale del serbatoio | 1.07 m |
| * Diametro esterno del mantello | 0.37 m |
| * Massa di sodio | 60 kg |
| * Capacità volumetrica del serbatoio | 0.095 m ³ |
| * Volume di sodio | 74 litri a 600 °C 65.6 litri a 150 °C |



- Il sodio (la cui massa totale è di 60 kg) viene immesso nel serbatoio SD alla T=150 °C
- Fase di preriscaldamento fino alla temperatura di 400 °C
- Fase di caricamento a 400 °C
- Fase di drenaggio con una T_{media}=500 °C
- La massa di sodio rimanente nel serbatoio dopo il caricamento = 18 kg

4 Apparecchiature e tubazioni sul circuito per circolazione, caricamento e drenaggio del sodio

Tutte le apparecchiature e le tubazioni interessate al passaggio del sodio, sia in fase di circolazione sia in fase di caricamento e drenaggio, sono dotate di tracciatura in grado di preriscaldarle a vuoto almeno fino a 400 °C. (vedere Cap. 10)

Tabella 1 (caratteristiche generali delle tubazioni del circuito di circolazione e delle relative apparecchiature)

| ID | s _e | ρ AISI 316L | L | S | massa(kg) | massa (kg) | massa |
|----|----------------|-------------|---|---|-----------|------------|-------|
|----|----------------|-------------|---|---|-----------|------------|-------|

| | mm | kg/m ³ | (m) | (mm) | sodio T=400°C | sodio T=600°C | (kg) AISI |
|----|------------|-------------------|-----|------|------------------|---------------|------------|
| 1. | 34.6 | 7960 | 8.5 | 4.55 | 3.7 | 3.5 | 24.6 |
| 2. | 48.3 | 7960 | 6 | 5.08 | 5.9 | 5.6 | 29.0 |
| 3. | 60.3 | 7960 | 2.5 | 5.54 | 4.1 | 3.9 | 17.0 |
| 4. | | | 1.0 | | | | |
| | 260 | 7960 | 3 | 6 | 26 | 26.8 | 40.2 |
| 5. | | | 1.2 | | | | |
| | 54.74 | 7960 | 5 | 5.54 | 1.3 | 1.2 | 6 |
| | TOT | | | | 41 | 41 | 117 |

1. Circuito di circolazione (CC)
2. Refrigeratore (RF)
3. Tratto di tubazione tra SA e SD (collegamento con la sezione di prova)
4. Serbatoio di alimento (SA)
5. Riscaldatore elettrico (RE)

5 Refrigeratore Sodio-Aria

Il refrigeratore sodio aria, ha la funzione di portare da 600°C a 400°C il sodio contenuto nel serbatoio di alimento e in tutti quei componenti in cui fluisce sodio.

Il refrigeratore di compone di:

- * Fascio tubiero costituito di 6 tubi da 0,0483 m lunghi circa 0.78 m e disposti l'uno sopra l'altro, leggermente sfalsati e collegati da 5 curve a 180°.
- * Cassone di contenimento
- * Ventilatore centrifugo da 3000 Nm³/h
- * Coibentazione esterna
- * Tracciamento elettrico

Nei paragrafi seguenti, viene descritto la procedura di calcolo per il dimensionamento del fascio tubiero, ed infine i risultati relativi a tale dimensionamento.

5.1 Ipotesi di progetto

Il refrigeratore, è in grado di portare il sodio dalla temperatura di 600 °C ai 400 °C.

- * Temperatura nominale ingresso sodio 600-400 °C
- * ΔT=18°C massimo tra ingresso e uscita sodio
- * Portata nominale di sodio 3 m³/h
- * Portata nominale di aria 3000 Nm³/h
- * Temperatura in aria 40 °C
- * Massima temperatura uscita aria 54 °C

5.2 Dimensionamento del refrigeratore sodio - aria

$$Q = 2\pi L * U * DTML \quad [W]$$

$$Q = \dot{m}c_{pNa}(T_{in} - T_{out}) = \dot{m}c_{p\,air}(t_{out} - t_{in})$$

Una volta impostate le temperature di ingresso ed uscita dei relativi fluidi(“T” si riferisce alla temperatura del sodio, mentre “t” si riferisce alla temperatura dell’aria), è possibile calcolare la portata di aria \dot{m} (kg/s). Tali temperature sono state definite tenendo conto delle caratteristiche del refrigeratore di Rif [1]

$$\dot{m} = \dot{m} \frac{c_{pNa}(T_{in} - T_{out})}{c_{p\,air}(t_{out} - t_{in})} \quad \left[\frac{kg}{s} \right]$$

Quindi la portata volumetrica: $\dot{w} = \dot{m}/\rho_{aria} \quad \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad \dot{W} = \dot{w} * 3600 \quad \left[\frac{m^3}{h} \right]$

5.3 Calcolo del coefficiente di scambio termico globale

Per calcolare la trasmittanza U sono state considerate le resistenze dovute alla convezione con sodio all’interno e con aria all’esterno, oltre alla conduzione all’interno dell’acciaio.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{Na}r_i} + \frac{\ln(r_e/r_i)}{\lambda_{aisi}} + \frac{1}{h_{aria}r_e}} \quad \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

$$h_{aria} = \frac{\lambda_{aria}Nu}{D} \quad \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

$$Nu = C_1 + C * (Re^a - C_2)Pr^b$$

Dove i coefficienti C1 , C, C2, a, b, sono riportati nella tabella sottostante, tali parametri dipendono sia dalla geometria del sistema che dalle caratteristiche termofluidodinamiche dell’aria.

Tabella 2

| Geometria | Re | C ₁ ; C ₂ | C | A | b | Note/Tipo di Moto | Dimensione per Nu e Gr |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| flusso su un solo lato di una superficie piana | 2000–3·10 ⁵ > 5·10 ⁵ | 0 ; 0 0 ; 23200 | 0,66 0,037 | 1/2 0,8 | 1/3 1/3 | laminare turbolento | lunghezza L nel verso del flusso |
| flusso entro condotti o tra superfici piane parallele | < 2100 > 10 ⁴ | 0 ; 0 0 ; 0 | 1,86(D/L) ^{0,22} 0,023(1+(D/L) ^{2,7}) | 1/3 0,8 | 1/3 0,4 | laminare turbolento | diametro D o distanza tra piani |
| flusso esterno ad un tubo, con moto del fluido normale all'asse del tubo | < 4·10 ³ 4·10 ³ –4·10 ⁴ 4·10 ⁴ –4·10 ⁵ | 0,43 ; 0 0,43 ; 0 0,43 ; 0 | 0,53 0,19 0,027 | 1/2 0,62 0,81 | 0,31 0,31 0,31 | laminare turbolento turbolento | diametro D diametro D diametro D |
| flusso normale ad un banco di tubi (diametro D, passo frontale s ₁ , passo longitudinale s ₂): s ₁ /D=1.5 s ₂ /D=3.0 | 2000–4·10 ⁴ | 0 ; 0 | 0,40 f(Nr) | 0,58 | 0,31 | Nr=2; 4; 10 f(Nr)=0,64; 0,8; 1 turbolento | D _{eq} della minima sezione di passaggio del fluido tra i tubi |

5.3.1 Coefficiente di scambio sodio lato tubo

Nonostante la poca influenza di questo coefficiente nel computo totale della trasmittanza, vengono comunque riportate le correlazioni impiegate per il calcolo di h_{sodio} .

$$Re = \frac{\rho_{na} v D}{\mu_{na}} \quad \text{Numero di Reynolds}$$

$$Nu = \frac{h_{na} D}{\lambda_{na}} \quad \text{Numero di Nusselt}$$

$$Pr = \frac{\mu_{na} c_p}{\lambda_{na}} \quad \text{Numero di Prandtl}$$

$$Pe = Re * Pr \quad \text{Numero di Peclet}$$

Una interessante classificazione, si può compiere sulle modalità di scambio termico utilizzando solo il numero di Peclet

Per $Pe < 100$ La trasmissione avviene quasi esclusivamente per conduzione

Per $Pe \approx 1.000$ La trasmissione per conduzione, è confrontabile con la convezione

Per $Pe > 50.000$ La trasmissione avviene solo per convezione

La correlazione impiegata per il calcolo del coefficiente di scambio termico sodio/tubo, è la correlazione di Seban-Shimazaki, valida per sodio e per leghe sodio-potassio con $Pe > 100$.

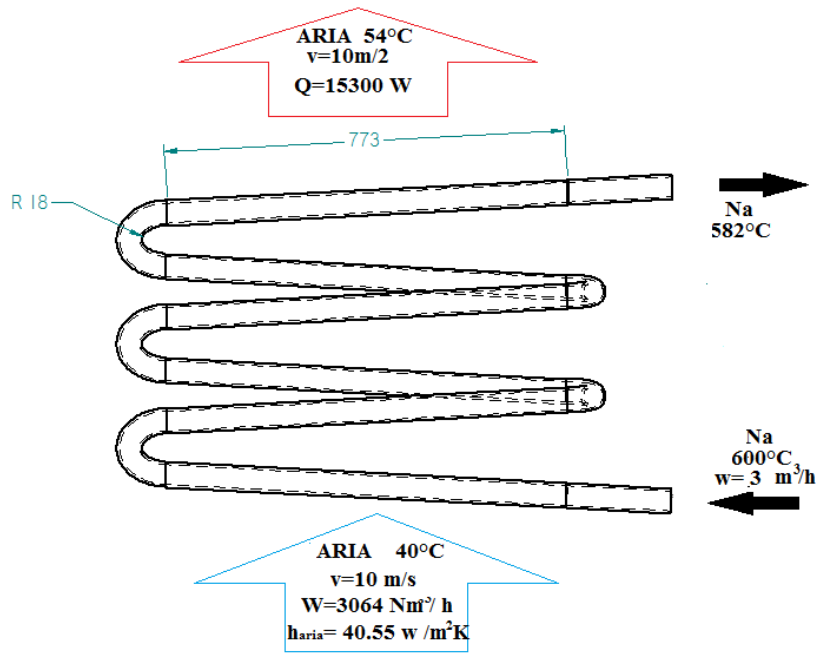
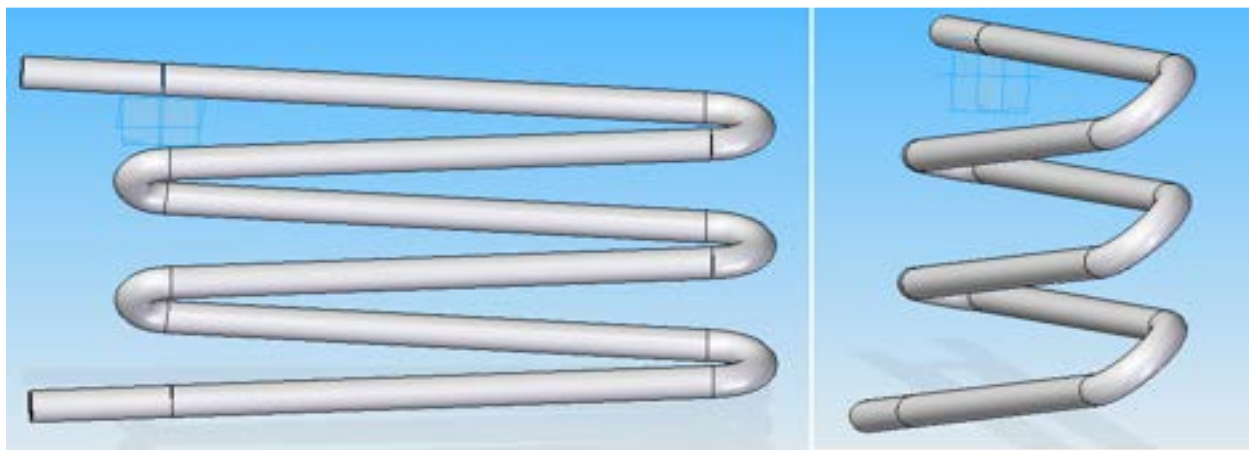
$$Nu = 5 + 0.025 Pe^{0.8}$$

Tabella 3

| | T _{in} [°C] | T _{out} [°C] | Portata [m ³ /h] | Q [w] | h [w/m ² K] | v [m/s] |
|-------|----------------------|-----------------------|-----------------------------|-------|------------------------|---------|
| Sodio | 600 | 582 | 3 | 15300 | 13300 | 0.7313 |
| Aria | 40 | 54 | 3462 (a 40°C) | 15300 | 40.55 | 10 |

Tabella 4

| | \varnothing interno [m] | \varnothing esterno [m] | s [m] | n passaggi e/o tubi | Lunghezza tubo[m] |
|-------------|---------------------------|---------------------------|---------|---------------------|-------------------|
| Tubi | 0.0381 | 0.0483 | 0.00508 | 6 | 0.773 |


Figura 2

Refrigeratore sodio/aria
Figura 3 (fascio tubiero del refrigeratore sodio/aria)

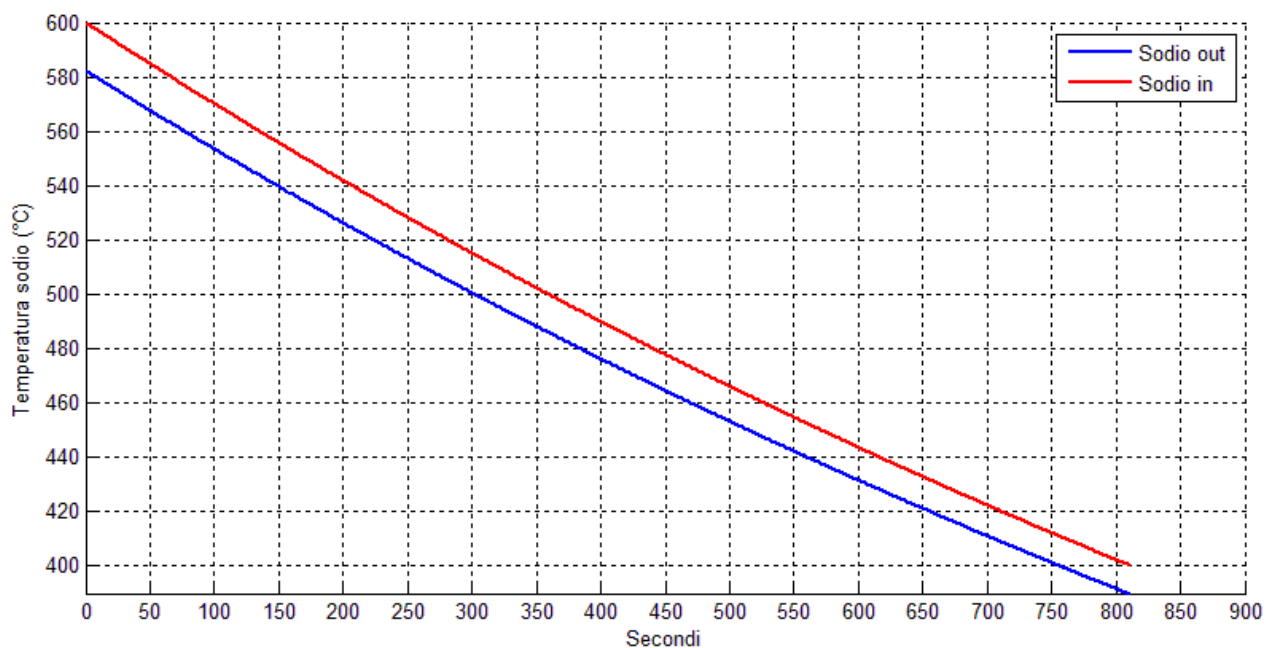


Figura 4 (Andamento della temperatura di ingresso e uscita del sodio nel tempo)

Da notare come il sodio contenuto in tutto il circuito di circolazione e nel serbatoio di alimento, passa dalla temperatura di esercizio di 600°C fino alla temperatura di 400°C in circa 14 minuti.

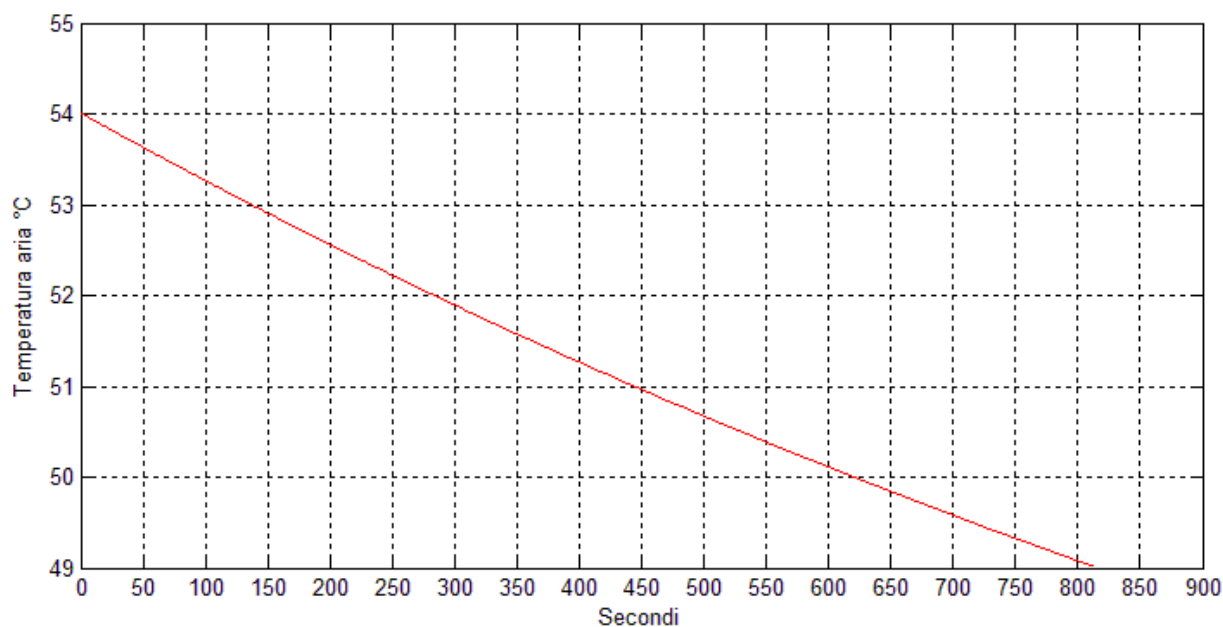


Figura 5 (Andamento della temperatura di scarico dell'aria nel tempo)

Nella fase di avviamento del refrigeratore, l'aria di refrigerazione entra alla temperatura di 40 °C ed esce a 54 °C. Con l'avanzare della fase di refrigerazione del sodio, quindi con la

riduzione di temperatura del sodio, la temperatura dell'aria all'uscita del refrigeratore diminuisce, fino a raggiungere i 49 °C nella fase finale, cioè quando ormai il sodio è raggiunto i 400 °C, dopo un tempo di circa 14 minuti.

6 Pompa elettromagnetica

Nel circuito sperimentale è prevista una pompa. Date le caratteristiche del sodio si è optato per una pompa elettromagnetica.

