



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



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

# Rapporto tecnico di fine fabbricazione e assemblaggio di elemento di combustibile prototipico per sistemi LFR

*E. Ghisolfi*



**FN S.p.A.**

**NUOVE TECNOLOGIE  
E SERVIZI AVANZATI**

Report RdS/2012/048

RAPPORTO TECNICO DI FINE FABBRICAZIONE E ASSEMBLAGGIO DI ELEMENTO DI COMBUSTIBILE  
PROTOTIPICO PER SISTEMI LFR

E. Ghisolfi – FN

Settembre 2012

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 del Progetto: Mariano Tarantino, ENEA

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	UNITÀ ORGANIZZATIVA	SOTTOCOMMESSA / CENTRO	TIPO	N° PROGRESSIVO						
	<b>LAM</b>	<b>070</b>	<b>R</b>	<b>381</b>						
CLASSE DI PROGETTAZIONE	CLASSE DI RISERVATEZZA	CAT. DI ARCHIVIAZIONE	UNITÀ DI PREPARAZIONE	PAG. : 1						
<b>RC</b>	<b>II</b>	<b>CII</b>	<b>UTR/LAM</b>	62						
<b>ACCORDO DI PROGRAMMA MSE- ENEA PAR 2011</b>										
<b>TITOLO :</b>	Accordo di Collaborazione ENEA- FN per “Prove di fabbricabilità per lo sviluppo dell’elemento di combustibile LFR”  Deliverable LP3 – B3.b Rapporto tecnico di fine fabbricazione e assemblaggio di elemento di combustibile prototipico per sistemi LFR									
<b>LISTA DI DISTRIBUZIONE INTERNA</b>  PRE/AD Dr.ssa S. Baccaro ASQ/LAM Dr.ssa E. Ghisolfi LAB Dr.ssa C. Amelio			<b>LISTA DI DISTRIBUZIONE ESTERNA</b>  ENEA Ing. P. Turrone  ENEA Ing. M. Tarantino							
	DESCRIZIONE	REDAZIONE			APPROVAZIONE			AUTORIZZAZIONE		
<input type="checkbox"/>										
<input type="checkbox"/>										
<input checked="" type="checkbox"/>	EMISSIONE	14	09	12	17	09	12	17	09	12
		 E. Ghisolfi			 S. Baccaro			 S. Baccaro		
Il presente documento è RISERVATO ed è proprietà di FN S.p.A. Esso non sarà mostrato a terzi né sarà utilizzato per scopi diversi da quelli per i quali è stato trasmesso.										

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI          IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.            0  Pag. :    2    di :    62
--	---	--

## INDICE

<b>1.0 Introduzione</b>	<b>pag. 4</b>
<b>2.0 Documenti di riferimento</b>	<b>pag. 4</b>
<b>3.0 Descrizione attività svolte Ob. A</b>	<b>pag. 5</b>
<b>3.1 Premessa su attività Ob. A</b>	<b>pag. 5</b>
<b>3.2 Composizione del fascio</b>	<b>pag. 7</b>
<b>3.3 Inserimento del fascio nel tubo esagonale</b>	<b>pag. 14</b>
<b>3.4 Conclusioni obiettivo A</b>	<b>pag. 17</b>
<b>4.0 Descrizione attività svolte Ob. B</b>	<b>pag. 18</b>
<b>4.1 Premessa su attività Ob. B</b>	<b>pag. 18</b>
<b>4.2 Materiale impiegato</b>	<b>pag. 22</b>
<b>4.3 Breve excursus sulle tecniche di “giunzione”</b>	<b>pag. 25</b>
<b>4.4 Prima tipologia di “giunzione” presa in esame: saldatura (A)</b>	<b>pag. 27</b>
<b>4.4.1 Progettazione, elaborazione disegni esecutivi e realizzazione provini per saldatura</b>	<b>pag. 31</b>
<b>4.4.2 Risultati preliminari ottenuti</b>	<b>pag. 36</b>
<b>4.5 Seconda tipologia di “giunzione” presa in esame: “imbutitura” (B)</b>	<b>pag. 40</b>
<b>4.5.1 Progettazione, elaborazione disegni esecutivi e realizzazione provini per “imbutitura”</b>	<b>pag. 41</b>
<b>4.5.2 Prove preliminari</b>	<b>pag. 43</b>
<b>4.5.3 Risultati preliminari ottenuti</b>	<b>pag. 47</b>
<b>4.6 Terza tipologia di “giunzione” presa in esame: filettatura “con guarnizione” (C)</b>	<b>pag. 48</b>
<b>4.6.1 Progettazione, elaborazione disegni esecutivi e realizzazione provini per “ con guarnizione”</b>	<b>pag. 48</b>
<b>4.6.2 Prove preliminari</b>	<b>pag. 52</b>
<b>4.6.3 Risultati preliminari ottenuti</b>	<b>pag. 53</b>
<b>4.7 Conclusioni Obiettivo B</b>	<b>pag. 55</b>
<b>5.0 Conclusioni generali</b>	<b>pag. 58</b>

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI          IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.            0  Pag. :    3    di :    62
--	---	--

## **Allegati**

### **All. 0: Specifiche preliminari banco di assemblaggio**

**All. 1: dis. J 50 0117 – ADP ENEA – LP3 PAR 2011 Giunzione griglia –barretta tipo  
 “A”: saldatura; prova preliminare componente singolo**

**All. 2: dis. J 50 0119 – ADP ENEA – LP3 PAR 2011 Giunzione griglia – barretta tipo  
 “A” : saldatura; componente griglia**

**All. 3: dis. J 50 0120 – ADP ENEA – LP3 PAR 2011 Giunzione griglia – barretta tipo  
 “A”: saldatura; componenti barretta, tubo, tappo**

**All. 4: dis. J 50 0118 – ADP ENEA – LP3 PAR 2011 Giunzione griglia – barretta tipo  
 “A”: saldatura: assieme provino – assemblaggio finale**

**All. 5: dis. J 50 0114 – ADP ENEA – LP3 PAR 2011 Giunzione griglia –barretta tipo  
 “B”: imbutitura; prova preliminare componente singolo**

**All. 6: dis. J 50 0125 – ADP ENEA – LP3 PAR 2011 Giunzione griglia – barretta tipo  
 “B” : imbutitura; componente griglia**

**All. 7: dis. J 50 0126 – ADP ENEA – LP3 PAR 2011 Giunzione griglia – barretta tipo  
 “B”: imbutitura; componenti barretta, tubo, tappo**

**All. 8: dis. J 50 0115 – ADP ENEA – LP3 PAR 2011 Giunzione griglia – barretta tipo  
 “B”: imbutitura: assieme provino – assemblaggio finale**

**All. 9: dis. J 50 0121 – ADP ENEA – LP3 PAR 2011 Giunzione griglia –barretta tipo  
 “C”: con guarnizione; prova preliminare componente singolo**

**All. 10: dis. J 50 0123 – ADP ENEA – LP3 PAR 2011 Giunzione griglia – barretta tipo  
 “C” : con guarnizione; componente griglia**

**All. 11: dis. J 50 0124 – ADP ENEA – LP3 PAR 2011 Giunzione griglia – barretta tipo  
 “C”: con guarnizione; componenti barretta lunga, corta e griglia**

**All. 12: dis. J 50 0122 – ADP ENEA – LP3 PAR 2011 Giunzione griglia – barretta tipo  
 “C”: con guarnizione: assieme provino – assemblaggio finale**

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI          IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.            0  Pag. :    4    di :    62
--	---	--

## 1.0 Introduzione

Il presente rapporto descrive quanto svolto da FN nell'ambito dell'Accordo di collaborazione con ENEA per un'attività dal titolo: Prove di fabbricabilità per lo sviluppo dell'elemento di combustibile LFR. Tale Accordo rientra nell'Accordo di Programma MSE-ENEA – Piano Annuale di Realizzazione 2011 ed è relativo alla tematica di ricerca “Energia Nucleare”; si riferisce alla linea progettuale LP3 “Reattori di IV Generazione” obiettivo B – Materiali strutturali del progetto Nuovo Nucleare da fissione: collaborazioni internazionali e sviluppo competenze in materia nucleare.

Il presente rapporto costituisce il deliverable LP3 – B3.b previsto dal PAR 2011 e racchiude le due relazioni, concernenti i due obiettivi dell'Accordo di collaborazione con ENEA, già consegnate ad ENEA a supporto delle rendicontazioni intermedie e denominate con le seguenti sigle:

- LAM 070 R 377 rev.0 – *Rapporto a supporto rendicontazione ob. A: “Valutazione preliminare circa il montaggio di elementi di combustibile esagonali chiusi”*
- LAM 070 R 379 rev.0 – *Rapporto a supporto rendicontazione ob. B: “Prove di fabbricabilità relative al collegamento barretta/supporto elementi quadrati aperti “vented”.*

## 2.0 Documenti di riferimento

- Accordo di collaborazione ENEA – FN siglato il 02/02/2012 e relativo allegato tecnico: “Prove di fabbricabilità per lo sviluppo dell'elemento di combustibile LFR”
- Documentazione tecnica varia fornita da ENEA
- Documentazione bibliografica

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI          IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.            0  Pag. :    5    di :    62
--	---	--

### **3.0    Descrizione attività svolte obiettivo A**

#### **3.1    Premessa su attività Ob. A**

ENEA, in qualità di progettista del nocciolo LFR (Lead Fast Reactor), ha in studio alcune soluzioni progettuali. Fra queste si trova quella che contempla l'impiego di elementi di combustibile esagonali chiusi tipo SPX1.

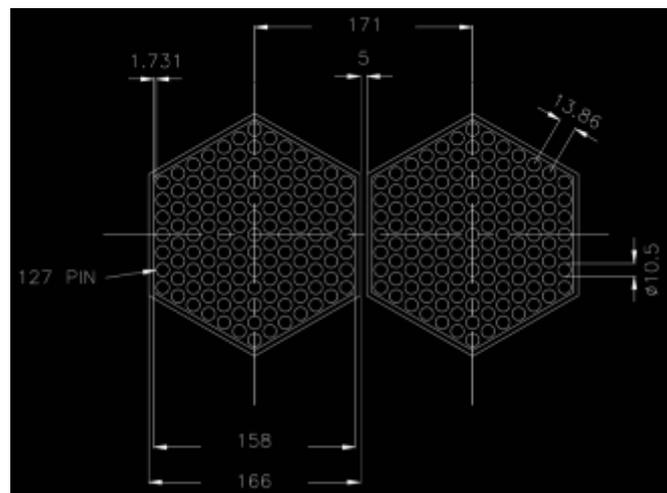
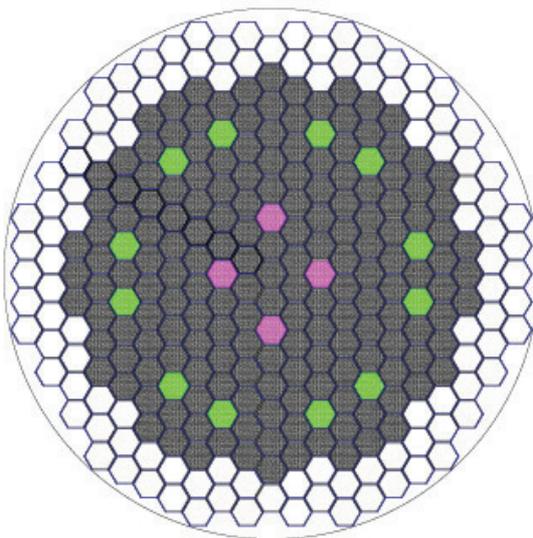
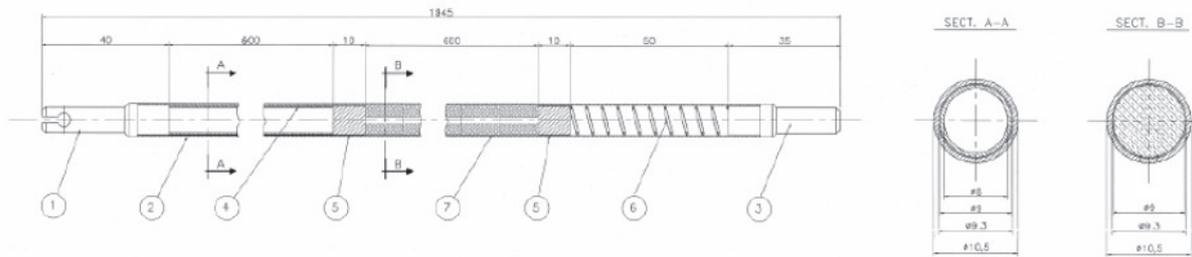
Sulla base delle precedenti esperienze maturate da FN in campo nucleare, soprattutto anche in ambito SPX, ENEA ha ritenuto opportuno richiedere ad FN uno studio di massima per valutare le problematiche operative e realizzative dell'assemblaggio di elementi esagonali chiusi con le relative griglie spaziatrici. L'impiego del piombo al posto del sodio pone infatti la problematica, qualora si scelga una geometria di questo tipo, dell'utilizzo di griglie spaziatrici al posto del filo spaziatore a causa del maggiore passo fra le barrette che compongono l'elemento di combustibile.

Le alternative di montaggio prese in considerazione sono due:

- l'introduzione delle barrette all'interno del condotto con griglie fissate al condotto esagonale
- l'introduzione all'interno del condotto esagonale del fascio munito di griglie.

Di seguito verrà data descrizione dei motivi che hanno portato alla scelta di una delle soluzioni e illustrata una possibile sequenza di montaggio.

Per quanto riguarda la geometria esagonale, ENEA ha deciso di seguire la configurazione adottata nel progetto ALFRED (vedi rappresentazione schematica del core in Fig. 1).



- 171  Fuel Assembly
- 16  Control Rod
- 16  Safety Rod
- 108  Dummy Element

Fig. 1 – ALFRED Core

Il passo del reticolo del fascio di barrette di ALFRED è 13.9 mm. Questo implica che la celletta esagonale che viene realizzata dalle lamine di griglia presenta dei lati di poco più di 8 mm. Le dimensioni di cella sono praticamente dimezzate rispetto ai PWR o BWR e questo rappresenta un fattore non trascurabile sulla difficoltà di realizzazione.

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI          IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.            0  Pag. :    7    di :    62
--	---	--

Come già descritto sopra, FN è stata incaricata da ENEA di effettuare una valutazione preliminare circa le modalità più convenienti per l'assemblaggio dell'elemento di combustibile esagonale con le griglie spaziatrici e l'inserimento nel tubo esagonale di contenimento.

Le soluzioni proposte da ENEA erano due:

- introduzione delle barrette all'interno del tubo esagonale con griglie fissate alla stessa
- introduzione all'interno del tubo esagonale del fascio munito di griglie.

Sulla base di valutazioni pratiche e dell'esperienza maturata con elementi tipo SPX, si è visto che la prima soluzione non era molto praticabile; in primis si tratta di operare con barrette "calde" e quindi occorre cercare di remotizzare il più possibile le operazioni; in questo senso pensare di centrare il collocamento delle singole barre di combustibile in un condotto esagonale munito di griglie (dalle dimensioni molto piccole, inteso come spessori, e quindi molto delicate) in remoto è sicuramente una complicazione.

A prescindere dal discorso "materiale radioattivo", le operazioni di inserimento delle barre singole (anche "fredde") all'interno degli appositi spazi definiti dalle griglie con tolleranze molto strette risultano di difficile realizzazione. Inoltre, sia le barre sia le griglie potrebbero subire danneggiamenti nello sfregamento reciproco nella fase di inserimento e quindi compromettere l'integrità del fascio. Una volta che il fascio fosse inserito completamente non sarebbe più verificabile (soprattutto visivamente) l'integrità dello stesso.

Per le motivazioni su esposte si è deciso di optare per la seconda soluzione. In questo caso il fascio di barrette verrebbe creato in assetto orizzontale, su un banco opportunamente realizzato (vedi allegato 0) e strumentato in modo che possa operare anche con controllo remoto. Tale banco, dotato della possibilità di essere ribaltato in verticale, sarebbe utilizzato anche per l'inserimento del fascio all'interno del tubo esagonale.

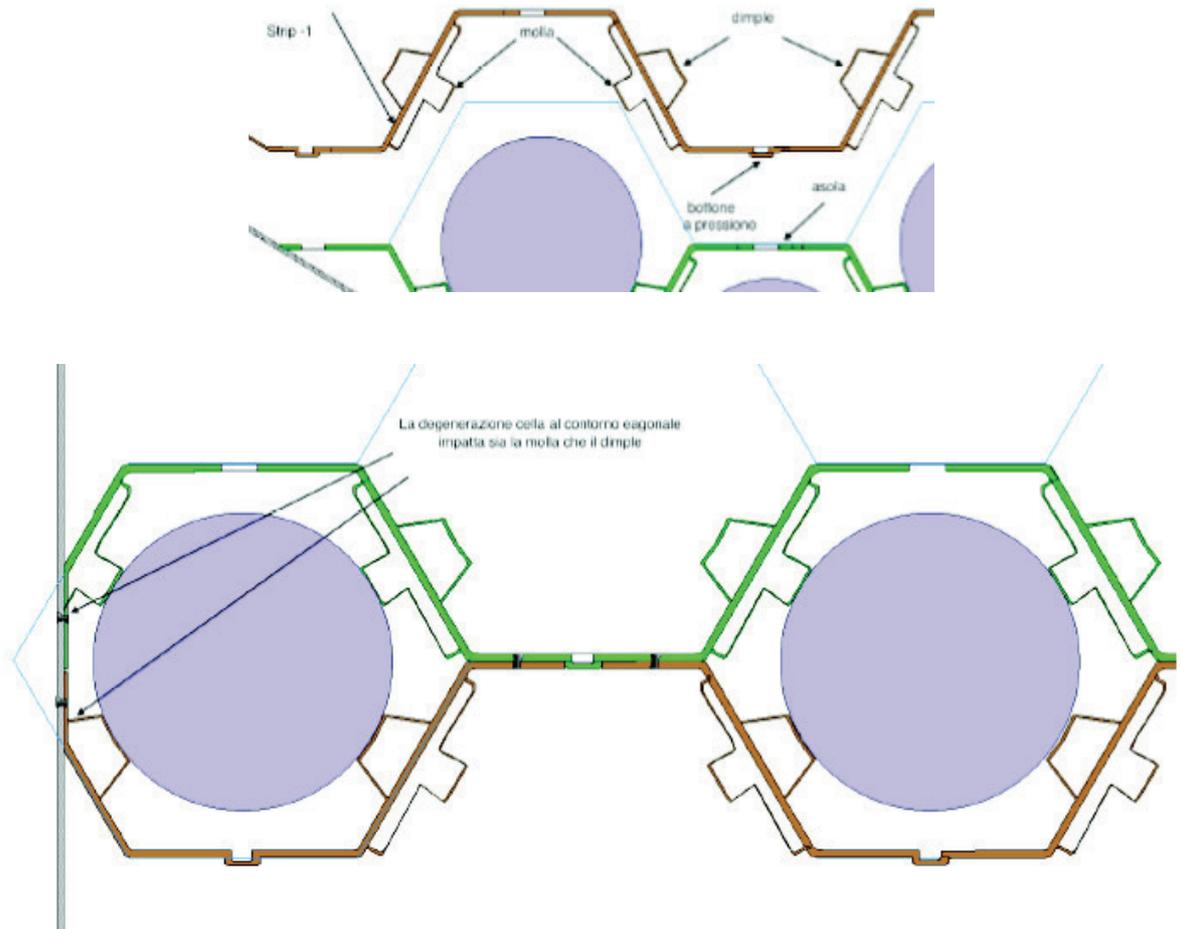
Di seguito si riporta schematicamente il risultato dello studio effettuato da FN su come intenderebbero condotte le operazioni di composizione del fascio (3.2) e di inserimento delle barre nel tubo esagonale (3.3).

### **3.2 Composizione del fascio**

Il fascio verrebbe composto per piani successivi deponendo le barrette su apposite "strips" di lamierino intagliato e stampato con un motivo costante che configura una semicella provvista di molla e dimple. Le strips suggerite da ENEA sarebbero di due tipi: una inferiore che fungerebbe da

letto per le barrette che vi vengono appoggiate, una superiore che costituirebbe la volta. Le due tipologie di strips verrebbero poi collegate mediante appositi “bottoni” a incastro e con l’ausilio di alcune puntature. La geometria delle strips deve tener conto del diverso numero di barrette che accolgono perché i piani di sezione longitudinale del fascio esagonale presentano appunto ranghi con diversi numeri di barrette e poi necessitano adattamenti agli estremi di interfaccia con le pareti di scatola esagonale.

In Fig. 2 è mostrata la tipologia di strips e la loro configurazione complessiva a formare la griglia esagonale.



