



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO



Ricerca di Sistema elettrico

Specifica Tecnica per la Fornitura ed Installazione della Facility SOLIDX

Ivan Di Piazza

Report RdS/PAR2013/050

Specifica Tecnica per la Fornitura ed Installazione della Facility SOLIDX

Ivan Di Piazza - ENEA

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV Generazione

Obiettivo: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare

Responsabile del Progetto: Mariano Tarantino, ENEA

Titolo

**Specifica tecnica per la fornitura e installazione della facility
SOLIDX**

Descrittori
Tipologia del documento:
Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE su sicurezza nucleare e reattori di IV generazione

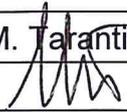
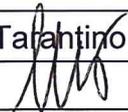
Argomenti trattati:

Generation IV reactors, Tecnologia dei metalli liquidi

Sommario

Il presente documento riporta la Specifica Tecnica di fornitura, installazione e collaudo della facility SOLIDX presso il CR ENEA del Brasimone. La facility si pone come obiettivo lo studio della solidificazione del metallo liquido pesante (Piombo), quando utilizzato come fluido termovettore nei sistemi nucleari di quarta generazione.

Note
Copia n.
In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	19/09/2014	NOME	I.Di Piazza	M. Tarantino	M. Tarantino
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA		REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 081	0	L	2	24

INDICE

INTRODUZIONE	3
CONCETTUALIZZAZIONE FACILITY SOLIDX	7
OGGETTO DELLA FORNITURA.....	9
SCOPO	9
DESCRIZIONE DELLA FORNITURA E DATI DI PROGETTO.....	9
SERBATOIO DI PROVA S100	9
HEATERS 11	
TERMOCOPPIE DI MISURA	12
LINEA DI DRENAGGIO/RIEMPIMENTO	12
VALVOLA LINEA DI DRENAGGIO/RIEMPIMENTO.....	12
SERBATOIO DI STOCCAGGIO S200	12
COMPONENTI, SISTEMI E STRUMENTAZIONE DI SERVIZIO.	12
REQUISITI DELLA FORNITURA.....	14
FABBRICAZIONE.....	14
MATERIALI.....	14
SALDATURE.....	14
PROVE IN PRESSIONE.....	15
PULIZIA	15
ESTENSIONE DELLA FORNITURA.....	16
IMBALLO E TRASPORTO	16
INSTALLAZIONE ED ASSISTENZA IN SITO.....	16
ACCETTAZIONE E GARANZIA.....	16
ESCLUSIONE DELLA FORNITURA	16
DURATA DELLA FORNITURA, PENALI, PAGAMENTI	17
ALLEGATI	18
DATA SHEET VALVOLE PER METALLO LIQUIDO	18
ANNEX 1 – MODELLO CFD A SUPPORTO DEL DIMENSIONAMENTO DI S100.....	21

INTRODUZIONE

In ambito europeo lo sviluppo dei reattori di IV generazione e dei sistemi SMR (Small Modular Reactor), con particolare riguardo a quelli a spettro neutronico veloce capaci di sostenere la chiusura del ciclo del combustibile per la minimizzazione dei rifiuti radioattivi e l'utilizzo ottimale delle risorse naturali, è inquadrato nella European Sustainable Nuclear Industrial Initiative (ESNII) dello Strategic Energy Technology-Plan (SET-Plan), di cui anche l'ENEA è membro.

In questo contesto, sia ENEA sia il sistema industriale italiano (es. ANSALDO NUCLEARE) e il sistema universitario (CIRTEN), sono focalizzati sullo sviluppo concettuale, sulla progettazione di dettaglio, e sulla ricerca tecnologica, del DEMO-LFR ALFRED "Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator", vedi *Figura 1*.

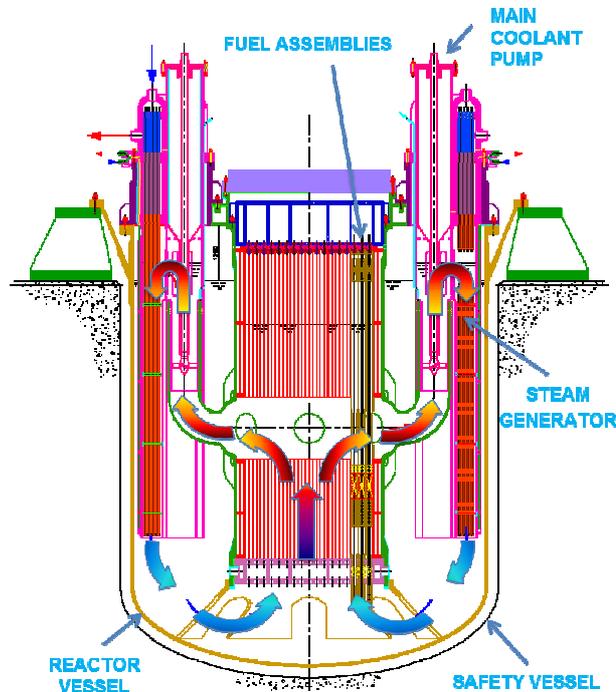


Figura 1 DEMO ALFRED Reactor Configuration.

Il prototipo ALFRED non solo funge da DEMO-LFR, ma ha insita l'ambizione di essere il primo prototipo di SMR refrigerato a metallo liquido pesante di concezione europea, in alternativa all' SVBR di concezione russa.

I sistemi LFR (anche SMR) nella configurazione a piscina integrata soddisfano tutti i requisiti introdotti per i sistemi nucleari di quarta generazione. Una roadmap di sviluppo dei sistemi LFR a livello europeo è riportata in *Figura 2*.

Sostenibilità: efficace utilizzo del combustibile e minimizzazione delle scorie

Il piombo è un refrigerante che presenta una sezione d'urto di assorbimento neutronico bassa e uno scarso potere moderante. Questa proprietà nucleare, intrinseca al refrigerante, permette di progettare ed esercire noccioli a spettro neutronico veloce anche con geometrie con un

elevato rapporto refrigerante/ combustibile, a sua volta necessario per la corretta asportazione del calore di fissione nel rispetto dei vincoli sulle temperature massime di esercizio.

La possibilità di operare con flussi neutronici particolarmente “duri” consente di ottenere facilmente noccioli con rapporto di conversione unitario (qualora il tasso di produzione di nuovo materiale fissile nel combustibile coincide con il tasso di consumo dello stesso), e quindi noccioli a lunga vita ed elevato tasso di bruciamento (elevata efficienza di utilizzo del combustibile, circa 150-200 volte superiore agli attuali sistemi di seconda e terza generazione).

Un flusso neutronico veloce permette non solo di accrescere la sostenibilità di tali sistemi mediante un utilizzo più efficace e razionale del combustibile nucleare, ma permette contemporaneamente una drastica riduzione della generazione di scorie ad elevata radiotossicità grazie ad un ciclo del combustibile “chiuso”. Le scorie effettivamente prodotte sono infatti separate dal plutonio e dagli attinidi minori, che vengono completamente riciclati e riutilizzati nel ciclo del combustibile (detto per l’appunto chiuso). Il plutonio e gli attinidi minori sono infatti i principali responsabili dell’elevata radiotossicità delle scorie nucleari dei sistemi GEN-II, GEN-III, che richiedono tempi di stoccaggio in siti geologici dell’ordine del milione di anni.

Con un ciclo del combustibile chiuso i sistemi LFR permettono di ridurre i volumi di scorie nucleari prodotte e la relativa radiotossicità, con la sola necessità di uno stoccaggio in siti superficiali per un tempo dell’ordine di 300-400 anni.