6.1 Calcolo delle perdite di carico

Per scegliere la prevalenza della pompa è necessario il calcolo delle perdite di carico. Per quanto riguarda le perdite di carico distribuite sono state impiegate le seguenti relazioni:

$$\Delta P = f_F \frac{\rho_{sodio} * l * v^2}{g * D} \left[\frac{kg}{m^2} \right]$$

Dove il fattore di funning per una tubazione a tubi lisci e per $3000 < Re < 10^5$ è:

$$f_F = 0.079 Re^{-0.25}$$

Mentre per le perdite di carico concentrate:

$$\Delta P_{conc} = \frac{1}{2} * K * \rho_{sodio} v^2 [Pa]$$

Dove il parametro K varia in funzione del tipo di curva e si può ricavare dalla tabella seguente, oppure calcolato con opportune formule.

| <i>Tipo</i> | <i>K</i> | <i>Tipo</i> | <i>K</i> |
|--------------------------------|----------|---------------------------------|----------|
| Curva a 45° standard | 0.35 | Valvola a sfera, apertura 100% | 6 |
| Curva a 45° a raggio ampio | 0.2 | apertura 50% | 9.5 |
| Curva a 90° standard | 0.75 | Valvola a disco, apertura 100% | 9 |
| Curva a 90° a raggio ampio | 0.45 | apertura 75% | 13 |
| Curva a 90° | | apertura 50% | 36 |
| brusca variazione di direzione | 1.3 | apertura 25% | 112 |
| Curva a 180° | 1.3 | Valvola ad angolo, aperta | 2 |
| Raccordo a T | | Valvola a farfalla | 0.24 |
| senza variazione di direzione | 0.4 | chiusura 5° | |
| con variazione di direzione | 1 | chiusura 10° | 0.52 |
| Manicotto | 0.04 | chiusura 20° | 1.54 |
| Valvola a saracinesca | | chiusura 40° | 10.8 |
| apertura 100% | 0.17 | chiusura 60° | 118 |
| apertura 75% | 0.9 | Valvola di non ritorno, a molla | 2 |
| apertura 50% | 4.5 | a piattello | 10 |
| apertura 25% | 24 | a sfera | 70 |
| Valvola a diaframma | | Misuratori di portata | |
| apertura 100% | 2.3 | Turbina | 6 |
| apertura 75% | 2.6 | Galleggiante | 15 |
| apertura 50% | 4.3 | Disco rotante | 10 |

Figura 6 (valori tipici di K per diverse tipologie di perdite di carico concentrate)
Tabella 5 (perdite di carico nel circuito)

| ID | ∅ (mm) | L (m) | n° valvole | n° curve 180° | n° curve 90° | v (m/s) |
|----|--------|-------|------------|---------------|--------------|---------|
| CC | 34.6 | 8.5 | 4 | 0 | 7 | 1.6326 |
| RF | 48.3 | 6 | 0 | 5 | 0 | 0.7298 |
| RE | | 1 | 0 | 0 | 0 | 0.7048 |
| | | | | | | — |

| ID | Perdite conc. [bar] | Perdite distr. [bar] | Perdite tot [bar] |
|---------------|---------------------|----------------------|-------------------|
| CC | 0.334 | 0.0756 | 0.136 |
| RF | 0.0155 | 0.008 | 0.0264 |
| RE | — | — | 0.0103 |
| TOTALE | — | — | 0.1727 |

Il valore delle perdite di carico totali del circuito è di 0.17 bar.

Nel caso in cui la pompa serva per ricaricare il serbatoio superiore, le perdite di carico sono date soltanto dalla parte ascendente del circuito e sono quindi inferiori alle totali, già calcolate nella tabella.

In seguito sono riportate le caratteristiche principali della pompa elettromagnetica scelta, in grado di resistere alle condizioni operative e di fornire la prevalenza richiesta. La pompa è stata volutamente sovradimensionata, per permettere di riutilizzarla in possibili upgrade della sezione di prova; in una fase successiva di progettazione potrebbe essere sostituita con un altro modello.



LA Series Electromagnetic Liquid Metal Pumps

CMI Novacast's LA series 3-phase linear annular induction pumps are constructed of stainless steel. The metal flows through the annular space between two concentric tubes, the inner of the two containing a magnetic core, through which the lines of a moving radial magnetic field are looped. The field is developed by a 3-phase stator around the tube. The flow of induced currents is circular, within the annular space, cutting the lines of the field. An axially exerted force then results, moving the liquid metal through the pump. Thermocouples are provided to monitor temperature, and cooling is provided to prevent damage to the components during operations up to 600 degrees Celsius.

LA 125 Specifications for Sodium

Max delivery (m³/h): 4
 Max temp (°C): 600
 ΔP (bars): 1.3
 Max pressure in pipe (rel. bars): 15
 N.P.S.H. (bars abs.): 0.7

Figura 7 (Descrizione della pompa)

7 Riscaldatore Elettrico

Il riscaldatore elettrico ha la funzione di innalzare, mediante apporto di potenza termica fornita dalla canna scaldante, la temperatura del sodio nel circuito di circolazione in modo da permetterne l'esecuzione della varie tipologie di esperienze previste.

7.1 Descrizione

Il riscaldatore si compone delle parti di seguito elencate:

1. **Serbatoio cilindrico ad asse verticale, flangiato superiormente e bombato inferiormente**

Diametro esterno del mantello $\varnothing_e=54.74$ mm

| | | |
|----------------------------------------|--------------------|-----|
| Spessore del mantello | s=5.54 | mm |
| Diametro dei bocchelli ingresso/uscita | $\varnothing=34.6$ | mm |
| Altezza totale | h=1000 | mm |
| Spessore di isolante ceramico | sc=80 | mm |
| Spessore di isolante Lana di roccia | sl=70 | mm |
| Spessore totale di isolante | S=150 | mm |
| Perdite termiche a 600°C | P=164 | W/m |

2. Canna scaldante

| | | |
|-------------------------------------|--------------------|-------------------|
| Potenza massima della canna | P=8500 | W |
| Diametro esterno della canna | $\varnothing_e=20$ | mm |
| Lunghezza scaldante | L=700 | mm |
| Flusso termico massimo | q=19.33 | W/cm ² |
| Materiale della guaina acciaio inox | AISI 316 | |

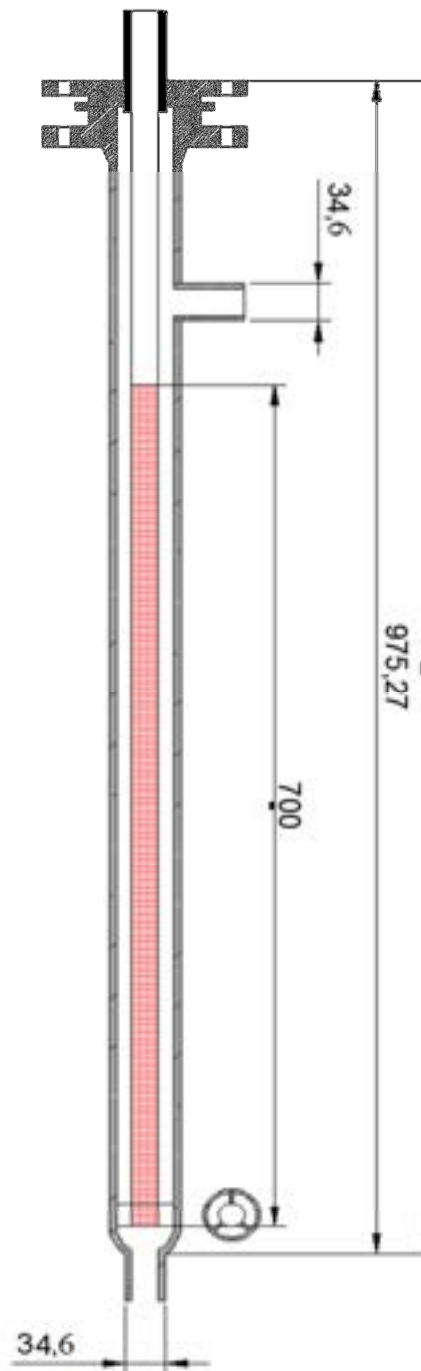


Figura 8 (sezione longitudinale del riscaldatore elettrico)

7.2 Procedura di calcolo

In questo paragrafo, viene descritta la procedura di calcolo utilizzata per lo studio del transitorio di riscaldamento del sodio dalla temperatura di 400°C fino ai 600°C.

Una volta definite le caratteristiche geometriche del riscaldatore, attraverso un codice di calcolo scritto in Matlab[®], sono state calcolate nel tempo *le temperature di ingresso ed uscita del sodio, il coefficiente di scambio termico per convezione forzata tra sodio e canna scaldante*, ed infine *la temperatura media della canna operante a massima potenza (P=8500 W)*.

7.2.1 Dettagli del modello utilizzato

Una volta assunto che la potenza del riscaldatore elettrico è 8500W e la portata di sodio che vi fluisce all'interno è di 3m³/h si ottiene che il $\Delta T = (T_{out} - T_{in})$ è pari a :

$$P_{re} = c_{pNa} \dot{m} (T_{out} - T_{in}) [W]$$

$$(T_{out} - T_{in}) = \frac{P_{re}}{c_{pNa} \dot{m}}$$

Dove la temperatura di ingresso T_{in} all'istante $t=0$ è pari a 400 °C, e la temperatura di uscita T_{out} viene calcolata attraverso la seguente equazione:

$$T_{out}^t = T_{in}^t + \frac{P_{re}}{c_{pNa} (T = T_{in}) * \dot{m}}$$

A questo punto, considerando l'energia termica accumulata nell'intero sistema, costituito da:

- Serbatoio di alimento
- Circuito di circolazione
- Refrigeratore
- Riscaldatore

Per un totale di sodio contenuto di 36 kg, e per un totale di AISI 316 pari a circa 100 kg, tutto alla temperatura di 400°C

$$E = E_{sodio} + E_{AISI} + (P_{RE} * t) - (P_{perdite} * t)$$

Dove:

Perdite termiche del sistema $P_{perdite} = P_{SA} + P_{cc} + P_{rf} + P_{re} = 2141 W$ *perdite a 600°C* (condizione conservativa in quanto si considerano le perdite termiche pari alle massime perdite raggiungibili dal sistema)

$$E_{sodio} = c_{psodio} m_{tot\ sodio} T_{in}^t$$

$$E_{AISI} = c_{pAISI} m_{tot\ AISI} T_{in}^t$$

Si ottiene che, le temperatura di ingresso del sodio all'istante temporale successivo è data:

$$T_{in}^{t+1} = \frac{E}{(m_{sodio} c_{psodio}) + (m_{AISI} c_{pAISI})}$$

Dove la T_{in}^{t+1} rappresenta, dal punto di vista fisico, la temperatura media assunta dal sistema dopo che il riscaldatore ha erogato un'energia pari ad $E = P_{re} * t$ (Joule) e $t=1$ secondo, ed il sistema ha dissipato verso l'esterno un'energia termica pari a $E = (P_{perdite} * t)$.

Quindi una volta calcolata la temperatura T_{in}^{t+1} il calcolo si ripete, e attraverso lo stesso modello si ricava la temperatura di ingresso all'istante temporale successivo, fino al raggiungimento dei 600°C.

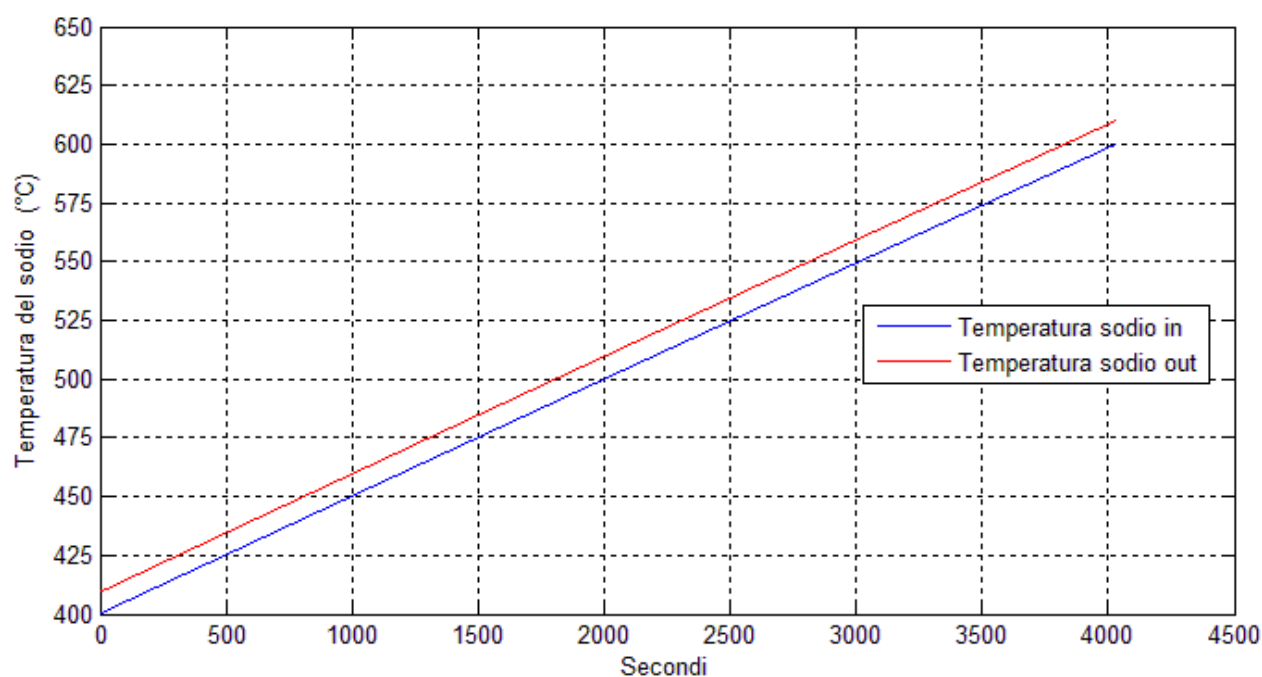


Figura 9 (andamento nel tempo della temperatura di ingresso ed uscita del sodio dal riscaldatore elettrico)

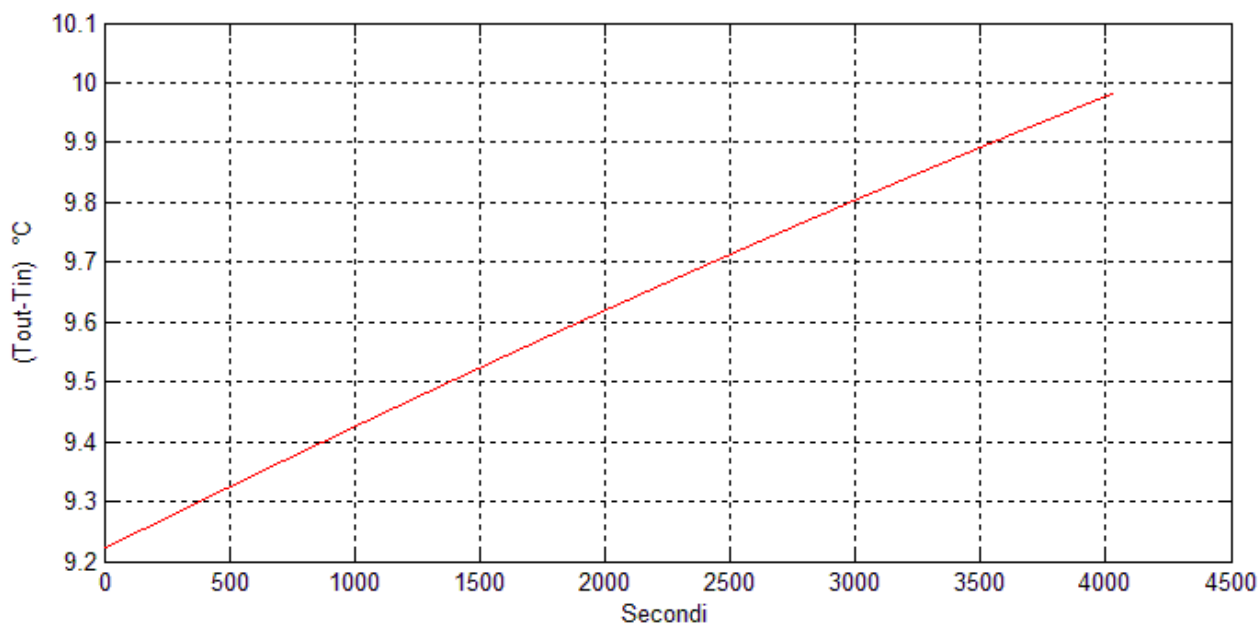


Figura 10 (andamento del ΔT tra la temperatura di uscita e di ingresso del sodio)

7.3 Calcolo del coefficiente di scambio termico h

Le correlazioni impiegate sono analoghe a quelle descritte nei paragrafi precedenti, per completezza di esposizione, vengono riportate nuovamente.

$$Re = \frac{\rho_{na} v_{DE}}{\mu_{na}} \quad \text{Numero di Reynolds}$$

$$Nu = \frac{h_{na} D}{\lambda_{na}} \quad \text{Numero di Nusselt}$$

$$Pr = \frac{\mu_{na} c_p}{\lambda_{na}} \quad \text{Numero di Prandtl}$$

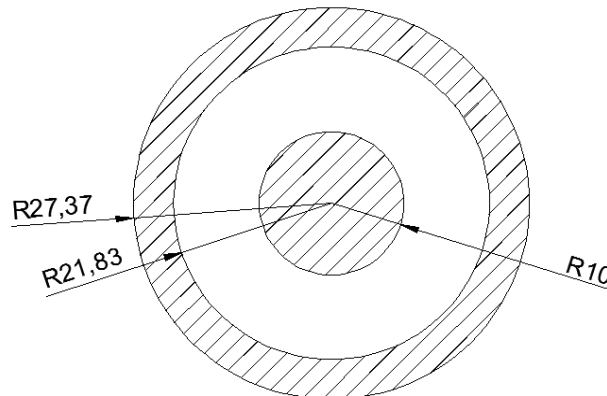
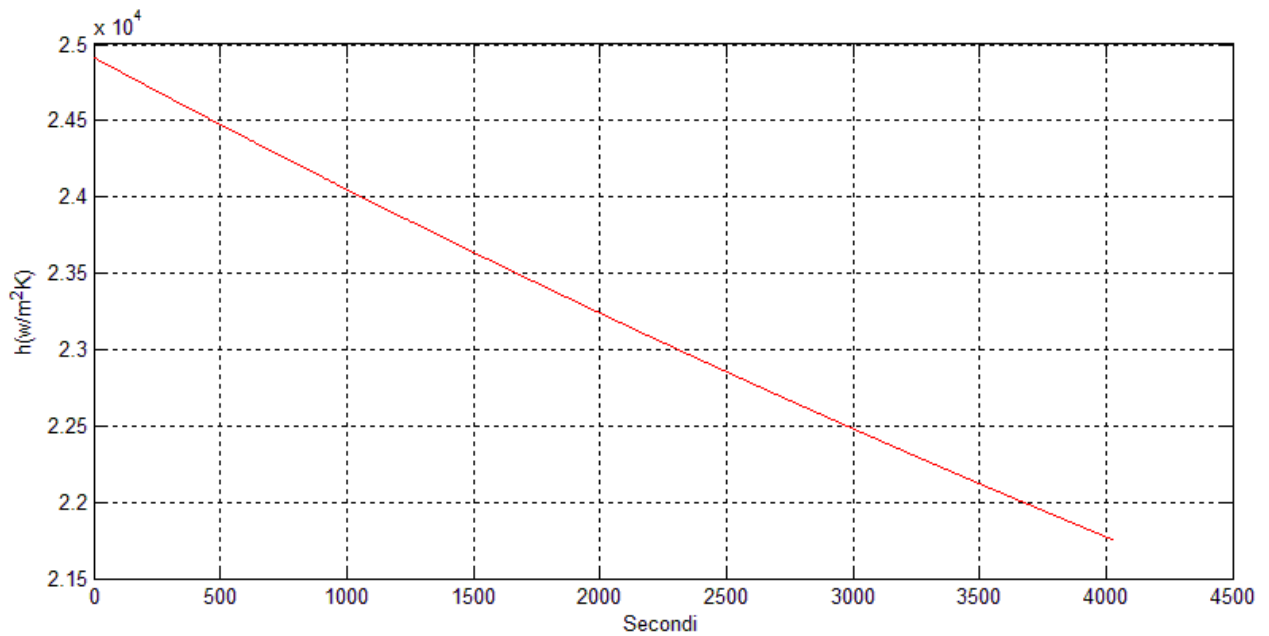
$$Pe = Re * Pr \quad \text{Numero di Peclet}$$

$$Nu = 5 + 0.025 Pe^{0.8}$$

$$h_{na} = \frac{\lambda_{na} Nu}{DE} \quad \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

Dove DE è il diametro equivalente:

$$DE = \frac{4 \text{Area di passaggio}}{\text{Perimetro bagnato}}$$


Figura 11 (Sezione del riscaldatore)


Attraverso il calcolo del coefficiente di scambio tra sodio e canna scaldante, si calcola la temperatura di parete di tale componente attraverso l'equazione:

$$P_{re} = A * h_{sodio} (T_{parete} - T_{sodio}) \quad [W]$$

$$T_{parete} = T_{sodio} + \frac{P_{re}}{\pi * \phi_{canna} * L * h_{na}} \quad [K]$$

il grafico sottostante riporta l'andamento della temperatura di parete con il tempo, tale temperatura è un valore mediato su tutta la lunghezza della canna scaldante.