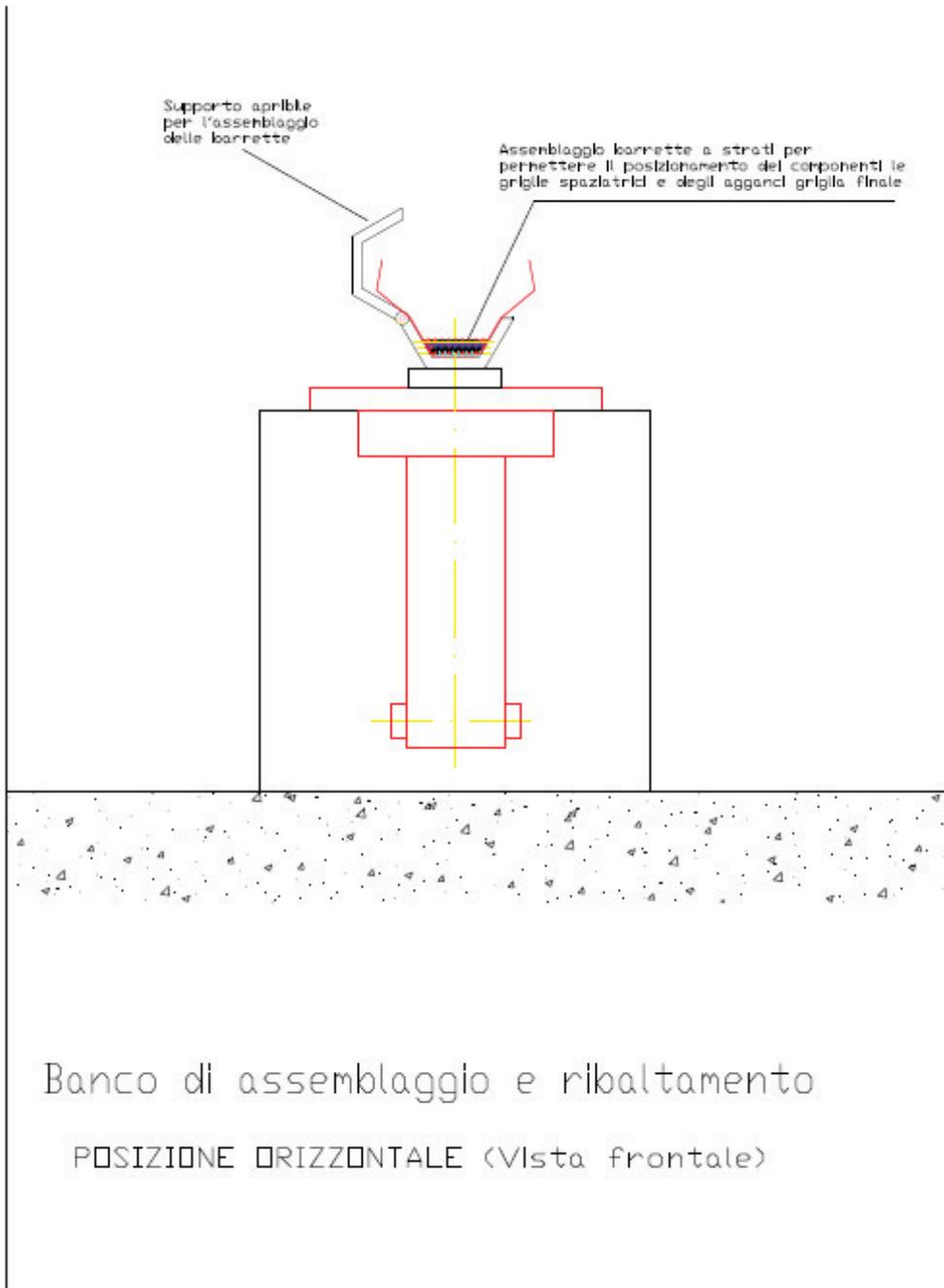
**Fig. 2 – Tipologia di strips con molle e dimples**

Il materiale delle griglie può essere lo stesso scelto per le barre, ossia Z10 CNDT 15-15 B, che presenta buone caratteristiche di lavorabilità di macchina.

Nelle figure seguenti è riassunta la sequenza della composizione del fascio, partendo dalla allocazione del supporto apribile esagonale sul banco in assetto orizzontale (supporto che poi sarà rimosso quando il fascio sarà in verticale nella fase di inserimento dello stesso nel tubo esagonale),

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI IDENTIFICAZIONE</b> LAM 070 R 381	Rev.           0 Pag. :   9    di :   62
--	--	---

della guaina esagonale collegata alle strips, delle strips di fondo e dell'inserimento progressivo delle barre partendo da un lato dell'esagono (con le relative strips superiori) e salendo fino alla mezzeria; a questo livello viene inserita anche una griglia finale che serve mantenere l'ancoraggio del fascio al piede dell'elemento.



**Fig. 3 – Banco in assetto orizzontale – fase di composizione del fascio**

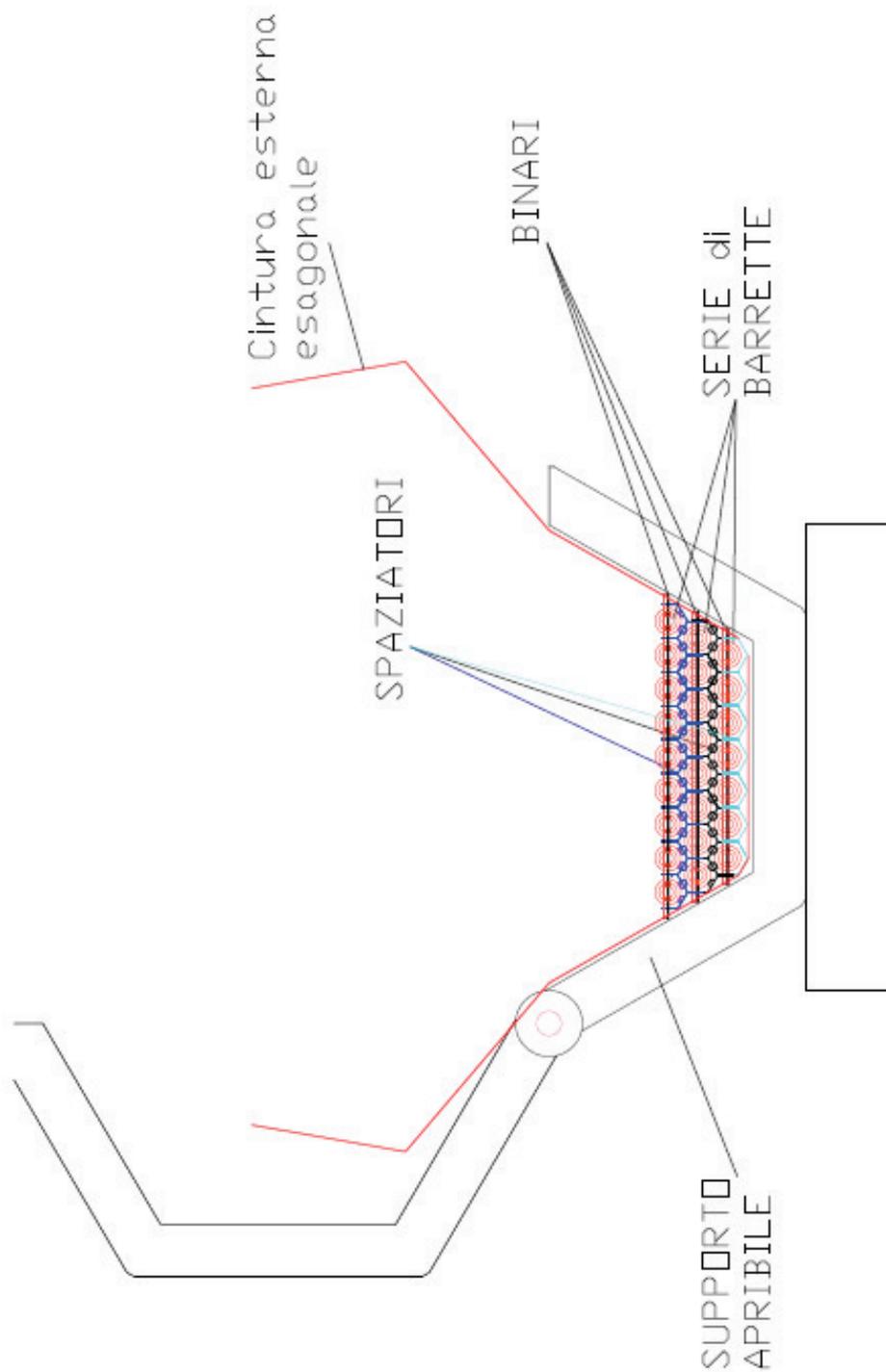
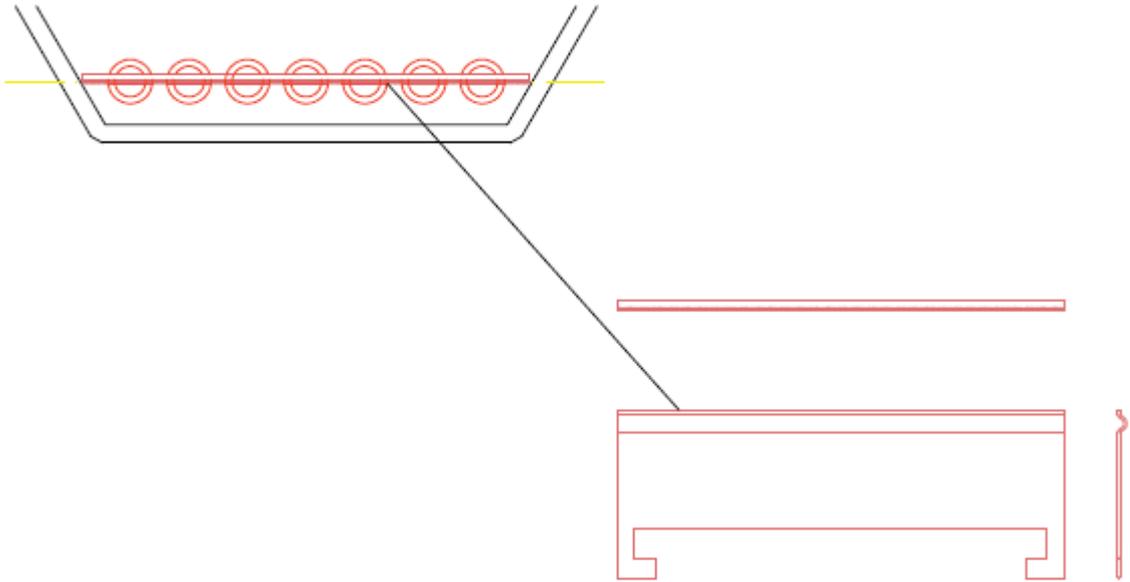


Fig. 4a – Particolare del posizionamento delle barrette



Particolare binario per aggancio tappo con griglia finale

**Fig. 4b – Particolare: binario per aggancio tappo con griglia finale**

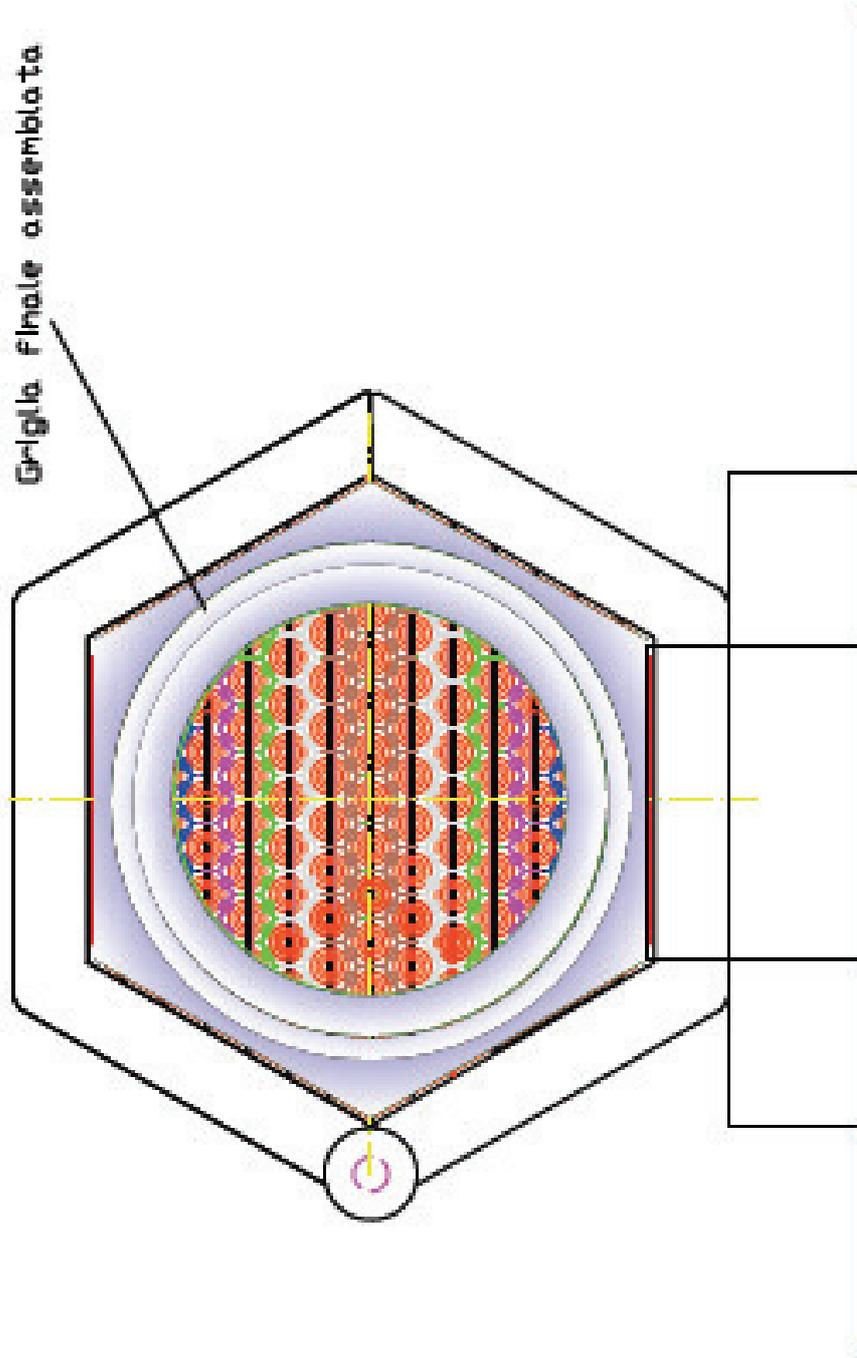
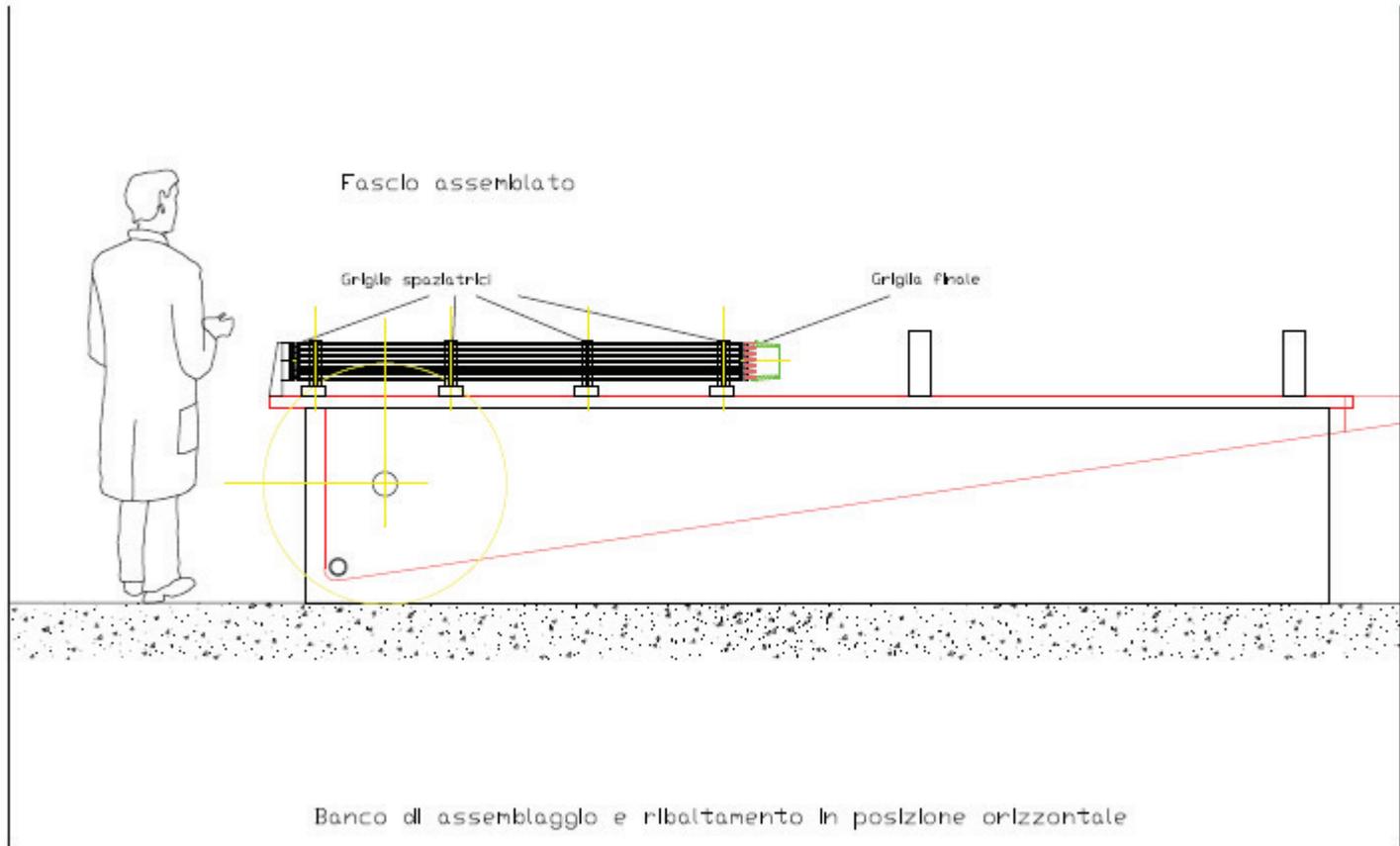


Fig. 4c – Vista del fascio completamente assemblato posto sul banco in posizione orizzontale



**Fig. 5 – Fascio completo posizionato sul banco prima di essere “appeso” e messo in verticale per l’inserimento nel tubo esagonale**

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.           0  Pag. :   14   di :   62
--	--	---

### 3.3 Inserimento del fascio nel tubo esagonale

Una volta realizzato il fascio, opportunamente dotato delle griglie spaziatrici, questo deve essere inserito nel tubo esagonale. Di seguito si riporta una breve descrizione della possibile sequenza operativa che prevede, come già accennato, l'impiego dello stesso banco di montaggio che dall'assetto orizzontale può passare a quello verticale, mediante un semplice meccanismo di ribaltamento:

1. Il fascio, precedentemente assemblato con le griglie, si trova sul banco in orizzontale; in asse, e sempre in appoggio sullo stesso banco, viene posizionato il tubo esagonale già dotato di piede d'appoggio (Fig. 6); il banco è dotato di una slitta a cui, previa verifica che non vi siano corpi estranei nel condotto, viene vincolato il tubo esagonale; tale slitta può traslare in verticale verso il basso mantenendo il tubo in asse e consentendo il suo calettamento sul fascio.

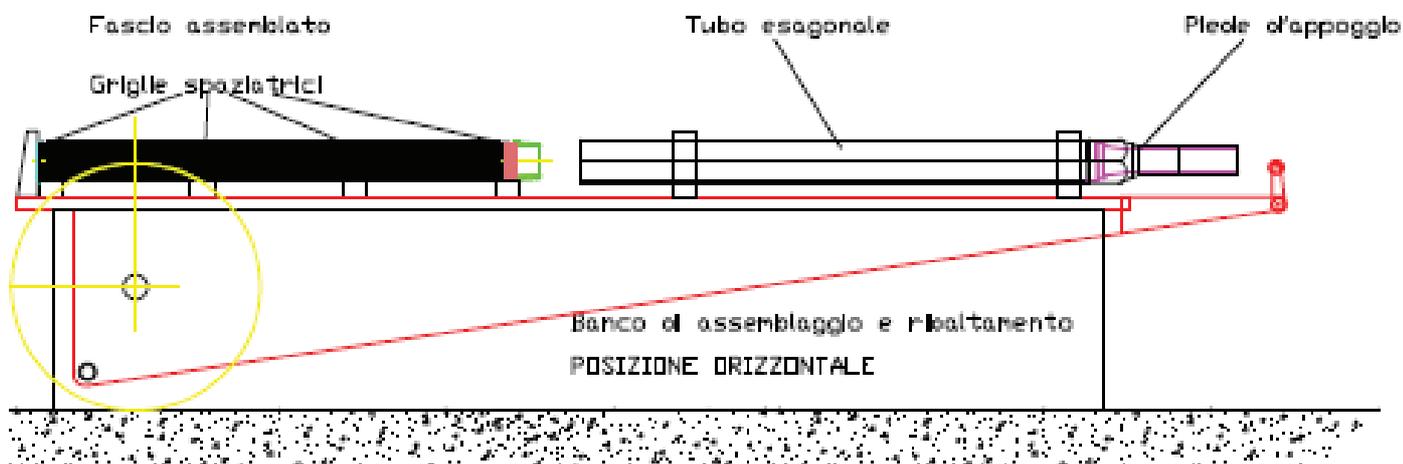
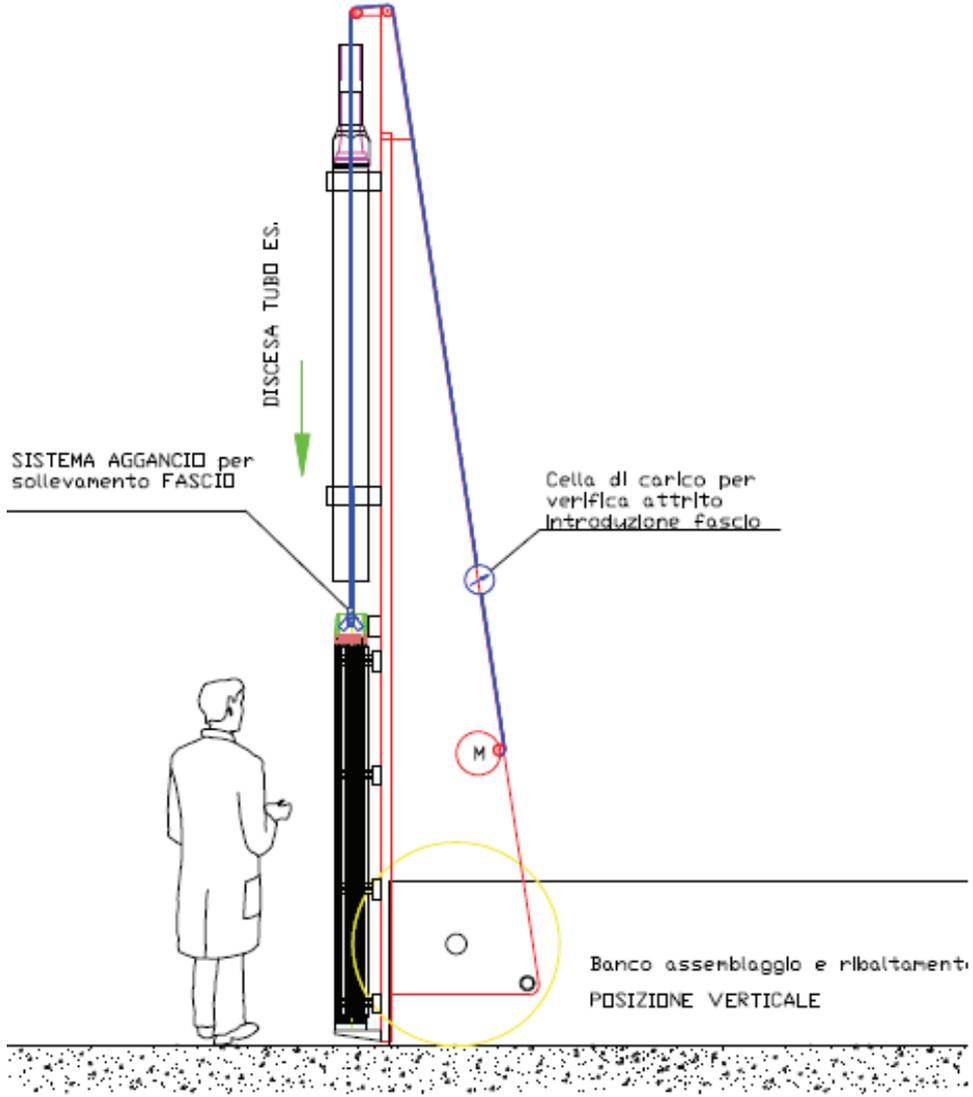


Fig. 6 – Banco per il montaggio in posizione orizzontale

2. Giunti a questo punto si inserirà all'interno del condotto esagonale un'asta in acciaio inox dotata ad un'estremità di un sistema tale da ancorare la griglia superiore del fascio; all'altra estremità del filo si predisporrà uno strumento (cella di carico) in grado di rilevare gli sforzi di attrito; successivamente si metterà in tiro il filo e si solleverà il fascio di un cm dalla base.