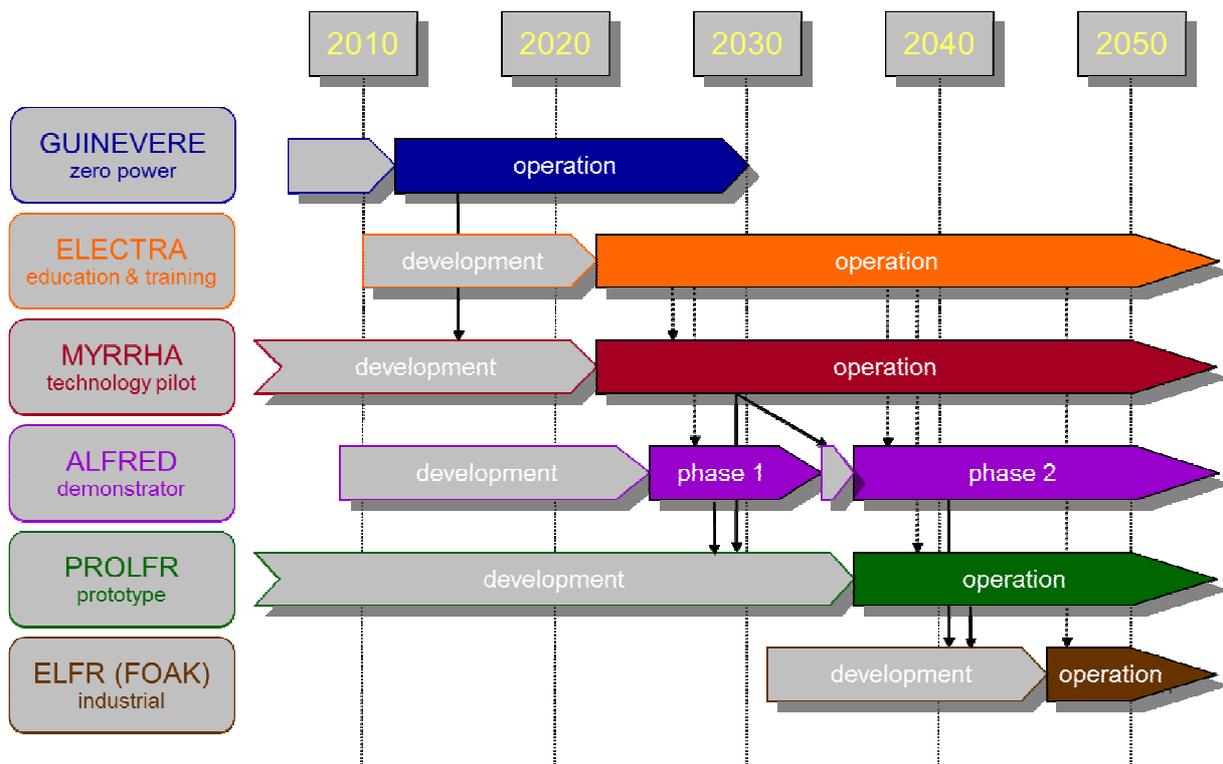


Figura 2 Roadmap sviluppo dei sistemi LFR

Economicità: costi competitivi e rischio sul capitale investito paragonabile ad ogni altra forma di produzione di energia elettrica.

I sistemi LFR sono ideati e progettati per essere estremamente semplici, riducendo quindi i tempi di costruzione, i tempi di ammortamento del capitale investito (parametro molto critico per i sistemi nucleari), e il costo di produzione dell'energia elettrica.

Tale semplicità è in gran parte consentita dalle intrinseche proprietà del refrigerante utilizzato. Il piombo infatti non interagisce chimicamente con aria e acqua (a differenza del sodio), e ha una bassa tensione di vapore. Ciò consente di realizzare sistemi a bassa pressione (praticamente pressione atmosferica) e consente di installare direttamente nel sistema primario il generatore di vapore, portando ad una considerevole semplificazione impiantistica. Nei sistemi refrigerati a sodio ciò non è praticabile, e un apposito circuito intermedio a sodio è previsto, aumentando la complessità, dimensioni e costi di impianto.

Inoltre la diretta installazione del generatore di vapore nel sistema primario migliora l'efficienza energetica del sistema LFR, riducendo i costi di produzione dell'energia elettrica. Infine mediante un accorto ed innovativo progetto di impianto, che lo rende estremamente semplice, è possibile sostituire o comunque ispezionare tutti i componenti del sistema primario, incrementando sensibilmente non solo il fattore di utilizzo dell'impianto e riducendo quindi i tempi di ammortamento sul capitale investito, ma anche la protezione dell'investimento.

Sicurezza e Affidabilità: elevata sicurezza e affidabilità durante l'esercizio, minimo rischio di danneggiamento del nocciolo, esclusione di un piano di evacuazione

I sistemi refrigerati a piombo, visto l'elevato punto di ebollizione del refrigerante utilizzato (1750 °C), la sua bassa tensione di vapore anche ad elevate temperature, e le sue ottime capacità schermanti, sono progettati per essere eserciti a pressione atmosferica e a temperature particolarmente lontane dal punto di ebollizione. Ciò consente di ottenere elevati standard di sicurezza e affidabilità durante l'esercizio, con un rischio di esposizione agli operatori molto modesto vista la capacità del piombo di intrappolare i prodotti di fissione anche volatili e di schermare le radiazioni gamma.

Le ottime proprietà neutroniche del piombo, già citate, consentono inoltre di sfruttare a pieno le peculiarità dello stesso come refrigerante, ovvero da un punto di vista termo-fisico (elevata capacità di asportare potenza termica, elevato calore specifico, elevato coefficiente di espansione termica), permettendo la progettazione di noccioli ad elevato rapporto passo su diametro, il che implica direttamente sistemi a ridotte perdite di carico e quindi contenute potenze di pompaggio. Inoltre tale configurazione permette di incrementare le capacità del sistema di asportare la potenza di decadimento in regime di circolazione naturale, quindi in maniera completamente passiva, permettendo così una sensibile semplificazione dei sistemi di controllo e protezione e accrescendo ulteriormente il grado di sicurezza di tali sistemi.

Da un punto di vista prettamente nucleare i reattori refrigerati a piombo presentano un coefficiente di reattività per presenza di vuoto negativo nel caso di noccioli di piccole-medie dimensioni e positivo nel caso di noccioli di grosse dimensioni. Tuttavia, in virtù dell'elevato punto di ebollizione del refrigerante (superiore alla temperatura di fusione degli acciai ma inferiore a quella del combustibile), l'ipotesi di esteso svuotamento della sola regione del nocciolo può essere considerata fisicamente irrealizzabile, così che i reattori refrigerati a piombo possano essere considerati immuni da uno degli scenari incidentali più gravi, tipici dei reattori veloci tradizionali.

Anche in caso di rottura dei tubi del generatore di vapore, vista l'elevata densità del piombo e le soluzioni progettuali adottate, il rischio di inserzione di vapore nel centro del nocciolo (dove il coefficiente di vuoto è maggiormente positivo) è estremamente ridotto.

Va infine evidenziato come l'elevata densità del piombo, pur nel caso di una improbabile fusione del nocciolo, riduca significativamente il rischio di una successiva compattazione del

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 081	0	L	6	24

combustibile e quindi di una nuova condizione di criticità del sistema. I fenomeni di dispersione del combustibile nel refrigerante sono infatti predominanti viste le densità del combustibile nucleare paragonabili a quelle del piombo e l'attitudine del piombo ad instaurare moti di circolazione naturale in ogni condizione incidentale ipotizzabile. Tale scenario non è invece ipotizzabile per i reattori ad acqua e a sodio, per i quali altresì il rischio di parziale o completa fusione del nocciolo è meno ridotto che non nel caso di un LFR.

D'altro canto l'elevato punto di fusione del piombo (327°C) che può indurre problemi di esercizio e controllo dei sistemi LFR, introduce un enorme vantaggio per quanto riguarda la sicurezza di tali sistemi. In caso di rottura del vessel con fuoriuscita di piombo dal sistema primario, questo tenderebbe immediatamente a solidificare arrestando la fuoriuscita, senza alcuna conseguenza per le strutture circostanti data anche la sua inerzia chimica con aria e acqua. Per i sistemi a sodio ciò non è neanche lontanamente immaginabile.

Rimane infine la questione della produzione del Polonio-210, volatile e altamente pericoloso per la salute pubblica. Con una adeguata selezione dei materiali e una corretta implementazione dei sistemi di controllo della chimica, e ancora date le attitudini del piombo ad intrappolare i prodotti di fissione altamente volatili, il rischio di rilascio delle pur minime quantità di Po-210 prodotte nel reattore, è estremamente ridotto.

Resistenza alla Proliferazione e Protezione Fisica: impossibilità di avere plutonio per la fabbricazione di bombe, elevata sicurezza per la salute pubblica in caso di atti terroristici.

L'uso di combustibile ad ossidi misti contenente attinidi minori (nel lungo termine), associato ad un ciclo di combustibile che non prevede la separazione chimica degli attinidi presenti nel combustibile stesso, rende questi sistemi enormemente inefficaci per la diversione di plutonio a fini illeciti. Inoltre nel breve termine, le proprietà neutroniche del piombo premettono la concezione di noccioli a lunga vita (peraltro già esercibili in un'ottica di chiusura del ciclo del combustibile), intrinsecamente incompatibili con la produzione di plutonio weapon-grade.

L'uso di un refrigerante chimicamente compatibile con aria e acqua, con ottime proprietà intrinseche di schermaggio delle radiazioni e di ritenzione dei prodotti di fissione tipicamente responsabili della contaminazione ambientale in caso di incidente severo, ed operante a bassa pressione permette di aumentare sensibilmente la protezione fisica della popolazione residente nelle zone limitrofe alla installazione nucleare, riducendo inoltre la necessità di robusti e complessi sistemi di protezione contro eventi catastrofici iniziati da eventi terroristici. Inoltre per i sistemi LFR in nessuna configurazione è previsto l'utilizzo di fluidi infiammabili, eliminando quindi il rischio di propagazione di incendi nel sito.

In tale ambito, l'ENEA, nell'ambito del PAR2013, ha assunto l'impegno di studiare la solidificazione del metallo liquido pesante (piombo) in vista di un possibile transitorio incidentale in LFR dove per un malfunzionamento, avvenga il congelamento del fluido primario nel GV.

Prescindendo dalle complessità geometriche del GV, sino ad ora pochissimo è stato fatto per investigare il fenomeno del congelamento. Soprattutto sono carenti i dati sperimentali su cui poter basare un eventuale analisi di transitorio incidentale sulle geometrie reali.