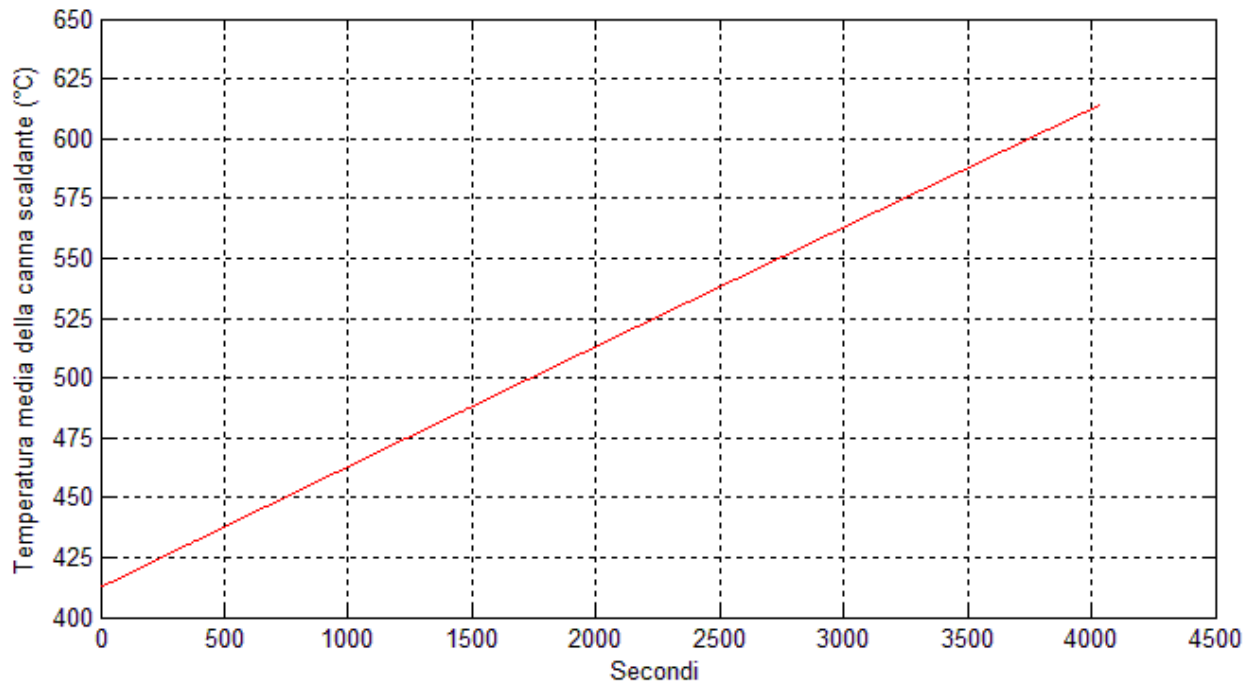


Figura 12

8 Coibentazione

Nel seguente capitolo viene riportato il calcolo per la coibentazione dell'impianto. Tale coibentazione consiste di un primo strato di materiale ceramico Cerablanket[®], ed un secondo strato di Flumroc[®], il quale ha una temperatura massima di esercizio di 250 °C.

Il tracciamento elettrico è stato dimensionato per tener conto delle condizioni più gravose di dispersione termica, cioè con l'impianto funzionante in condizioni stazionare alla temperatura T di 600°C. Tale tracciamento elettrico è in grado di far fronte alle diverse esigenze di funzionamento.

- Preriscaldamento dell'impianto a vuoto, da 20 a 400 °C.
- Mantenimento, ad un valore prefissato di temperatura dai 400 ai 600 °C con tutti i componenti e tubazioni pieni di sodio.
- Innalzamento della temperatura da quella di mantenimento fino a quella di funzionamento.

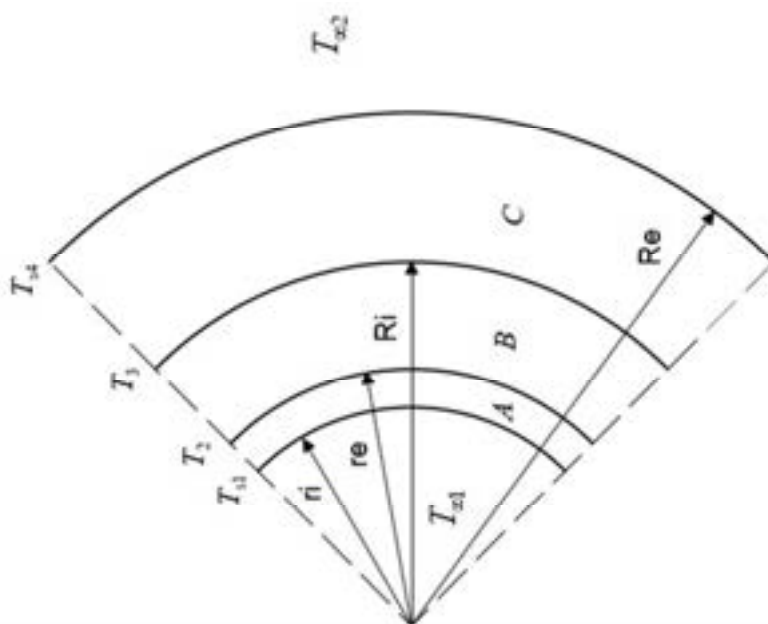


Figura 13 (Sezione del tubo con i due strati di isolante previsti)

$$\dot{Q} = \frac{Q}{L} = 2\pi \cdot \frac{(T_{na} - T_{aria})}{\frac{1}{h_{na} r_i} + \frac{\ln(r_e / r_i)}{\lambda_{aisi}} + \frac{\ln(R_i / r_e)}{\lambda_{cer}} + \frac{\ln(R_e / R_i)}{\lambda_{lana}} + \frac{1}{h_{aria} R_e}} \quad \left[\frac{W}{m} \right]$$

Per quanto riguarda la temperatura di parete, cioè la temperatura superficiale del Flumroc® (il coibentante più esterno), è stata utilizzata come vincolo per il calcolo degli spessori del coibentante, tale temperatura è stata imposta: $T_p=40$ °C.

Un secondo vincolo, nasce dall'esigenza della massima temperatura raggiungibile del Flumroc® che è pari a 250°C

$$T_p = T_a + \frac{\dot{Q}}{2\pi h_a R_e} \quad [K]$$

$$T_i = T_p + \frac{\dot{Q}}{2\pi \lambda_{\text{isola}} \ln\left(\frac{R_e}{R_i}\right)} \quad [K]$$

Dove \dot{Q} è la potenza, dissipata nell'ambiente esterno, di una tubazione avente lunghezza un metro e raggio interno r_i .

8.1 Numeri adimensionali e correlazioni

Il sodio che fluisce nella tubazione scambia calore con il tubo attraverso fenomeni di natura convettiva: al fine del calcolo del coefficiente di scambio termico, sono state impiegate le seguenti correlazioni:

$$Re = \frac{\rho_{na} v D}{\mu_{na}} \quad \text{Numero di Reynolds}$$

$$Nu = \frac{h_{na} D}{\lambda_{na}} \quad \text{Numero di Nusselt}$$

$$Pr = \frac{\mu_{na} c_p}{\lambda_{na}} \quad \text{Numero di Prandtl}$$

$$Pe = Re \cdot Pr \quad \text{Numero di Peclet}$$

Una interessante classificazione sulle modalità di scambio termico si può proporre utilizzando solo il numero di Peclet

| | |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Per $Pe < 100$ | La trasmissione avviene quasi esclusivamente per conduzione |
| Per $Pe \approx 1.000$ | La trasmissione per conduzione, è confrontabile con la convezione |
| Per $Pe > 50.000$ | La trasmissione avviene solo per convezione |

La correlazione impiegata per il calcolo del coefficiente di scambio termico sodio/tubo è la correlazione di Seban-Shimazaki, valida per sodio e per leghe sodio-potassio con $Pe > 100$.

$$Nu = 5 + 0.025 Pe^{0.8}$$

Il calcolo della densità di potenza lineare e quindi della trasmittanza e degli spessori dell'isolante, è stato effettuato attraverso un codice di calcolo scritto in Matlab®. In più tali

calcoli, hanno verificato come per quei range di velocità e temperatura i fenomeni convettivi, sono paragonabili a fenomeni di scambio termico di carattere conduttivo.

8.2 Spessore di coibentante e dispersione termiche del circuito di circolazione, e del circuito di drenaggio

Queste grandezze, sono state calcolate nelle condizioni termiche più gravose, cioè, alla temperatura di 600°C.

8.2.1 Condizioni di progetto:

| | |
|------------------------------------------|-------|
| Temperatura della tubazione | 600°C |
| Temperatura di parete | 40°C |
| Temperatura massima della lana di roccia | 250°C |

Tabella 6

| \varnothing (mm) | Q (W/m) | U(W/m ² K) | T _{plana} (°C) | s.cera (mm) | s.lana (mm) | Stot (mm) |
|--------------------|---------|-----------------------|-------------------------|-------------|-------------|-----------|
| 34.6 | 139 | 0.038 | 220 | 80 | 60 | 140 |
| 60.3 | 166 | 0.045 | 238 | 90 | 70 | 160 |

Dove:

| | |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| T _{plana} | è la temperatura di parete della lana di roccia, tale temperatura deve rimanere inferiore ai 250°C. |
| s.cera | è lo spessore di coibentante ceramico |
| s.lana | è lo spessore di lana di roccia |

La tabella sottostante riporta le perdite termiche per unità di lunghezza alle varie temperature per due prodotti commerciali (Alsiflex Blanket ® e Flumroc ®).

Tabella 7

| Tipo di isolante | T _{max} (°C) | ρ (kg/m ³) | $\lambda_{(600^{\circ}\text{C})}$ (W/mK) | $\lambda_{(400^{\circ}\text{C})}$ (W/mK) |
|------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
| Alsiflex Blanket | 1430 | 160 | 0.13 | 0.08 |
| Flumroc | 250 | 32 | 0.063(100°C) | 0.047(40°C) |

Tabella 8 (in questa tabella sono riportate le perdite termiche per unità di lunghezza del circuito di circolazione da $\varnothing 34.6$ mm e della linea di drenaggio da $\varnothing 60.3$ mm)

| Tna(°C) | Q (w/m) $\varnothing 34.6$ | Q(w/m) $\varnothing 60.3$ |
|---------|-------------------------------|---------------------------|
| 600 | 139 | 166 |
| 550 | 126 | 152 |
| 500 | 115 | 138 |
| 450 | 103 | 123 |
| 400 | 91 | 109 |
| 350 | 79 | 95 |
| 300 | 67 | 80 |
| 250 | 55 | 66 |
| 200 | 43 | 52 |
| 150 | 31 | 37 |
| 100 | 20 | 23 |
| 50 | 8 | 9 |

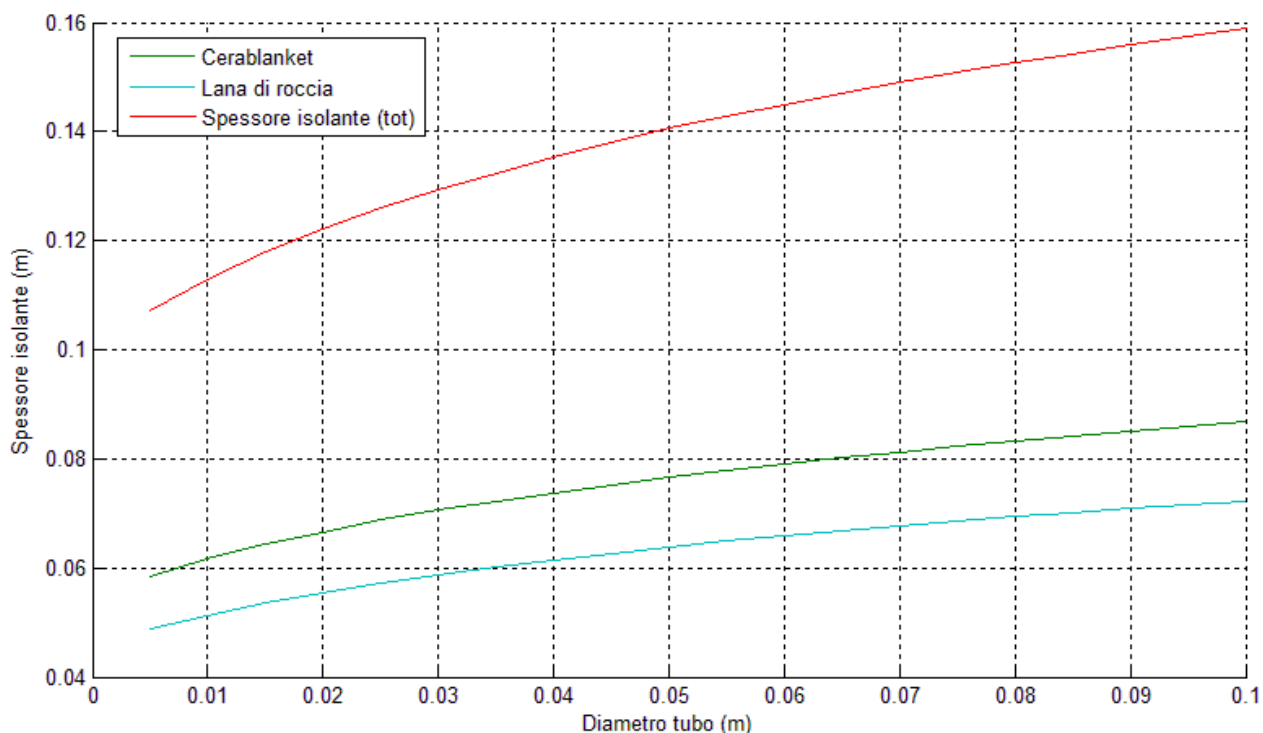


Figura 14 (Andamento dello spessore di coibentante in funzione del diametro della tubazione)

Il calcolo di tali grandezze è stato effettuato ipotizzando una temperatura costante della superficie esterna del coibentante Flumroc®, tale temperatura è stata imposta a 40°C. Un altro parametro di considerevole importanza è la massima temperatura a cui l'isolante può lavorare, nel particolare il Flumroc® non deve né superare né raggiungere la $T= 250^{\circ}\text{C}$.

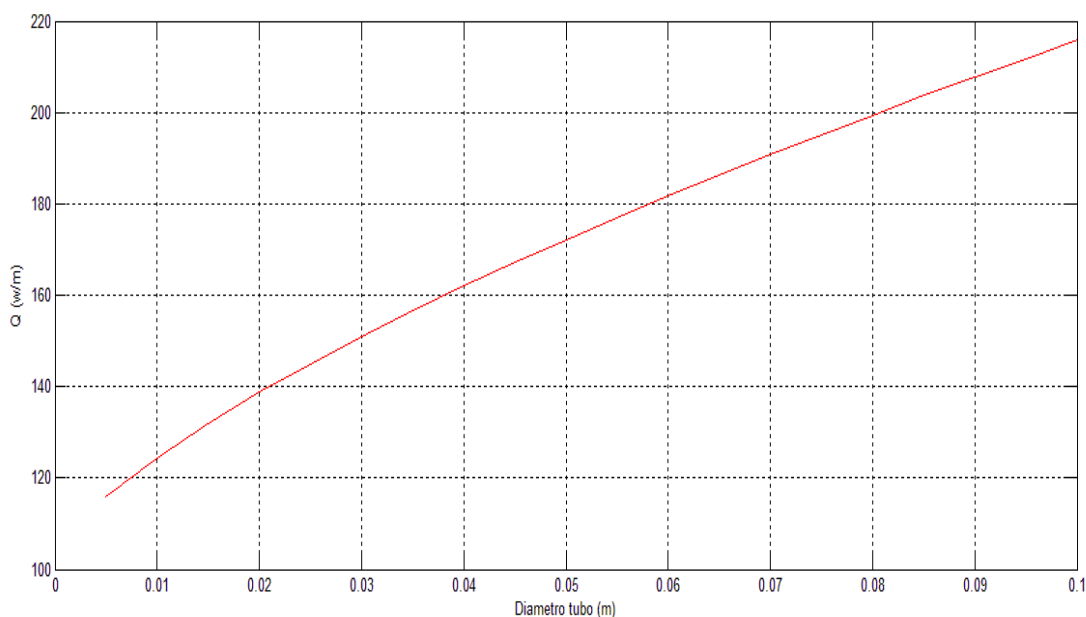


Figura 15 (Perdite termiche per unità di lunghezza in funzione del diametro della tubazione)

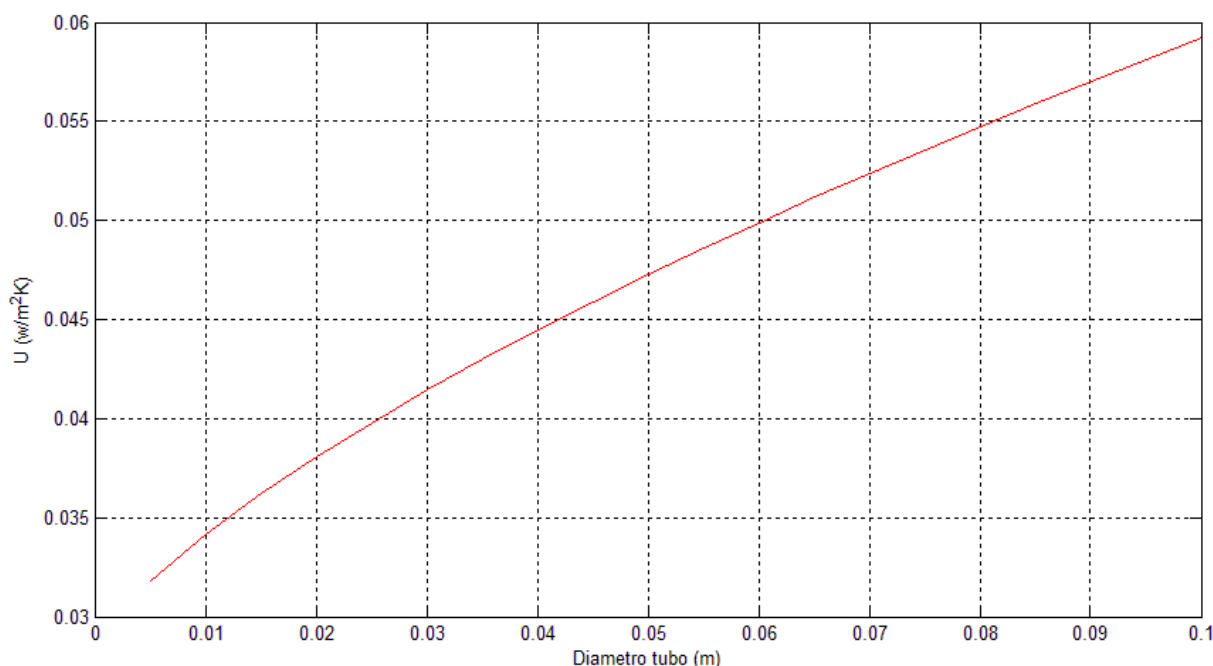


Figura 16 (Trasmittanza in funzione del diametro della tubazione. Gli spessori dei coibentanti variano in modo tale da rispettare le condizioni definite precedentemente: temperatura di parete esterna fissa a 40 °C e temperatura della lana di roccia inferiore a 250 °C)

8.3 Coibentazione di serbatoi cilindrici

Il problema della coibentazione dei serbatoi presenti nell'impianto prevede lo studio di tali componenti operanti a temperatura e pressione costante, con $T=600^{\circ}\text{C}$ e $p=1,5$ atm ass. Tali condizioni sono le più gravose, dal punto di vista delle dispersioni termiche e della relativa coibentazione.