**Fig. 7 – Banco di assemblaggio e ribaltamento in posizione verticale**

3. Il fascio viene appoggiato, una volta messo in verticale, su un supporto opportuno (morbido) e viene sostenuto da supporti chiusi, apribili nella fase di inserimento all'interno del tubo esagonale;

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI          IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.            0  Pag. :    16    di :    62
--	---	---

4. Si azionerà quindi la discesa della slitta verticale. In questa fase si avrà l'inizio del calettamento del tubo esagonale sul fascio; man mano che il tubo scenderà i supporti retrattili si apriranno per lasciare passare il tubo stesso.
5. Nel caso in cui si incontrino degli sforzi di attrito elevati durante l'inserimento del fascio, questi saranno comunque rilevati dal dispositivo digitale e se il valore misurato sarà superiore a quello di specifica permesso ed impostato, la discesa del condotto sarà automaticamente bloccata.
6. Il dispositivo di misura sarà opportunamente tarato prima dell'inizio delle operazioni in modo da essere sicuri del suo corretto funzionamento e della corretta lettura.
7. Quando il condotto sarà completamente calettato la slitta agirà su un interruttore che toglierà l'alimentazione ai motori di traslazione e arresterà l'avanzamento del tubo stesso.
8. Qualora si riscontrino anomalie o mal funzionamenti o valori di attrito superiori a quelli di specifica il condotto verrà estratto dal fascio e si verificherà la situazione in modo da definire la causa della non conformità e poter intraprendere le opportune azioni correttive.
9. La pressione esercitata dalle molle delle griglie spaziatrici dovrebbe essere tale da mantenere per attrito in posizione le griglie stesse. In ogni caso si prevede di inserire delle astine in appoggio fra le barrette (tipo chiavette) durante la composizione del fascio ed estraibili alla fine dell'inserimento del fascio stesso nel tubo esagonale.
10. Al termine dell'operazione di inserimento del condotto si verificherà che la griglia finale sia in posizione corretta mediante l'impiego di un calibro idoneo.
11. Una volta che il tubo sia stato completamente calettato, verrà fissato alla griglia finale e quindi vincolato al fascio mediante grani tirati con una coppia di serraggio stabilita e poi saldati; si toglierà il sistema di afferraggio.
12. Ultimata la fase di montaggio, la slitta verticale sarà azionata per sollevare l'insieme e riportarlo in posizione orizzontale.

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI          IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.            0  Pag. :    17    di :    62
--	---	---

### **3.4 Conclusioni obiettivo A**

Partendo dalle specifiche ENEA relative al core ALFRED ed alle geometrie suggerite per le griglie spaziatrici, basandosi sia sull'esperienza maturata in ambito nucleare con la realizzazione di diverse ricariche per centrali nazionali ed estere, nonché per il reattore Superphenix (elementi esagonali freddi), si è individuata la migliore sequenza per la composizione del fascio e per il suo inserimento nel tubo di contenimento esagonale.

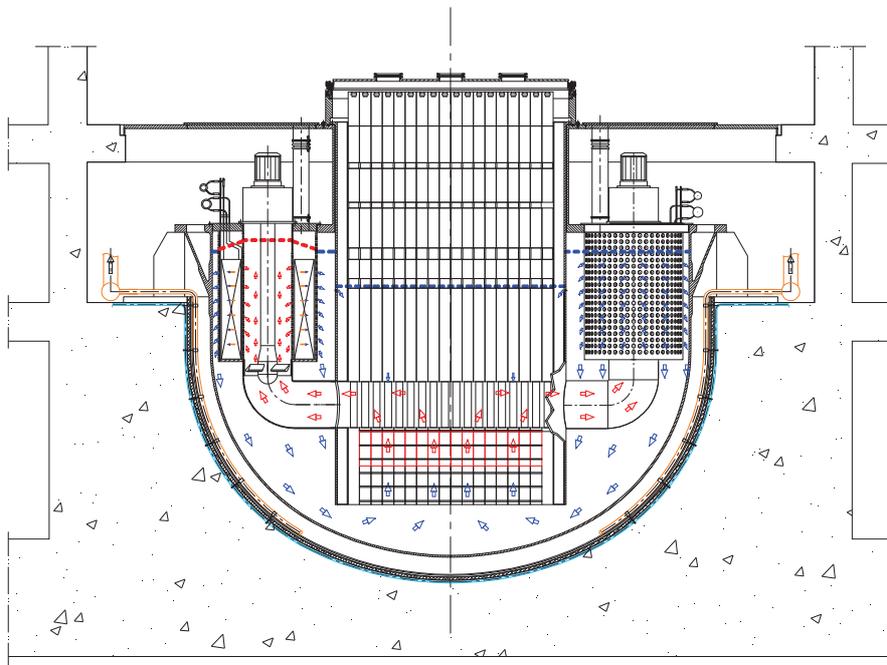
Sia per la composizione del fascio con le relative griglie spaziatrici sia per il suo inserimento nel tubo esagonale, si è pensato di utilizzare un banco opportunamente strumentato per poter operare anche in remoto (data la presenza di materiale radiogeno all'interno delle barre) ed in grado di lavorare sia in assetto orizzontale (composizione del fascio e collocamento in asse del fascio e del tubo) ed in verticale (inserimento del tubo sul fascio).

**4.0 Descrizione attività svolte Ob. B**

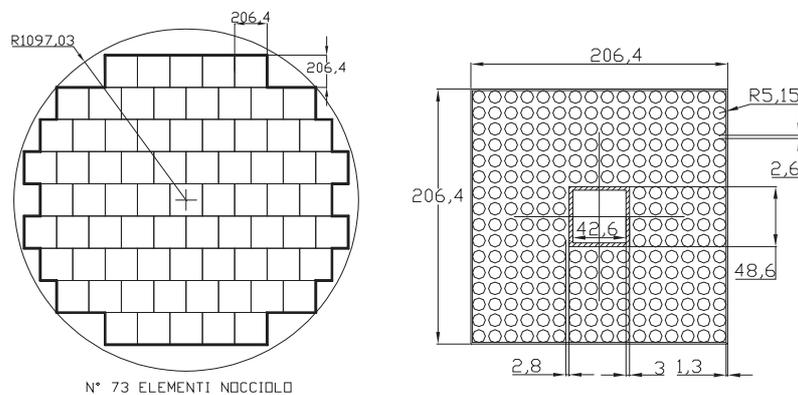
**4.1 Premessa su attività Ob. B**

La seconda soluzione progettuale individuata da ENEA per il nocciolo contempla l'impiego di elementi di combustibile quadrati "vented".

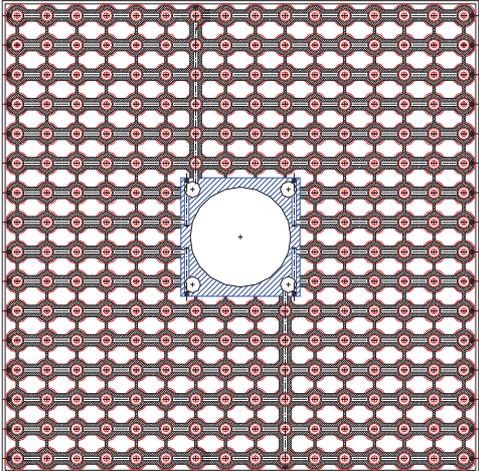
Relativamente a questa tipologia di elementi di combustibile, è stata ideata una soluzione innovativa che non prevede l'estensione della barretta combustibile per contenere i gas di fissione, ma il rilascio dei prodotti gassosi verso volumi chiusi sul prolungamento superiore dell'elemento di combustibile ad una distanza di circa un metro dalla zona attiva.



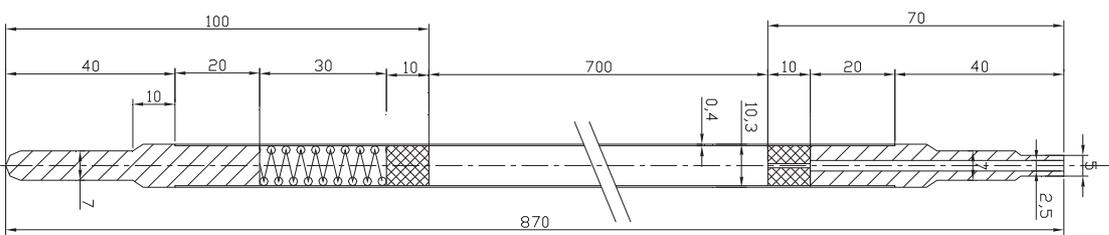
**Fig. 8 – Schema di massima della configurazione con gli elementi "vented"**



**Fig. 9 – A sinistra disposizione degli elementi, a destra composizione di un singolo elemento quadrato "vented"**



**Fig. 10 – Griglia di supporto delle barrette con canalizzazioni per gas**



**Fig. 11 – Barretta di combustibile**

Questa soluzione richiede un collegamento a tenuta (dei prodotti di fissione, inclusi quelli gassosi) fra un'estremità forata della barretta combustibile ed il suo supporto (vedi schizzi di massima in figura 12).

Si presentano quindi due ordini di difficoltà per detti collegamenti, in quanto sono da realizzare in spazi limitati (i passi tra le barrette sono dell'ordine di pochi millimetri) e perché devono, ovviamente, essere di alta qualità per garantire la tenuta anche a seguito di transitori termici e di irraggiamento sotto alto flusso neutronico veloce.

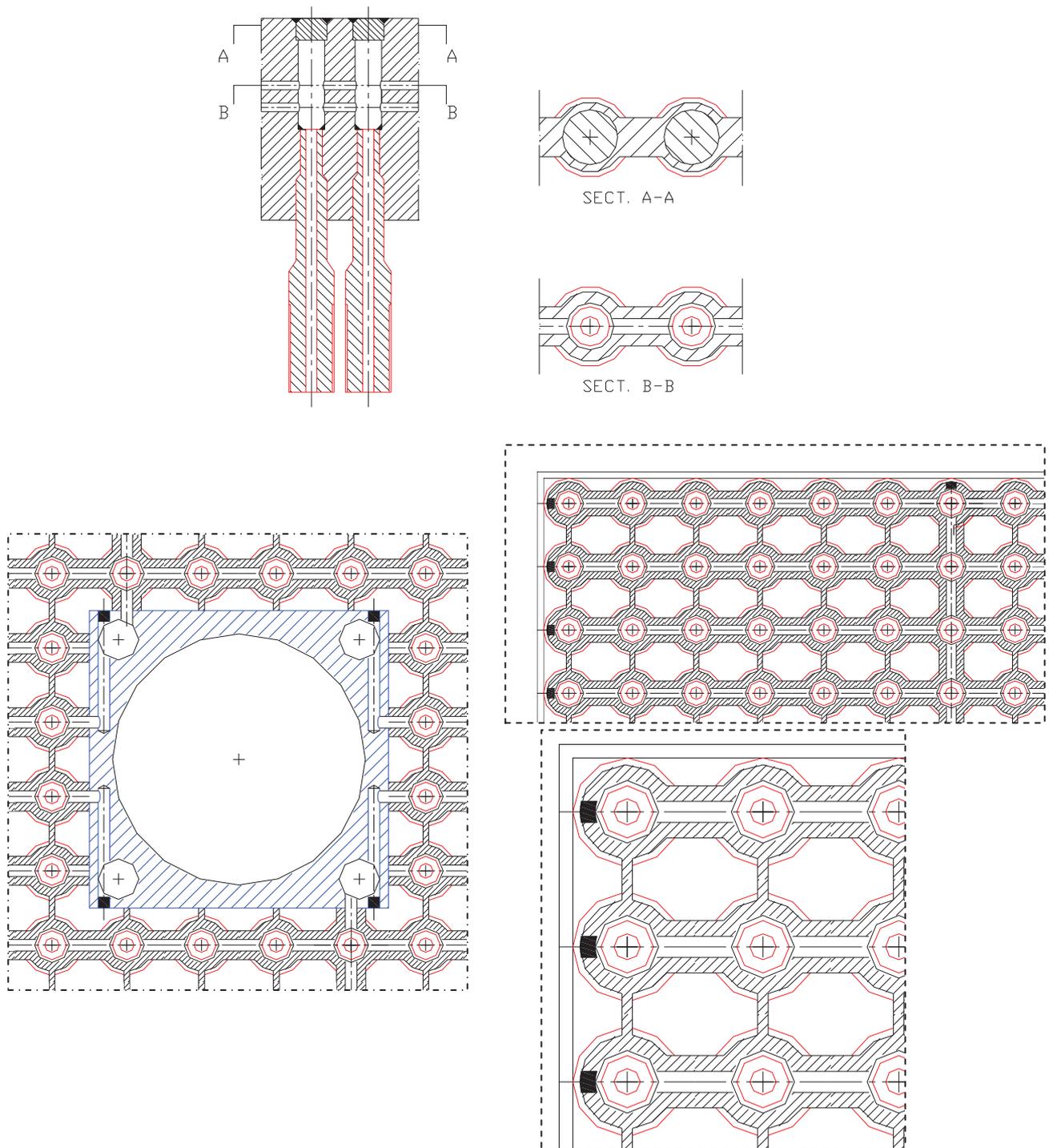


Fig. 12 – Schizzi di massima del collegamento fra barrette e supporto (griglia) con canali per adduzione gas

L'ENEA, a titolo preliminare, per tali collegamenti ha individuato tre possibili soluzioni che consistono in:

- saldatura
- tipo a rivetto

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI          IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.            0  Pag. :    21    di :    62
--	---	---

- filettatura a tenuta di gas.

ENEA ha ritenuto opportuno richiedere ad FN uno studio di massima per valutare la fattibilità di tali soluzioni o di alternative soluzioni per il collegamento barretta/supporto (griglia) di questo tipo di elementi.

Partendo da queste indicazioni, FN ha sviluppato lo studio del collegamento in tre modalità diverse, saldatura, tipo ad “imbutitura” (con punta a frizione), e filettatura con guarnizione (che sostituiva, in questa prima parte della sperimentazione quella a tenuta di gas, perché ritenuta più agevole dal punto di vista realizzativo e comunque interessante per quanto riguarda la tenuta).

Sulla base delle indicazioni di massima ricevute, dei vincoli sul materiale, sulle dimensioni e le tolleranze in gioco, nonché l’ambiente in cui questi accoppiamenti saranno inseriti (transienti termici, presenza di materiale radioattivo) è stato effettuato uno studio preliminare che ha portato alla definizione delle tre tipologie di accoppiamento. Per ciascuna tipologia individuata sono stati progettati i provini preliminari e quelli definitivi (stringa da quattro elementi); negli allegati della presente relazione sono riportati i disegni esecutivi finali, emersi dalle successive modifiche, in funzione delle prove via via effettuate, relativi a ciascuna tipologia.

La definizione delle modalità di realizzazione dei provini preliminari e di quelli definitivi simulanti le barrette e le griglie di supporto ha tenuto conto delle difficoltà operative che dovranno essere affrontate per la realizzazione dell’elemento quadrato. Il materiale impiegato per la fabbricazione dei provini è l’acciaio inox siglato con Z10 CNDT 15-15 B (per dettagli vedi il paragrafo successivo).

In questa fase di realizzazione di simulacri delle barrette e delle griglie sono stati impiegati i seguenti macchinari di officina: torni per la fabbricazione delle barrette ed elettroerosione a filo e frese a controllo numerico per la produzione delle griglie (stringhe da 4 fori).

Accanto alle problematiche realizzative, sono state prese in considerazione anche quelle relative al controllo della bontà della giunzione, tenendo conto, soprattutto dell’oggetto finale, ossia l’elemento di combustibile, in quanto, data appunto la geometria vincolante (interspazi fra le barrette molto piccoli) e la presenza di materiale fissile all’interno delle singole barrette, anche la definizione delle modalità per il controllo della qualità e della tenuta delle giunzioni rappresenta un problema non trascurabile.

Nei paragrafi seguenti verranno esposti i principali risultati ottenuti sinora nella sperimentazione per ciascuna tipologia affrontata.

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.            0  Pag. :    22    di :    62
--	--	---

## 4.2 Materiale impiegato

Il materiale impiegato per la fabbricazione dei provini è l'acciaio inox siglato con Z10 CNDT 15-15 B, si tratta di un materiale particolare, realizzato appositamente per l'impiego nucleare, che presenta un tenore di C inferiore al 0.1%, con un 15% circa di Cr e di Ni ed una piccola aggiunta di Ti.

Di questo materiale è stata fornita una campionatura ad ENEA per verifiche.

Presso il Laboratorio chimico-fisico-strutturale della FN sono state effettuate caratterizzazioni al microscopio elettronico a scansione per osservare l'aspetto morfologico del materiale e, mediante sonda per microanalisi, è stata verificata la composizione, sia pure a livello qualitativo, in quanto, il sistema presenta un margine di errore piuttosto elevato quando si sondano gli elementi leggeri, per cui nel computo finale non è stato inserito il C.

Di seguito si riportano due micrografie a 100 e 1000 ingrandimenti, ottenute con microscopio elettronico Zeiss EVO 40 sulla superficie del materiale. In questa fase della sperimentazione non si sono effettuate caratterizzazioni metallografiche in quanto non ancora strettamente necessarie.

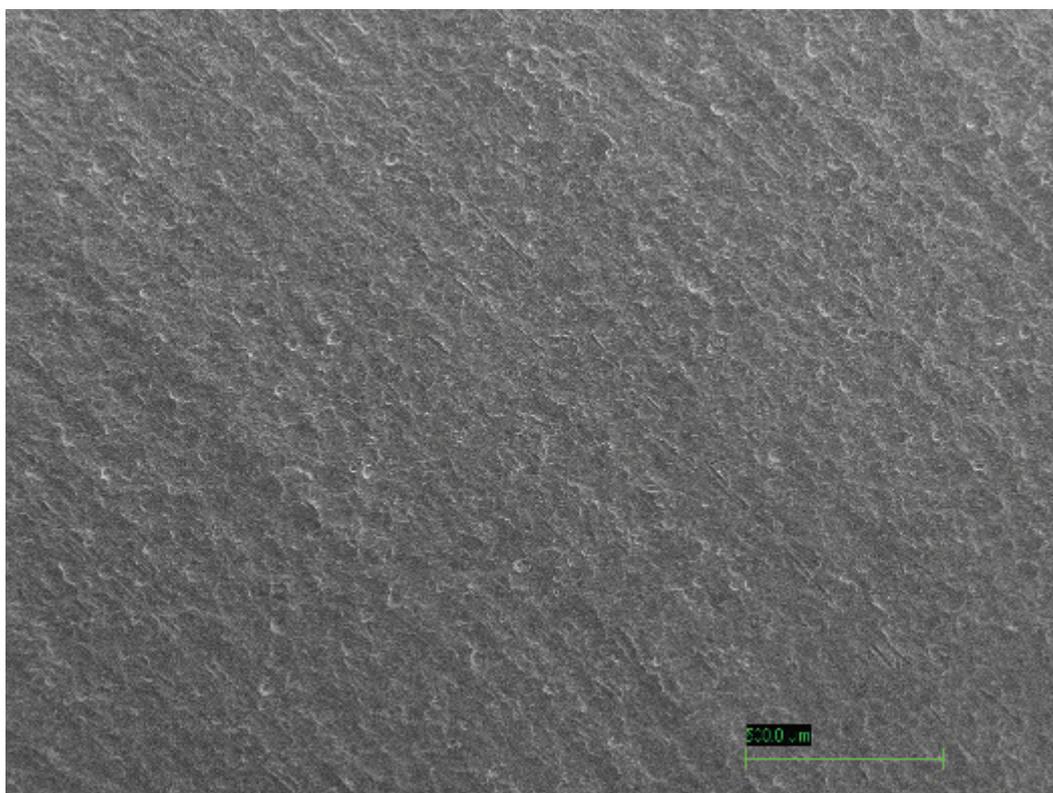
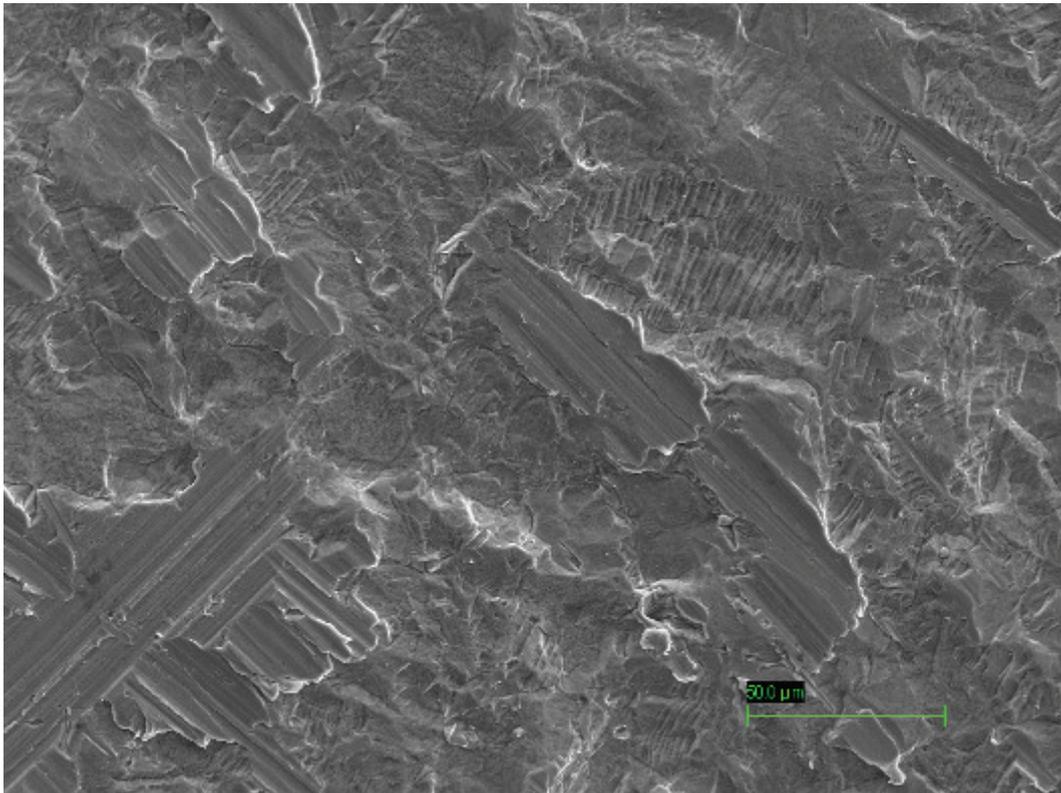
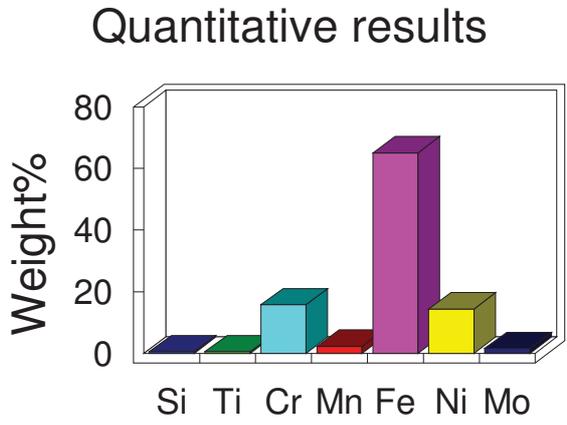
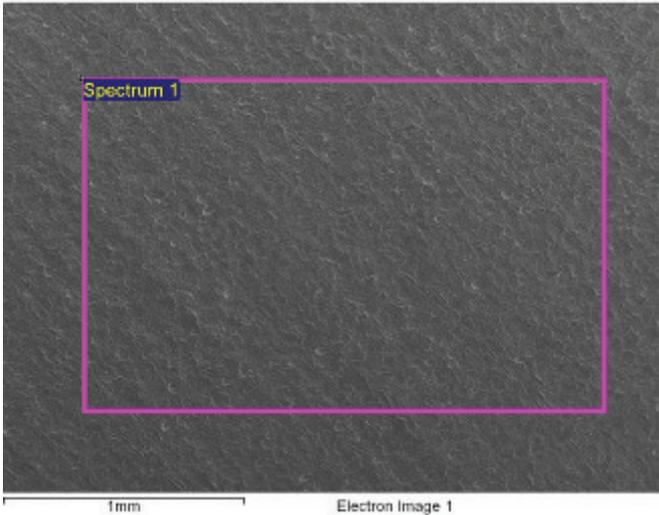