Per questa ragione, ENEA ha preso l'iniziativa di progettare, realizzare ed esercire una prima facility denominata SOLIDIX, per investigare il congelamento del piombo. Tale facility ha volutamente una geometria semplice, e mira a raccogliere i primi dati sperimentali significativi sul fenomeno.

L'oggetto della fornitura ed i suoi limiti verranno dettagliati nelle prossime sezioni.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 081	0	L	7	24

CONCETTUALIZZAZIONE FACILITY SOLIDX

La facility a metallo liquido pesante SOLIDX (SOLIDification eXperiment) è stata definita e concettualizzata con lo scopo di realizzare una prima apparecchiatura che possa supportare sperimentalmente lo sviluppo tecnologico dei sistemi refrigerati a piombo fluente, investigando il fenomeno del congelamento del metallo liquido. La facility utilizzerà direttamente il piombo come fluido, lavorando quindi a temperature elevate a cavallo dei 330 °C (Temperatura di congelamento).

La facility SOLIDX è stata concettualizzata secondo lo schema riportato nel P&ID, **Figura 3**. I dettagli della fornitura vengono descritti attraverso i sottosistemi principali:

- 1) Il serbatoio di prova strumentato S100;
- 2) Il sistema di fill&drain composto da:
 - a. linea di fill&drain
 - b. valvola V101
 - c. serbatoio di stoccaggio S200.

SOLIDIX

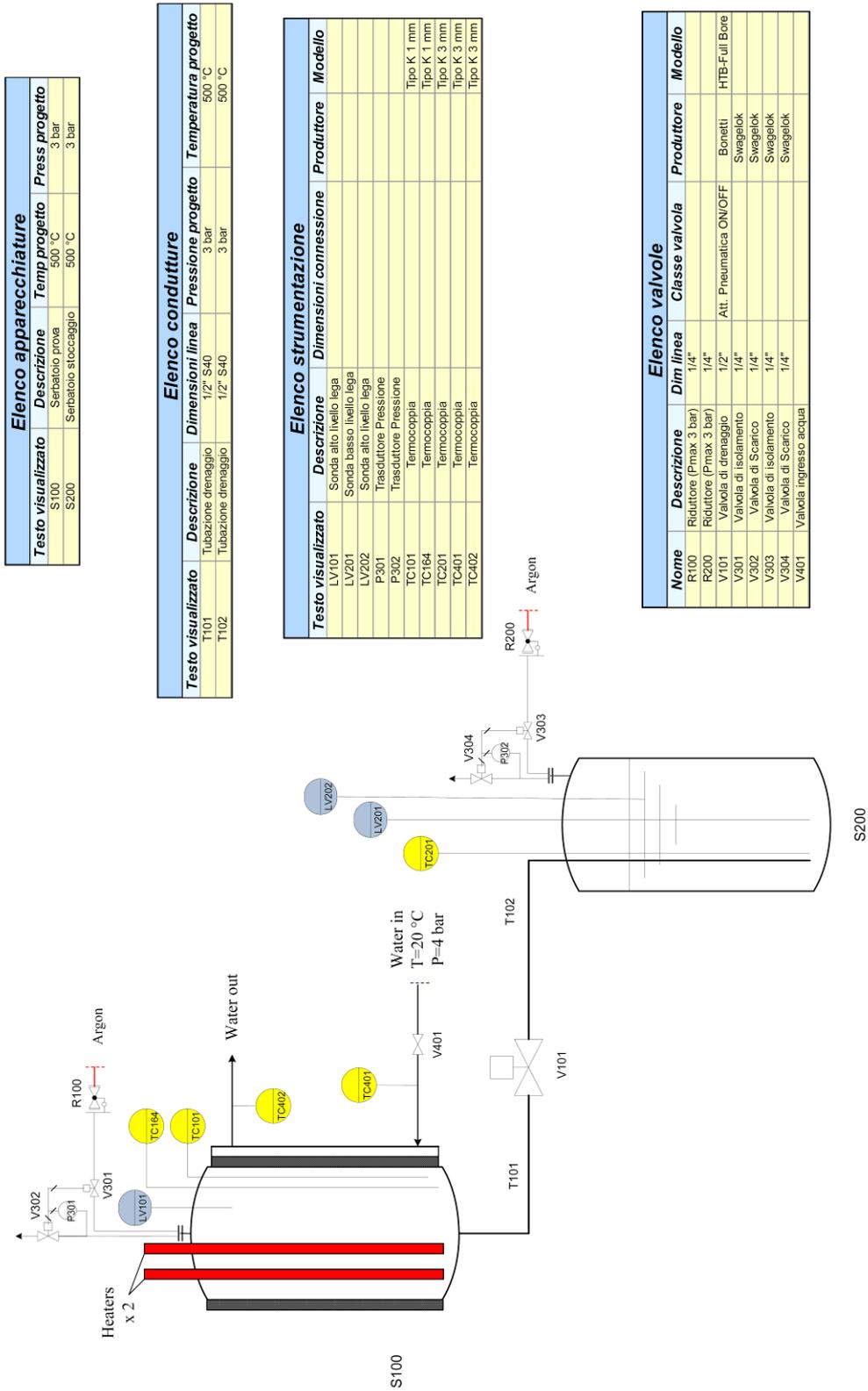


Figura 3 P&ID della facility per lo studio del fenomeno di solidificazione SOLIDIX.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 081	0	L	9	24

OGGETTO DELLA FORNITURA

La presente Specifica Tecnica ha come oggetto l’approvvigionamento, la fabbricazione l’installazione e il collaudo presso il C.R. Brasimone (edificio sperimentale PEC), della facility a metallo liquido pesante per lo studio della solidificazione denominata SOLIDX “SOLIDification eXperiment”.

SCOPO

La Specifica Tecnica ha lo scopo di descrivere l’oggetto della fornitura, di stabilire i criteri generali per la fabbricazione, certificazione secondo direttiva 97/23/CE (PED), i controlli, le prove non distruttive, l’imballaggio e quanto necessario alla realizzazione, trasporto e installazione dell’upgrade dell’impianto presso il C.R. Brasimone.

In linea generale la fornitura comprende:

- ✓ progettazione di dettaglio e la definizione del P&ID definitivo e relativo layout;
- ✓ la realizzazione dei disegni costruttivi;
- ✓ le verifiche termo-meccaniche dei componenti di impianto indicati e la relativa certificazione;
- ✓ l’approvvigionamento dei materiali;
- ✓ la fabbricazione dei componenti di impianto indicati e il relativo assemblaggio;
- ✓ progettazione, realizzazione e fornitura dei supporti di impianto;
- ✓ i controlli e i test in corso d’opera e di fine realizzazione;
- ✓ il dossier di fine fabbricazione comprensivo di certificazioni;
- ✓ la pulizia e decapaggio di tutti i componenti di impianto;
- ✓ l’imballo e la spedizione presso il sito ENEA del Brasimone;
- ✓ installazione dell’impianto presso l’edificio sperimentale PEC;
- ✓ collaudi in sito.

DESCRIZIONE DELLA FORNITURA E DATI DI PROGETTO

La facility SOLIDX è costituita da due serbatoi S100 ed S200 collegati tra loro da una linea di drenaggio con una valvola remotizzata.

Il Fornitore dovrà responsabilizzarsi sulle scelte del Cliente nella definizione del piping e dei relativi collegamenti flangiati e della strumentazione ausiliaria.

SERBATOIO DI PROVA S100

Il serbatoio di prova S100 costituisce la vera e propria sezione di prova all’interno del quale verrà congelato il piombo durante la campagna sperimentale. Una sezione trasversale concettuale del serbatoio S100 è riportata in Figura 4. Il serbatoio è composto da tre tubi concentrici denominati dall’interno verso l’esterno T1, T2, T3. Per ragioni sia economiche che di reperibilità e facilità realizzativa, i tubi sono commerciali, e le tipologie sono indicate in **Tabella 1**. La lunghezza dei tubi è di 350 mm, dove il pelo libero del piombo liquido arriverà

a quota 290 mm con 60 mm di cover gas. I tubi verranno chiusi in basso con dei fondi piani saldati, mentre in alto deve essere prevista una flangia a saldare 10 inches WN 300 lbs per la chiusura di T1, con la contro-flangia cieca provvista di tutte le penetrazioni necessarie per la strumentazione ed il circuito gas. Dovrà essere inoltre prevista un oblò con illuminazione interna per alte temperature a tenuta per la visualizzazione del pelo libero del piombo. I tubi T2 e T3 devono essere concettualizzati smontabili rispetto a T1 in maniera da garantire tutte le operazioni di manutenzione e upgrade della facility.

Tabella 1 Dimensioni dei tubi da adottare per il serbatoio S100.