Considerando un generico serbatoio:

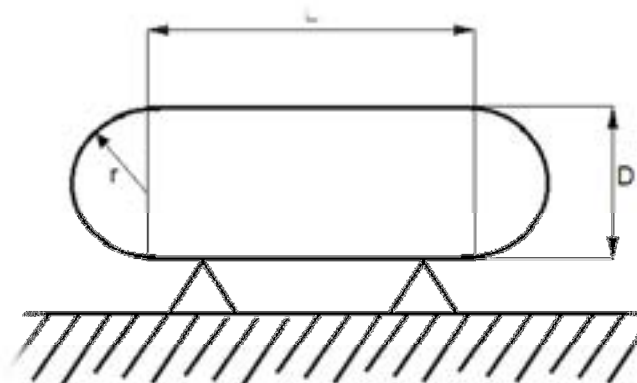


Figura 17

Il calcolo dello spessore di coibentante, è stato effettuato applicando il teorema della sovrapposizione degli effetti, e considerando la temperatura di parete costante in ogni punto del serbatoio.

Prima vengono calcolate le perdite per il cilindro avente superficie esterna: $S = \pi DL$, e poi per la sfera avente una superficie esterna : $S_{sfe} = 4\pi r^2$.

Quindi per il cilindro:

$$Q_{cil} = 2\pi L \cdot \frac{(T_{na} - T_{aria})}{\frac{1}{h_{na} r_i} + \frac{\ln(r_e / r_i)}{\lambda_{aisi}} + \frac{\ln(R_i / r_e)}{\lambda_{cer}} + \frac{\ln(R_e / R_i)}{\lambda_{lana}} + \frac{1}{h_{aria} R_e}} \quad [W]$$

Per il calcolo di tali dispersioni sono stati trascurati, data la loro piccola influenza nel calcolo della trasmittanza, i termini relativi allo scambio sodio-AISI316L e quello relativo alla conducibilità dell'AISI 316, tutto questo imponendo la temperatura di superficie esterna pari alla temperatura del sodio contenuto nel serbatoio.

Sfera:

$$Q_{sfe} = 4\pi r^2 * q''(r) [W]$$

$$\frac{Q_{sfe}}{4\pi r^2} = -\lambda \frac{dT}{dr}$$

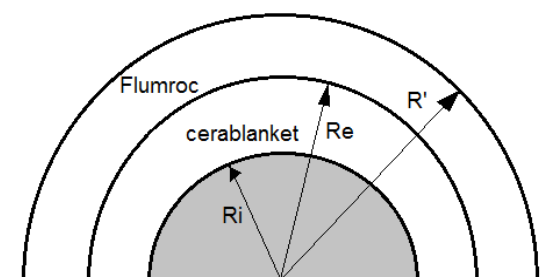
$$\frac{Q_{sfe}}{4\pi} \int_{R_e}^{R_i} \frac{1}{r^2} dr = \int_{T_2}^{T_1} \lambda dT$$

Da cui si ottiene :

$$Q_{sfe} = \frac{4\pi\lambda}{\frac{1}{R_i} - \frac{1}{R_e}} (T_1 - T_2) [W]$$

Quindi tenendo conto dei vari strati di isolante e dei fenomeni convettivi con l'aria esterna:

$$Q_{sfe} = \frac{1}{\frac{1}{R_i} - \frac{1}{R_e} + \frac{1}{R_e} - \frac{1}{R_i} + \frac{1}{4\pi R^{h_{aria}}}} (T_{na} - T_{aria}) [W]$$



8.4 Serbatoio di drenaggio e carico SD

I dati riguardanti il serbatoio di drenaggio e carico (denominato SD) sono i seguenti:

| | |
|-------------------------|---------------------------------|
| Volume serbatoio | 95 litri = 0.095 m ³ |
| Massa di sodio | 60 kg |
| Volume di sodio a 600°C | 73.97 litri |
| Volume di sodio a 150°C | 63.65 litri |

È un serbatoio cilindrico ad asse orizzontale bombato:

$$V = \pi r^2 L + \frac{4}{3} \pi r^3$$

L=0.70m r=0.18 m

1. Il sodio, 60 kg, viene immesso nel serbatoio SD alla T=150°C
2. Preiscaldamento fino alla T=400°C
3. Fase di caricamento a 400°C
4. Fase di drenaggio con una T_{media}=500°C

Il dimensionamento dello spessore di coibentante è stato effettuato considerando una temperatura di parete del serbatoio costante sia nel tempo che nello spazio. Cioè in ogni punto ed in ogni istante temporale, la temperatura T_{sup}=500°C.

Le equazioni utilizzate per la risoluzione di questo problema sono riportate nel paragrafo precedente: tali equazioni sono state risolte attraverso un codice di calcolo Matlab, ed utilizzando le seguenti condizioni al contorno:

- T_{p esterna} = 40°C
- T_{na} = 500°C
- T_{p lana} < 250°C
- λ_{cera} = 0.095 W/mK
- λ_{lana} = 0.063 W/mK
- h_{aria} = 6 W/m²K

nella tabella seguente vengono riportati i risultati del dimensionamento con i relativi spessori di coibentante, e le potenze termiche dissipate nelle varie condizioni di temperatura del sodio. Gli spessori, sono stati calcolati alla temperatura di drenaggio di 500°C ed imponendo la

temperatura esterna della Lana di roccia < di 40°C e la temperatura massima della lana di roccia <250°C per i motivi già specificati nei paragrafi precedenti.

| Tipo di isolante | T _{max} (°C) | P(kg/m ³) | λ _(600°C) (W/mK) | λ _(400°C) (W/mK) |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Alsiflex Blanket | 1430 | 160 | 0.13 | 0.08 |
| Flumroc | 250 | 32 | 0.063(100°C) | 0.047(40°C) |

8.5 Serbatoio di alimento e di espansione SA

Caratteristiche generali.

- * Serbatoio ad asse verticale
- * Massa di sodio in esercizio 26 kg
- * Volume di sodio contenuto a 600°C 0.0320 m³
- * Volume del serbatoio di alimento 0.0411 m³
- * Lunghezza del serbatoio 1.03 m
- * Diametro del serbatoio 0.26 m

| Tipo di isolante | T _{max} (°C) | P(Kg/m ³) | λ _(600°C) (w/mK) | λ _(400°C) (w/mK) |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Alsiflex Blanket | 1430 | 160 | 0.13 | 0.08 |
| Flumroc | 250 | 32 | 0.063(100°C) | 0.047(40°C) |

| Tna(°C) | Qtot (W) | Tp lana (°C) | Tp esterna(°C) | s cera(mm) | s lana(mm) | s tot(mm) |
|---------|----------|--------------|----------------|------------|------------|-----------|
| 600 | 302 | 218 | 38 | 150 | 92 | 242 |
| 550 | 275 | 200 | 36 | " " | " " | " " |
| 500 | 250 | 183 | 35 | " " | " " | " " |
| 450 | 224 | 166 | 33 | " " | " " | " " |
| 400 | 198 | 150 | 31 | " " | " " | " " |
| 350 | 172 | 132 | 30 | " " | " " | " " |
| 300 | 146 | 115 | 28 | " " | " " | " " |
| 250 | 120 | 98 | 27 | " " | " " | " " |
| 200 | 94 | 81 | 25 | " " | " " | " " |
| 150 | 68 | 64 | 24 | " " | " " | " " |
| 100 | 41 | 47 | 22 | " " | " " | " " |
| 50 | 16 | 30 | 21 | " " | " " | " " |

Le potenze termiche per temperature inferiori a 600°C sono state calcolate mantenendo costante sia lo spessore di isolante che le conducibilità termiche dei materiali: in questo modo, si garantisce attraverso ipotesi e calcoli di carattere conservativo, la veridicità del dimensionamento che segue nel paragrafo successivo.

8.6 Coibentazione del riscaldatore elettrico

Il dimensionamento dello spessore di isolante è stato effettuato considerando la temperatura massima raggiungibile da tale componente $T=600^{\circ}$ e la temperatura media dell'aria di 20°C

| | | |
|------------------------------------------|----------------|-----|
| Diametro esterno del mantello | $\Phi_e=54.74$ | mm |
| Spessore del mantello | $s=5.54$ | mm |
| Diametro dei bocchelli ingresso/uscita | $\Phi=34.6$ | mm |
| Altezza totale | $h=1000$ | mm |
| Spessore di isolante ceramico | $sc=80$ | mm |
| Spessore di isolante Lana di roccia | $sl=70$ | mm |
| Spessore totale di isolante | $S=150$ | mm |
| Perdite termiche a 600°C | $P=164$ | W/m |

| Tipo di isolante | $T_{\max} (^{\circ}\text{C})$ | $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$ | $\lambda_{(600^{\circ}\text{C})} (\Omega/\mu\text{K})$ | $\lambda_{(400^{\circ}\text{C})} (\Omega/\mu\text{K})$ |
|------------------|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Alsiflex Blanket | 1430 | 160 | 0.13 | 0.08 |
| Flumroc | 250 | 32 | 0.063(100°C) | 0.047(40°C) |

| | Qtot (W) | Tp lana (°C) | s cera (mm) | s lana (mm) | s tot (mm) |
|------------|-----------------|---------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| 600 | 157 | 234 | 82 | 70 | 152 |
| 550 | 143 | 216 | " " | " " | " " |
| 500 | 130 | 198 | " " | " " | " " |
| 450 | 116 | 179 | " " | " " | " " |
| 400 | 102 | 162 | " " | " " | " " |
| 350 | 89 | 142 | " " | " " | " " |
| 300 | 75 | 123 | " " | " " | " " |
| 250 | 62 | 105 | " " | " " | " " |
| 200 | 49 | 86 | " " | " " | " " |
| 150 | 35 | 68 | " " | " " | " " |
| 100 | 22 | 50 | " " | " " | " " |

8.7 Coibentazione refrigeratore

Le condizioni definite per la coibentazione del refrigeratore sono:

- * temperatura AISI 600°C
- * temperatura di parete della lana di roccia pari a 50°C
- * temperatura massima raggiungibile dalla lana di roccia 250°C.
- * temperatura ambiente 20°C

| T Na(°C) | Qtot (W) | Tp lana (°C) | s cera (mm) | s lana (mm) | s tot (mm) |
|----------|----------|--------------|-------------|-------------|------------|
| 600 | 366 | 248 | 170 | 60 | 256 |
| 550 | 334 | 230 | " " | " " | " " |
| 500 | 302 | 209 | " " | " " | " " |
| 450 | 271 | 190 | " " | " " | " " |
| 400 | 240 | 168 | " " | " " | " " |
| 350 | 208 | 150 | " " | " " | " " |
| 300 | 174 | 130 | " " | " " | " " |
| 250 | 145 | 110 | " " | " " | " " |
| 200 | 113 | 90 | " " | " " | " " |

8.8 Linea argon

$T_{\text{argon}}=250^{\circ}\text{C}$

Diametro della linea argon=0.0245 m

Il materiale impiegato per l'isolamento della linea argon è il Flumroc®:

| T _{Na} (°C) | Qtot (W/m) | Tp esterna(°C) | S lana (m) | S tot (m) |
|----------------------|------------|----------------|------------|-----------|
| 250 | 58,4 | 40 | 0,04 | 0,04 |

9 Calcolo delle perdite termiche

Nel seguente capitolo vengono riportati i calcoli relativi alle perdite termiche del circuito di prova e di tutti i componenti ad esso connessi, perdite calcolate alle varie temperature di funzionamento.

Temperatura delle tubazioni di 600°C e temperatura ambiente di 20°C.

| \varnothing_e (mm) | L (m) | Q(W/m) | Qtot (W) |
|----------------------|-------|--------|-------------|
| 34.6 | 8,5 | 142 | 1181 |
| 60.3 | 2,5 | 166 | 415 |
| RF | — | — | 249 |
| SA | — | — | 302 |
| RE | 1 | 157 | 157 |
| Totale | | | 2304 |

Nella tabella sottostante sono riportate le perdite termiche medie, dissipate dal sistema nella fase di preriscaldamento a vuoto: quindi in una **T massima di 400°C**

| \varnothing_e (mm) | L (m) | Q(W/m) | Qtot (W) |
|----------------------|-------|--------|-------------|
| 34.6 | 8,5 | 50 | 773 |
| 60.3 | 2,5 | 58 | 273 |
| RF | — | — | 240 |
| SA | — | — | 224 |
| RE | 1 | | 116 |
| TOT | — | — | 1626 |

Nella tabella sottostante sono riportate le perdite termiche medie, dissipate dal sistema nella fase di riscaldamento del circuito con sodio: quindi in un **range di temperatura che va dai 400 ai 600°C.**

| \varnothing_e (mm) | L (m) | Q(W/m) | Qtot (W) |
|----------------------|-------|--------|-------------|
| 34.6 | 8,5 | 115 | 978 |
| 60.3 | 2,5 | 138 | 345 |
| RF | — | — | 303 |
| SA | — | — | 250 |
| RE | 1 | | 129 |
| TOT | — | — | 2005 |

9.1 Calcolo della potenza termica necessaria per il preriscaldamento del sodio nel serbatoio di drenaggio SD

Tale operazione viene effettuata con l'utilizzo di un riscaldatore elettrico presente nel serbatoio SD, tale riscaldatore ha il compito principale di preriscaldare i 60 kg di sodio dai

150°C fino ai 400 °C , per poi mantenere tale temperatura costante, dei restanti 19 kg di Na, che dopo il caricamento si trovano stoccati in SD.

$$\Delta E_{AISI} = E_{AISI} - E_{0AISI} = m_{AISI}(c_{p400}T_{400} - c_{p150}T_{150})$$

$$\Delta E_{AISI} = 57 * (673.15 * 550 - 423.15 * 500)$$

$$\Delta E_{AISI} = 9043.5 \text{ kJ}$$

$$\Delta E_{Na} = E - E_0 = m_{Na}(c_{p400}T_{400} - c_{p150}T_{150})$$

$$\Delta E_{Na} = 60 * (673.15 * 1.2826 - 423.15 * 1.3624)$$

$$\Delta E_{Na} = 17213 \text{ kJ}$$

Quindi una volta calcolata l'energia necessaria da fornire al sistema affinché questo porti, il sodio e l'intero serbatoio alla temperatura di 400°C, è possibile definire le caratteristiche delle canne scaldanti che debbono intervenire per tale scopo.

Ipotizzando l'utilizzo di una canna scaldante da 8500 W, la stessa canna scaldante impiegata per il riscaldatore elettrico, direttamente immersa nel serbatoio SD in posizione orizzontale, e collegata attraverso un opportuna flangia, si identifica che il tempo impiegato dal sistema nel raggiungimento della temperatura di preriscaldamento è :

$$t = \frac{\Delta E}{P_{canna} - P_{perdite\ 400^\circ}} \approx 54 \text{ minuti}$$

Dove :

$$\Delta E = \Delta E_{Na} + \Delta E_{AISI} = 26256.5 \text{ kJ}$$

$$P_{canna}: \text{Potenza della canna scaldante} = 8500 \text{ W}$$

$$P_{perdite\ 400^\circ}: \text{Perdite termiche a } 400^\circ\text{C} = 296 \text{ W}$$

9.2 Calcolo della potenza termica necessaria per il preriscaldamento del circuito a vuoto

Questa operazione, viene effettuata tramite tracciatura elettrica e consiste nel preriscaldare l'impianto da una temperatura di 20°C fino ai 400°C.

$$\Delta E = E - E_0 = m_{AISI}(c_{p400}T_{400} - c_{p20}T_{20})$$

$$\Delta E = 117 * (673.15 * 550 - 293.15 * 470)$$

$$\Delta E = 27197 \text{ kJ}$$

Quindi tenuto conto della potenza termica installata tramite tracciatura elettrica è circa 3600 W, ed delle perdite termiche medie dissipate dal sistema nella fase di preriscaldamento sono circa

1062 W, ottengo che il tempo necessario per portare il sistema alla temperatura di 400°C è pari:

$$t = \frac{\Delta E}{P} \text{ dove } P = P_{te} - P_{p400} \text{ quindi } t = \frac{27197 * 10^3}{3600 - 1624} \sim 230 \text{ minuti}$$

Quindi il sistema costituito dal circuito di circolazione del sodio, il serbatoio di alimento e la conduttura per il drenaggio, sarà in grado di preriscaldarsi dalla temperatura di 20°C fino ai 400° C in circa 4 ore.

9.3 Calcolo della potenza termica necessaria per portare il circuito dalla temperatura di 400 ai 600 °C

La parte dell'impianto coinvolto per il riscaldamento del sodio dalla temperatura di 400 fino ai 600, è costituita dal serbatoio di alimento, il circuito di circolazione, e il tratto di tubazione da 2"1/2 che si trovava tra il serbatoio SA e la sezione di prova.

$$m_{tot-Na} = m_{RR} + m_{Rf} + m_{2"1/2} + m_{SA} = 41 \text{ kg}$$

Calcolo dell'energia necessaria, per portare il 41 kg di sodio dalla temperatura di 400°C ai 600°C.

$$\Delta E_{sodio} = m(C_{p600}T_{600} - C_{p400}T_{400}) \text{ Joule}$$

$$\Delta E_{sodio} = 9474 \text{ kJ}$$

A questa energia, deve essere sommata l'energia necessaria per portare le tubazioni ed il serbatoio SA, dalla temperatura di preriscaldamento di 400°C alla temperatura di esercizio 600°C

$$m_{tot-AISI} = m_{RR} + m_{Rf} + m_{2"1/2} + m_{SA} + m_{RE} = 117 \text{ kg}$$

Dove $m_{tot-AISI}$ è la massa totale di acciaio del circuito di circolazione e di tutti i componenti ad esso connessi.

$$\Delta E = m_{tot-AISI} (C_{p600}T_{600} - C_{p400}T_{400}) \text{ kJ}$$

$$m_{tot-AISI} = 117 \text{ kg}$$

$$\begin{array}{ll} C_p = 550 \text{ J/kgK} & T = 400 \text{ °C} \\ C_p = 590 \text{ J/kgK} & T = 600 \text{ °C} \end{array}$$

Quindi si ottiene che l'energia necessaria per portare tutto l'AISI 316L dalla temperatura di 400°C alla temperatura di 600°C è:

$$\Delta E = 16956 \text{ kJ}$$

$$\Delta E_{tot} = \Delta E_{sodio} + \Delta E_{aisi} \text{ kJ}$$

Infine, sommando i due termini di energia, ΔE_{sodio} più il ΔE_{aisi} , ottengo l'energia totale da apportare al sistema affinché questo raggiunga la temperatura di esercizio.

$$\Delta E_{tot} = 26430 \text{ kJ}$$

Tenendo conto delle perdite termiche a 600°C pari a $P_{600} = 2304 \text{ W}$, ottengo che per portare il sodio dalla temperatura di 400° fino ai 600°C attraverso la tracciatura elettrica il tempo impiegato è pari :

$$t = \frac{\Delta E}{P} \text{ dove } P = P_{te} - P_{p600} \text{ quindi } t = \frac{26430 * 10^3}{3600 - 2304} \sim 340 \text{ minuti} = 5.66 \text{ ore}$$

Al contrario, se si riscalda il sodio attraverso un riscaldatore da 8500 kW e contemporaneamente si utilizza anche la tracciatura elettrica per una potenza totale fornita al sistema di 10.6 kW si ottiene un tempo minimo per il raggiungimento della temperatura di esercizio pari a :

$$t = \frac{\Delta E}{P} \text{ dove } P = (P_{te} + P_{re}) - P_{p600} \text{ quindi } t = \frac{26430 * 10^3}{12100 - 2304} \sim 45 \text{ minuti}$$

Se invece si impiega solo il riscaldatore elettrico il tempo sale a :

$$t = \frac{\Delta E}{P} \text{ dove } P = P_{re} - P_{p600} \text{ quindi } t = \frac{26430 * 10^3}{8500 - 2304} \sim 71 \text{ minuti}$$

10 Tracciamento elettrico

Le tubazioni e i componenti dell'impianto destinati a contenere sodio od argon con vapori di sodio, sono provvisti di riscaldamento elettrico realizzato mediante cavi scaldanti tipo Pyrotenax®.