Fig. 13 – Immagine al microscopio elettronico a scansione della superficie del materiale (100 X)



**Fig. 14 – Immagine al microscopio elettronico a scansione della superficie del materiale (1000X)**

In Fig. 15 sono riportati i risultati (livello semi-quantitativo/qualitativo) ottenuti mediante EDS (Energy Dispersive Spectroscopy) con sonda per microanalisi, non considerando nel computo il C, per i motivi su esposti. Si nota, accanto a Cr e Ni (che mostrano all'incirca le percentuali di specifica), la presenza di Si, Ti, Mn e Mo, oltre, ovviamente a quella del Fe.



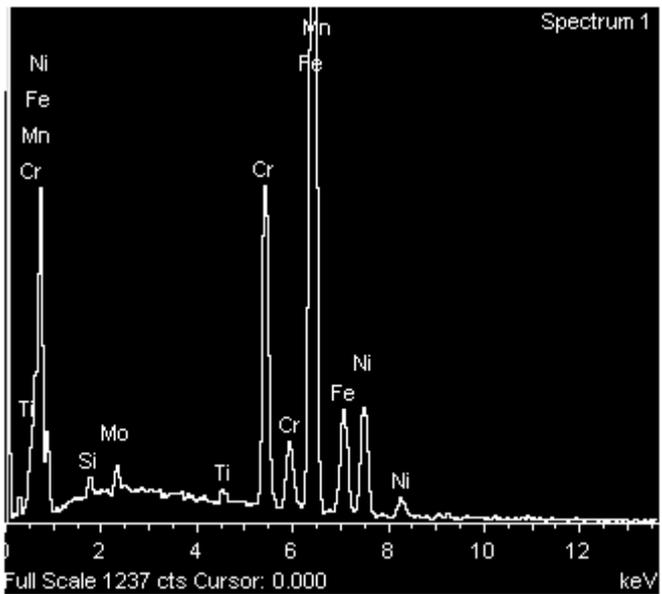
Spectrum processing :  
No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)  
Number of iterations = 3

Standard :

- Si SiO2 1-Jun-1999 12:00 AM
- Ti Ti 1-Jun-1999 12:00 AM
- Cr Cr 1-Jun-1999 12:00 AM
- Mn Mn 1-Jun-1999 12:00 AM
- Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM
- Ni Ni 1-Jun-1999 12:00 AM
- Mo Mo 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
Si K	0.53	1.05
Ti K	0.51	0.59
Cr K	15.66	16.75
Mn K	2.32	2.34
Fe K	65.08	64.79
Ni K	14.31	13.56
Mo L	1.59	0.92
<b>Total</b>	<b>100.00</b>	



**Fig. 15 – Risultati analisi EDS (Energy Dispersive Spectroscopy)**

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI          IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.            0  Pag. :    25    di :    62
--	---	---

### 4.3 Breve excursus sulle tecniche di “giunzione”

Prima di entrare nel vivo della descrizione delle attività sperimentali condotte in FN, si ritiene opportuno dare una panoramica circa i processi di “giunzione”. Innanzitutto questi ultimi si possono suddividere in alcune categorie principali:

- saldatura per fusione (fusion welding): fanno parte di questa categoria le saldature ad arco e high-energy –beam (con fascio ad alta energia);
- saldature allo stato solido (solide-state welding): la saldatura viene eseguita senza fusione, tipo saldature a freddo, ad ultrasuoni, per attrito, a resistenza elettrica, per esplosione e diffusion bonding;
- brasatura e saldo-brasatura, dove si usa un metallo basso fondente apportato esternamente;
- incollaggi utilizzando adesivi;
- giunzioni meccaniche con rivetti, bulloni, ganci e fissaggi vari.

Ovviamente, poiché si possono avere diverse tipologie di giunto e di materiali, si tratta di individuare il processo più adatto. Nella tabella 1 viene data evidenza delle principali caratteristiche delle varie tecniche messe a confronto.

Fra i processi di giunzione a fusione, inoltre, si possono fare delle distinzioni in funzione delle caratteristiche; nella tabella 2 vengono riassunte le principali a confronto.

**Tabella 1 – Tecniche di giunzione a confronto**

Tecnica	Caratteristiche								
	Resistenza	Flessibilità nella progettazione	Piccole parti	Grandi componenti	Tolleranze	Affidabilità	Facilità di manutenzione	Visivo	Costo
Saldatura ad arco	1	2	3	1	3	1	2	2	2
Saldatura a resistenza	1	2	1	1	3	3	3	3	1
Brasatura	1	1	1	1	3	1	3	2	3
Meccanica (bulloni e dadi)	1	2	3	1	2	1	1	1	3
Con rivetti	1	2	3	1	1	1	3	1	2
Con ganci	2	3	3	1	2	2	2	1	3
Aggraffatura	2	2	1	3	3	1	3	1	1
Adesivi	3	1	1	2	3	2	3	3	2

Legenda: 1 = molto buono, 2 = buono; 3 = meno buono

**Tabella 2 – Caratteristiche generali dei processi di saldatura a confronto**

Tipo di saldatura	Caratteristiche						
	Operatività	Vantaggi	Livello di esperienza dell'operatore	Posizione di saldatura	Tipo di corrente elettrica	Distorsioni *	Costo dell'attrezzatura
Saldatura ad arco schermato (SMAW)	manuale	Portatile e flessibile	Alto	tutte	AC/DC	1-2	Basso
Saldatura ad arco sommerso (SAW)	automatica	Elevate deposizioni	Basso - medio	Piana e orizzontale	AC/DC	1-2	Medio
Arco gas-metallo (GMAW o MIG)	Semiautomatica o automatica	Possibilità di lavorare con molti metalli	Basso - alto	tutte	DC	2-3	Medio - alto
TIG	Manuale o automatica	Possibilità di lavorare con molti metalli	Basso - alto	tutte	AC/DC	2-3	Medio
A elettrodo consumabile (FCAW)	Semiautomatico o automatico	Elevata deposizione	Basso - alto	tutte	DC	1-3	Medio
Oxyfuel	manuale	Portatile e flessibile	Alto	tutte	-	2-4	Basso
Electron beam (EBW), laser beam (LBW)	Semiautomatica o automatica	Possibilità di lavorare con molti metalli	Medio - alto	tutte	-	3-5	Alto

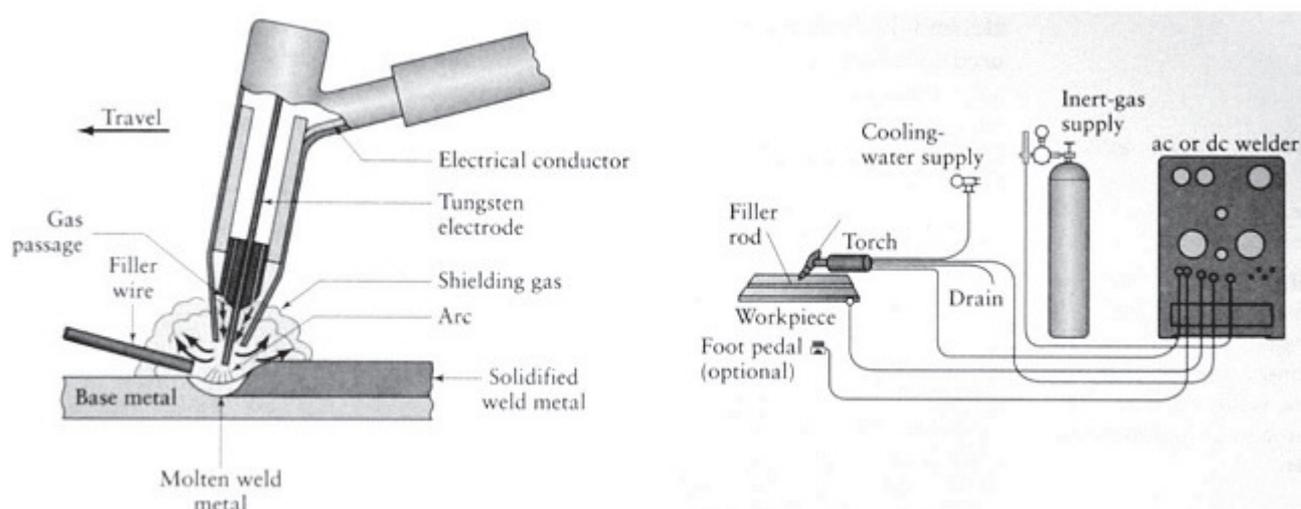
Legenda: \* 1 = elevato; 5 = molto basso

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.            0  Pag. :    27    di :    62
--	--	---

#### 4.4 Prima tipologia di “giunzione” presa in esame: saldatura (A)

A fronte delle indicazioni ENEA e dell’esperienza FN nel settore delle saldature di precisione in ambito nucleare, la prima tecnica presa in considerazione è stata quella della saldatura.

Partendo dall’esperienza maturata in FN in ambito nucleare con saldature TIG (Tungsten Inert Gas) sia in manuale che in automatico, in un primo momento, si era presa in considerazione l’ipotesi di impiegare questo tipo di tecnica.



**Fig. 16 – Schematizzazioni della saldatura TIG**

Nella figura 16 si vede una classica torcia per saldatura TIG e, in particolare, l’elettrodo in tungsteno, la pinza di bloccaggio dell’elettrodo e l’ugello ceramico per il convogliamento dei gas di copertura.

In questa tecnica è possibile operare sia con che senza metallo di apporto. Non si usa fondente, ma elio e/o argon per schermare. L’elettrodo in tungsteno non si consuma e produce un arco stabile. Si impiegano correnti continue a circa 200 A o alternate a 500 A. Le potenze in gioco vanno da 8 kW a 20 kW. La corrente alternata si usa principalmente per alluminio e magnesio per la sua azione pulitrice di rimozione degli ossidi. In generale, occorre evitare il contatto dell’elettrodo di tungsteno con il metallo fuso per ovviare a contaminazioni del primo. La tecnica ha un costo piuttosto elevato a causa del gas inerte, ma permette di realizzare saldature di alta qualità.

Studiando i disegni di massima dell’accoppiamento barretta/griglia (vedi Fig. 9, 10, 11 e 12), in particolare per le saldature interne, si è visto che la torcia per saldatura TIG (Fig. 16), doveva essere introdotta nel foro da 7.5 mm. In questo caso, quindi, era necessario poter avere a disposizione una

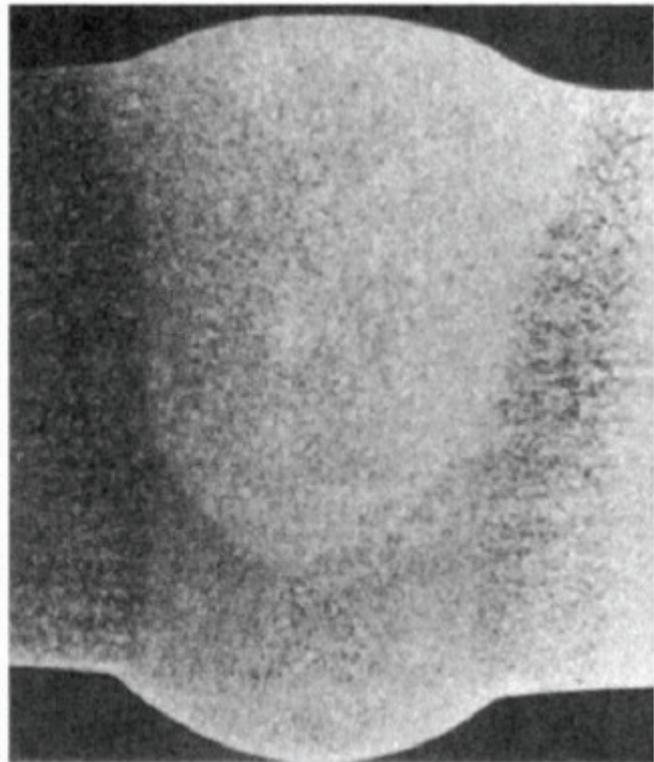
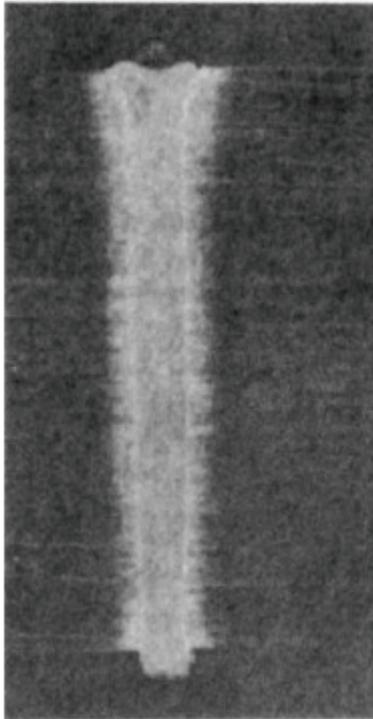
 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI          IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.            0  Pag. :    28    di :    62
--	---	---

micro - torcia realizzata ad hoc che potesse operare in tali spazi. Una volta messo a punto e qualificato il processo, pensando alla realizzazione finale dell'elemento di combustibile con la presenza di materiale fissile all'interno delle barre, il sistema doveva essere tutto automatizzato, in quanto la visione all'interno della zona da saldare diventa difficoltosa, date le dimensioni della stessa e l'ingombro della micro - torcia.

Pur essendo questa tecnica in generale molto versatile, in questo caso, invece, soprattutto per le saldature interne qui richieste, dati gli spazi molto contenuti e le tolleranze di accoppiamento vincolanti, per il suo impiego si richiedeva la realizzazione e la messa a punto di un impianto ad hoc con micro-torche in grado di operare, appunto, negli spazi ristretti imposti dalla geometria. Tale realizzazione non era fattibile nelle tempistiche previste.

Confrontandosi con esperti del RINA, inoltre, si è presa in considerazione un'altra tipologia di saldatura, quella definita micro-saldatura laser. In questo caso, come visibile anche nella Tabella 2 riportata al paragrafo 4.3, la distorsione o la zona termicamente alterata è praticamente nulla, in quanto la tecnica in questione opera in modo molto puntuale e locale senza scaldare una zona estesa del componente da saldare; ovviamente, trattandosi di una saldatura di precisione richiede una preparazione del giunto adeguata, con il rispetto delle tolleranze al centesimo. Viene richiesto l'impiego di un laser da 100 kW e, se anche il costo dell'attrezzatura è in media più elevato rispetto al tradizionale TIG, risulta comunque più vantaggioso dal punto di vista della finitura, della posizione di saldatura (soprattutto per le microsaldature interne che richiedono una elevata precisione), per il fatto che non necessita di una ulteriore pulizia (difficoltosa in spazi così ristretti e che potrebbe contaminare il materiale fissile contenuto nella barretta dell'elemento aperto) e perché la giunzione è esente da ossidazioni.

Nella Fig. 17 sono mostrate le dimensioni delle zone di saldatura relative alle due tecniche su citate, reperite in letteratura (L. Lutterotti – tecnologie e sistemi di lavorazione I, anno 2005-2006): a sinistra si può vedere la zona della saldatura laser, a destra quella della TIG. La prima è molto stretta e quindi anche i fenomeni connessi alla presenza di una zona termicamente alterata sono praticamente molto ridotti, se non annullati.



**Fig. 17 – Confronto fra le zone di saldatura delle tecniche Laser e TIG: a sinistra la zona della tecnica LASER, a destra quella TIG.**

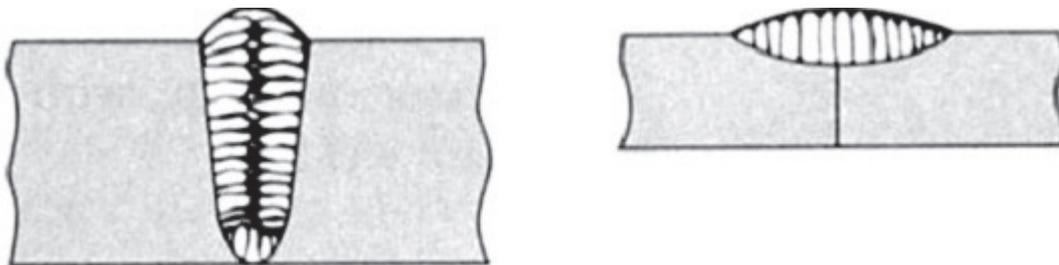
A differenza della saldatura TIG, nel caso del laser, il calore di fusione viene fornito da un laser ad alta potenza. Si può concentrare l'energia in un'area molto piccola dando origine a saldature profonde e strette. Il rapporto profondità/sezione va da 4 a 10. Si possono fare delle saldature a spot, come già accennato (impulsi nel range dei ms); in continuo questa tecnica si impiega per saldature profonde in sezioni spesse. Si usa in ossigeno con acciai e con gas inerti per leghe non ferrose. La velocità arriva fino a 80m/min.

Come già accennato sopra, i vantaggi di questa tipologia di tecnica risiedono soprattutto nel fatto di produrre saldature di alta qualità, con un minimo ritiro e minima distorsione, senza porosità.

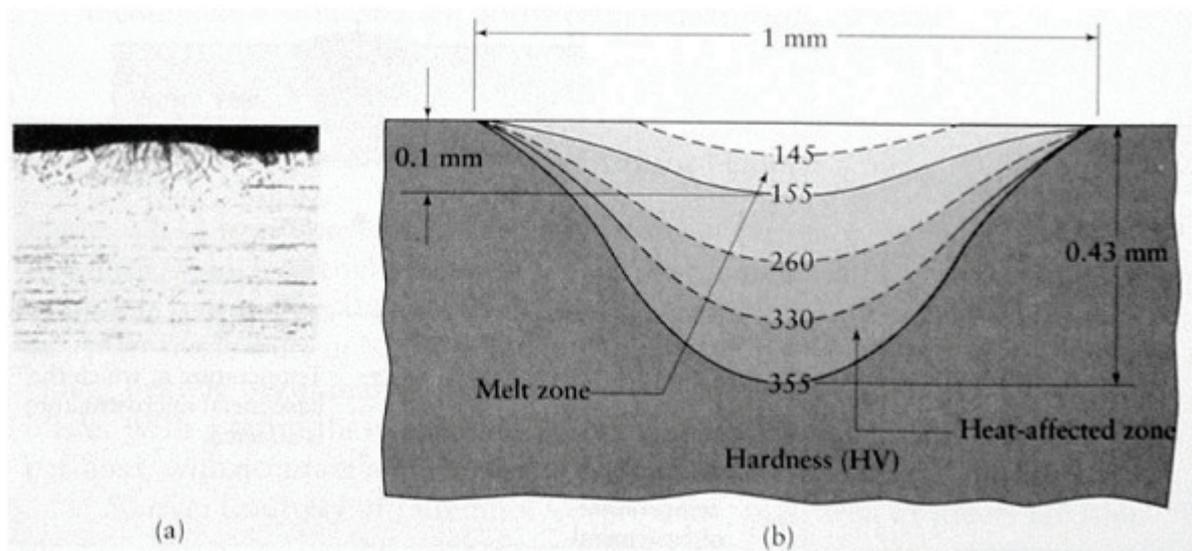
Rispetto all'EBW (Electron Beam Welding), inoltre, non richiede il vuoto, il fascio può essere focalizzato otticamente, utilizzando per esempio fibre ottiche e facilmente manipolato; non genera raggi X come l'EBW e presenta una migliore qualità nella saldatura anche rispetto a questa tecnica, con meno tendenza alla fusione incompleta, a spatter, porosità e distorsioni.