Tubo	Tipologia	O.D.[mm]	s[mm]	L [mm]
T1	10 inches Sch40	273	9.27	350
T2	14 inches Sch80	355.6	19	350
T3	16 inches Sch40	406.4	12.7	350
Powder gap	-	-	22.3	350

Il tubo T1 conterrà il piombo della sezione di prova. Il gap tra il tubo T1 e T2 verrà riempito con polvere di acciaio inossidabile AISI304; ciò garantirà la necessaria resistenza termica per realizzare l'esperimento. Il gap non dovrà essere a tenuta ed il fornitore si dovrà responsabilizzare sulle soluzioni di dettaglio per garantire i necessari scorrimenti tra tubo e tubo dovuti alle dilatazioni termiche durante l'esercizio.

Nel gap tra T2 e T3 scorrerà acqua a circuito aperto alla pressione di rete; è stato calcolato che le portate di rete sono più che sufficienti per smaltire le potenze richieste. Il gap tra T2 e T3 sarà suddiviso in 4 settori stagni alimentati separatamente. Questo garantirà la possibilità di refrigerazione asimmetrica della facility ampliando la gamma dei possibili esperimenti.

Le dimensioni dei tubi e lo spessore del gap di polvere sono state determinate sulla base di un modello CFD che tiene conto dello scambio termico coniugato nel fluido e nelle strutture termiche. Il modello è riportato in 0-Annex 1, ed è basato su valori di conducibilità delle polveri ricavate su precedenti esperienze condotte al Brasimone sulla facility TXP. Il dimensionamento scelto consente di avere piombo completamente liquido alla piena potenza, e garantisce gradi di congelamento sempre più alti al diminuire della potenza.

Esternamente al tubo T1 verrà posizionato un cavo scaldante della lunghezza di 2.1 m e della potenza di 300 W. La scelta del tipo di cavo nonché la relativa installazione verrà concordata dal fornitore con ENEA.

Sul fondo saldato del tubo T1, dovrà essere prevista una tubazione di drenaggio da ½" Sch.40 provvista di flangia di collegamento ½" WN 300 lb. Tale flangia serve da elemento di collegamento con la linea di drenaggio T101 visibile nel P&ID, **Figura 3**.

Il serbatoio flangiato costituito dal tubo T1 ed il fondo saldato, dovrà essere progettato rispettando i seguenti parametri:

- ✓ Temperatura di Progetto: 500 °C
- ✓ Temperatura di Esercizio: 400 °C
- ✓ Tipo di Fluido: Piombo
- ✓ Pressione di Progetto assoluta (sul fondo): 1,50 bar
- ✓ Pressione di Esercizio assoluta (sul fondo): 1,45 bar
- ✓ Gas di copertura: Argon
- ✓ Sovrappressione gas di copertura: 50 mbar
- ✓ Volume totale: 20 litri

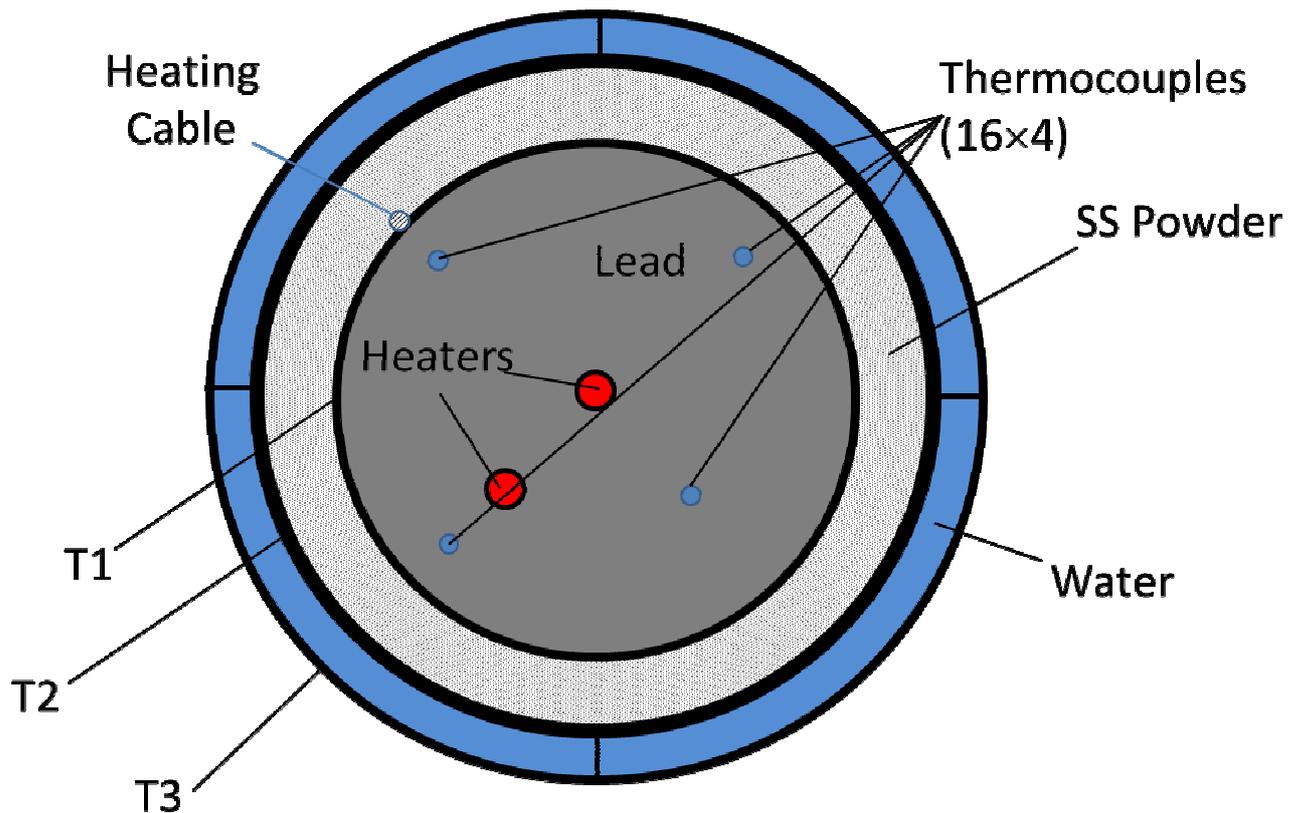


Figura 4 Vista concettuale in sezione del serbatoio S100.

Heaters

Gli elementi scaldanti da inserire all'interno del serbatoio S100 sono essenziali per la realizzazione dell'esperimento. Tali elementi verranno disposti nelle seguenti posizioni:

- ✓ Elemento H1 in posizione centrale
- ✓ Elemento H2 ad una distanza di metà del raggio interno dal centro, cioè a 63.6 mm dal centro;

Gli elementi scaldanti H1 ed H2 dovranno avere le caratteristiche indicative riportate in **Tabella 2**. E' da tener presente che la penetrazione degli elementi scaldanti attraverso la flangia di chiusura dovrà essere realizzata attraverso connettori swagelok compatibili con i diametri scelti.

Tabella 2 *Caratteristiche dei riscaldatori cilindrici H1 ed H2.*

Lunghezza Attiva	250 mm
Potenza	2500 W
Diametro	20 mm

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 081	0	L	12	24

Termocoppie di misura

Le termocoppie saranno di tipo K e di diametro 1 mm. Saranno disposte lungo 4 tubi come indicato in Figura 4, a 16 altezze diverse a partire dal livello del fondo del serbatoio. La posizione radiale dei tubi di sostegno sarà ad una distanza di $\frac{3}{4}$ del raggio, cioè a 95.4 mm dal centro per tre dei tubi, ed ad una distanza di $\frac{1}{2}$ del raggio cioè a 63.6 mm dal centro.

Linea di drenaggio/riempimento

Il piping del circuito di drenaggio sarà costituito da tubazioni in acciaio inox AISI304/316 da 1/2" S40. La realizzazione e installazione delle tubazioni ed i relativi supporti sono completa responsabilità del Fornitore.

La linea di drenaggio dovrà essere progettata rispettando i seguenti parametri:

- ✓ Temperatura di Progetto: 500 °C
- ✓ Temperatura di Esercizio: 400 °C
- ✓ Tipo di Fluido: Piombo
- ✓ Pressione di Progetto: 3 bar
- ✓ Pressione di Esercizio: 1,5 bar

Valvola linea di drenaggio/riempimento

Per il drenaggio/riempimento della facility è prevista la installazione di una valvola, denominata V101, lungo la linea, tra la T101 e la T102.

Le valvole scelte sono del tipo a sfera da 1/2", a passaggio pieno (ball valve full bore) del tipo BONT HTB con estremità flangiata 300 lbs complete di attuatore pneumatico ON/OFF ed elettrovalvole di controllo, della CESARE BONETTI S.p.A (vedi allegato 0).