Ipotesi di dimensionamento termico:

- * Preriscaldamento dell'impianto vuoto da 20 a 400°C prima del riempimento con sodio.
- * Mantenimento di tutto l'impianto ed i componenti interessati, alla temperatura massima di esercizio di 600°C

Il dimensionamento della tracciatura elettrica, è stato effettuato basandosi sulle perdite termiche a 600°C, perdite che ammontano a 2600 W, successivamente, attraverso il calcolo del tempo necessario per portare il circuito dalla temperatura di 20°C fino ai 400°C, ha portato come risultato, che il tempo minimo necessario a tale operazione è di 5 ore con una potenza installata di 2,6 kW, tale tempo scende a 3 ore se si installa una potenza di 3,6 kW.

10.1 Tubazione da $\Phi 34.6\text{mm}$ (circuito di ricircolazione)

- * $T_{\max}=600^{\circ}\text{C}$
- * $P_{\text{perdite}}= 1196 \text{ W}$
- * Cavo HAA2M5600
- * Cavo a due conduttori
- * Tensione di alimentazione 300 V
- * Massima densità lineare di potenza erogabile 200 W/m

Ricordando la condizione imposta precedentemente, per cui la tracciatura elettrica viene sovradimensionata al fine di garantire il preriscaldamento del circuito a vuoto da 20°C a 400°C in circa 3 ore, per una potenza totale installata di 3600 W a differenza dei 2540 W coincidenti con le perdite totali alla temperatura di 600°C

Per cui
$$K = \frac{3600}{2540} = 1.417$$

$$\dot{P} = P_{\text{perdite}} * K = 1196 * 1.417 = 1695 \text{ W}$$

L=8.5 m Lunghezza della tubazione da 1”

Attraverso l’equazione
$$\dot{P} = \frac{(V^2)}{R*L}$$

Essendo che V=300 Volt, R=5.6 Ω /m ottengo che un cavo avente queste caratteristiche, ed un lunghezza di 9.48 m produce una potenza di 1695 W con una densità lineare di potenza di:

$$\dot{q} = \frac{\dot{P}}{L_{\text{cavo}}} = 179 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

Quindi una densità lineare di potenza che soddisfa e non supera le caratteristiche termomeccaniche del cavo scaldante in questione.

10.2 Tubazione da $\Phi 60.3 \text{ mm}$ (linea di drenaggio)

- * $T_{\max}=600^{\circ}\text{C}$
- * $P_{\text{perdite}}= 450 \text{ W}$
- * Cavo HAA2M19,7k
- * Cavo a due conduttori

- * Tensione di alimentazione 300 V
- * Massima densità lineare di potenza erogabile 200 W/m

$$K = \frac{3600}{2540} = 1.417$$

$$\dot{P} = P_{perdite} * K = 450 * 1.417 = 638 \text{ W}$$

L=2.5 m Lunghezza della tubazione da 2" 1/2

Attraverso l'equazione $\dot{P} = \frac{(V^2)}{R * L}$

Essendo che V=300 volt, R=19.7 Ω/m ottengo che per un cavo avente queste caratteristiche, ed un lunghezza di 7.16 m produce una potenza di 638 W con una densità lineare di potenza di:

$$\dot{q} = \frac{\dot{P}}{L_{cavo}} = 89 \frac{W}{m}$$

Quindi una densità lineare di potenza che soddisfa e non supera le caratteristiche termo meccaniche del cavo scaldante in questione.

Considerato che la lunghezza della tubazione è 2.5m e la lunghezza del cavo scaldante di 7.16m, si rende necessario avvolgere il cavo attorno alla tubazione con un certo passo, e per un certo numero di spire.

Dato che il $\varnothing_{cavo}=3.2\text{mm}=0.0032 \text{ m}$ e che il raggio minimo di curvatura è:

$$r_{min} = 6 * \varnothing_{cavo} = 0.0192 \text{ m}$$

e il raggio del tubo è di 0.03775m, quindi rispetto la condizione per cui questo cavo scaldante può essere avvolto attorno al tubo anche per un passo molto piccolo.

$$L_{spira} = \pi D_{tubo} + Passo$$

$$N_{spire} = \frac{L_{cavo}}{L_{spira}} = \frac{L_{cavo}}{\pi D + Passo}$$

$$Passo = \frac{L_{tubo}}{N_{spire}}$$

Da cui ottengo: $Passo = \pi D_{tubo} \frac{L_{tubo}}{L_{cavo}} * (1 - \frac{L_{tubo}}{L_{cavo}})^{-1} = 0.127\text{m}$

$$N_{spire} = 7$$

$$L_{spira} = 0.364 \text{ m}$$

10.3 Tubazione da Φ 48.3 mm (refrigeratore)

Il refrigeratore sodio-aria, non è dotato di tracciamento elettrico in quanto, per il tracciamento, si prediligono delle condizioni di installazione dove la tubazione e il relativo tracciamento elettrico vengono coibentati al fine di garantire che la potenza erogata dal cavo scaldante venga trasferita alla tubazione o al singolo componente piuttosto che all'aria ambiente.

Quindi in definitiva per il preriscaldamento del refrigeratore in condizione di avvio dell'impianto e nelle condizioni di mantenimento della temperatura di esercizio, viene impiegato un sistema di alimentazione in corrente continua, il quale, data una certa differenza di potenziale applicata alle estremità delle tubazioni che costituiscono il refrigeratore stesso, fa instaurare una corrente che per effetto Joule fornisce la potenza termica necessaria.

- * $T_{\max} = 600^{\circ}\text{C}$
- * $P_{\text{perdite}} = 593 \text{ W}$
- * $L = 6 \text{ m}$ (Lunghezza della tubazione da 1" 1/2)

$$K = \frac{3600}{2540} = 1.417$$

$$\dot{P} = P_{\text{perdite}} * K = 593 * 1.417 = 840 \text{ W}$$

Dove la \dot{P} è la potenza termica che deve essere fornita per effetto Joule dal sistema di alimentazione.

Essendo che, la resistività dell'AISI 316 a 20°C è pari a $\rho = 0.75 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$, il diametro interno di 38.1 mm e lo spessore di 5.08 mm, e la lunghezza di 6 m, si ottiene che la resistenza elettrica della tubazione che costituisce il refrigeratore è pari a $R = 0.0074 \Omega$
 Quindi:

$$I = \sqrt{\frac{\dot{P}}{R}} = 337 \text{ [Ampere]}$$

Quindi, si calcola che la tensione da applicare alla tubazione affinché si instauri tale corrente è pari a $V = R * I = 2.5 \text{ Volt}$

Calcolate queste grandezze, si identificano le caratteristiche del sistema di alimentazione in corrente continua, il quale dovrà essere in grado di erogare una corrente massima di 337 Ampere e avere una tensione di alimentazione di 2.5 Volt.

10.4 Serbatoio di Alimento ed espansione (SA)

- * $T_{\max} = 600^{\circ}\text{C}$

- * $P_{\text{perdite}} = 302 \text{ W}$
- * Cavo HAA2M13,2k
- * Cavo a due conduttori
- * Tensione di alimentazione 300 V
- * Massima densità lineare di potenza erogabile 200 W/m

$$K = \frac{3600}{2540} = 1.417$$

$$\dot{P} = P_{\text{perdite}} * K = 302 * 1.417 = 428 \text{ W}$$

R=0.13m raggio del serbatoio cilindrico
 L=0.75+(2*0.13) m lunghezza del serbatoio

Attraverso l'equazione $\dot{P} = \frac{(V^2)}{R*L}$

Essendo che V=300 volt, R=9 Ω/m ottengo che per un cavo avente queste caratteristiche, ed un lunghezza di 23.4 m produce una potenza di 428 W con una densità lineare di potenza di:

$$\dot{q} = \frac{\dot{P}}{L_{\text{cavo}}} = 18 \frac{W}{m}$$

Quindi una densità lineare di potenza che soddisfa e non supera le caratteristiche termo meccaniche del cavo scaldante in questione.

Oppure, se R=13.2 Ω/m ottengo che la lunghezza del cavo affinché questo eroghi una potenza di 428 W è di 16m, con una densità lineare di potenza

$$\dot{q} = \frac{\dot{P}}{L_{\text{cavo}}} = 26.75 \frac{W}{m}$$

Quindi in definitiva, il circuito di circolazione, e il serbatoio di alimento, verranno dotati di una tracciatura elettrica per un potenza complessiva di 3600 W.

10.5 Serbatoio di Drenaggio (SD)

- * $T_{\text{max}} = 500^\circ\text{C}$
- * $P_{\text{perdite}} = 296 \text{ W}$
- * Cavo HAA2M19,7k
- * Cavo a due conduttori
- * Tensione di alimentazione 300 V
- * Massima densità lineare di potenza erogabile 200 W/m

R=0.18m raggio del serbatoio cilindrico
 L=0.70+(2*0.18) m lunghezza del serbatoio

Attraverso l'equazione $\dot{P} = \frac{(V^2)}{R*L}$

Essendo che $V=300$ Volt, $R=19.7 \Omega/m$ ottengo che per un cavo avente queste caratteristiche, ed una lunghezza di 15.4 m produce una potenza di 296 W con una densità lineare di potenza di:

$$\dot{q} = \frac{\dot{P}}{L_{cavo}} = 19 \frac{W}{m}$$

Quindi una densità lineare di potenza che soddisfa e non supera le caratteristiche termo meccaniche del cavo scaldante in questione.

$$L_{spira} = \pi D_{SD} + Passo$$

$$N_{spire} = \frac{L_{cavo}}{L_{spira}} = \frac{L_{cavo}}{\pi D + Passo}$$

$$Passo = \frac{L_{SD}}{N_{spire}}$$

Da cui ottengo:

$$Passo = \pi D_{tubo} \frac{L_{SD}}{L_{cavo}} * \left(1 - \frac{L_{SD}}{L_{cavo}}\right)^{-1} = 0.053m$$

$$N_{spire} = 13$$

$$L_{spira} = 1.13 m$$

11 Specifiche materiali e correlazioni

11.1 Caratteristiche termo-fluidodinamiche del sodio.

In questo paragrafo sono riportate le caratteristiche del sodio in termini di densità, conducibilità, viscosità, coefficiente di dilatazione lineare e calore specifico, espressioni utilizzate per il calcolo dei coefficienti di scambio termico. Le correlazioni riportate sono di semplice utilizzo e valide nel range di temperature utilizzate.

11.1.1 Densità

$$\rho_{sodio} = 219 + 275,32 \cdot \left(1 - \frac{T}{2503,7}\right) + 511,58 \cdot \left(1 - \frac{T}{2503,7}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{kg}{m^3}$$

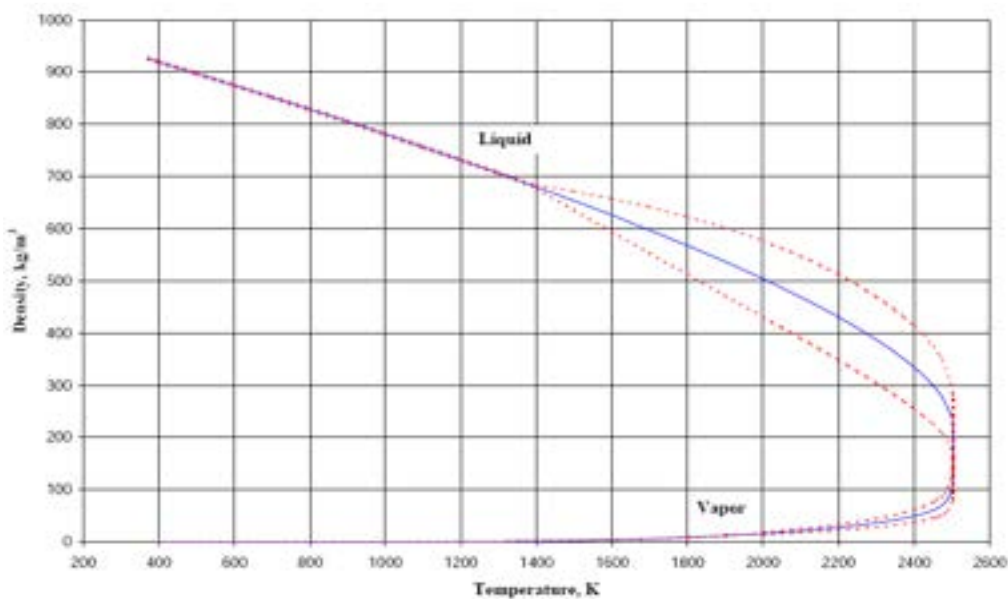


Figura 18

11.1.2 Conducibilità termica

$$K_{sodio} = 124,6 - 0,11381 \cdot T + 5,5226 \cdot 10^{-5} \cdot (T)^2 - 1,1842 \cdot 10^{-8} \cdot (T)^3 \frac{W}{mK}$$

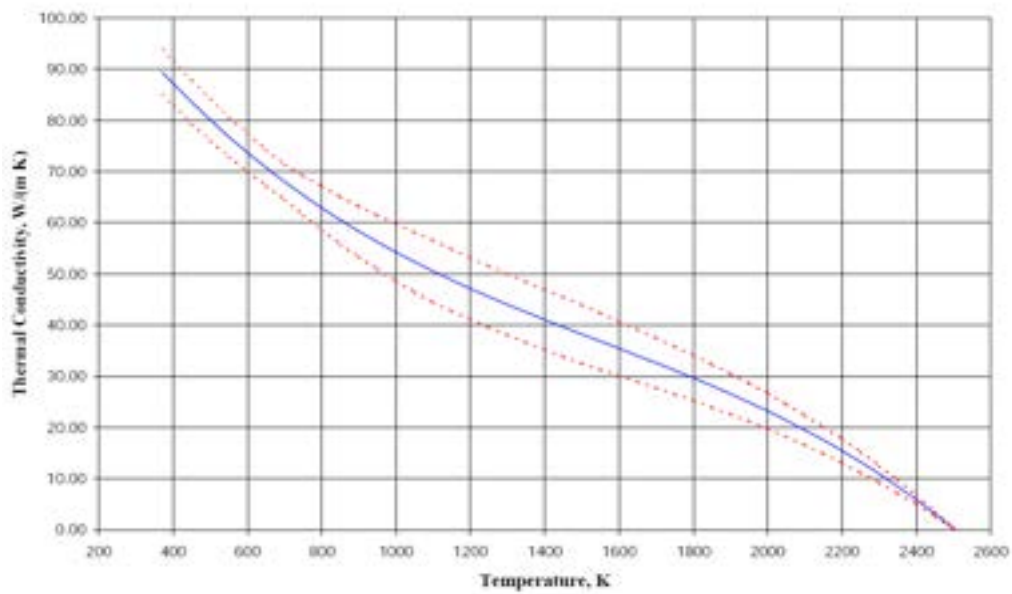


Figura 19

11.1.3 Viscosità dinamica

$$\mu_{sodio} = \exp\left(-6,4406 - 0,3958 \log(T) + 556,835 \cdot \frac{1}{T}\right) [Pa \cdot s]$$

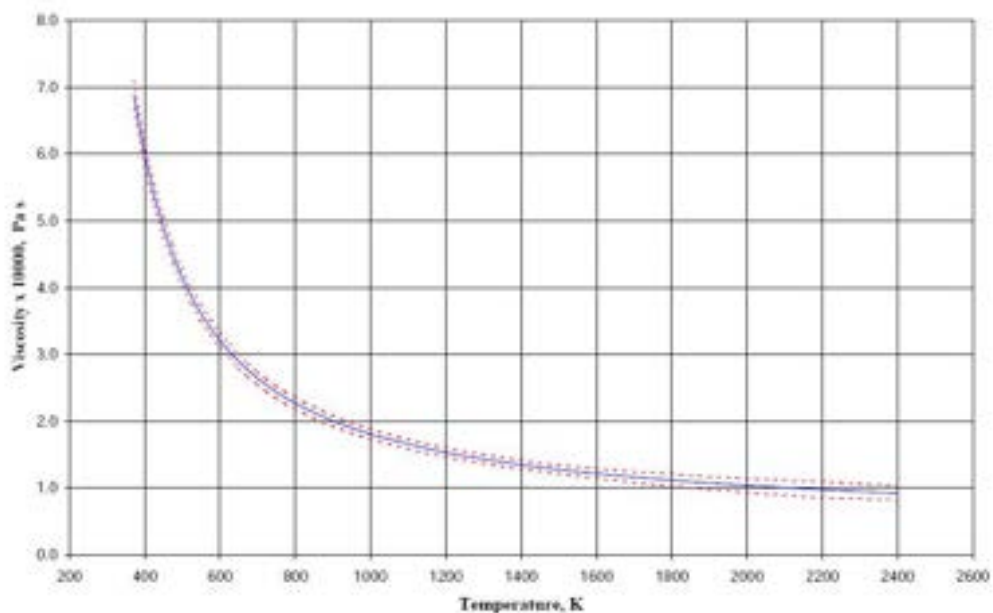


Figura 20

11.1.4 Viscosità cinematica

$$\nu_{sodio} = \frac{\mu_{sodio} \text{ m}^2}{\rho_{sodio} \text{ s}}$$

Coefficiente di dilatazione lineare:

$$\beta_{sodio} = 0.000000103 \cdot T + 0.0002 \left[\frac{1}{K} \right]$$

ipotizzando che l'andamento di tale coefficiente sia lineare nel range di temperature tra 400-800 K è possibile approssimare la curva ad una retta