Il fatto di presentare la possibilità di una zona termicamente alterata molto piccola quasi nulla non è un fattore da trascurare. Generalmente, infatti, nella zona di fusione dove avviene la solidificazione

si formano grani dendritici paralleli al flusso di calore (Fig. 18) e la durezza cresce dall'esterno verso l'interno (Fig. 19).



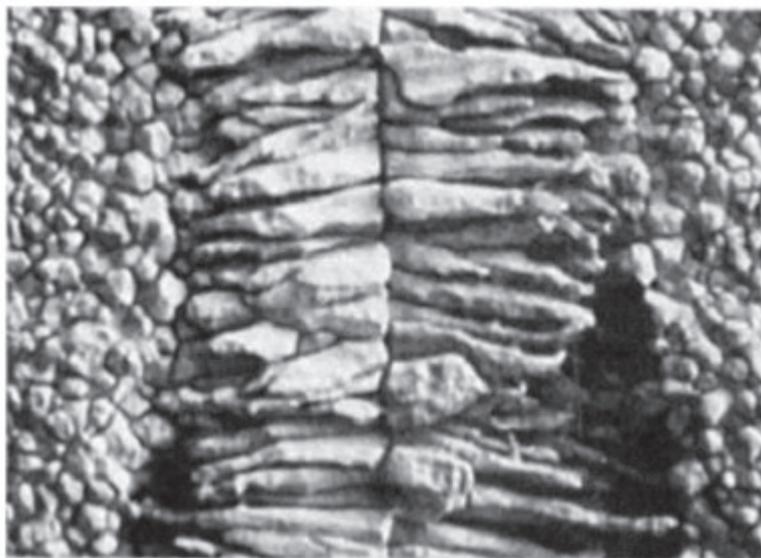
**Fig. 18 – Disposizione dei grani dendritici**



**Fig. 19 – Variazione della durezza nella zona termicamente alterata**

Nella zona alterata per riscaldamento dalla saldatura, la microstruttura e composizione chimica possono venir alterate causando problemi al materiale ed al componente. In particolare, si altera la grana cristallina che cresce diminuendo le proprietà meccaniche. Inoltre, la diffusione della zona di fusione e la presenza di segregazioni nella stessa possono alterare la composizione chimica e dare quindi origine a fenomeni di corrosione.

In Fig. 20 è mostrato un esempio tratto dalla letteratura di corrosione intergranulare in una saldatura.



**Fig. 20– Esempio di corrosione intergranulare in una saldatura (tratto da L. Lutterotti – Tecnologie e sistemi di lavorazione I – anno 2005-2006)**

#### **4.4.1 Progettazione, elaborazione disegni esecutivi e realizzazione provini per saldatura**

Sulla base delle dimensioni di ingombro definite da ENEA sono stati progettati i provini preliminari ed i provini con stringa da quattro fori, come previsto nell'allegato tecnico all'Accordo ENEA-FN. Al fine di mettere a punto i parametri con il materiale in oggetto e per poter verificare la resistenza del giunto anche meccanicamente mediante trazione con la macchina universale Instron, sono stati progettati dei componenti singoli simulanti la barretta e la griglia, da impiegare come provini preliminari e per una pre-qualifica. Come replica di questi provini singoli, è stata progettata una stringa da quattro posizioni (quattro barrette) che simulasse anche la geometria finale dell'elemento, tenendo conto non solo delle tolleranze di accoppiamento, ma anche degli ingombri e delle problematiche della vicinanza delle singole barrette, nonché della fattibilità dei canali di collegamento al collettore dei gas di fissione.

Per comodità non si riportano i disegni intermedi le cui modifiche successive hanno condotto a quelli definitivi che sono, invece, presentati negli allegati seguenti:

- allegato 1: dis. J 50 0117 – ADP ENEA – LP3 PAR 2011 Giunzione griglia –barretta tipo “A”: saldatura; prova preliminare componente singolo
- allegato 2: dis. J 50 0119 – ADP ENEA – LP3 PAR 2011 Giunzione griglia – barretta tipo “A” : saldatura; componente griglia

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI          IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.            0  Pag. :    32    di :    62
--	---	---

- allegato 3: dis. J 50 0120 – ADP ENEA – LP3 PAR 2011 Giunzione griglia – barretta tipo “A”: saldatura; componenti barretta, tubo, tappo
- allegato 4: dis. J 50 0118 – ADP ENEA – LP3 PAR 2011 Giunzione griglia – barretta tipo “A”: saldatura: assieme provino – assemblaggio finale.

Al fine di accoppiare al meglio i provini simulanti la griglia e la barretta, con la tecnica della microsaldatura laser senza materiale d’apporto è necessario, visto che il cordone di saldatura ha una larghezza molto ridotta, che la profondità di penetrazione è elevata ed il laser lavora a spot, localmente, senza alterare in modo macroscopico il materiale e quindi riducendo quasi a zero la zona termicamente alterata, che le quote dei provini siano molto precise e che le tolleranze imposte siano rispettate. A fronte di una prima campionatura di provini realizzata per saggiare anche la lavorabilità del materiale, ne è stata realizzata una seconda, concentrando l’attenzione sul rispetto al centesimo delle tolleranze da disegno. Attualmente ne è in lavorazione una terza che tiene conto delle modifiche suggerite dall’esito delle prime prove di saldatura. Tutti i provini realizzati sono stati controllati dimensionalmente in laboratorio metrologico. In particolare, si è cercato di prestare attenzione nella realizzazione della parte terminale del provino barretta che va accoppiato con il foro del provino griglia (o dei fori della stringa da 4 posizioni), soprattutto in termini di altezza della parte cilindrica e di giochi fra maschio e femmina.

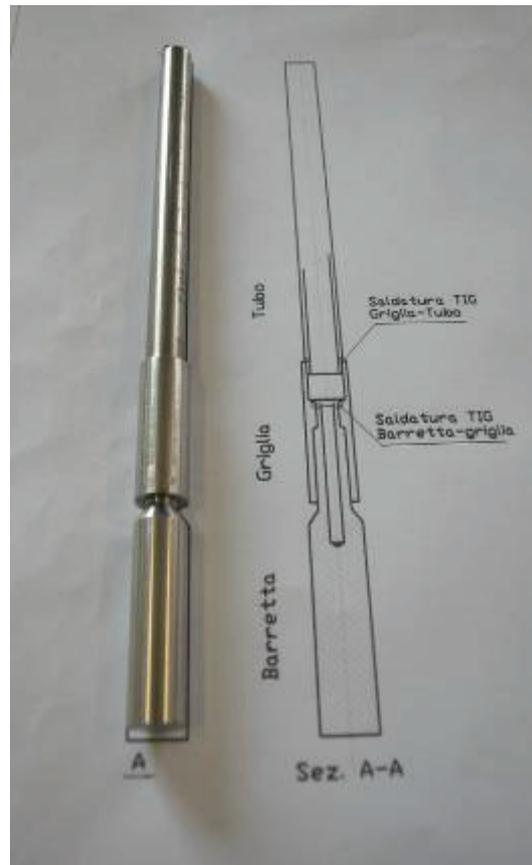
Per le prove definite preliminari è stato progettato un provino singolo (vedi allegato 1, dis. J 50 0117), costituito da provino barretta, provino griglia e tubo per il collegamento allo strumento per il leak-test. Nella figura seguente è mostrato un esempio di questi provini. L’insieme delle componenti che costituiscono un provino preliminare, e quindi una prova preliminare, viene identificato con la sigla univoca PPA – n. progr., ove PPA sta per:

P = Prove

P = Preliminari

A = con la tecnica di saldatura.

Al laboratorio qualificato, in grado di effettuare la microsaldatura laser, sono stati consegnati provini per le prove di assaggio (messa a punto dei parametri del laser, spot, velocità, etc.) e provini per la pre-qualifica, sempre in assetto singolo.



**Fig. 21 - Esempio di insieme per provino singolo: barretta, griglia e tubo per Prove Preliminari saldatura A (PPA) (nota: nel disegno erroneamente è stata lasciata la dicitura TIG)**

Per quanto riguarda la stringa da 4 fori, con il materiale a disposizione, è stato possibile realizzarne due per tipologia di tecnica di giunzione mediante lavorazioni di elettroerosione (per gli esterni), foratura e fresatura impiegando centri di lavoro a controllo numerico. Nella figura 22 vengono mostrate le griglie realizzate per la saldatura (dis. J 50 0119). Rispetto ai provini ottenuti mediante tornitura presentano un colore grigio opaco dovuto alla lavorazione di elettroerosione, se lucidati superficialmente assumono la stessa colorazione dei provini barretta. Le griglie sono state controllate dimensionalmente in laboratorio metrologico.

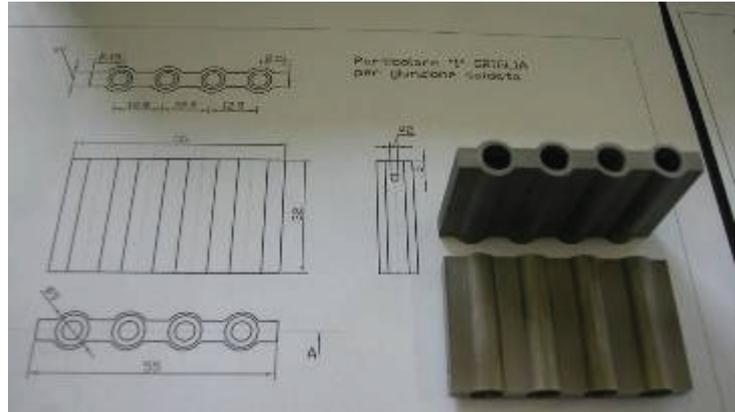


Fig. 22 - Griglie per saldatura (stringhe da 4 fori, dis. J 50 0119)

In parallelo sono stati realizzati i provini barretta da inserire nei fori delle griglie da 4, i tappi per chiudere tre dei quattro fori, i tubi da inserire nel quarto foro per il collegamento allo strumento con cui si effettua il leak - test. Nelle figure seguenti si riportano i dettagli di questi componenti ed una visione d'insieme prima dell'assemblaggio finale mediante saldatura (dis. J 50 0120).

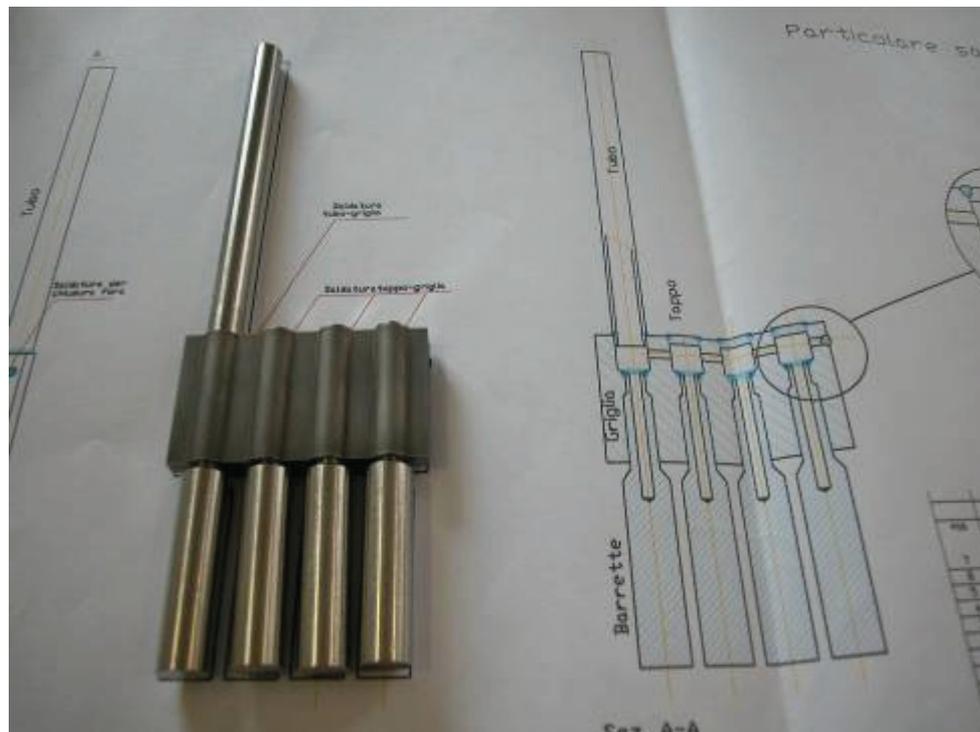


Fig. 23 - Assieme provino stringa da 4 - assemblaggio finale

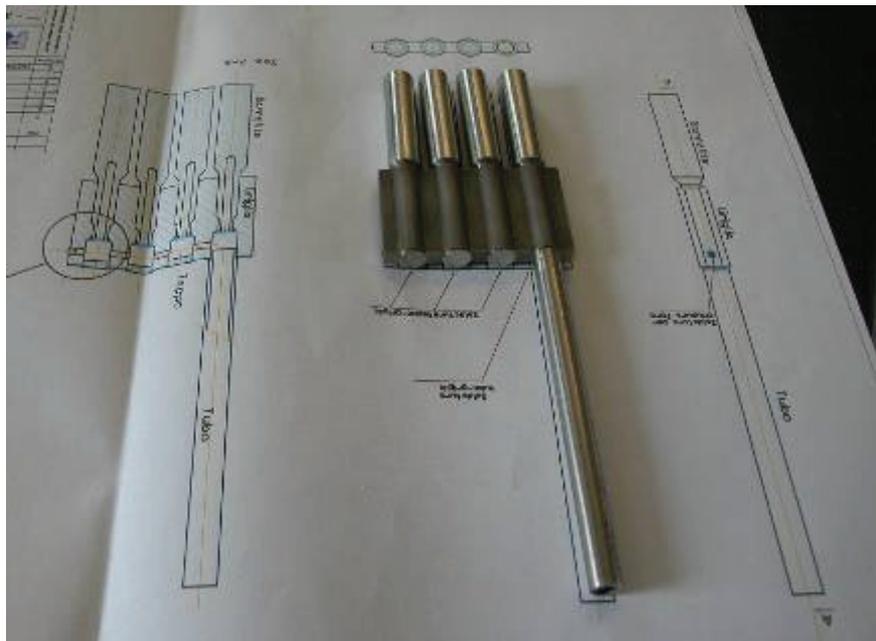


Fig. 24 – Vista assieme provino lato tappi

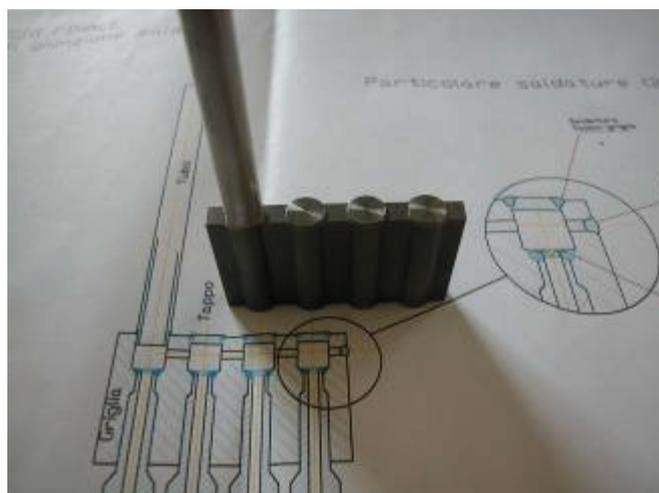


Fig. 25 – Tappi (a sinistra), vista dall'alto dell'assieme (senza barrette, prima della saldatura) (a destra)

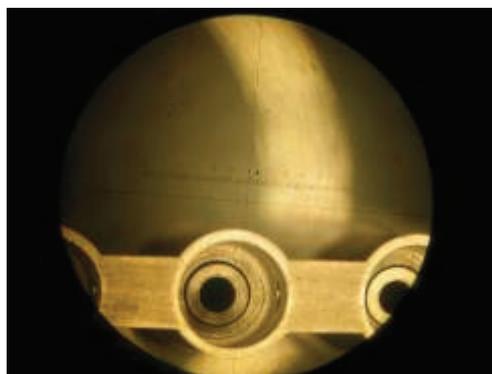


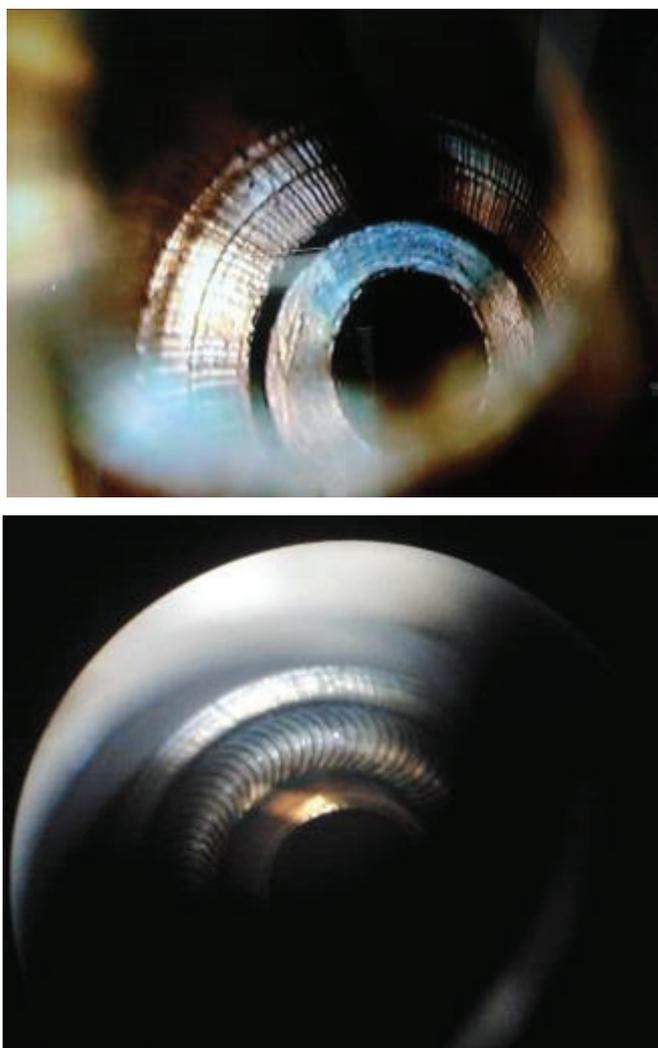
Fig. 26 – Visione del canale laterale che collega le 4 posizioni (a sinistra), accoppiamento barretta/griglia prima della saldatura interna: si nota che la parte superiore del provino barretta deve essere a filo del piano interno della griglia in cui viene effettuata la saldatura (a destra)

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI          IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.            0  Pag. :    36    di :    62
--	---	---

#### 4.4.2 Risultati preliminari ottenuti

Alcuni provini in accoppiamento singolo (vedi dis. J 50 0117), scelti fra i migliori realizzati e con le tolleranze di accoppiamento più precise (PPA – 1, PPA – 2 e PPA – 3), sono stati inviati alla ditta attrezzata per la microsaldatura laser, la E.T.S. Sistemi industriali srl. I primi due sono stati impiegati per la messa a punto dei parametri, mentre il terzo, il PPA – 3, è stato anche sottoposto ad una caratterizzazione preliminare mediante prova di tenuta in elio, con leak-test (Hood Method).

Nella figura seguente sono mostrati alcuni ingrandimenti del cordone di saldatura ottenuto per microsaldatura laser sui componenti oggetto dello studio.



**Fig. 27 – Immagini dell'accoppiamento interno (sopra) e del cordone di saldatura ottenuto sui provini preliminari (sotto)**

Le prove in elio sono state effettuate utilizzando lo strumento visibile in Fig. 281 e sono state condotte presso E.T.S. Sistemi Industriali Srl da personale qualificato e certificato.



**Fig. 28 – Strumento impiegato per la prova di tenuta in He (a sinistra) e “tool” specifico per l’accoppiamento del provino con lo strumento (a destra)**

La prova di tenuta (Hood Method) sul componente prototipale PPA-3di pre-qualifica ha dato l’esito seguente:

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.            0  Pag. :    38    di :    62
--	--	---

- rumore di fondo con test in vuoto:  $2 \cdot 10^{-10}$  mBar l/s
- massimo segnale di perdita:  $1.5 \cdot 10^{-10}$  mBar l/s.

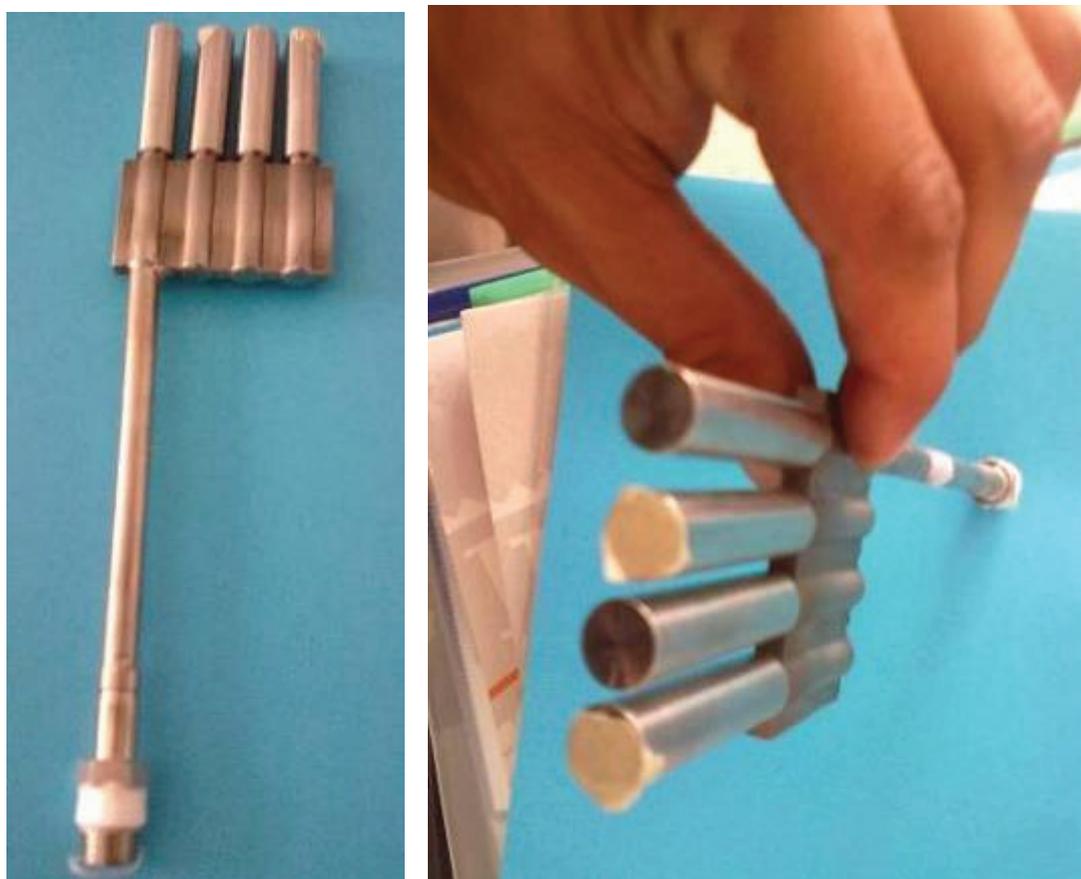
Prima di procedere con la finitura dei provini del secondo gruppo da quattro previsto, si è preferito attendere l'esito delle prove preliminari e di quelle sul primo gruppo da quattro.