Serbatoio di stoccaggio S200

Il serbatoio di stoccaggio, denominato S200, dovrà essere flangiato superiormente e la flangia dovrà essere dotata di tutte le penetrazioni necessarie per la strumentazione, il circuito carico e scarico gas e la linea di drenaggio, come indicato nel P&ID, **Figura 3**. S200 dovrà essere progettato rispettando i seguenti parametri:

- ✓ Temperatura di Progetto: 500 °C
- ✓ Temperatura di Esercizio: 400 °C
- ✓ Tipo di Fluido: Piombo
- ✓ Pressione di Progetto: 3 bar
- ✓ Pressione di Esercizio: 2 bar
- ✓ Gas di copertura: Argon
- ✓ Sovrappressione gas di copertura: 100 mbar-2 bar
- ✓ Volume totale: 20 litri

COMPONENTI, SISTEMI E STRUMENTAZIONE DI SERVIZIO.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 081	0	L	13	24

Sono parte integrante della fornitura i seguenti componenti e sistemi:

- 1) Circuito gas del serbatoio S100 e S200 (tubi 8X1), fornito di elettrovalvole, riduttori, piping e trasduttori di pressione;
- 2) Sistema di tracciatura con relative termocoppie di regolazione e controllo;
- 3) Strumentazione di impianto quali TC del sistema primario con relativa struttura di supporto vincolata alla flangia superiore.

Inoltre, dovrà essere prevista una struttura di supporto per S100, di altezza tale che la flangia di drenaggio di S100 si trovi a 700 mm dal piano di calpestio. S200 sarà invece dotata di una struttura di supporto al livello del piano di calpestio. La progettazione e la definizione della struttura è piena responsabilità del fornitore e dovrà essere verificata da ENEA per approvazione.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 081	0	L	14	24

REQUISITI DELLA FORNITURA

La fornitura dovrà essere in accordo alle prescrizioni elencate nei successivi paragrafi.

FABBRICAZIONE

Il Fornitore si dovrà responsabilizzare sulle scelte effettuate dal Cliente nel progetto concettuale di primo livello proposto. Tuttavia potrà proporre soluzioni diverse qualora ne semplifichino la fabbricazione e l'assemblaggio.

Sulla base della presente specifica concettuale di primo livello, il Fornitore dovrà produrre un progetto concettuale di secondo livello e successivamente un progetto di dettaglio completo di disegni di dettaglio ritenuti necessari per definire le dimensioni e le tolleranze finalizzate alla realizzazione dei componenti di impianto in officina.

La fabbricazione dovrà essere eseguita conformemente alla direttiva 97/23/CE (PED) per quanto concerne le costruzioni saldate.

MATERIALI

Le parti di impianto, supporti e altri componenti oggetto della fornitura dovranno essere realizzati in acciaio austenitico tipo AISI 304/316/316L, a meno che non venga specificatamente indicato un materiale diverso dal Cliente.

L'approvvigionamento e la ricezione dei materiali dovranno essere condotti conformemente alle norme ASTM, UNI e DIN, accompagnati da certificati di origine, comprovanti le caratteristiche chimico-fisiche e i trattamenti subiti relativi al lotto di materiale della fornitura. Per le parti per le quali non sia applicabile alcuna delle norme indicate, il Fornitore dovrà procedere secondo il proprio standard aziendale, previa autorizzazione del Cliente.

Le guarnizioni di tenuta delle flange di collegamento sul piping e sui vari componenti dovranno essere del tipo spirometallico a spire alternate grafite e AISI 316 (HB<160) di spessore 4.5 mm, con anello esterno di centraggio e anello di compressione interno in AISI 316, con spessore di 3 mm, dimensionate secondo ASME B16.20 (m=3.00 ;Y=68.9 MPa).

La bulloneria di collegamento tra le flange con interposte le guarnizioni spirometalliche dovrà essere in acciaio inossidabile austenitico secondo ASTM A193 B8 del tipo A2/70.

SALDATURE

Il riferimento normativo per quanto riguarda i giunti saldati è la Direttiva 97/23/CE (PED).

Per le saldature dovrà essere prodotto un documento che riporti per ogni giunzione:

- procedimento usato,
- qualifica saldatura,
- tipo di elettrodo e omologazione,
- qualifica del saldatore,
- controlli non distruttivi previsti.

Valgono inoltre le seguenti prescrizioni aggiuntive:

- ✓ i giunti saldati non di testa che realizzano la tenuta con l'ambiente esterno dovranno essere rasati dopo l'ultima passata ed ispezionati con Liquidi Penetranti ad ogni passata;

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 081	0	L	15	24

- ✓ le saldature di testa presenti sui vari componenti di impianto, dovranno essere radiografate; in alternativa si ammette ispezione con Liquidi Penetranti ad ogni passata.

PROVE IN PRESSIONE

A fine assemblaggio, l'ENEA richiede che vengano eseguite una prova di tenuta,

1. Prova pneumatica di tenuta per il serbatoio S100 e linea T101;
2. Prova pneumatica di tenuta per il serbatoio di stoccaggio S200 e linea T102

PULIZIA

Particolare attenzione dovrà essere riservata alla pulizia dei manufatti, sia in fase di fabbricazione che durante il trasporto. Dovrà essere garantito un alto livello di pulizia necessario ad evitare che residui di lavorazioni meccaniche, scorie di saldatura, polvere ecc. possano depositarsi all'interno dei componenti della facility.

Tutti i componenti dovranno essere sgrassati e decapati presso le officine del Fornitore, adottando un apposita procedura che dovrà essere elaborata e proposta dal Fornitore e successivamente approvata da ENEA.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 081	0	L	16	24

ESTENSIONE DELLA FORNITURA

La fornitura comprende, oltre ai manufatti descritti,

- la bulloneria;
- le guarnizioni di tenuta (3 per ogni giunto);
- valvole, componenti, giunti e raccordi per la facility;
- valvole, componenti, giunti e raccordi per il circuito gas dei serbatoi S100 ed S200;
- componenti e accessori per l'esecuzione delle prove di tenuta;
- bocchello di ingresso e uscita (1/2") acqua per ogni setto (#4) della facility;
- quadro elettrico di potenza e relativo cablaggio in sito con relativa certificazione.

La fornitura include, inoltre, il dossier di fine fabbricazione (in formato cartaceo ed elettronico), dove sono raccolti tutti i documenti riguardanti:

- P&ID definitivo;
- Layout definitivo (3D);
- l'approvvigionamento dei materiali e i relativi certificati;
- i disegni di officina necessari per la fabbricazione;
- la descrizione delle saldature e i controlli effettuati,
- le prove di tenuta realizzate e la relativa procedura adottata;
- le note di calcolo prodotte per i vari dimensionamenti effettuati;
- la procedura di sgrassatura e decapaggio adottata;
- le certificazioni richieste secondo la direttiva 97/23/CE (PED)

IMBALLO E TRASPORTO

Gli imballi dovranno essere idonei a garantire la conservazione della pulizia, la protezione delle parti e l'integrità strutturale della fornitura, durante il trasporto fino al sito ENEA del Brasimone.

INSTALLAZIONE ED ASSISTENZA IN SITO

Il Fornitore dovrà garantire la necessaria assistenza tecnica in sito, al fine di provvedere, coadiuvato dal personale tecnico ENEA, alla corretta installazione, primo avvio e il relativo collaudo della facility SOLIDX.

ACCETTAZIONE E GARANZIA

L'accettazione della fornitura avverrà presso il C.R. ENEA del Brasimone a seguito del esito positivo delle prova di tenuta sulla facility. In caso di esito negativo dell'accettazione della facility SOLIDX, sarà a completo carico del Fornitore apportare tutte le modifiche necessarie per soddisfare i requisiti di prestazioni e funzionalità riportate in Specifica Tecnica.

ESCLUSIONE DELLA FORNITURA

Sono esclusi dalla fornitura i seguenti componenti e sistemi:

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 081	0	L	17	24

- sistema di acquisizione dati e controllo potenza, sia nella componente software che hardware;
- sistema di coibentazione;
- piombo di riempimento impianto;
- circuito secondario di refrigerazione ad acqua.

DURATA DELLA FORNITURA, PENALI, PAGAMENTI

La presente fornitura dovrà essere ultimata entro il **30 Settembre 2014**.

Per ogni giorno solare di ritardo nella consegna della fornitura sarà applicata la penale dello 0,3% (tre per mille) dell'importo totale.

L'importo globale della penale applicabile non potrà superare, comunque, il 10% dell'importo totale della fornitura.

Qualora l'ammontare complessivo della penale ecceda il 10% del valore del contratto, il responsabile ENEA può risolvere il contratto e provvedere all'esecuzione in danno.

I pagamenti saranno effettuati, a fronte di presentazione di regolare fattura posticipata, come di seguito riportato:

- 50% dell'ammontare totale a esito positivo dell'accettazione del progetto concettuale di secondo livello e del progetto di dettaglio della facility;
- 50% dell'ammontare totale ad esito positivo dell'accettazione della fornitura in sito.