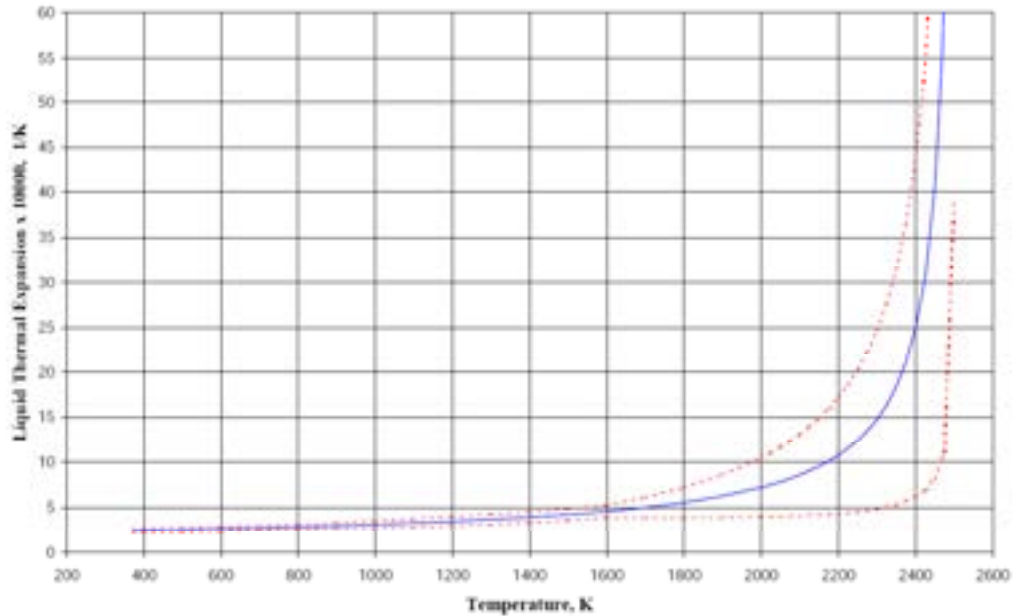


Figura 21

11.1.5 Calore specifico

$$C_p = -0.28 \cdot T + 1480 \left[\frac{J}{kgK} \right]$$

anche per il calore specifico valgono le approssimazioni fatte per β

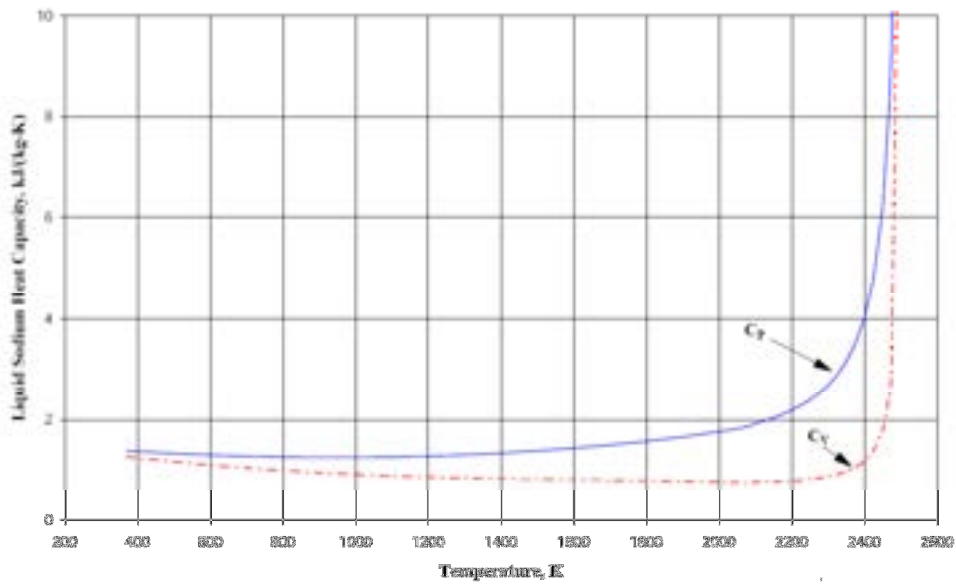


Figura 22

Isolanti termici (<http://www.promat.it/AlteTemperature/SchedeTecniche.html>)

Promat

ALSIFLEX® -1260, -1430

Materassini in fibra ceramica refrattaria

Descrizione del prodotto



ALSIFLEX® è una gamma di prodotti in fibra ceramica di altissima qualità, adattati ad una ampia gamma di temperature, densità, spessori e dimensioni. atta a rispondere alle molteplici richieste dei più diversi settori. Le fibre ALSIFLEX® sono prodotte con processo "spinning" e risultano essere particolarmente adatte alla realizzazione di materassini per la fabbricazione di moduli ad alto potere isolante. L'alta purezza delle materie prime impiegate nella produzione dei materassini ALSIFLEX® Blanket, nelle versioni 1260 e 1430. Il limitato contenuto di parti non fibrilate (shots), e il moderno processo di doppia agugliatura, posizionano il nostro prodotto tra uno dei migliori in assoluto in termini di stabilità dimensionale in temperatura, elevata resistenza termica, potere isolante elevato, ottima uniformità e lavorabilità.

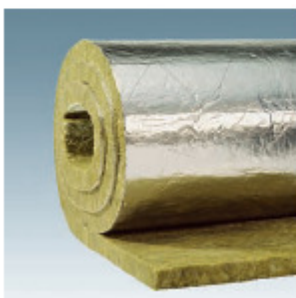
| ALSIFLEX® Blanket | | 1150 ¹ | 1260 ² | 1430 ² | |
|-----------------------------------------------------|-----------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Temperatura di classificazione | °C | 1150 | 1260 | 1430 | |
| Refrattarietà | SK | - | 36 min (1790°C) | 38min (1850°C) | |
| Diametro medio ponderato delle fibre | µm | - | 3 | 3 | |
| Lunghezza media ponderata delle fibre | mm | Max. 300 | Max. 300 | Max. 300 | |
| Contenuto medio di "shot" per 70 mesh (212µ) | % | - | 10 max | 10 max | |
| Resistenza alla trazione | | | | | |
| 96 Kg / m ³ | kPa | - | 70 | 70 | |
| 128 Kg / m ³ | | - | 100 | 100 | |
| 160 Kg / m ³ | | - | 125 | 125 | |
| Calore specifico | kJ / Kg°K | 1,15 | 1,13 | 1,04 | |
| Ritiro lineare dopo esposizione isoterma, 24 ore | % | - | 1000°C / 1,3 | 1200°C / 1,0 | |
| | | - | 1100°C / 2,1 | 1300°C / 2,0 | |
| | | - | 1150°C / 3,2 | 1200°C / 3,0 | |
| | | - | 1400°C / 2,6 | | |
| Conduttività termica a temperatura media di: | | 64 Kg/m ³ | 96 Kg/m ³ | 128 Kg/m ³ | 160 Kg/m ³ |
| 200°C | W / mk | 0,08 | 0,07 | 0,06 | 0,06 |
| 400°C | | 0,11 | 0,10 | 0,09 | 0,08 |
| 600°C | | 0,18 | 0,15 | 0,14 | 0,13 |
| 800°C | | 0,25 | 0,22 | 0,19 | 0,17 |
| 1000°C | | 0,38 | 0,30 | 0,27 | 0,24 |
| Composizione chimica tipica | | | | | |
| Al ₂ O ₃ | % | 45 - 48 | 46 - 49 | 33 - 38 | |
| SiO ₂ | | 48 - 60 | 47 - 58 | 44 - 49 | |
| ZrO ₂ | | - | - | 16 -20 | |

Lana di Roccia Flumroc

| Caratteristiche fisiche del materiale | Simbolo | Descrizione/Valore rilevato | | | | | Norma/Disposizione | |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|----------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------------------|-----------|
| Peso specifico apparente | ρ_a | ca. 32 kg/m ³ | | | | | EN 1602 | |
| Conduttività termica | λ | 0.045 W/(m K) | | | | | | |
| Conduttività termica λ , in funzione della temperatura media | t_m °C | °C | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | UNI 52612 |
| | λ | W/(m K) | 0.043 | 0.047 | 0.052 | 0.057 | 0.063 | |
| Capacità termica specifica | c | 840 J/(kg K) | | | | | | |
| Resistività, coefficiente di diffusione lana di roccia | μ | ca. 1 | | | | | UNI EN 12086 | |
| Spessore dello strato d'aria equivalente alla diffusione, alu | s_d | ca. 2700 m | | | | | UNI EN 12086 | |
| Temperatura limite d'applicazione, lana di roccia | | 250 °C * | | | | | | |
| Temperatura limite d'applicazione, alu | | 80 °C | | | | | | |
| Classificazione incendio lana di roccia | | Eqs | | | | | AICAA | |
| Certificato svizzero della protezione antincendio | | No. 4582 | | | | | AICAA | |
| Punto di fusione della lana di roccia | | > 1000 °C | | | | | UNI 4102-17 | |
| Qualità AS | | Applicazione in abbinamento con acciai austenitici | | | | | AGI Q 132 | |

*Oltre questo valore, consultazione dei leganti

Materasso a lamelle Flumroc FML 250



Vantaggi

- punto di fusione > 1000 °C
- facile e rapido da lavorare
- flessibile
- riciclabile

Descrizione del prodotto

Materasso a lamelle in lana di roccia, rivestito su un lato di uno strato di alluminio puro rinforzato con rete.

Impiego

Coibentazione termica e fonica di canali di ventilazione, condutture e serbatoi di vario genere con temperature medie \leq 250 °C.



Cavi scaldanti

(http://www.tycothermal.com/italy/italian/heat_tracing/productsearch/bybrand/productDetails.aspx?crd=0&cg=0&pcg=2195&nm=HAX)

| Dati tecnici | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------|---------|-----------------------------------|--------------|---------|------------------------------------|--------------|---------|------------------------------------|
| Materiale della guaina del cavo | Alloy 825 | | | | | | | | | | | | |
| Materiale del conduttore | Varie leghe e rame | | | | | | | | | | | | |
| Temperatura massima di esposizione | 650°C* (cavo scaldante) 550°C (unità scaldanti bruciate) 650°C* (unità scaldanti con saldature a laser) * È possibile raggiungere temperature più elevate; mettersi in contatto con Tyco Thermal Controls | | | | | | | | | | | | |
| Temperatura minima d'installazione | -60°C | | | | | | | | | | | | |
| Raggio minimo di curvatura | 6 x De (diametro del cavo) a -60 °C | | | | | | | | | | | | |
| Tensione di alimentazione massima e potenza sviluppata | <table border="1"> <thead> <tr> <th>Tensione (U_p/U)</th> <th>Potenza massima sviluppata*</th> <th>Tipo di cavo scaldante</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>600/600 V AC</td> <td>210 W/m</td> <td>Cavo HAX1N a un conduttore, 600 V</td> </tr> <tr> <td>300/300 V AC</td> <td>200 W/m</td> <td>Cavo HAX2M a due conduttori, 300 V</td> </tr> <tr> <td>600/600 V AC</td> <td>270 W/m</td> <td>Cavo HAX2N a due conduttori, 600 V</td> </tr> </tbody> </table> *Valore tipico, in funzione dell'applicazione | Tensione (U _p /U) | Potenza massima sviluppata* | Tipo di cavo scaldante | 600/600 V AC | 210 W/m | Cavo HAX1N a un conduttore, 600 V | 300/300 V AC | 200 W/m | Cavo HAX2M a due conduttori, 300 V | 600/600 V AC | 270 W/m | Cavo HAX2N a due conduttori, 600 V |
| Tensione (U _p /U) | Potenza massima sviluppata* | Tipo di cavo scaldante | | | | | | | | | | | |
| 600/600 V AC | 210 W/m | Cavo HAX1N a un conduttore, 600 V | | | | | | | | | | | |
| 300/300 V AC | 200 W/m | Cavo HAX2M a due conduttori, 300 V | | | | | | | | | | | |
| 600/600 V AC | 270 W/m | Cavo HAX2N a due conduttori, 600 V | | | | | | | | | | | |
| Dispersione a terra | 3 mA /100 m (nominali a 20 °C) | | | | | | | | | | | | |
| Distanza minima tra i cavi | 25 mm per le aree pericolose | | | | | | | | | | | | |

Tabella 1 Cavi scaldanti HAX2M della serie MI (cavo a due conduttori, 300 V)


| Sigla | Resistenza nominale (Ω/km @ 20°C) | Diametro esterno (mm) | Coefficiente di temperatura (x 10 ⁻⁴ /K) | Lunghezza massima elemento (m) | Peso nominale (kg/km) | Codice componente (PN) |
|------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------|------------------------|
| HAF2M36K | 36000 | 3,2 | 0,09 | 628 | 45,1 | 32SF1110 |
| HAF2M29.5K | 29500 | 3,6 | 0,09 | 542 | 62,2 | 32SF2900 |
| HAF2M24.5K | 24500 | 3,9 | 0,09 | 431 | 65,8 | 32SF2750 |
| HAA2M19.7K | 19700 | 3,4 | 0,085 | 632 | 49,3 | 32SA2600 |
| HAA2M13.2K | 13200 | 3,7 | 0,085 | 500 | 57,0 | 32SA2400 |
| HAA2M9000 | 9000 | 3,7 | 0,085 | 501 | 57,9 | 32SA2275 |
| HAA2M6600 | 6600 | 4,6 | 0,085 | 329 | 88,2 | 32SA2200 |
| HAA2M5600 | 5600 | 4,5 | 0,085 | 384 | 75,9 | 32SA2170 |
| HAB2M3750 | 3750 | 4,7 | 0,04 | 315 | 87,8 | 32SB2114 |

Guida di installazione

http://www.tycothermal.com/assets/Europe/Italian/Document/Installation%20Instruction/4526/DOC-687_R0.pdf

12 Riferimenti

- [1] Progetto NIRA PRM/CBR
- [2] Appunti sulla tecnologia del sodio: conduzione e manutenzione di impianti a sodio - F. Ferretti F. Fogliani – RT/VEL/85/6
- [3] Appunti sulla tecnologia del sodio: installazioni sperimentali a sodio - F. Ferretti F. Fogliani – RT/VEL/85/4


| | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------|----------------------|-------------------|-----------------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione NNFISS – LP3 - 028 | Rev. 0 | Distrib. L | Pag. 54 | di 74 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------|----------------------|-------------------|-----------------|

ALLEGATO N. 1


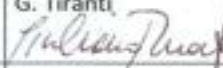
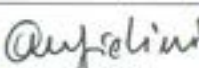

SPECIFICHE TECNICHE DI UN CIRCUITO A SODIO PER PROVE TERMOMECCANICHE E PER TEST SU PICCOLI COMPONENTI

NOTA:

L'allegato 1 riporta integralmente il documento “**Specifiche tecniche di un circuito a sodio per prove termomeccaniche e per test su piccoli componenti**”, emesso come documento interno ENEA UTFISST\MEPING n. 2/2011 rev.1 e prodotto nell'ambito delle attività del presente PAR 2008-2009, sottotask LP3-B5. L'emissione si è resa necessaria per formalizzare adeguatamente la trasmissione delle specifiche a CIRTEN, per il seguito di competenza.


| | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 028 | 0 | L | 55 | 74 |

| | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| UNITA' TECNICA TECNOLOGIE E IMPIANTI PER LA FISSIONE E LA GESTIONE DEL MATERIALE NUCLEARE | Laboratorio di Metodi di Progettazione e Ingegneria Sperimentale | Pagina 1 di 21 |
| | Id. Doc. UTFISSTMEPING n. 2/2011 rev.1 | |

| | | | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| TITOLO | SPECIFICHE TECNICHE DI UN CIRCUITO A SODIO PER PROVE TERMOMECCANICHE E PER TEST SU PICCOLI COMPONENTI | | | | |
| <p>Autori : M. Angiolini, R. Calvigioni, P. Incalcaterra, G. Tiranti</p> <p><u>Sommario</u> : Si forniscono le linee guida per uno studio di fattibilità, commissionato a UNIROMA 1 quale membro del consorzio CIRTEN, di un piccolo impianto a sodio. Lo studio si inquadra in una prospettiva di rilancio della ricerca sperimentale sull'impiantistica nucleare in generale, con riferimento a reattori di IV generazione, con il proposito di ricostruire competenze anche nel settore dei reattori refrigerati a sodio, anche in considerazione della rilevanza di questa soluzione nello scenario di sviluppo dell'energia nucleare delineato a livello comunitario dal SET Plan.</p> <p>Le dimensioni ridotte dell'impianto, per il quale si suggerisce un inventario di sodio dell'ordine di 50 Kg, sono imposte soprattutto da esigenze di semplicità realizzativa e di gestione, in considerazione anche della scarsità di competenze esperte nel campo attualmente disponibili presso ENEA.</p> <p>Il presente documento rientra nell'ambito dell'Accordo di Programma MSE-ENEA 2009-2011, PAR 2008-2009, Linea Progettuale LP-3 B5.</p> | | | | | |
| | Rev.1 | | | | |
| 1 | Modificata camera di prova | 26/7/2011 |  P. Incalcaterra G. Tiranti  |  M. Angiolini |  P. Incalcaterra |
| 0 | Emissione | 01/04/2011 | P. Incalcaterra M. Angiolini G. Tiranti | R. Calvigioni | P. Incalcaterra |
| N° | Descrizione | Data | Redazione | Convalida | Approvazione |

INDICE

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 1. SCOPO DEL DOCUMENTO | pag. 57 |
| 2. RUOLO DELL'IMPIANTO E SUE POSSIBILITA' SPERIMENTALI. | pag. 58 |
| 2.1. Ruolo dell'impianto | pag. 58 |
| 2.2. Descrizione delle esperienze di shock termico | pag. 59 |
| 2.3. Esperienze su pompe elettromagnetiche | pag. 60 |
| 2.4 Esperienze su strumentazione speciale ovvero dedicata ad impianti a sodio | pag. 60 |
| 3. DEFINIZIONE DEL PROCESSO DI IMPIANTO | pag. 61 |
| 4. DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO | pag. 62 |
| 4.1. Condizioni generali di progetto | pag. 62 |
| 4.1.1 Componenti del circuito idraulico | pag. 62 |
| 4.1.2 Linee dell'Argon | pag. 62 |
| 4.1.3 Guardia idraulica | pag. 63 |
| 4.1.4 Materiali | pag. 63 |
| 4.2. Componenti principali d'impianto | pag. 63 |
| 5. TRACCIAMENTO ELETTRICO E COIBENTAZIONE | pag. 67 |
| FIGURE E TABELLA DELLE SPECIFICHE TECNICHE DELLA CAMERA DI SHOCK STATICO | pagg. 68÷74 |

| | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 028 | 0 | L | 57 | 74 |

1. SCOPO DEL DOCUMENTO

Nell'ambito di un rilancio dell'opzione nucleare anche in Italia, si ritiene essenziale riavviare attività sperimentali con impianti al sodio, tenendo conto che il SET (Strategic Energy Technologies) Plan 2010-2020 prevede, nella parte relativa allo sviluppo dell'energia nucleare (SNETP, Sustainable Nuclear Energy Technology Platform), ampie opportunità di ricerca e sviluppo nel campo dei reattori veloci al sodio di IV generazione: il sodio rappresenta la tecnologia leader rispetto alle altre due alternative (Reattori refrigerati a piombo o piombo-bismuto e refrigerati a gas).


Con il presente documento si intende definire le principali caratteristiche di funzionamento e di progetto di un "circuito per prove termomeccaniche e di piccoli componenti" che potrebbe essere realizzato presso l'ENEA, nell'ambito sia di una ripresa di esperienze su temi di ricerca relativi a futuri reattori "di IV generazione" con refrigerazione a sodio liquido (SFR) e sia di un incremento di competenze nello specifico settore.

In particolare questo documento:

- * propone una soluzione impiantistica di riferimento per l'attività richiesta a CIRTEN;
- * delinea le configurazioni di funzionamento per alcune sperimentazioni di più immediato interesse;
- * fornisce le principali specifiche del progetto termoidraulico.

CIRTEN, sulla scorta di tale proposta progettuale e sulla base della propria esperienza pluriennale in ambito SNETP ed ESNII (European Sustainable Nuclear Industrial Initiative), dove ha avuto opportunità di approfondire le esigenze di R&S immediate e future nel settore dei reattori a sodio, svilupperà lo studio di fattibilità di una configurazione d'impianto sperimentale che:

- * sia finalizzato alla verifica del comportamento di strutture nel caso di carichi termici ciclici.
Il tema ricade nel campo degli studi e verifiche connessi sia al fenomeno del ratchetting (deformazione progressiva) sia a problematiche riconducibili al tema più vasto della "life extension", e può collocarsi anche in progetti europei in corso (p.es. MATTER);
- * sia quanto più possibile flessibile, ciò al fine di collocarsi in un ambito almeno europeo per scenari ancora da investigare nel campo dei reattori a sodio. La configurazione, in definitiva, dovrebbe essere spendibile facilmente negli studi su Generation IV e consentire anche attività di R&S e qualifica di strumentazione e sensoristica;
- * presenti costi di realizzazione ragionevoli: si richiede pertanto una stima economica dell'impianto che verrà proposto.

| | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 028 | 0 | L | 58 | 74 |

2. RUOLO DELL'IMPIANTO E SUE POSSIBILITA' SPERIMENTALI.

2.1. Ruolo dell'impianto.

Ruolo fondamentale dell'impianto è quello di permettere l'organizzazione di un ampio ventaglio di prove sperimentali su provini, strumentazione innovativa e componenti di piccole dimensioni per la loro caratterizzazione nei circuiti a sodio liquido, con evidente riferimento alle applicazioni nei reattori veloci a sodio. Tra gli scopi principali dell'impianto rientrano:

- * caratterizzazione di materiali strutturali (thermal ratchetting, thermal striping, shock termici)
- * progettazione e test di sensori e strumentazione di controllo.