Superato il test sul PPA-3, si è proceduto con la microsaldatura laser del primo gruppo da quattro.

In questo caso, malgrado la cura nel realizzarli, per un paio di provini –barretta l'accoppiamento interno- mantello non si è rivelato così preciso come richiesto da questa tecnica, fattore che ha reso molto difficoltosa l'operazione di saldatura degli stessi; inoltre, i tappi previsti per chiudere tre posizioni al fine di avere un percorso unico che simulasse quello dei gas di fissione, presentavano un bordo troppo sottile che ha creato ulteriori problemi.

La difficoltà nella saldatura di due posizioni interne e le problematiche sui tappi hanno comportato la nascita di perdite ad elio in vuoto con valori massimi intorno a  $1 \cdot 10^{-7}$  mBar l/s.

Nella figura 29 sono mostrate alcune immagini del gruppo da quattro dopo saldatura e durante la preparazione per il controllo al leak-test.



**Fig. 29 – Gruppo da 4 (0119 A) dopo saldatura**

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI          IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.            0  Pag. :    39    di :    62
--	---	---

La progettazione di questo gruppo, in particolare quella dei tappi effettuata secondo l'esperienza TIG, verrà affinata sulla base dell'esito di questa prova, assolutamente indispensabile per fare un punto zero e definire come completare la realizzazione del secondo gruppo di provini per griglia da 4. Le attività in tal senso sono in corso e verranno presentate nella rev. 1 della presente relazione.

In ogni caso, si può affermare che il risultato ottenuto sul provino singolo sia molto interessante e che quindi la tecnica in questione (microsaldatura laser) sia da considerare molto valida per la fabbricazione del giunto in esame, confermando le previsioni.

Sul secondo gruppo di provini che sono in fase di ultimazione, verranno anche effettuate le prove in pressione ed i test dopo ciclaggio termico, mentre i provini singoli saranno sottoposti a test a trazione e ad esame al microscopio dopo averli sezionati.

Il completamento di queste caratterizzazioni sarà esposto nella rev.1 della presente relazione.

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.           0  Pag. :   40   di :   62
--	--	---

#### 4.5 Seconda tipologia di “giunzione” presa in esame: “imbutitura” (B)

Pur partendo dall’assunto che la saldatura garantisca la migliore tenuta, si è comunque ipotizzata la possibilità di altre tecniche alternative, che richiama un accoppiamento più di tipo meccanico. La seconda tipologia, definita forse impropriamente “imbutitura” (“con punta a frizione”) e indicata nei disegni con la sigla B, per distinguerla dalle altre due prese in esame, prevede l’impiego di un utensile in metallo duro, opportunamente sagomato in punta, allineato con l’asse del provino accoppiato che, ruotando e frizionando in appoggio sulla testa del provino barretta porta in temperatura il materiale e, giunti alla temperatura ottimale, attraverso un avanzamento stabilito nelle prove, deforma la parte terminale del provino maschio, allargandola ed accoppiandola alla sede della griglia, consentendo quindi la tenuta. Nella figura 30 si può vedere schematizzato quanto descritto.

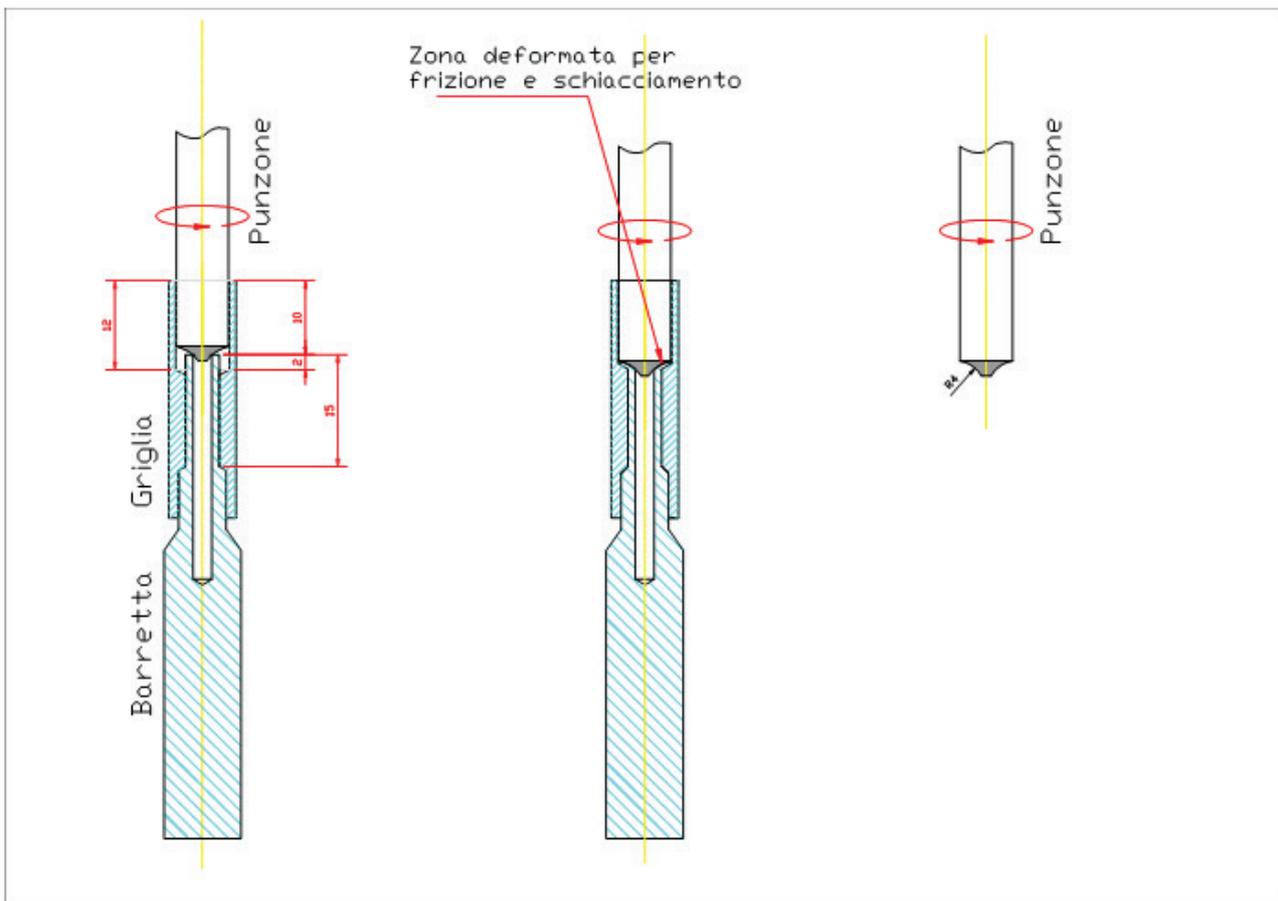


Fig. 30 - Principio su cui si basa la tecnica B “imbutitura”

Ovviamente questo sistema è stato sperimentato in FN per le prove preliminari e potrà essere perfezionato anche con un macchinario progettato ad hoc. Nel caso delle prime prove di fattibilità è

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI          IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.           0  Pag. :   41   di :   62
--	---	---

stato impiegato un tornio manuale per afferrare e mettere in rotazione il punzone in metallo duro opportunamente sagomato e permetterne l'avanzamento una volta messo in asse con il provino griglia ed il provino barretta (come si vedrà al paragrafo seguente in cui sono descritte le prove preliminari a provino singolo).

Nel caso dell'elemento finale, si è pensato di operare con un macchinario, che possa agire in asse con l'elemento, imprimere sia la rotazione del punzone (utensile) sia procedere con avanzamenti micrometrici controllati e imprimere una forza di deformazione stabilita per creare, appunto, la deformazione delle barrette all'interno delle posizioni di alloggiamento previste nella griglia quadrata dell'elemento "vented". Ovviamente, quest'ipotesi è legata ai risultati delle prove preliminari che definiscono la bontà della strada seguita o le eventuali modifiche da apportare prima di scartare definitivamente questa tecnica.

#### **4.5.1 Progettazione, elaborazione disegni esecutivi e realizzazione provini per "imbutitura"**

Come per la tecnica A, si è proceduto anche in questo secondo caso alla progettazione e realizzazione sia di provini singoli sia dell'assieme da quattro fori (stringa da quattro), sempre tenendo conto dei vincoli già descritti ai paragrafi precedenti. Nelle prime prove effettuate si è rilevata la necessità di modificare l'angolo del punzone per ottenere una migliore deformazione e quindi un giunto più affidabile.

Come per la tecnica di saldatura, non si riportano i disegni intermedi le cui modifiche successive hanno condotto a quelli definitivi che sono, invece, presentati negli allegati seguenti:

- allegato 5: dis. J 50 0114 – ADP ENEA – LP3 PAR 2011 Giunzione griglia –barretta tipo "B": imbutitura; prova preliminare componente singolo
- allegato 6: dis. J 50 0125 – ADP ENEA – LP3 PAR 2011 Giunzione griglia – barretta tipo "B" : imbutitura; componente griglia
- allegato 7: dis. J 50 0126 – ADP ENEA – LP3 PAR 2011 Giunzione griglia – barretta tipo "B": imbutitura; componenti barretta, tubo, tappo
- allegato 8: dis. J 50 0115 – ADP ENEA – LP3 PAR 2011 Giunzione griglia – barretta tipo "B": imbutitura: assieme provino – assemblaggio finale.

Sono stati realizzati diversi provini singoli e sono stati verificati gli accoppiamenti delle componenti barretta e griglia. Tutti i provini sono stati controllati dimensionalmente in laboratorio metrologico per verificarne la rispondenza ai disegni esecutivi. In particolare, si è cercato di prestare attenzione

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.           0  Pag. :   42   di :   62
--	--	---

nella realizzazione della parte terminale del provino barretta che va accoppiato con il foro del provino griglia (o dei fori della stringa da 4 posizioni), soprattutto in termini di altezza della parte cilindrica che, in questo caso, non deve essere esattamente a filo con il foro come per la tecnica A, ma deve sporgere oltre questo di alcuni mm al fine di avere materiale sufficiente da deformare e costituire la giunzione.

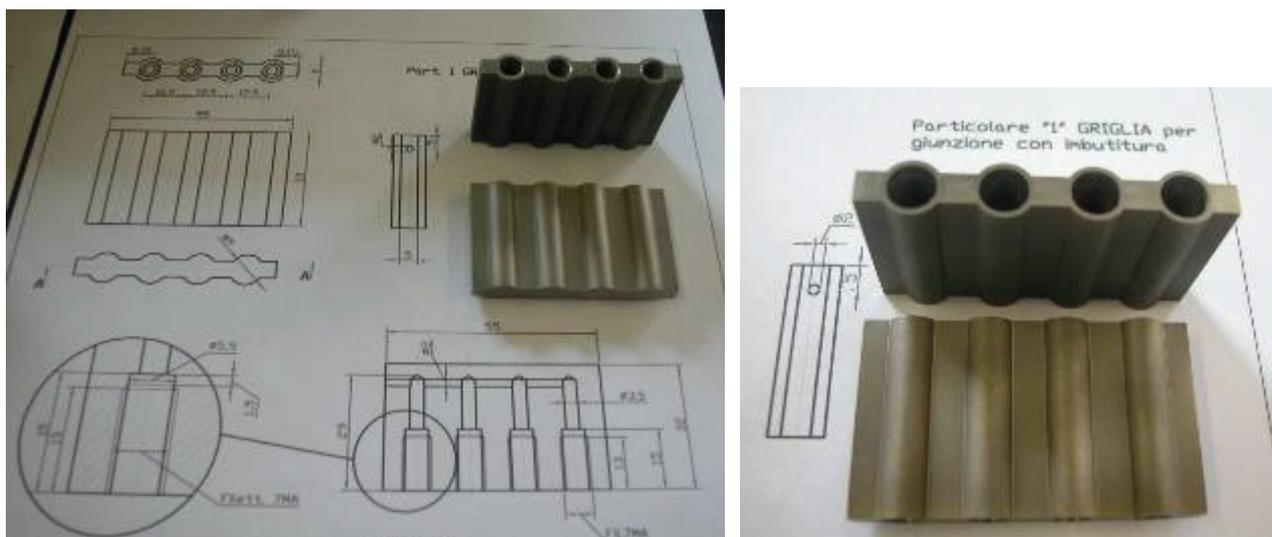
Per le prove definite preliminari è stato progettato un provino singolo (vedi allegato 1, dis. J 50 0114), costituito da provino barretta, provino griglia e tubo per il collegamento allo strumento per il leak-test. L'insieme delle componenti che costituiscono un provino preliminare, e quindi una prova preliminare, viene identificato con la sigla univoca PPB – n. progr., ove PPB sta per:

P = Prove

P = Preliminari

B = con la tecnica di “imbutitura”.

Per quanto riguarda la stringa da 4 fori, con il materiale a disposizione, è stato possibile realizzarne due per tipologia di tecnica di giunzione mediante lavorazioni di elettroerosione (per gli esterni), foratura e fresatura impiegando centri di lavoro a controllo numerico. Nella figura 31 vengono mostrate le griglie realizzate per imbutitura (dis. J 50 0125). Anche queste griglie sono state controllate dimensionalmente in laboratorio metrologico.



**Fig. 31 - Griglie per imbutitura (stringhe da 4 fori, dis. J 50 0125)**

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.            0  Pag. :    43    di :    62
--	--	---

Come per la tecnica A, sono stati realizzati anche i provini barretta da accoppiare alle griglie, i tappi per chiudere tre dei quattro fori di ciascuna griglia ed i tubi da inserire nel quarto tubo per il collegamento allo strumento per leak-test. Sulla base dell'esito delle prove di tenuta verranno valutate le eventuali modifiche da apportare a questi provini per migliorare le prestazioni.

#### 4.5.2 Prove preliminari

##### PPB-0

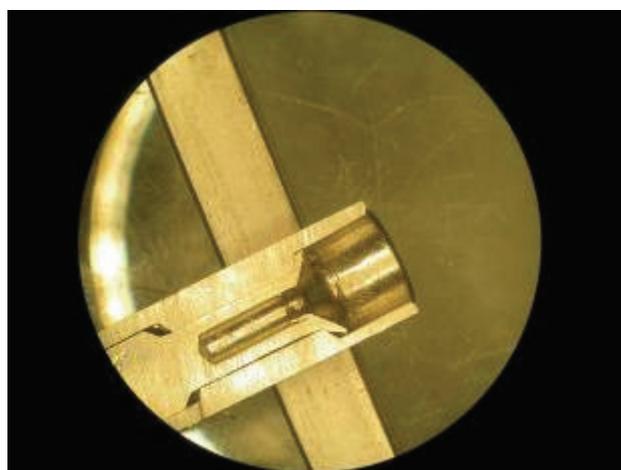
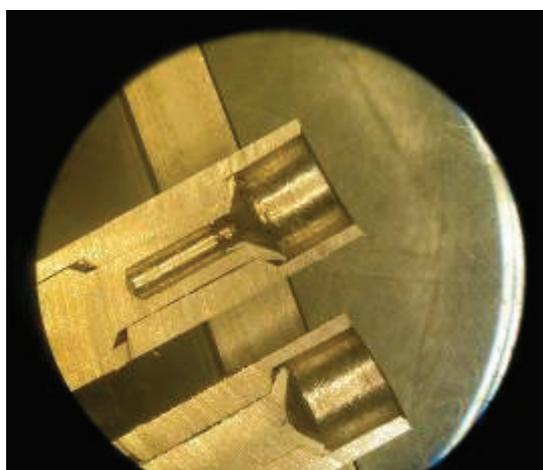
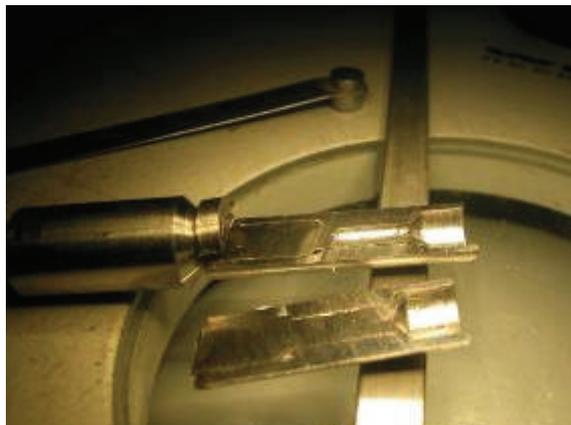
Si tratta di un insieme di prove preliminari su provini singoli non ancora definitivi, atte a determinare i parametri di massima per ottenere il corretto accoppiamento e la definizione del materiale del punzone, nonché una sua prima geometria. Si sceglie di non riportarne il dettaglio in quanto utile solo a fini interni.

##### PPB-1

La prova PPB-1 è stata effettuata su un insieme a provino singolo non ancora definitivo ma già prossimo a quello poi impiegato nelle prove successive; tale prova è stata molto utile per modificare i disegni. E' stato impiegato un tornio manuale per mettere in rotazione il punzone che doveva deformare il provino - barretta nella sua parte cilindrica finale al fine di costituire la giunzione.



**Fig. 32 – Prova PPB – 1: provino assemblato e particolare dell'interno (al microscopio ottico) che mostra l'avvenuta deformazione dei lembi del provino barretta sul provino griglia**



**Fig. 33 – Foto in alto: provino PPB-1 tagliato in sezione per verificare l'accoppiamento della deformazione del provino barretta rispetto alla griglia; in basso visioni al microscopio ottico di tale accoppiamento non ancora ottimale**

Dalle foto effettuate sulla sezione al microscopio ottico (Fig. 33), si può notare come si sia ottenuta la deformazione voluta senza particolari problematiche, risulta evidente che occorre agire sull'inclinazione del punzone per un migliore accoppiamento con la parte della griglia esterna al provino barretta stesso; in questo caso si vede come l'inclinazione della deformazione abbia un angolo leggermente diverso rispetto a quello della griglia, cosa che è stata successivamente corretta per ottenere un migliore accoppiamento ed uno spessore omogeneo del materiale deformato.

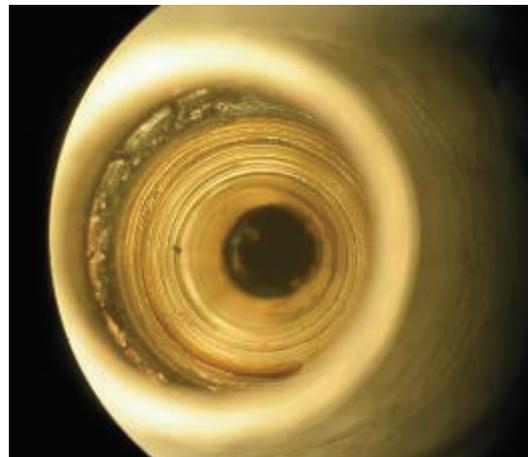
### **Prova PPB – 2:**

A seguito delle considerazioni emerse dalle prove precedenti, è stata modificata l'inclinazione del punzone. La prova è stata condotta portando la velocità di rotazione del punzone a circa 1200 rpm.; l'avanzamento è stato impostato in manuale fino a battuta.

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.            0  Pag. :    45    di :    62
--	--	---



**Fig. 34 – Provino PPB – 2 prima e dopo “imbutitura”**



**Fig. 35 – Prova in corso (a sinistra); particolare dell’accoppiamento interno visto al microscopio ottico (a destra)**

Il provino assemblato non è stato tagliato ma tenuto per le prove di tenuta in elio.

### **PPB – 3**

La prova PPB-3 è stata condotta tenendo conto delle esperienze precedenti e seguendo il ciclo seguente, schematizzato in Fig. 36, ove si tiene conto già anche del gruppo da 4 (in questo caso, si dovrebbe poi apportare una modifica per l’afferraggio dei singoli provini nelle varie posizioni rispetto alla prima per tenere conto degli ingombri reciproci). Rispetto alla prova PPB- 2 il riscaldamento del componente era maggiore e più omogeneo. Si è anche ottenuta una colorazione diversa sullo stesso componente, indice della raggiunta temperatura (vedi Fig. 37).

Il provino PPB-3 ottenuto è stato inviato alle prove di tenuta in elio, opportunamente corredato, come il provino PPB-2, di un tubo in acciaio inox non saldato da 8 mm di diametro interno e 1 mm di spessore, tornito ad un estremità per accoppiarsi al foro del provino griglia come previsto dal disegno J50 0114.