ALLEGATI

DATA SHEET VALVOLE PER METALLO LIQUIDO

BONT® Valvole a sfera in acciaio forgiato

Acciaio al carbonio - acciaio inossidabile

Tipo HTB, per alta temperatura

Rating DIN 2401 PN 40, PN 63 e PN 100

Rating ASME B16.34 Classe 300 and 600, full rated

Dimensioni da DN 15 a DN 100 - da 1/2" a 4"

- Queste valvole sono **MONODIREZIONALI**. Assicurarsi che la direzione del flusso corrisponda a quella indicata dalla freccia sul corpo.
- Queste valvole sono adatte per servizio continuo alla temperatura massima di 550 °C (1022 °F).
- Dimensioni da DN 15 a DN 100 - da 1/2" a 4"
- Progettate in accordo a: ASME B16-34, B16-5 B16-11, B16-25 MSS SP 72, BS 5351 DIN 2401, DIN 3239
- Certificate "Fire Safe" secondo API 6FA e BS 6775
- Certificate "TA LUFT"
- Costruzione "Split body", in tre pezzi
- Sfera flottante
- Sedi di tenuta in composito metallo/grafite brevettato
- Baderna "Long Life" registrabile con premitreccia
- Premitreccia: Flangiato - (Filettato su DN15 - 1/2")
- Stelo antiespulsione
- Valvola progettata intrinsecamente antistatica
- Coppia di manovra estremamente bassa grazie alle speciali sedi, guarnizioni e progetto
- Le valvole, anche già in esercizio, possono essere equipaggiate con un attuatore.
La connessione all'attuatore è in accordo allo standard ISO 5211

- Estremità:
 - Filettate NPT secondo ANSI B1.20.1
 - SW secondo ANSI B16.11
 - BW secondo ANSI B16.25
 - BW secondo DIN 3239
- **Esecuzioni flangiate:**
Secondo gli standard Europei (UNI, DIN, AFNOR, etc.) PN 40
Le flange sono "raised face" e forate secondo UNI 2229
Lo scartamento (A) è in accordo alla DIN 3202-F1

Secondo gli standard Europei (UNI, DIN, AFNOR, etc.) PN 63 e PN 100
Le flange sono "raised face" e forate secondo UNI 2229
Lo scartamento (A) è in accordo alla DIN 3202-F1

Secondo gli standard Americani ASME B16.34 Classe 300
Le flange sono R.F. forate secondo ASME B16.5
Lo scartamento (A) è in accordo alla ASME B16.10

Secondo gli standard Americani ASME B16.34 Classe 600
Le flange sono R.F. forate secondo ASME B16.5
Lo scartamento (A) è in accordo alla ASME B16.10

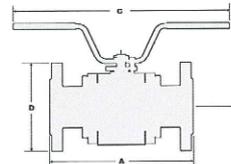


Fig. 941

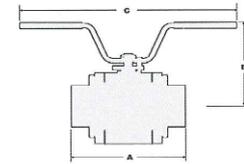


Fig. 942

BONT® Valvole a sfera tipo HTB - "Full Bore" (passaggio pieno)

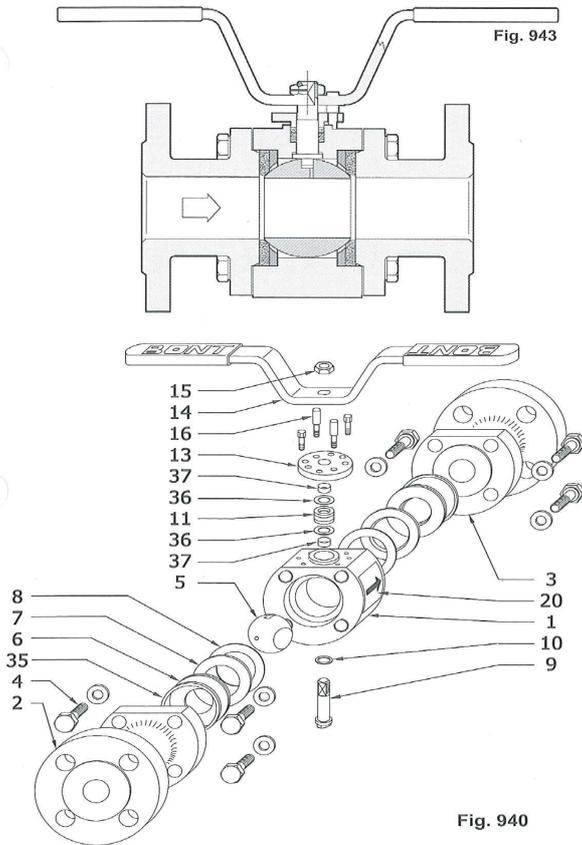
DN	Dimensioni		Filettate o SW o BW		Flangiate DIN PN 40			Flangiate DIN PN 63			Flangiate DIN PN 100			Flangiate ASME 300			Flangiate ASME 600			
	B mm	C mm	A mm	Peso kg	A mm	D mm	Peso kg	A mm	D mm	Peso kg	A mm	D mm	Peso kg	A mm	D mm	Peso kg	A mm	D mm	Peso kg	
1/2"	15	110	180	90	2,5	130	95	3,5	210	105	5	210	105	5	140	95	4,3	165	95	4,5
3/4"	20	140	210	100	3,2	150	105	4,7	230	130	6,7	230	130	6,7	152	117	5,4	191	117	6
1"	25	164	270	110	5,5	160	115	7	230	140	8,1	230	140	8,1	165	124	7	216	124	7,8
1.1/2"	30	215	350	140	7,6	180	140	11,6	260	155	14,4	260	155	14,4	178	133	10,5	229	133	11,4
1.1/2"	40	220	350	150	10,6	200	150	15,5	260	170	20,1	260	170	22,4	191	155	15,0	241	155	17,3
2"	50	230	350	170	14,7	230	165	22,5	300	180	24,2	300	195	26,5	216	165	21,9	292	165	23,6
2.1/2"	65	235	500	210*	29	290	185	43,7	340	205	47,2	340	220	50,6	241	190	43,7	330	190	46,0
3"	80	250	500	305*	35	310	200	50,0	380	215	53,8	380	230	57,5	283	209	50,0	356	209	52,9

Le valvole ASME Class 150 sono fornite su richiesta. Notare che gli scartamenti (Dimensione A) per le valvole ASME 150 sono identici a quelli ASME 300 - * valido per tipo BW

BONT® Valvole a sfera tipo HTB - "Reduced Bore" (passaggio ridotto)

DN	Dimensioni		Filettate o SW o BW		Flangiate DIN PN 40			Flangiate DIN PN 63			Flangiate DIN PN 100			Flangiate ASME 300			Flangiate ASME 600			
	B mm	C mm	A mm	Peso kg	A mm	D mm	Peso kg	A mm	D mm	Peso kg	A mm	D mm	Peso kg	A mm	D mm	Peso kg	A mm	D mm	Peso kg	
3/4"	20	110	180	90	2,9	150	105	3,9	230	130	5,3	230	130	5,3	152	117	4,6	191	117	4,8
1"	25	140	210	100	4	160	115	5,5	230	140	7,5	230	140	7,5	165	124	5,8	216	124	6,6
1.1/2"	32	164	270	110	6	180	140	7,5	260	155	8,8	260	155	8,8	178	133	8,5	229	133	9,5
1.1/2"	40	215	350	140	8,1	200	150	12	260	170	14,5	260	170	14,5	191	155	11,5	241	155	13,5
2"	50	220	350	150	11,2	230	165	16	300	180	20,7	300	195	23,0	216	165	17,3	292	165	19,6
2.1/2"	65	230	350	191*	17	290	185	24	340	205	25,9	340	220	28,8	241	190	25,3	330	190	27,6
3"	80	235	500	210*	31	310	200	45	380	215	48,9	380	230	52,3	283	209	47,2	356	209	50,6
4"	100	250	500	305*	38	350	235	52	430	250	55,8	430	265	59,8	305	254	54,1	432	273	57,5

Le valvole ASME Class 150 sono fornite su richiesta. Notare che gli scartamenti (Dimensione A) per le valvole ASME 150 sono identici a quelli ASME 300 - * valido per tipo BW



La valvola a sfera **BONT®** HTB è progettata per l'uso ad alta temperatura. La fondamentale innovazione di questa valvola è costituita dalle rivoluzionarie sedi di tenuta. Non si tratta delle usuali sedi metalliche, bensì di sedi "semi-morbide".

Le principali caratteristiche delle valvole HTB sono:

- Utilizzabili per ogni tipo di fluido compatibile con la grafite. Particolarmente adatte per applicazioni su Acqua/Vapore anche con alta pressione differenziale.
- Perfetta tenuta "Bubble Tight" in linea e verso l'esterno nell'intero range di applicabilità.
- Grande resistenza alla erosione.
- Molto efficaci nell'utilizzo con fluidi contenenti parti abrasive o fluidi "sporchi". Gli strati alternati di metallo e grafite della sede provvedono ad una pulizia superficiale della sfera ad ogni manovra di apertura e chiusura.
- Le caratteristiche della baderna eliminano ogni apprezzabile perdita o emissione nell'ambiente esterno.
- Assenza di manutenzione. Se tuttavia, per qualsiasi ragione, fosse mai richiesta la manutenzione della valvola, la sostituzione dei seggi è veramente semplice ed economica, grazie al loro ridotto costo ed alla loro capacità di auto adattarsi alla sfera.

Ciò elimina la necessità di dover sostituire contemporaneamente seggi di tenuta e sfera, come avviene nelle valvole con tenuta esclusivamente metallica ("metal to metal").

- **FIRE TEST** - Certificato n°. MLN9901225/1-2. E' importante sottolineare che la coppia di manovra prima e dopo il test è rimasta praticamente invariata.