E' importante che l'impianto sia di semplice configurazione e di facile gestione, in modo da costituire un'attrezzatura utilizzabile per esigenze di training per i seguenti aspetti principali:

- * addestramento di personale per la conduzione di impianti sodio;
- * acquisizione di tecniche d'intervento e manutenzione di impianti al sodio;
- * acquisizione della metodologia di progettazione di circuiti al sodio, principalmente per quanto riguarda gli aspetti normativi e di sicurezza;
- * acquisizione di tecniche e metodologie di progettazione;
- * organizzazione di campagne di prova.


I componenti che possono essere provati sono (al di là delle apparecchiature installate sul circuito e che ne fanno parte integrante):

- * sezioni di prova per esperienze di shock termico su provini/componenti di piccole dimensioni
- * strumentazione specifica per impianti al sodio (sonde di livello continue e discontinue; misuratori di portata sodio, pompe elettromagnetiche con porte compatibili con le dimensioni e gli scopi dell'impianto, misuratori di pressione differenziale, sensori elettrochimici, generatori e trasduttori di ultrasuoni, ecc);
- * valvole per sodio.

2.2. Descrizione delle esperienze di shock termico.

Qui di seguito vengono indicate in linee generali alcune esperienze di shock termico in sodio statico ed in sodio fluente, di cui l'ENEA sta valutando la fattibilità e l'opportunità nell'ambito di un più ampio coinvolgimento in progetti europei sullo studio dei materiali, e che dovrebbero essere effettuate sull'impianto in oggetto.

L'esecuzione di queste prove richiederà, di volta in volta, la realizzazione di apposite sezioni di prova: esse non rientrano nei limiti dello studio richiesto a CIRTEN, che dovrà tuttavia prevederne l'applicabilità alla configurazione impiantistica che vorrà proporre.

| | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 028 | 0 | L | 59 | 74 |

Per le prove statiche la sezione di prova suddetta sarà costituita da una camera a tenuta, nella quale saranno alloggiati:

- c) un'apposita tanica con copertura mobile,
- d) un'apparecchiatura di sollevamento,

che consentirà test di shock termici e di deformazione residua tramite immersione di provini in sodio caldo e loro successivo raffreddamento con una corrente di argon secondo appropriate matrici sperimentali.

Al momento è stata sviluppata una possibile soluzione per una camera di prova per shock termici su provini cilindrici. Si è studiata una camera equipaggiata con un dispositivo di sollevamento a motore passo-passo che consente l'immersione e l'estrazione del provino con velocità selezionabili in un ampio range.

Sono state dimensionate le apparecchiature accessorie (riscaldatori, refrigeratore dell'argon per mantenere la camera a temperatura di 40°C, compatibile con le elettroniche presenti).

Nelle figg. 2-A, 2-B, 2C e 2D è illustrato il progetto preliminare della camera per l'esecuzione di prove di shock in sodio statico, ed in tabella sono riassunti alcuni dati di progetto delle apparecchiature accessorie e le caratteristiche principali degli isolanti.

La temperatura del sodio nella tanica di prova potrà essere compresa nel range 400 – 600 °C.

Per le prove di shock termico con sodio fluente ENEA sta progettando una sezione di prova tubolare (che non è oggetto dell'attività CIRTEN) precaricabile con martinetti idraulici ed opportunamente preriscaldata tramite riscaldatori elettrici (fig. 3).

Per queste prove si potrà sfruttare, per semplificare il lay-out d'impianto, il battente idraulico tra serbatoio principale e serbatoio di carico, tra i quali dovrà esistere un dislivello dell'ordine di 2,50 m: lo shock termico sarà determinato dalla portata che si instaura ponendo in collegamento diretto nell'ordine il serbatoio principale, la sezione di prova ed il serbatoio di stoccaggio. Nello schema proposto tale collegamento sarà realizzabile by-passando la pompa e il refrigeratore tramite l'apposito by-pass.

La pressione nei due serbatoi, posti a quota diversa (dell'ordine di 4 metri), è bilanciata tramite una tubazione che li pone in collegamento diretto lato argon.

Il progetto dovrà indicare il valore di portata massima di sodio ottenibile con la configurazione finale.


2.3. Esperienze su pompe elettromagnetiche.

Le connessioni dell'impianto permettono di realizzare un circuito di circolazione sodio che può essere equipaggiato con pompe elettromagnetiche di prova per realizzare esperienze sulle stesse con portate di sodio compatibili con le caratteristiche dell'impianto.

2.4 Esperienze su strumentazione speciale ovvero dedicata ad impianti a sodio.

L'impianto sperimentale dovrà essere progettato per consentire anche prove di caratterizzazione di strumentazione dedicata ad impianti al sodio, con particolare attenzione a quella strumentazione attualmente in fase di sviluppo. A titolo esemplificativo, l'interesse della ricerca per la strumentazione innovativa si orienta verso:

- * flussimetri ultrasonici,
- * sistemi di visione ad ultrasuoni per rilevamenti in tank,
- * misure di densità da misure di velocità di ultrasuoni,
- * misure densità di micro bolle gassose,
- * sensori di livello (mutua induttanza),
- * misure di contaminazione da idrogeno (mass spectrometers, diffusion membranes, sensori elettrochimici),
- * misure di impurità disciolte (cold traps).

| | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 028 | 0 | L | 61 | 74 |

3. DEFINIZIONE DEL PROCESSO DI IMPIANTO.

Sulla base delle esperienze da realizzare sull'impianto e descritte al capitolo precedente, si propone una possibile configurazione circuitale che possa rispondere alle varie esigenze di funzionamento.

Lo schema di flusso riportato in fig. 1 costituisce una proposta di una configurazione che può coprire differenti modalità operative.

La parte circuitale dedicata specificatamente alla circolazione del sodio deve assicurare essenzialmente due funzioni:

- * Innalzare la temperatura del sodio presente nell'impianto (serbatoio principale, che funge anche da volume di espansione, tubazioni di collegamento, pompa elettromagnetica e relativi componenti in linea) dal valore di preriscaldamento (150°C) al valore di prova (max 600°C).

Tale incremento di temperatura è ottenuto tramite il riscaldatore elettrico.

Il mantenimento della temperatura di prova può ottenersi tramite l'intervento del riscaldatore ed eventualmente dell'aerotermostato su comando di un regolatore settato alla temperatura da mantenere. E' comunque possibile ottenere lo stesso risultato con un opportuno dimensionamento della tracciatura elettrica: lo studio di fattibilità potrà evidenziare quale opzione preferire, anche in base a valutazioni di semplicità di gestione e di economicità.

- * Possibilità di eseguire esperienze su componenti, strumentazione e sensori quali le pompe elettromagnetiche, misuratori di portata e di pressione differenziale, generatori e trasduttori di ultrasuoni, etc.

I componenti da provare possono essere installati in apposite sezioni di prova, che saranno collegate all'impianto attraverso le connessioni previste in fig. 1.

4. DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO.

4.1. Condizioni generali di progetto.

L'impianto è costituito da componenti che di norma sono interessati dalla circolazione o ristagno di sodio, e da tubazioni e componenti che garantiscono la presenza di un'atmosfera inerte di Argon nei volumi non occupati da sodio dove non può essere presente aria o altri aeriformi che possono portare tracce di umidità e impurità varie.

L'impianto dovrà assicurare un dislivello dell'ordine di 2,5 m tra il serbatoio principale e il serbatoio di stoccaggio: sarà pertanto necessario prevedere una struttura di sostegno adeguata. L'impianto sarà sistemato in una hall tecnologica: CIRTEN indicherà i requisiti a cui deve soddisfare la hall per ospitare processi che trattano il sodio.

L'inventario totale di sodio sarà limitato a 50 Kg di sodio che, per semplificazione d'impianto, si supporrà fornito già in fase liquida tramite dispenser carrellato a temperatura di 150°C, corrispondente ad un volume di 55 litri circa.

4.1.1 Componenti del circuito idraulico: per le parti d'impianto di norma interessate dalla circolazione o dal ristagno di sodio, e più in particolare:

- serbatoio principale,
- serbatoio di drenaggio e carico (SD),
- pompa elettromagnetica,
- riscaldatore,
- fascio tubiero del refrigeratore,
- flowmeter,
- tubazioni di circolazione, di carico e di drenaggio del sodio,
- valvole sulle tubazioni del sodio e valvole di radice della strumentazione di processo,
- filtro/i sodio.

le condizioni generali di progetto sono le seguenti:

- pressione di progetto: 1,50 bar assoluti,
- temperatura di progetto : 600° C ,
- vuoto di 10 torr (1333 Pa) a 200°C.

4.1.2 Linee dell'Argon : per le linee di distribuzione dell'argon, a valle del gruppo di riduzione della pressione, le specifiche di progetto sono:

- pressione di progetto: 1,50 bar assoluti,
- temperatura: 250°C.

Si noti che in fase di circolazione del sodio, di norma la sovrappressione dell'atmosfera di argon è mantenuta a 200 mm H₂O: pertanto la pressione assoluta nell'impianto va mantenuta pari a 1,02 bar assoluti.

In fase di caricamento del sodio, dal serbatoio di carico al serbatoio principale, si procede:

- a. preriscaldando a vuoto, tramite la tracciatura elettrica, le tubazioni di carico, il circuito sodio (serbatoio principale, pompa e.m., refrigeratore etc.) fino alla temperatura del sodio presente nel SD (minimo 150 °C);
- b. pressurizzando lentamente il serbatoio di carico rispetto al serbatoio principale, fino a raggiungere in quest'ultimo il livello di sodio richiesto dalla prova. Stante il dislivello suggerito (2500 mm, vedi fig. 1) tra i due serbatoi, tale pressurizzazione sarà sempre inferiore alla pressione di progetto dell'impianto.

4.1.3 Guardia idraulica : per quanto concerne il serbatoio “guardia idraulica” le condizioni di progetto sono:

- pressione di progetto: atmosferica (sfiato libero),
- temperatura 100 °C.

4.1.4 Materiali:

Sia per le parti a contatto con sodio che per quelle a contatto con Argon e per la guardia idraulica si ritiene che l'utilizzo di acciaio inossidabile AISI 316 sia la soluzione più immediata ed economica, oltre ad essere compatibile con i fluidi di processo (sodio, argon, acqua).

4.2. Componenti principali d'impianto.

In riferimento allo schema di flusso fig. 1, l'impianto presenta i seguenti componenti principali:

1) Serbatoio principale, che ha le seguenti funzioni:

- consentire la dilatazione termica del sodio del circuito dalla temperatura di caricamento (che va assunta pari a 150°C) alla temperatura d'esercizio massima (600°C);
- consentire la taratura di piccoli componenti quali sonde di livello, misuratori di portata, misuratori di pressione differenziale, pompe elettromagnetiche.

Il serbatoio avrà orientativamente le seguenti caratteristiche:

- tipo: cilindrico, ad asse verticale, chiuso da due fondi bombati;
- capacità volumetrica totale: 40 litri,
- quantità di sodio di caricamento per l'esercizio: 26 Kg (pari a circa 28 litri a 150°C),
- Materiale di costruzione: acciaio AISI 316,

- Pressione di progetto: 1,50 bar assoluti,
- Temperatura di progetto : 600°C,
- Vuoto di 10 torr (1333 Pa) a 200°C.

Il serbatoio sarà dotato di bocchelli per la connessione alle tubazioni di circolazione del sodio, ed orientativamente:

- sul fondo inferiore: attacco per collegamento tubazione di circolazione sodio;
- sul fasciame cilindrico: attacco per collegamento con tubazione di circolazione sodio e pozzetti per misure di temperatura;
- sul fondo superiore: attacco per collegamento con tubazione argon (gas di copertura); attacco per sonda continua di livello; attacco per sonda discontinua di livello; attacco per presa di pressione;
- ulteriori penetrazioni potranno essere suggerite da CIRTEN.

Il serbatoio deve essere provvisto di tracciatura elettrica in grado di mantenerlo alla temperatura di 400°C (ovvero maggiore, se lo studio di fattibilità lo ritenesse opportuno). La tracciatura deve comprendere almeno due zone indipendenti, di cui una alloggiata nella parte superiore del serbatoio in zona sicuramente non interessata dalla presenza di sodio, ricavabile in base al contenuto massimo di sodio presente nel serbatoio (26 Kg). Va infatti previsto il caso di congelamento del sodio nel serbatoio: in tal caso si deve procedere a riscaldare prima la zona superiore e successivamente, superata la temperatura di fusione del sodio, si procede al lento scongelamento della parte inferiore, per evitare pericolose sovrappressioni dovute alla differenza di volume specifico tra fase liquida e solida.

2) Serbatoio di caricamento e di drenaggio (SD).

Il serbatoio in oggetto è installato nell'apposita fossa situata sotto l'impianto, costituisce il punto più basso del circuito sodio ed ha le seguenti funzioni principali:

- contenere la quantità di sodio necessaria per il caricamento ed il drenaggio dell'impianto;
- garantire una quantità minima di sodio a caricamento ultimato;
- permettere lo svolgimento delle esperienze di shock termico nell'apposita sezione;
- permettere la purificazione di tutto il sodio prima del caricamento dell'impianto.

La capacità volumetrica totale di SD, nella soluzione proposta in fig.1, è pari a 80 litri.

La quantità di sodio da caricare in SD è pari a 50 Kg, che occupano circa 55 litri a 150°C. La quantità precisa potrà essere determinata a valle della progettazione,

tenendo conto di una quantità di sodio che deve restare in SD dopo il caricamento e durante l'esercizio impianto, per evitare eccessivi shock termici al serbatoio in caso di drenaggio d'emergenza.

Si tenga conto che anche per SD deve essere considerato l'evento di congelamento del sodio e quindi il successivo riscaldamento con liquefazione del sodio non deve causare sollecitazioni pericolose, come già descritto per il serbatoio principale.

3) Apparecchiature e tubazioni sul circuito per circolazione, caricamento e drenaggio del sodio.

Tutte le apparecchiature e le tubazioni interessate al passaggio del sodio, sia in fase di circolazione sia in fase di caricamento e drenaggio, devono essere dotate di tracciatura in grado di preriscaldarle a vuoto almeno fino a 400 °C (ovvero maggiore, se lo studio di fattibilità lo ritenesse opportuno). La tracciatura dovrà comunque assicurare la liquefazione del sodio eventualmente congelatosi nelle tubazioni a causa di un evento di mancanza prolungata di apporto termico.

Tutte le tubazioni debbono avere un'adeguata pendenza verso il punto di raccolta per consentire il drenaggio del sodio per gravità.

4) Linee e componenti di servizio.

Il sistema di riduzione della pressione dell'argon deve essere dimensionato per assicurare la sovrappressione di esercizio e la sovrappressione di caricamento.

Le tubazioni di sfiato gas, indipendenti per ogni serbatoio, saranno complete di valvole di intercettazione e trappole "TV" per i vapori di sodio.

La guardia idraulica per abbattimento di eventuali vapori di sodio prima dello scarico all'atmosfera, ha anche la funzione di impedire eventuali rientri di aria nel circuito gas in caso di mancanza di alimentazione argon.

La strumentazione di controllo della pressione o di altre grandezze, qualora collegata direttamente ai serbatoi, deve essere provvista di trappole per il vapore di sodio "TV" che trattengono i vapori di sodio presenti nel gas di copertura.

Le valvole di sicurezza hanno lo scopo di convogliare nella guardia idraulica l'argon di copertura con possibile presenza di vapori di sodio che può fuoriuscire da uno dei serbatoi a causa di una eventuale sovrappressione accidentale negli stessi. Ciascuna valvola di sicurezza è preceduta da un disco di rottura posti sulle tubazioni argon in derivazione dalle linee di immissione e sfiato argon dei serbatoi, senza intercettazione. Lo scarico delle valvole di sicurezza non va corredato con "TV".

In parallelo a ciascuna valvola di sicurezza va installata una valvola limitatrice di pressione, tarata ad una pressione ovviamente inferiore alla pressione di scoppio del disco di rottura, che impedisce l'intervento del gruppo disco di rottura-valvola di sicurezza se non in casi di emergenza. La valvola limitatrice si apre automaticamente

alla pressione di taratura, ed è dotata di servocomando (p.es. elettrico) per sfiatare la pressione a richiesta dell'Operatore.

5) Unità di purificazione mobile.

Allo scopo di controllare il tenore di ossidi presenti nel sodio dell'impianto ed eventualmente abbassarlo ad un valore accettabile per il buon funzionamento, il serbatoio SD va collegato ad una unità di purificazione sodio.

6) Tubazione per prove a caduta per gravità.

Questa tubazione è prevista per collegamento di una sezione di prova per shock termici, quando è richiesto che la portata si stabilisca per gravità sfruttando il dislivello tra il circuito di circolazione sodio ed il serbatoio SD. La stessa è anche prevista di attacco per pompa da vuoto, per la procedura normale di pulizia dell'impianto in occasione del primo caricamento.

7) Refrigeratore sodio-aria.

Il refrigeratore sodio-aria ha lo scopo di regolare la temperatura del sodio del serbatoio principale al valore impostato per l'effettuazione delle prove.

Il ventilatore può essere comandato da un regolatore di temperatura che agisce sul motore a giri variabili del ventilatore e/o sulle serrande di regolazione dell'aria.

Il fascio tubiero del refrigeratore deve essere tracciato per assicurare il mantenimento della temperatura di sicurezza al congelamento del sodio.


8) Riscaldatore elettrico

Il riscaldatore elettrico ha la funzione di innalzare, mediante l'apporto di potenza termica fornita elettricamente, la temperatura del sodio nel circuito di circolazione in modo da permettere l'esecuzione dei vari tipi di esperienze previste.

Il riscaldatore può essere realizzato secondo varie soluzioni, che costituiscono oggetto dello studio di fattibilità di CIRTEN.

9) Pompa elettromagnetica.

La pompa elettromagnetica deve assicurare la circolazione del sodio nel circuito. Le caratteristiche costruttive dipenderanno dal progetto del circuito. In fase realizzativa il Costruttore definirà i dettagli d'installazione e le caratteristiche degli ausiliari della pompa.

| | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 028 | 0 | L | 67 | 74 |

5. TRACCIAMENTO ELETTRICO E COIBENTAZIONE

Le tubazioni e i componenti dell'impianto destinati a contenere sodio od argon con vapori di sodio, valvole comprese, debbono essere provvisti di riscaldamento elettrico realizzato mediante cavi scaldanti e di relativa coibentazione.

Si propongono le seguenti linee guida per il dimensionamento delle tracciature:

preriscaldamento dell'impianto vuoto da 20°C a 150°C prima del riempimento con sodio;

innalzamento, in un tempo prestabilito, della temperatura dal valore di preriscaldamento al valore di mantenimento (400°C) in assenza di sodio;

possibilità di mantenimento, ad un valore prefissato (minimo 400°C) di tutti i componenti e tubazioni pieni di sodio;

possibilità dell'innalzamento della temperatura dal valore di mantenimento (400°C) al valore di funzionamento (max 600°C) dei componenti e tubazioni quando soggetti a prove che richiedono variazioni di temperatura;

preriscaldamento, con fusione del sodio, del serbatoio di stoccaggio SD nel quale è prevista la solidificazione del sodio;

rigenerazione, mediante riscaldamento, dei pacchi filtranti delle trappole per vapori di sodio a seguito di un loro eventuale intasamento.