#### FASE1

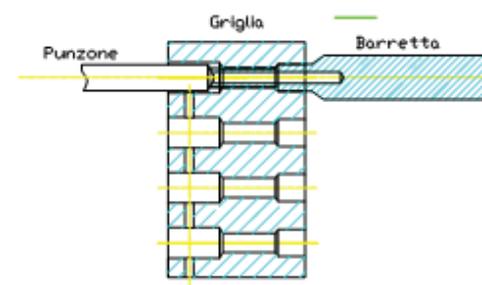
##### Posizionamento

- 1-Punzone su mandrino del tornio
- 2-Barretta 1 su mandrino contropunta
- 3-Avvicinare barretta a contatto con punzone per verifica allineamento e azzeramento contropunta



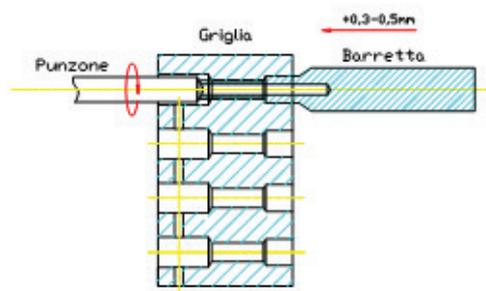
#### FASE 2

- Inserimento griglia e riposizionamento  
Punzone a contatto con Barretta 1



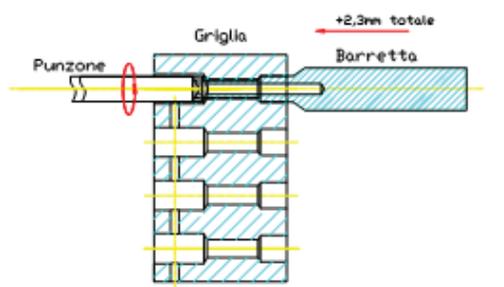
#### FASE 3

- Messa in rotazione tornio a velocità elevata (oltre 1000 giri)
- Avanzamento manuale contropunta per portare in temperatura per sfregamento l'estremità della barretta



#### FASE 4

- Avanzamento rapido contropunta a misura (+2,3mm) e, dopo 1-2 secondi arretramento di 4-5 millimetri



#### FASE 5

- Arresto rotazione mandrino

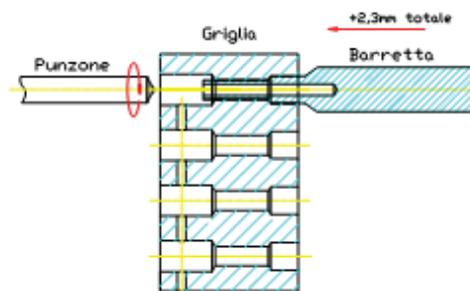
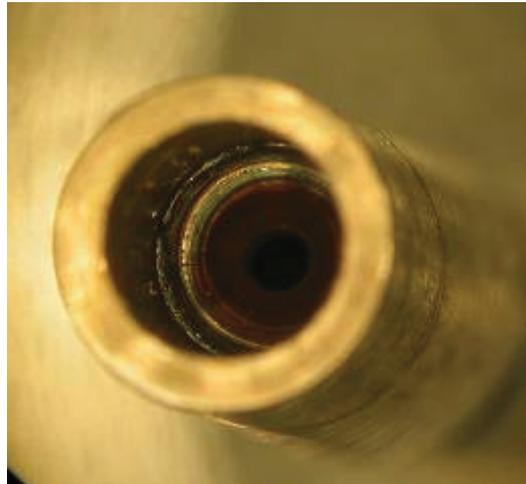


Fig. 36 - Sequenza fasi per ottenere giunto per "imbutitura"



**Fig. 37 – A sinistra provino PPB – 3 dopo giunzione; a destra, particolare al microscopio ottico dell'accoppiamento interno mediante deformazione**

### 4.5.3 Risultati preliminari ottenuti

Come già descritto al paragrafo 4.4.2, la prima prova cui sottoporre i provini preliminari prima di procedere con la realizzazione del giunto nel gruppo da 4 è quella di tenuta in elio.

Anche in questo caso le prove sono state condotte presso E.T.S. Sistemi Industriali srl con la stessa strumentazione già evidenziata in Fig. 28.

Sui due provini PPB- 2 e PPB – 3 sono state effettuate prove di tenuta in elio secondo il metodo Hood, ottenendo i seguenti risultati:

Identificazione provino	Test in vuoto (Hood Method)	
	Background	Max segnale dopo 2 minuti
	mBar l/s	mBar l/s
<b>PPB - 2</b>	$2.60 \cdot 10^{-9}$	$5.30 \cdot 10^{-4}$
<b>PPB - 3</b>	$2.90 \cdot 10^{-9}$	$3.10 \cdot 10^{-4}$

In pratica i provini in questione non presentano una tenuta sufficiente, per cui occorre rivedere il tipo di accoppiamento ed effettuare delle modifiche ai provini, prima di rigettare in toto la tipologia di tecnica.

Sui provini sottoposti al test verrà effettuata un'analisi distruttiva per valutare in sezione il tipo di accoppiamento e ottenere maggiori informazioni. I provini da 4 saranno modificati opportunamente. Le azioni poste in essere ed i risultati relativi saranno descritti nella rev. 1 della presente relazione.

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI          IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.           0  Pag. :   48    di :   62
--	---	--

#### **4.6 Terza tipologia di “giunzione” presa in esame: filettatura “con guarnizione” (C)**

Sempre rimanendo dell’opinione che la saldatura resti la tecnica migliore, si è ipotizzata anche questa tipologia di giunzione più di carattere meccanico, mediante filettatura e guarnizione.

Questa tipologia è stata indicata nei disegni con la lettera C. Essa prevede la realizzazione di un provino barretta molto diverso dai precedenti in quanto presenta una parte filettata e si utilizza per la tenuta una guarnizione che dovrebbe essere in oro, sia per motivi di deformabilità del materiale sia per la compatibilità con l’ambiente finale alla presenza di piombo fuso. Nel caso delle prove preliminari, viste comunque le diverse variabili ed incognite, si è preferito iniziare con delle guarnizioni in rame puro, ottenute direttamente per tornitura.

A differenza delle altre due tipologie di provino assieme (griglia a stringa da 4), in questo caso uno dei provini barretta, quello inserito nella prima posizione, è volutamente lasciato più lungo e cavo al fine di accoppiarlo direttamente allo strumento per il leak-test senza impiegare un tubo in più, evitando quindi anche una giunzione in più.

##### **4.6.1 Progettazione, elaborazione disegni esecutivi e realizzazione provini per “con guarnizione”**

Come per le altre due tecniche, non si riportano i disegni intermedi le cui modifiche successive hanno condotto a quelli definitivi che sono, invece, presentati negli allegati seguenti:

- allegato 9: dis. J 50 0121 – ADP ENEA – LP3 PAR 2011 Giunzione griglia –barretta tipo “C”: con guarnizione; prova preliminare componente singolo
- allegato 10: dis. J 50 0123 – ADP ENEA – LP3 PAR 2011 Giunzione griglia – barretta tipo “C” : con guarnizione; componente griglia
- allegato 11: dis. J 50 0124 – ADP ENEA – LP3 PAR 2011 Giunzione griglia – barretta tipo “C”: con guarnizione; componenti barretta lunga, corta e griglia
- allegato 12: dis. J 50 0122 – ADP ENEA – LP3 PAR 2011 Giunzione griglia – barretta tipo “C”: con guarnizione: assieme provino – assemblaggio finale.

Sono stati realizzati diversi provini singoli e sono stati verificati gli accoppiamenti delle componenti barretta e griglia. Tutti i provini sono stati controllati dimensionalmente in laboratorio metrologico per verificarne la rispondenza ai disegni esecutivi. In particolare, si è cercato di prestare attenzione nella realizzazione della guarnizione in rame che è stata inizialmente pensata dello spessore di 0.5 mm e, successivamente, dopo alcune prove, portata a 2 mm.

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.            0  Pag. :    49    di :    62
--	--	---

Per le prove definite preliminari è stato progettato un provino singolo (vedi allegato 9, dis. J 50 0121), costituito da provino barretta e provino griglia. Nelle figure seguenti sono mostrati esempi di questi provini. L'insieme delle componenti che costituiscono un provino preliminare, e quindi una prova preliminare, viene identificato con la sigla univoca PPC – n. progr., ove PPC sta per:

P = Prove

P = Preliminari

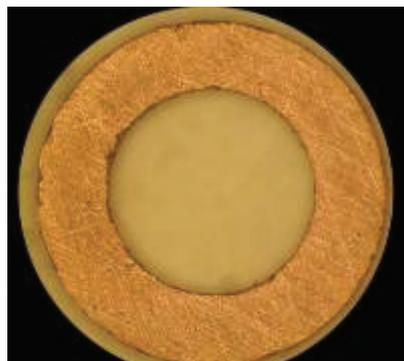
C = con la tecnica con guarnizione.



**Fig. 38 – Provini preliminari in assetto singolo con guarnizioni in rame (PPC, dis J50 0121)**

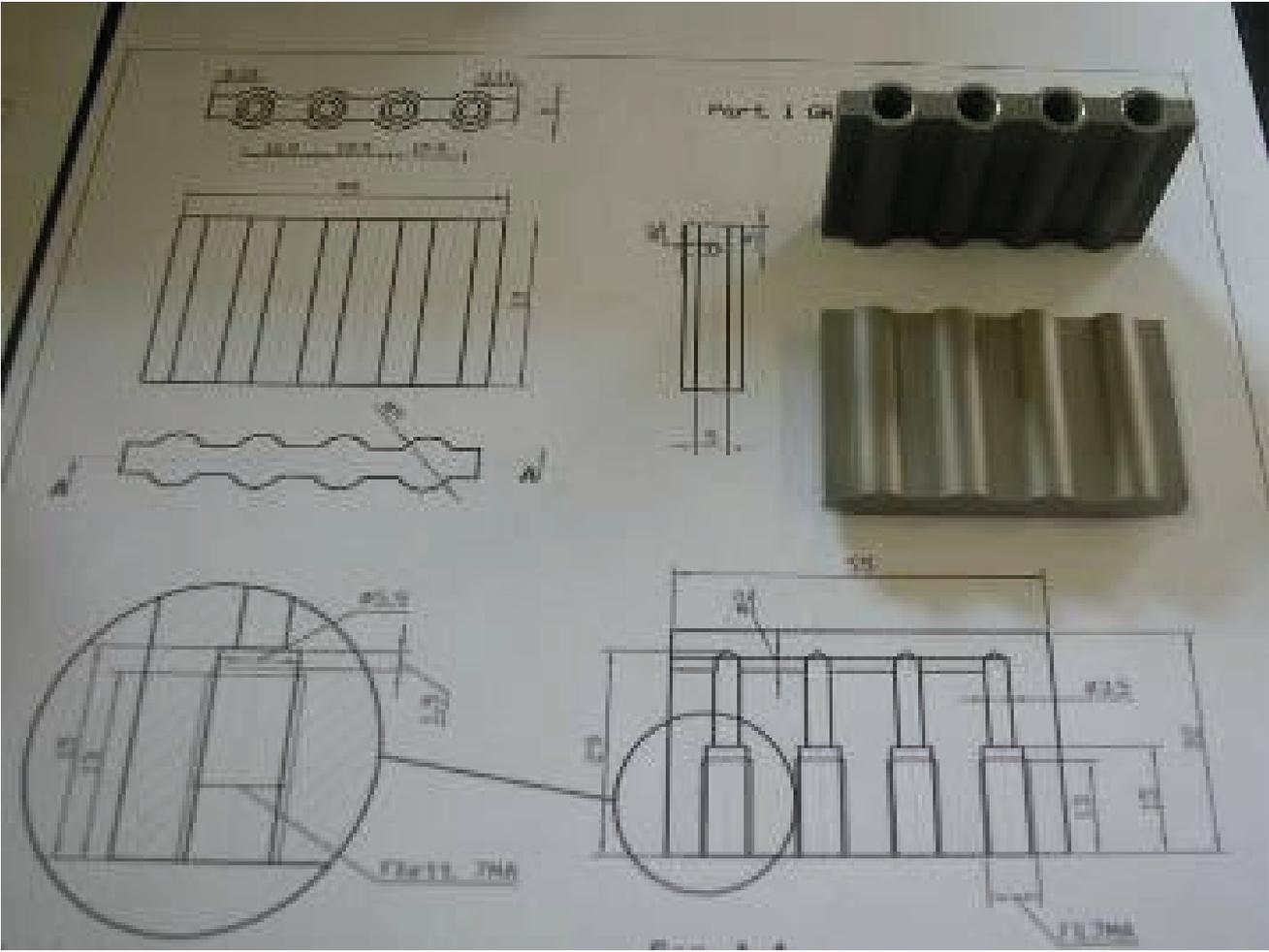


**Fig. 39 – Particolare della filettatura del provino barretta (a sinistra), con la guarnizione calzata e provino griglia prima dell'assemblaggio**



**Fig. 40 – Particolare della finitura della guarnizione in rame realizzata per tornitura e lucidata (visione ingrandita al microscopio ottico)**

Per quanto riguarda la stringa da 4 fori, con il materiale a disposizione, è stato possibile realizzarne due per tipologia di tecnica di giunzione mediante lavorazioni di elettroerosione (per gli esterni), foratura e fresatura impiegando centri di lavoro a controllo numerico. Nella figura 41 vengono mostrate le griglie realizzate per la tipologia “a guarnizione” (dis. J 50 0123). Come per le altre , relative alle altre tipologie, rispetto ai provini ottenuti mediante tornitura presentano un colore grigio opaco dovuto alla lavorazione di elettroerosione, se lucidate superficialmente assumono la stessa colorazione dei provini barretta. Le griglie sono state controllate dimensionalmente in laboratorio metrologico.



**Fig. 41 – Griglie da 4 posizioni per tipologia C (dis. J 50 0123): si nota dalla foto che sono chiuse e quindi non necessitano dei tappi**

Parallelamente alla realizzazione delle griglie, sono stati realizzati i provini barretta da inserire nei quattro fori, di cui tre definiti corti e chiusi ad una estremità, mentre il quarto presenta lo stesso disegno del provino singolo ed è più lungo ed aperto per essere collegato direttamente allo strumento per la misura della tenuta in elio. In figura 42 si possono vedere tre viste di un provino da 4 pre-assemblato, da cui si evince la differenza fra i provini barretta e la “compattezza” del provino che non richiede tubi e tappi aggiuntivi e quindi fonti di eventuale perdita o, comunque, zone che richiedano un’ulteriore giunzione.

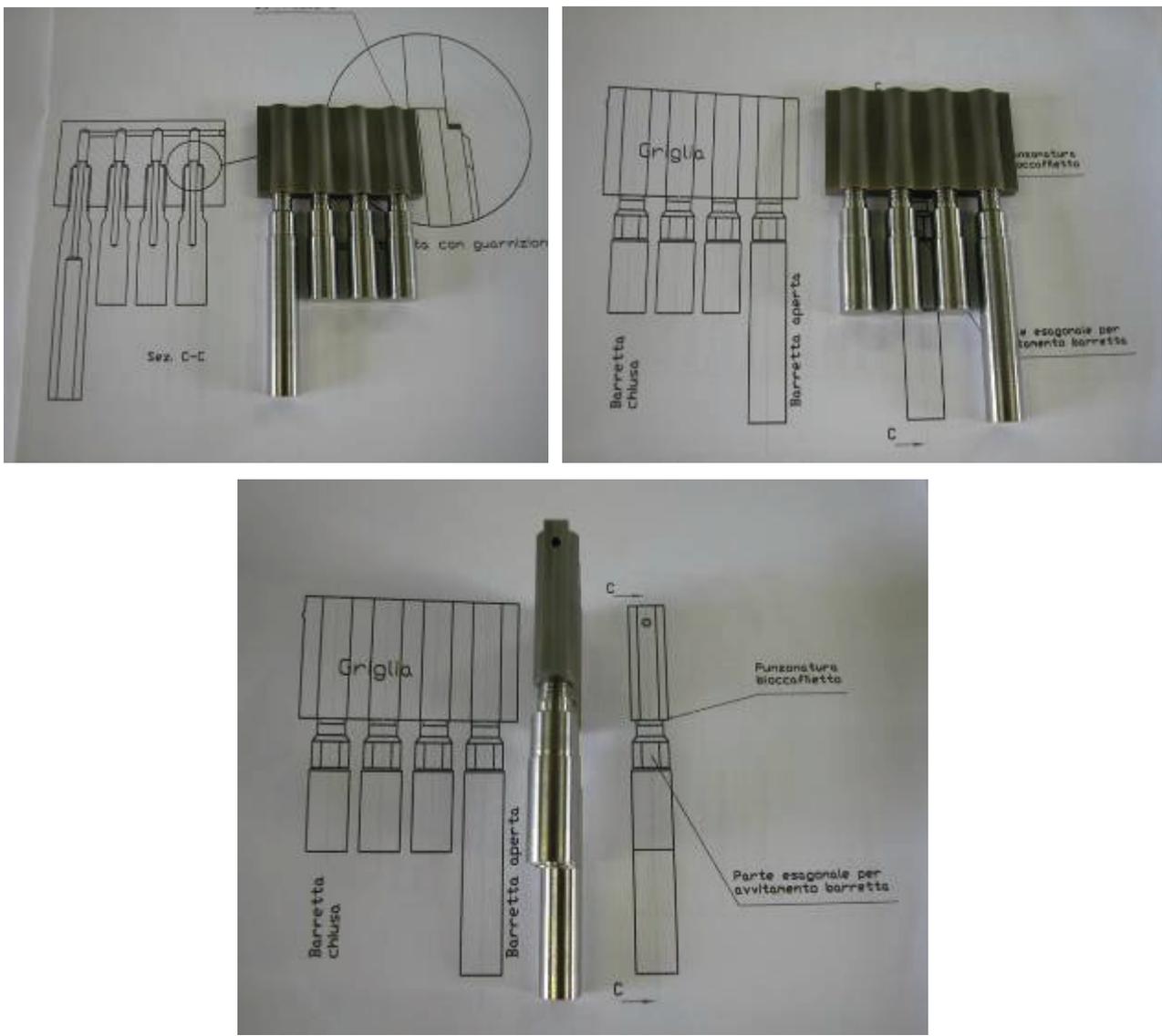


Fig. 42 – Gruppo da 4 del tipo “C” – tre viste del gruppo pre-assemblato (dis. J 50 0122)

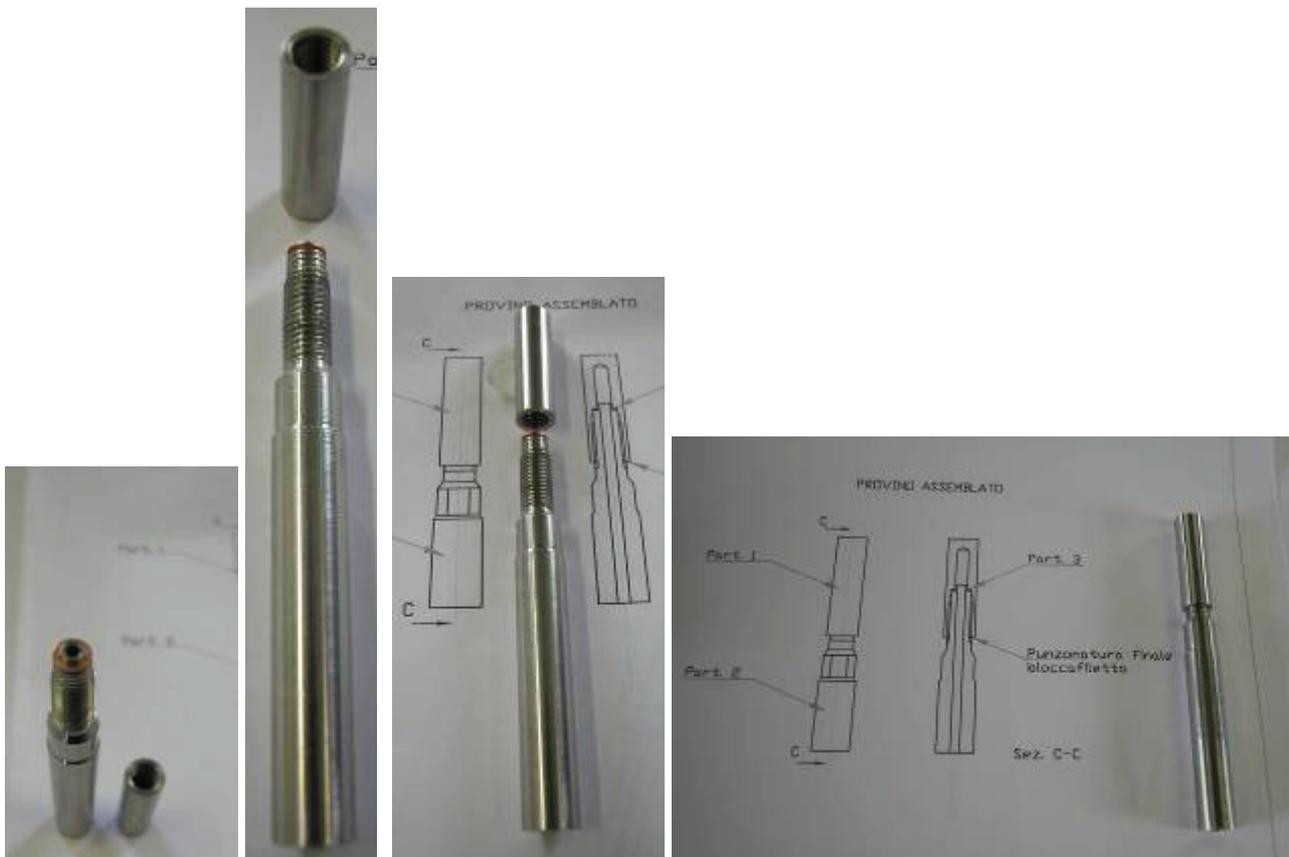
 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.           0  Pag. :   52   di :   62
--	--	---

#### 4.6.2 Prove preliminari

Come per la tipologia B, anche in questo caso sono state effettuate alcune prove molto preliminari che non vengono riportate, in quanto utili solo a fini interni.

##### Prova PPC-1:

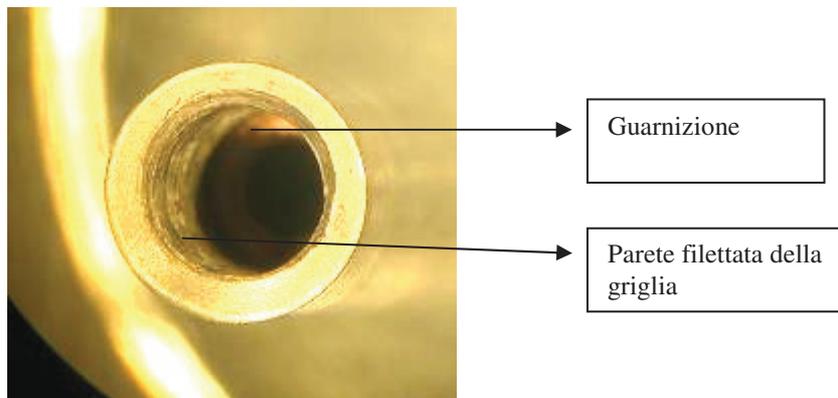
la prova PPC – 1 è stata effettuata accoppiando un provino singolo – barretta di quelli lunghi (dis. J 50 0121), con un provino griglia filettato ed una guarnizione di rame da 0.5 mm di spessore (che, in queste prove, doveva simulare l'equivalente in oro). L'accoppiamento è stato effettuato manualmente con una doppia chiave a pappagallo chiusa all'estremità.



**Fig. 43 – Prova PPC – 1: componenti allineate e provino assemblato**

Successivamente si è cercato di “svitare” l’assemblato e si è visto al microscopio ottico come la guarnizione in rame si fosse adattata alla sede (Fig. 44).

Dopo l’analisi al microscopio, il componente è stato nuovamente tirato in modo da ottenere il provino PPC – 1 che è stato inviato alle prove di tenuta in elio.