- **TA-Luft TEST** - Certificato n°. 86T409.

Da sottolineare:

- Benchè consentito, non vi è stata necessità di ripristinare il serraggio della baderna durante il test.
- Le perdite rilevate sono state inferiori di qualche "ordine di grandezza" rispetto alle perdite ammesse.

Il test è stato effettuato alla temperatura di 427 °C (800 °F). Tale limite era imposto dal materiale del corpo valvola.

Utilizzando idonei materiali per il corpo valvola, sono stati effettuati con successo altri test alla temperatura di 550 °C.

Esecuzione costruttiva	Materiali impiegati	
	Corpo ed estremità	Sfera e stelo
52	ASTM A105	ASTM A182 F316 + S.H.
63	ASTM A182 F316	ASTM A182 F316 + S.H.

No.	Particolare	No.	Particolare
1	Corpo	11	Baderna
2	Estremità di ingresso	13	Flangia premitreccia
3	Estremità di uscita	14	Maniglia
4	Vite	15	Dado maniglia
5	Sfera	16	Tirante premitreccia/fermo
6	Seggio	20	Targhetta
7	Anello di appoggio	35	Guarnizione Autoseal *
8	Guarnizione	36	Anello distanziale ●
9	Stelo	37	Anello guidastelo ●
10	Anello antifrizione		

*solo: su Full Bore \geq DN 32 e \geq 1/4"
 su Reduced Bore \geq DN 40 e \geq 1.1/2"
 ●solo: su Full Bore \geq DN 20 e \geq 3/4"
 su Reduced Bore \geq DN 25 e \geq 1"

Condizioni operative per i materiali citati in questo catalogo

Max TEMPERATURA di esercizio secondo DIN	Max.Pressione secondo DIN 2401					
	Classe PN40 Esec. costr. 52	Classe PN40 Esec. costr. 63	Classe PN63 Esec. costr. 52	Classe PN63 Esec. costr. 63	Classe PN100 Esec. costr. 52	Classe PN100 Esec. costr. 63
	bar	bar	bar	bar	bar	bar
- 10 ÷ 20	40	40	63	63	100	100
120	40	40	63	63	100	100
200	35	35	50	50	80	80
250	32	32	45	45	70	70
300	28	28	40	40	60	60
350	24	24	36	36	56	56
400	21	21	32	32	50	50
425	-	-	-	-	-	-
450	-	-	-	-	-	-
500	-	-	-	-	-	-
550	-	-	-	-	-	-

Max TEMPERATURA di esercizio secondo ASME ed API	Max. PRESSIONE d'esercizio secondo ASME					
	Classe 150 Esec. costr. 52	Classe 150 Esec. costr. 63	Classe 300 Esec. costr. 52	Classe 300 Esec. costr. 63	Classe 600 Esec. costr. 52	Classe 600 Esec. costr. 63
	bar	bar	bar	bar	bar	bar
- 29 ÷ 38	19.6	19.0	51.1	49.6	102.1	99.3
100	17.7	16.2	46.4	42.2	92.8	84.5
200	14.0	13.7	43.8	35.7	90.5	71.2
250	12.1	12.1	41.7	33.4	83.4	66.7
300	10.2	10.2	38.7	31.6	77.5	63.1
350	8.4	8.4	37.0	30.4	73.9	63.1
400	6.5	6.5	34.5	29.3	69.0	58.9
425	5.6	5.6	28.8	29.0	57.5	58.3
450	4.7	4.6	20.0	29.0	40.1	57.7
500	2.8	2.8	8.8	27.3	17.6	54.8
550	-	1.6	-	23.8	-	47.8

Attacchi per la connessione ad attuatore secondo la norma ISO 5211

Full Bore	DN Red. Bore	Flang. ISO 5211	∅d2 f8	∅d3	∅d4 x e	h	A	B	C	D
1/2"	3/4"	F03	25	36	M5x6.5	2	∅9.8	6	4.5	10.5
3/4"	1"	F03	25	36	M5x8	3	M12	7.4	10	23.0
1"	1 1/4"	F04	30	42	M5x8	3	M12	7.4	14.5	30.5
1 1/4"	1 1/2"	F05	35	50	M6x8	3	M14	8.8	16	35
1 1/2"	2"	F05	35	50	M6x8	3	M14	8.8	16	35
2"	2 1/2"	F05	35	50	M6x8	3	M14	8.8	16	35
2 1/2"	3"	F07	55	70	M8x8	3	M24	18	27	61
3"	4"	F07	55	70	M8x8	3	M24	18	27	61

La coppia di manovra dell'attuatore dovrà essere determinata in base alle condizioni di esercizio della valvola.

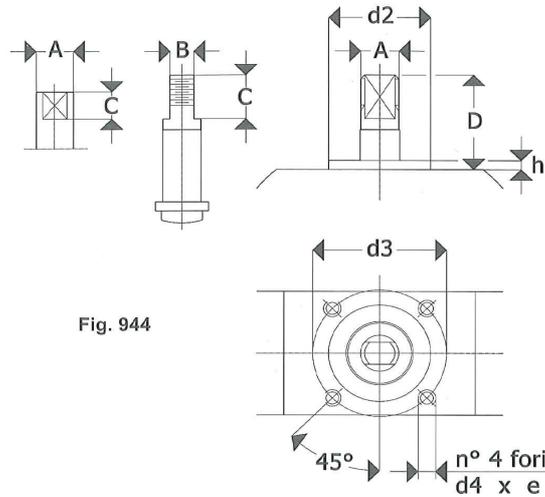


Fig. 944

Prolunga in caso di coibentazione

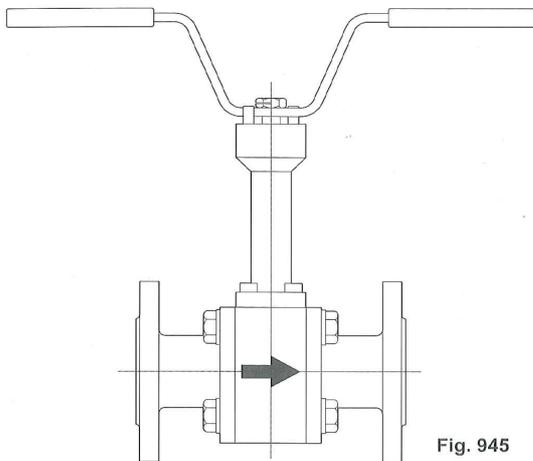


Fig. 945



ANNEX 1 – MODELLO CFD A SUPPORTO DEL DIMENSIONAMENTO DI S100

Viene qui descritto sinteticamente il modello sviluppato per il dimensionamento del serbatoio di prova S100. Il modello utilizza la Fluidodinamica computazionale (CFD) accoppiando i fenomeni di scambio termico convettivo nel fluido con la conduzione nei tubi e nel gap di polvere.

Attraverso il modello è stato possibile calibrare il gap di polvere tra T1 e T2 in modo da ottenere condizioni sperimentali volute a piena potenza. La scelta progettuale di utilizzare il gap di polvere di acciaio consente inoltre una grande semplificazione del circuito secondario ad acqua, che non deve essere in pressione e chiuso, ma può essere aperto ed utilizzare acqua alla pressione di rete.

Per la generazione del modello ed i calcoli è stato utilizzato il codice ANSYS CFX 15.

Il modello ha rispettato fedelmente la geometria di S100, ed una rappresentazione del modello e della mesh di calcolo è riportata in . Per il modello sono stati utilizzati $1.7 \cdot 10^6$ nodi, con elementi tetraedrici nel fluido con inflation sulle pareti di T1 a contatto con il piombo e sulla canna scaldante; sulle parti solide è stata adottata una mesh esaedrica ad elevata accuratezza. La risoluzione utilizzata è ritenuta ampiamente sufficiente per le velocità in gioco.

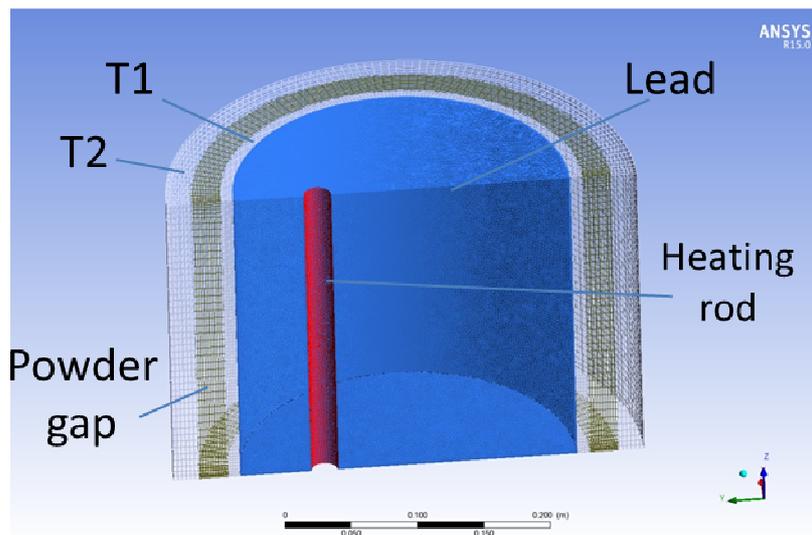


Figura 5 Modello CFD dell'apparecchiatura sperimentale SOLIDX.