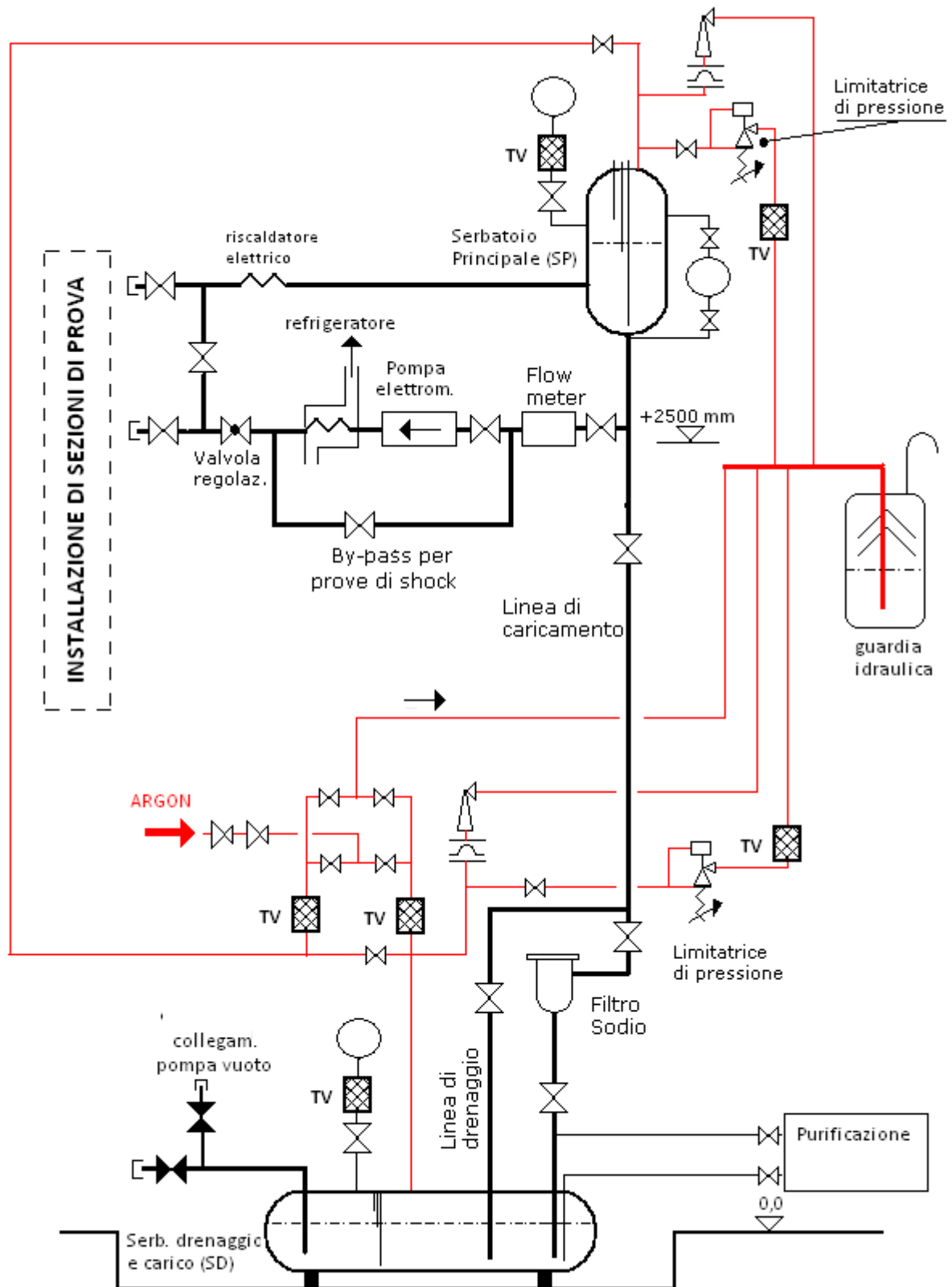


Fig. 1 : schema di flusso indicativo

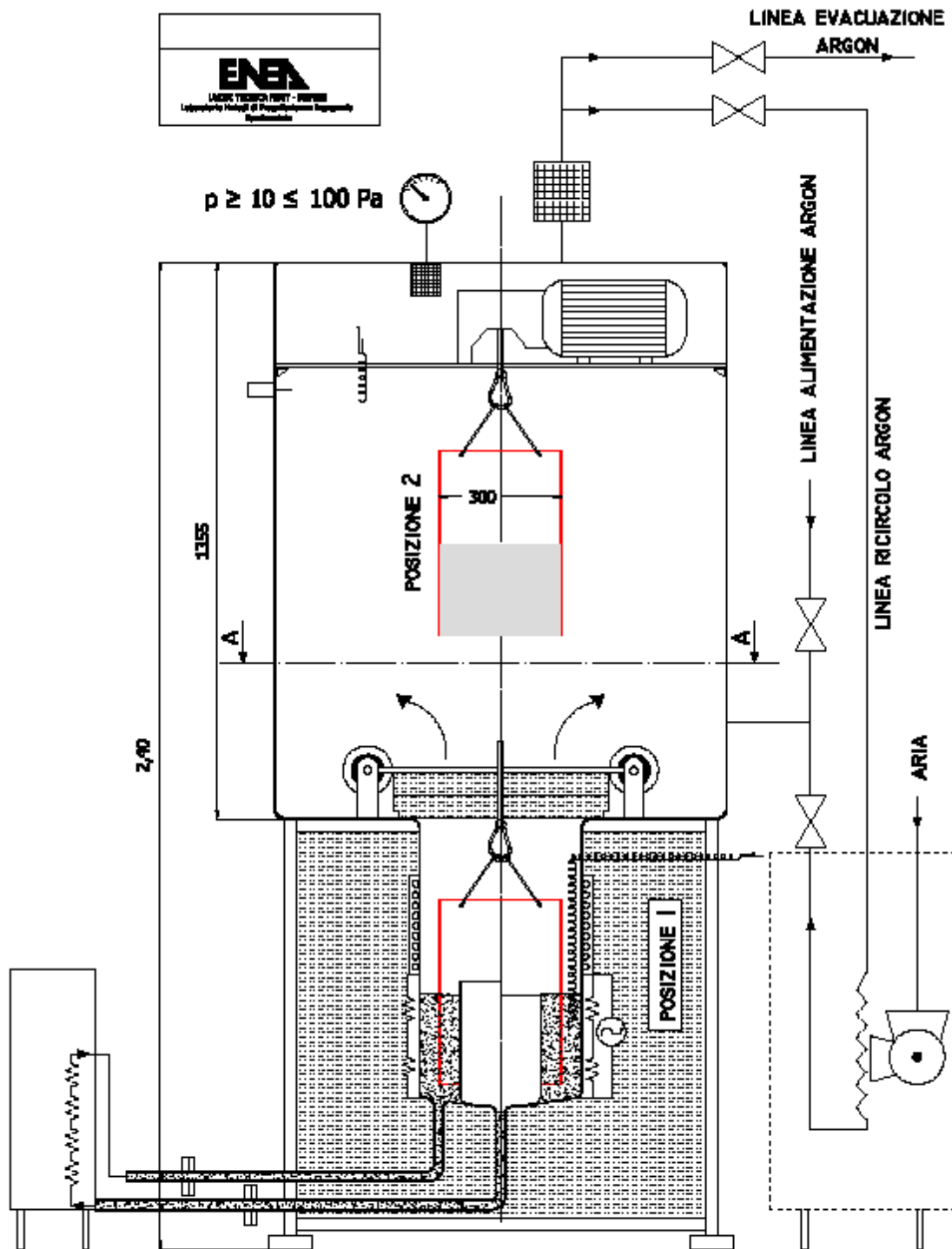
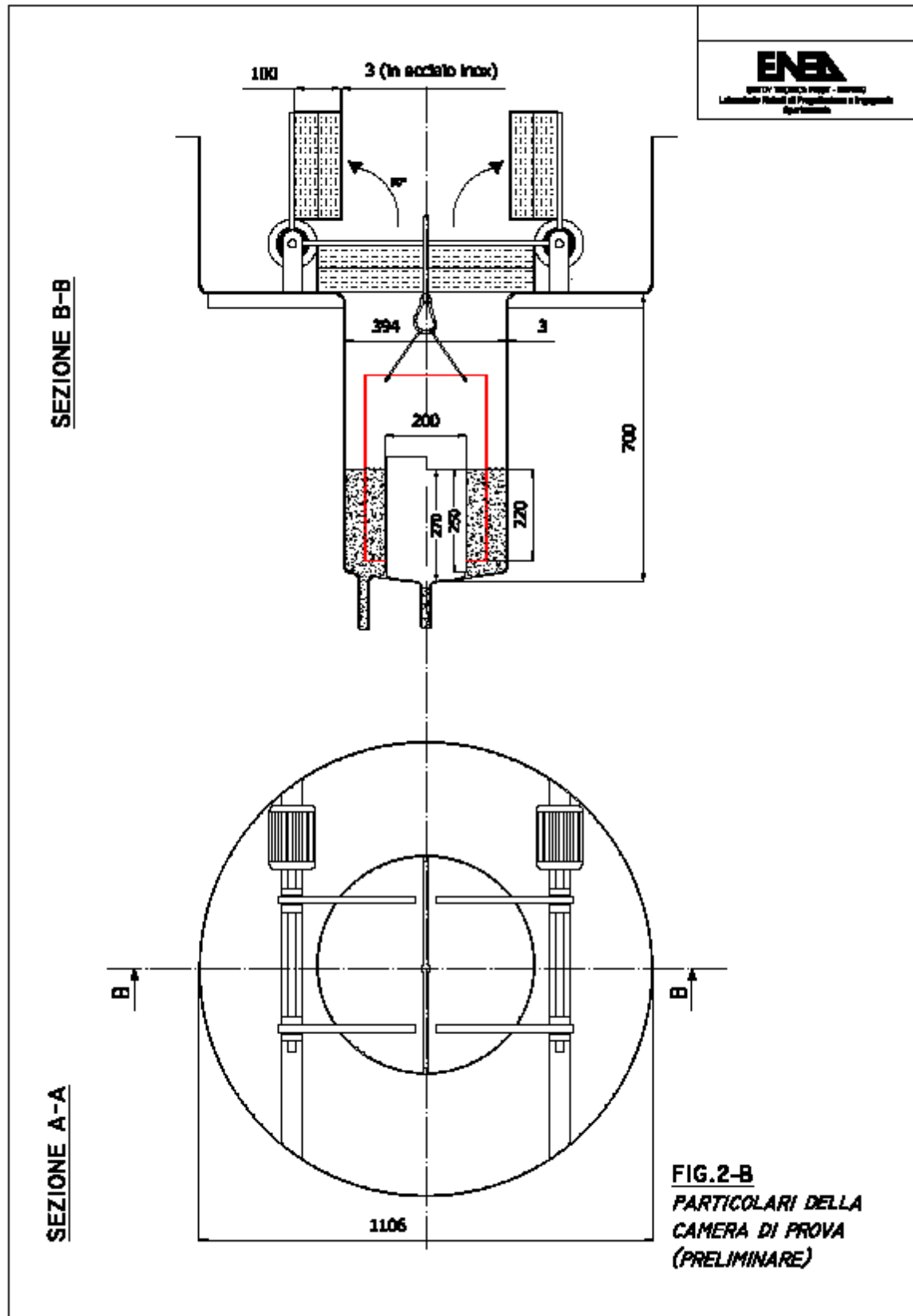
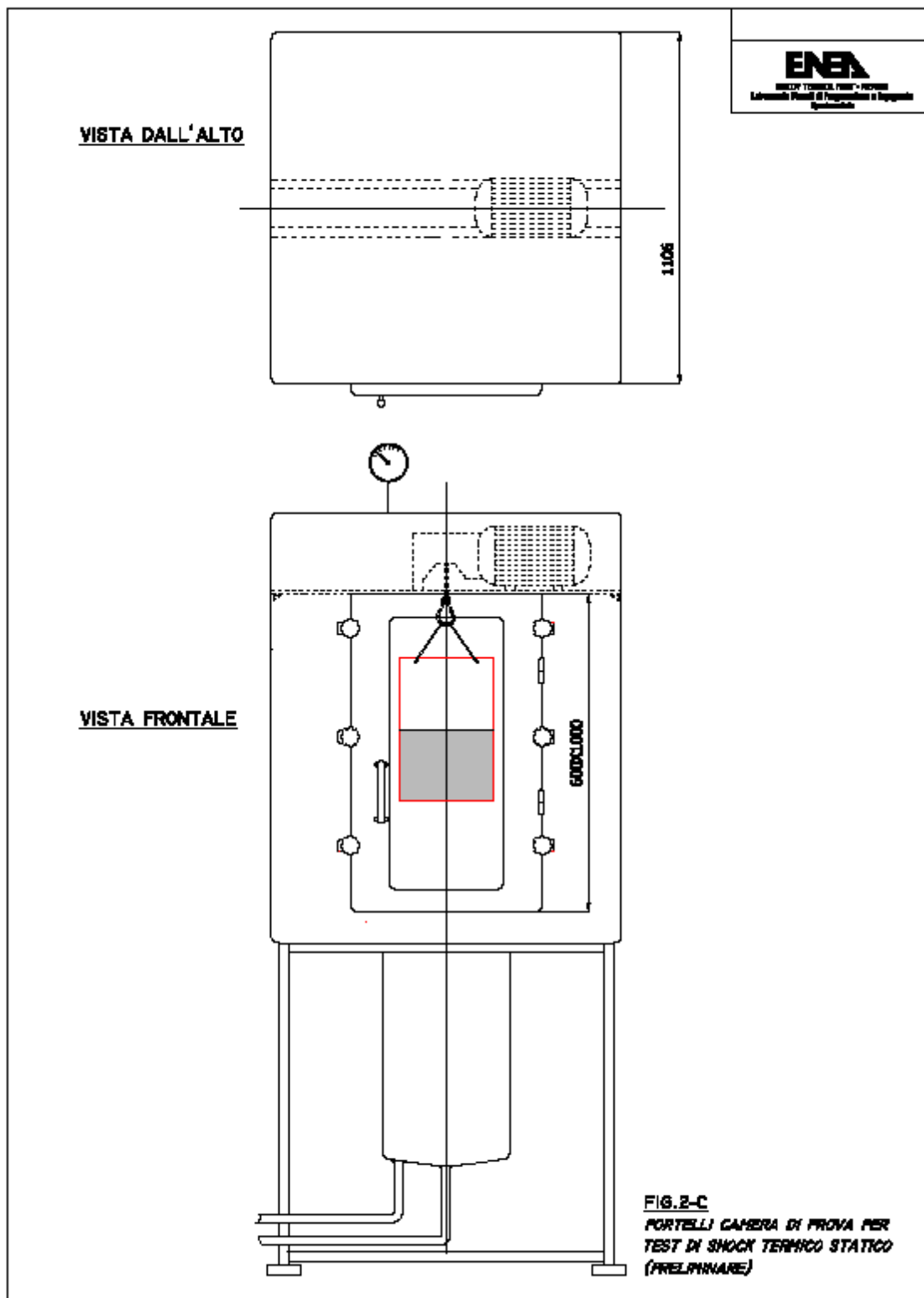


FIG.2-A
CAMERA DI PROVA PER TEST DI
SHOCK TERMICO STATICO
(PRELIMINARE)





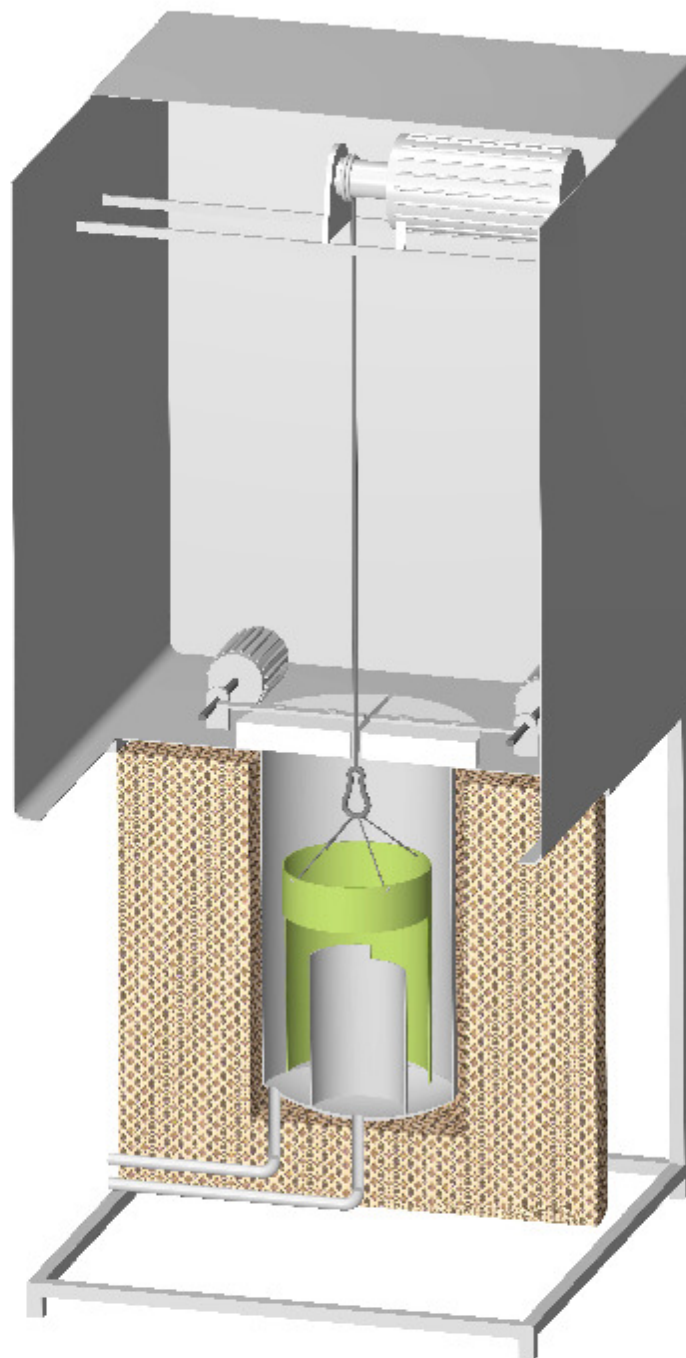


FIG.2-D
CAMERA DI PROVA PER TEST
DI SHOCK TERMICO STATICO
(PRELIMINARE)

TABELLA SPECIFICHE TECNICHE DELLA CAMERA DI SHOCK STATICO

| N°DI RIFERIMEN | QUANTITA' | DENOMINAZIONE | SPECIFICHE TECNICHE | FABBRICANTE /RIVENDITORE | MODELLO/ TIPO |
|----------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------|
| 1 | 1 | Camera di prova | materiale acciaio AISI 304 | | |
| 2 | 1 | Sistema di raffreddamento argon a scambiatore argon-aria con soffiante | Potenza: 250W Portata: Ar=100nm ³ /h aria=150nm ³ /h | Scambiatore aria-argon da 1m ² ΔT Ar=10 coΔT=aria 5C° | |
| 3 | 1 | Sistema di riscaldamento/ mantenimento sodio in fusione a fasce scaldanti | Potenza: max 2 KW | | |
| 4 | 1 | Sistema di generazione e circolo sodio | Potenza: Portata: | | |
| 5 | 1 | Sistema di raffreddamento vessel con acqua a perdere | Potenza: 600W Portata: 50 l/h ΔT=10 C° | | |
| 6 | 1 | Organo di sollevamento sezione di prova | Potenza:200W Velocità 6m/min | | |
| 7 | 2 | Servocomando apertura/chiusura coperchio vessel | Motore passo-passo | | |
| 8 | 1 | Coibentazione Vessel | Fibre ceramiche Fiberfrax con zirconia stabilizzata | Unifrax Italia Saronno (Va) | Durablanket- |
| 9 | 1 | Coibentazione coperchio con involucro di contenimento | Fibre ceramiche Fiberfrax con zirconia stabilizzata spessore 110 mm | Unifrax Italia Saronno (Va) | Durablanket-S |
| 10 | 1 | Filtro vapori sodio | | | |
| 11 | 1 | Manometro | | | |
| 12 | 1 | Termocoppia | | | |
| 13 | 1 | Termocoppia | | | |
| 14 | 1 | Sonda umidità | | | |

*

Prima di iniziare il test di shock termico, eseguire ciclo di inertizzazione della camera mediante circolazione di argon fino ad ottenere una concentrazione di H₂O non superiore a 10 ppm