Per la conducibilità dell'acciaio in T1 e T2 sono state utilizzati valori dipendenti dalla temperatura secondo l'espressione:

$$k_{AISI} = 14.35 + 0.0142 \cdot T [^{\circ}C] \quad (1)$$

Per la conducibilità della polvere sono stati utilizzate le correlazioni ottenute dalla facility TXP:

$$k_{SSPowder} = 8.725 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 7.840 \cdot 10^{-6} \cdot T + 0.523 \quad (2)$$

dove la temperatura è espressa in gradi Celsius.

Le dimensioni geometriche sono state mutuare dalla **Tabella 1**, mentre la potenza della canna scaldante è stata fissata al suo valore di progetto 2500 W. Esternamente al tubo T2 è stata imposta una condizione di HTC corrispondente ad una velocità di 1 m/s con temperatura dell’acqua di refrigerazione fissata a 20 °C. In ogni caso, la resistenza termica preponderante è quella del gap di polvere, mentre la struttura della stratificazione interna al piombo dipende dai moti convettivi che hanno luogo per convezione naturale.

Come è evidente dalla , è stata presa in considerazione una configurazione asimmetrica di canna scaldante, come già proposto in Figura 4 per S100.

Dal punto di vista termofluidodinamico, siamo in presenza di una cavità cilindrica con una sorgente interna di calore e le pareti refrigerate. In tale condizione, per effetto della convezione naturale, ha luogo un moto ascendente del fluido caldo e più leggero lungo le pareti della canna scaldante ed un moto discendente lungo le pareti refrigerate.

Tale struttura è evidenziabile in **Figura 6**, **Figura 7** e **Figura 8** dove sono rappresentati il modulo del vettore velocità, i vettori e le linee di corrente rispettivamente.

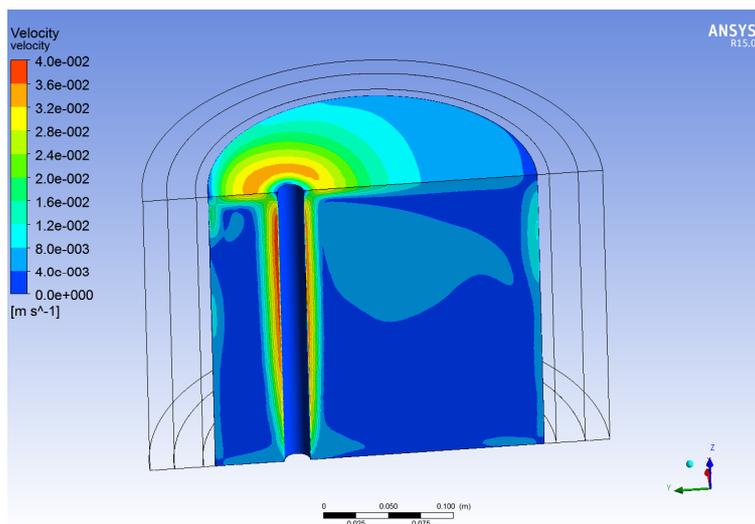


Figura 6 Modulo del vettore velocità nel recipiente S100.

I dettagli del moto del fluido sono in realtà molto più complessi di quanto detto sopra, come del resto è visibile in Figura 8 dalle linee di corrente. In ogni caso, nelle condizioni scelte, la massima velocità del fluido è dell’ordine di 40 mm/s ascendente lungo la canna scaldante. Ciò porta ad una costante di tempo idrodinamica dell’ordine del minuto. Possiamo quindi dire che dal punto di vista transitorio il fenomeno di scambio termico di S100 è dominato dalla costante di tempo nel gap di polvere, dell’ordine di:

$$\tau_{gap} \approx \frac{\delta_{gap}^2}{k} \cdot \rho c_p \approx 700 s \tag{3}$$

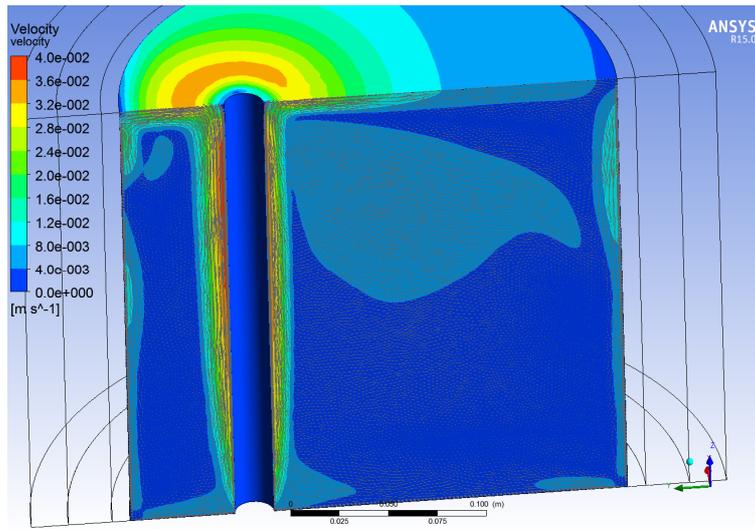


Figura 7 Modulo del vettore velocità nel recipiente S100 con i vettori velocità sovrapposti.

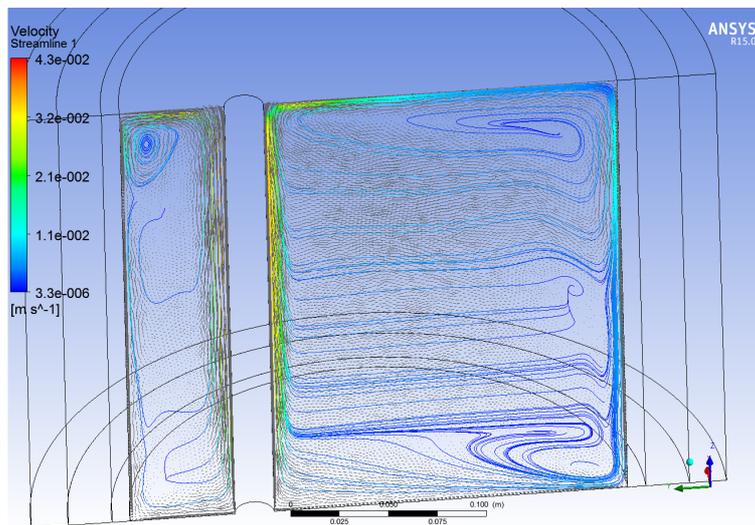


Figura 8 Vettori velocità e linee di corrente colorate con il modulo della velocità.

Come effetto combinato dello scambio termico convettivo e conduttivo (coniugato), otteniamo la distribuzione di temperatura a regime in **Figura 9**, che conserva il bilancio termico.

Possiamo notare che:

- ✓ Nelle condizioni scelte rimaniamo al di sopra della temperatura di congelamento nel piombo in tutti i punti;
- ✓ La stratificazione termica è principalmente verticale, e questo giustifica la scelta delle direzioni di misura ‘verticali’ illustrati in Figura 4.

Nel definizione dei dati di progetto della facility, la presenza della seconda canna scaldante in posizioni assiale (non modellata con la CFD), garantisce un margine per poter ottenere condizioni di totale liquefazione del piombo.

Abbassando la potenza delle canne scaldanti si potranno ottenere livelli di congelamento via via maggiori, con un congelamento che parte dal fondo del recipiente.

Le 16x4 termocoppie assiali permetteranno di discriminare lo spessore di piombo solidificato sul fondo del recipiente.

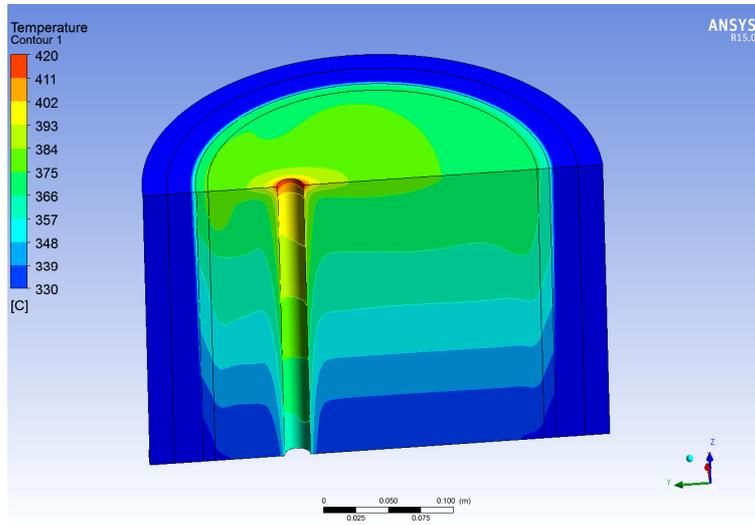


Figura 9 Distribuzione di temperature nel recipiente S100.