**Fig. 44 – Particolare della guarnizione in rame posizionata all’interno (fondo) del provino griglia (foto al microscopio ottico)**

#### **Prova PPC – 2:**

la prova PPC – 2 è stata effettuata con le stesse modalità della PPC – 1, tranne che per il fatto che, una volta assemblato, il provino non è stato più disassemblato. E’ stato inviato alla prova di tenuta in elio.

#### **Prova PPC – 3:**

La prova PPC-3 è stata effettuata impiegando per chiudere il provino una chiave dinamometrica (16 N m) e inserendo una guarnizione in rame da 2 mm. Il provino è stato inviato alla prova di tenuta in elio.

#### **4.6.3 Risultati preliminari ottenuti**

Come già descritto al paragrafo 4.4.2, la prima prova cui sottoporre i provini preliminari prima di procedere con la realizzazione del giunto nel gruppo da 4 è quella di tenuta in elio.

Anche in questo caso le prove sono state condotte presso E.T.S. Sistemi Industriali srl con la stessa strumentazione già evidenziata in Fig. 28.

Sui tre provini PPC- 1, PPC-2 e PPC–3 sono state effettuate prove di tenuta in elio secondo il metodo Hood, ottenendo i risultati visibili nella tabella seguente.

In pratica i provini PPC – 1 e PPC – 3 hanno segnali in vuoto migliorativi nel tempo (il segnale si abbassa anche in presenza di elio); il collaudo a 10 Bar di elio ha evidenziato valori di poco sopra il rumore di fondo. Il PPC -2 presentava un forellino sul tubo di collegamento che non ha permesso il collaudo in pressione, mentre quello in vuoto è stato possibile perché il forellino è stato isolato.

Identificazione provino	Test in vuoto (Hood Method)		Test in pressione (Sniffer Hood Method)		
	Background	Max segnale dopo 2 minuti	Pressione	Background	Max segnale dopo 2 minuti
	mBar l/s	mBar l/s	Bar	mBar l/s	mBar l/s
<b>PPC - 1</b>	$2.50 \cdot 10^{-9}$	$7.80 \cdot 10^{-10}$	10	$2.80 \cdot 10^{-6}$	$3.40 \cdot 10^{-6}$
<b>PPC - 2</b>	$3.80 \cdot 10^{-10}$	$3.20 \cdot 10^{-10}$	-	-	-
<b>PPC - 3</b>	$2.80 \cdot 10^{-10}$	$2.50 \cdot 10^{-10}$	10	$2.00 \cdot 10^{-6}$	$2.20 \cdot 10^{-6}$

Questi risultati sono piuttosto confortanti e portano a considerare che questa tecnica, opportunamente migliorata, possa essere comunque presa in considerazione.

Sui provini saranno effettuate analisi di resistenza a trazione nonché analisi distruttive per verificare in sezione l'entità dell'accoppiamento.

Le attività ed i risultati delle analisi e test sui gruppi da 4 restanti, incluso il test dopo ciclaggio termico, saranno descritti nella rev. 1 della presente relazione.

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI          IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.            0  Pag. :    55    di :    62
--	---	---

#### 4.7 Conclusioni Obiettivo B

Sono state svolte le seguenti attività:

- partendo dalle indicazioni circa le geometrie e le tolleranze in gioco, estremamente ristrette e vincolanti, e, sempre tenendo conto dell'impiego finale con materiale fissile, in condizioni di barretta aperta per cui occorrerà poi procedere con lavorazioni governate in remoto, FN ha preso in esame tre tipologie di tecniche di giunzione:
  - mediante saldatura (A)
  - per "imbutitura" (con punta a frizione) (B)
  - con filettatura e guarnizione (C).
- Per ciascuna tipologia sono stati realizzati i disegni esecutivi relativi sia a provini singoli, necessari per effettuare prove preliminari di assaggio e di messa a punto delle tecniche in oggetto, nonché per la caratterizzazione preliminare, sia a provini costituiti da stringhe di quattro elementi simulanti, appunto, una serie di quattro barrette da collegare a quattro posizioni nella griglia di supporto, comprensiva dei canali di adduzione dei gas.
- Impiegando il materiale di utilizzo nucleare, l'acciaio inox Z10 CNDT 15 15 B, dalle caratteristiche simili a quello richiesto da ENEA, FN ha realizzato mediante tornitura, elettroerosione a filo e fresatura i provini di cui al punto precedente, curandone anche la verifica dimensionale mediante controlli effettuati in laboratorio metrologico.
- Per quanto riguarda la tecnica di saldatura, partendo dalla propria esperienza in campo nucleare con la saldatura di tipo TIG, è stato effettuato uno studio per valutare l'applicabilità della stessa a questo tipo di geometria e di vincoli; si è visto che per riuscire ad effettuare le saldature interne, visti gli spazi, appunto molto stretti, occorreva disporre di un impianto ad hoc con micro-torce; sulla base di uno scambio di opinioni con esperti del RINA, anche sulla definizione dei controlli qualità e di certificazione da effettuare per garantire la bontà del giunto, si è deciso di optare per la microsaldatura laser, in grado di garantire una maggiore precisione in spazi così ristretti. Poiché il calore di fusione viene fornito da un laser ad alta potenza, si può concentrare l'energia in un'area molto piccola dando origine a saldature profonde e strette. Il rapporto profondità/sezione va da 4 a 10. I vantaggi di questa tipologia di tecnica risiedono soprattutto nel fatto di produrre saldature di alta qualità, con un minimo ritiro e minima distorsione (zona termicamente alterata praticamente quasi nulla), senza porosità. Inoltre, da un punto di vista pratico, questa tipologia non richiede il vuoto, il fascio

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI          IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.            0  Pag. :    56    di :    62
--	---	---

può essere focalizzato otticamente, utilizzando per esempio fibre ottiche e facilmente manipolato; non genera raggi X come l'EBW e presenta una migliore qualità nella saldatura anche rispetto a quest'ultima tecnica, con meno tendenza alla fusione incompleta, a spatter, porosità e distorsioni. Per contro, poiché il cordone di saldatura è quasi inesistente, questa tecnica richiede di realizzare provini molto precisi nelle zone di accoppiamento.

- Sono stati forniti alla ditta individuata, qualificata per effettuare tali saldature, i provini in assetto singolo per le prove preliminari e di pre-qualifica, oltre ad un provino stringa da 4 fori.
- I campioni sono stati testati mediante prove in elio secondo il metodo Hood ottenendo, in particolare nei provini singoli, valori molto interessanti.
- E' in corso il completamento della seconda stringa da quattro sulla quale verranno poi effettuati anche i test di tenuta dopo ciclaggio termico; sui provini singoli, già testati ad elio, verrà effettuata la caratterizzazione meccanica e strutturale. I risultati saranno prodotti a breve ed esposti nella rev. 1 della presente relazione.
- Per quanto riguarda la seconda tecnica, "imbutitura", sono state effettuate prove preliminari variando i parametri di processo; i provini ottenuti in queste prove sono stati sottoposti a test di tenuta in elio riscontrando valori non ancora soddisfacenti; i provini verranno sottoposti a prove distruttive per verificare l'accoppiamento ed ottenere ulteriori informazioni. I provini da 4 saranno modificati opportunamente.
- Malgrado i primi risultati ottenuti, si ritiene sia necessario rivedere alcuni parametri ed effettuare modifiche ai provini prima di rigettare in toto questa tecnica. Le azioni poste in essere ed i risultati relativi saranno descritti nella rev. 1 della presente relazione.
- Per quanto riguarda la terza tecnica, quella con filettatura e guarnizione, sono state effettuate prove preliminari variando i parametri di processo (spessore guarnizione, modalità di serraggio); i provini sono stati sottoposti a prove di tenuta in elio, sia in vuoto sia in pressione, riscontrando interessanti valori. Il completamento della caratterizzazione con la stringa da quattro è in corso, inoltre sono state individuate anche delle modifiche alle guarnizioni che saranno sicuramente migliorative in termini di tenuta. I risultati verranno esposti nella rev. 1 della presente relazione.
- In conclusione, si può affermare che, confrontando i risultati preliminari ottenuti, risulta che la microsaldatura laser dà valori più bassi come segnale di perdita e sembra essere la strada migliore anche in termini di ripetibilità e controllo "passivo" della qualità della lavorazione (se non si è in tolleranza si hanno perdite subito e di tipo strumentale). In ogni caso, il

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI IDENTIFICAZIONE</b> LAM 070 R 381	Rev.           0 Pag. : 57   di : 62
--	--	---

completamento delle prove e le modifiche che verranno apportate in funzione di quanto già testato potranno ulteriormente confermare questa tesi o individuare una seconda tipologia da approfondire nel proseguo dell'attività.

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI          IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.            0  Pag. :    58    di :    62
--	---	---

## 5.0 Conclusioni generali

ENEA, in qualità di progettista del nocciolo LFR secondo varie tipologie, necessita di associare alle attività progettuali anche studi approfonditi di fabbricabilità delle soluzioni proposte. Per quanto riguarda gli elementi di combustibile sono in corso di studio tre soluzioni:

- elementi di combustibile quadrati aperti tipo PWR
- elementi di combustibile esagonali chiusi tipo SPX1
- elementi di combustibile quadrati aperti “vented” (soluzione innovativa).

Per gli elementi di combustibile quadrati aperti è disponibile la tecnologia PWR.

Per gli elementi di combustibile esagonali chiusi, la tecnologia già adottata per i reattori veloci raffreddati a sodio prevede l'utilizzo di un filo spaziatore tra barrette di combustibile, mentre nei reattori LFR si vorrebbe ricorrere a griglie spaziatrici avendo a disposizione un maggior passo fra le barrette. Il montaggio di griglie fra gli elementi chiusi non è di facile esecuzione e la relativa procedura non è ancora stata studiata.

Per quanto riguarda gli elementi di combustibile quadrati aperti “vented”, è stata ideata una soluzione innovativa che non prevede l'estensione della barretta combustibile per contenere i gas di fissione, ma il rilascio dei prodotti gassosi verso volumi chiusi sul prolungamento superiore dell'elemento di combustibile ad una distanza di circa un metro dalla zona attiva.

Questa soluzione richiede un collegamento a tenuta (dei prodotti di fissione, inclusi quelli gassosi) fra un'estremità forata della barretta combustibile ed il suo supporto. Si presentano quindi due ordini di difficoltà per detti collegamenti, in quanto sono da realizzare in spazi limitati (i passi tra le barrette sono dell'ordine di pochi millimetri) e perché devono, ovviamente, essere di alta qualità per garantire la tenuta anche a seguito di transitori termici e di irraggiamento sotto alto flusso neutronico veloce.

Fatta questa premessa, sulla base dell'esperienza maturata nell'ambito nucleare da FN (lavorazioni meccaniche e saldature di precisione), ENEA ha deciso di stipulare con FN un accordo di Collaborazione per un'attività dal titolo “Prove di fabbricabilità per lo sviluppo dell'elemento di combustibile LFR”, che rientra nell'Accordo di Programma MSE-ENEA – Piano Annuale di Realizzazione 2011, tematica di ricerca “Energia Nucleare”, linea progettuale LP3 “Reattori di IV Generazione” (obiettivo B – Materiali strutturali, sotto Ob. B3); in questa attività sono stati sviluppati da FN i seguenti Obiettivi:

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI          IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.           0  Pag. :   59   di :   62
--	---	---

- Obiettivo A: “Valutazione preliminare circa il montaggio di elementi di combustibile esagonali chiusi”
- Obiettivo B: “Prove di fabbricabilità relative al collegamento barretta/supporto elementi quadrati aperti “vented”.

A fronte dell’attività svolta si possono trarre le seguenti conclusioni:

**Obiettivo A:**

partendo dalle specifiche ENEA relative al core ALFRED (elementi esagonali chiusi) ed alle geometrie suggerite per le griglie spaziatrici, basandosi sia sull’esperienza maturata in ambito nucleare con la realizzazione di diverse ricariche per centrali nazionali ed estere, nonché per il reattore Superphenix (elementi esagonali freddi), si è individuata la migliore sequenza per la composizione del fascio e per il suo inserimento nel tubo di contenimento esagonale.

Le soluzioni proposte da ENEA erano due:

- introduzione delle barrette all’interno del tubo esagonale con griglie fissate alla stessa
- introduzione all’interno del tubo esagonale del fascio munito di griglie.

Sulla base di valutazioni pratiche e dell’esperienza maturata con elementi tipo SPX, si è visto che la prima soluzione non era molto praticabile; in primis si tratta di operare con barrette “calde” e quindi occorre cercare di remotizzare il più possibile le operazioni; in questo senso pensare di centrare il collocamento delle singole barre di combustibile in un condotto esagonale munito di griglie (dalle dimensioni molto piccole, inteso come spessori, e quindi molto delicate) in remoto è sicuramente una complicazione.

A prescindere dal discorso “materiale radioattivo”, le operazioni di inserimento delle barre singole (anche “fredde”) all’interno degli appositi spazi definiti dalle griglie con tolleranze molto strette risultano di difficile realizzazione. Inoltre, sia le barre sia le griglie potrebbero subire danneggiamenti nello sfregamento reciproco nella fase di inserimento e quindi compromettere l’integrità del fascio. Una volta che il fascio fosse inserito completamente non sarebbe più verificabile (soprattutto visivamente) l’integrità dello stesso.

Scartata questa prima ipotesi, si è quindi passati alla valutazione della seconda definendo la sequenza di composizione del fascio di barrette ed il loro inserimento con le griglie spaziatrici all’interno del tubo esagonale.

Sia per la composizione del fascio con le relative griglie spaziatrici sia per il suo inserimento nel tubo esagonale, si è pensato di utilizzare un banco opportunamente strumentato per poter operare

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI          IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.            0  Pag. :    60    di :    62
--	---	---

anche in remoto (data la presenza di materiale radiogeno all'interno delle barre) ed in grado di lavorare sia in assetto orizzontale (composizione del fascio e collocamento in asse del fascio e del tubo) ed in verticale (inserimento del tubo sul fascio).

Una prima specifica di tale banco è stata inserita negli allegati al presente Deliverable.

**Obiettivo B:**

In questo caso FN ha dovuto valutare la fattibilità di alcune soluzioni tecniche per l'accoppiamento barretta/supporto (griglia) di elementi quadrati aperti "vented" progettati da ENEA.

Sono state svolte le seguenti attività:

- partendo dalle indicazioni circa le geometrie e le tolleranze in gioco, estremamente ristrette e vincolanti, e, sempre tenendo conto dell'impiego finale con materiale fissile, in condizioni di barretta aperta per cui occorrerà poi procedere con lavorazioni governate in remoto, FN ha preso in esame tre tipologie di tecniche di giunzione:
  - mediante saldatura (A)
  - per "imbutitura" (con punta a frizione) (B)
  - con filettatura e guarnizione (C).
- Per ciascuna tipologia sono stati realizzati i disegni esecutivi relativi sia a provini singoli, necessari per effettuare prove preliminari di assaggio e di messa a punto delle tecniche in oggetto, nonché per la caratterizzazione preliminare, sia a provini costituiti da stringhe di quattro elementi simulanti, appunto, una serie di quattro barrette da collegare a quattro posizioni nella griglia di supporto, comprensiva dei canali di adduzione dei gas.
- Utilizzando materiale di grado nucleare, l'acciaio inox Z10 CNDT 15 15 B, dalle caratteristiche simili a quello richiesto da ENEA, FN ha realizzato mediante tornitura, elettroerosione a filo e fresatura i provini di cui al punto precedente, curandone anche la verifica dimensionale mediante controlli effettuati in laboratorio metrologico.
- Per quanto riguarda la tecnica di saldatura, partendo dalla propria esperienza in campo nucleare con la saldatura di tipo TIG, è stato effettuato uno studio per valutare l'applicabilità della stessa a questo tipo di geometria e di vincoli; si è visto che per riuscire ad effettuare le saldature interne, visti gli spazi, appunto molto stretti, occorreva disporre di un impianto ad hoc con micro-torce; sulla base di uno scambio di opinioni con esperti del RINA, anche sulla definizione dei controlli qualità e di certificazione da effettuare per garantire la bontà del giunto, si è deciso di optare per la microsaldatura laser, in grado di garantire una maggiore

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI          IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.            0  Pag. :    61    di :    62
--	---	---

precisione in spazi così ristretti. Poichè il calore di fusione viene fornito da un laser ad alta potenza, si può concentrare l'energia in un'area molto piccola dando origine a saldature profonde e strette. Il rapporto profondità/sezione va da 4 a 10. I vantaggi di questa tipologia di tecnica risiedono soprattutto nel fatto di produrre saldature di alta qualità, con un minimo ritiro e minima distorsione (zona termicamente alterata praticamente quasi nulla), senza porosità. Inoltre, da un punto di vista pratico, questa tipologia non richiede il vuoto, il fascio può essere focalizzato otticamente, utilizzando per esempio fibre ottiche e facilmente manipolato; non genera raggi X come l'EBW e presenta una migliore qualità nella saldatura anche rispetto a quest'ultima tecnica, con meno tendenza alla fusione incompleta, a spatter, porosità e distorsioni. Per contro, poiché il cordone di saldatura è quasi inesistente, questa tecnica richiede di realizzare provini molto precisi nelle zone di accoppiamento.

- Sono stati forniti alla ditta individuata, qualificata per effettuare tali saldature, i provini in assetto singolo per le prove preliminari e di pre-qualifica, oltre ad un provino stringa da 4 fori.
- I campioni sono stati testati mediante prove in elio secondo il metodo Hood ottenendo, in particolare nei provini singoli, valori molto interessanti.
- Per quanto riguarda la seconda tecnica, "imbutitura", sono state effettuate prove preliminari variando i parametri di processo; i provini ottenuti in queste prove sono stati sottoposti a test di tenuta in elio riscontrando valori non ancora soddisfacenti; i provini verranno sottoposti a prove distruttive per verificare l'accoppiamento ed ottenere ulteriori informazioni. I provini da 4 saranno modificati opportunamente.
- Malgrado i primi risultati ottenuti, si ritiene sia necessario rivedere alcuni parametri ed effettuare modifiche ai provini prima di rigettare in toto questa tecnica.
- Per quanto riguarda la terza tecnica, quella con filettatura e guarnizione, sono state effettuate prove preliminari variando i parametri di processo (spessore guarnizione, modalità di serraggio); i provini sono stati sottoposti a prove di tenuta in elio, sia in vuoto sia in pressione, riscontrando interessanti valori. Il completamento della caratterizzazione con la stringa da quattro è in corso, inoltre sono state individuate anche delle modifiche alle guarnizioni che saranno sicuramente migliorative in termini di tenuta.
- In conclusione, si può affermare che, confrontando i risultati preliminari ottenuti, risulta che la microsaldatura laser dà valori più bassi come segnale di perdita e sembra essere la strada migliore anche in termini di ripetibilità e controllo "passivo" della qualità della lavorazione (se non si è in tolleranza si hanno perdite subito e di tipo strumentale). In ogni caso, il

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI IDENTIFICAZIONE</b> LAM 070 R 381	Rev.           0 Pag. :   62   di :   62
--	--	---

completamento delle prove ancora in corso e le modifiche che verranno apportate in funzione di quanto già testato potranno ulteriormente confermare questa tesi o individuare una seconda tipologia da approfondire nel proseguo dell'attività.

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI          IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.            0  ALLEGATI
--	---	-----------------------------------

## Allegato 0

### Specifiche preliminari banco di assemblaggio

#### A1 – Scopo:

Il banco in oggetto è concepito per utilizzo multiplo. Esso permette le seguenti operazioni:

- Formazione in orizzontale del fascio di barrette completo delle griglie spaziatrici opportune (n. 4)
- Ribaltamento da orizzontale a verticale e viceversa di un elemento tipo ALFRED
- Posizionamento in asse del tubo esagonale in cui inserire il fascio
- Introduzione in verticale del fascio entro il tubo esagonale.

#### A2 – Componenti principali:

Il banco sarà composto essenzialmente dalle seguenti parti:

##### A2.1 – Basamento – plinto

Si tratta di predisporre un robusto basamento ancorato saldamente a terra tramite un plinto in cemento armato che eviti le vibrazioni e sopporti il peso del banco e dell'elemento completo. Nel basamento sono montati:

- il perno che definisce il centro di rotazione del ribaltamento del bancale
- il cilindro idraulico, adeguatamente dimensionato, che comanda il ribaltamento
- staccato dal basamento è previsto un cavalletto su cui appoggia l'estremità del bancale in posizione orizzontale.

##### A2.2 – Bancale

Deve essere dimensionato in modo che durante la fase di introduzione assicuri la coassialità tra fascio e tubo esagonale e che durante la fase di ribaltamento non assuma una freccia eccessiva che possa compromettere l'integrità dell'elemento di combustibile. Sul bancale sono piazzati tutti i componenti che esplicano le principali funzioni operative della macchina e precisamente:

- *slitta*: scorre su due guide fissate ai lati del bancale e permette la corsa del tubo durante la fase di introduzione; è azionata da un motoriduttore a velocità variabile che comanda una vite su cui scorre la chiocciola fissata alla slitta. La precisione e la robustezza delle guide della slitta devono assicurare la coassialità del fascio-tubo esagonale. Sulla slitta sono

 <p><b>FN S.p.A.</b>  <b>NUOVE TECNOLOGIE  E SERVIZI AVANZATI</b></p>	<p><b>SIGLA DI  IDENTIFICAZIONE</b></p> <p>LAM 070 R 381</p>	<p>Rev.            0</p> <p>ALLEGATI</p>
--	--	--

posizionati due o più supporti apribili (eventualmente a comando pneumatico) che staffano il fascio o l'elemento rendendolo solidale alla slitta. Tali supporti sono aperti o chiusi ad impulso manuale.

- *Supporti del fascio:* sono quattro supporti a sede esagonale, fissati ai lati del bancale, su cui appoggia il fascio di barrette. Permettono il posizionamento delle griglie spaziatrici e della griglia finale. Ruotano, aprendosi in due metà, come bandiere in modo da far passare il fascio durante la fase di introduzione, quando l'estremità del fascio passa nei punti di sostegno del fascio. Il comando di rotazione dei semisupporti viene dato da otto cilindri pneumatici asserviti a microinterruttori o distributori pneumatici disposti lungo le guide della slitta e azionati da un riscontro sulla slitta.
- *Supporto sostegno fascio in verticale:* è piazzato all'estremità del banco e deve sostenere il peso del fascio quando il bancale è in posizione verticale. Durante la fase di ribaltamento dell'elemento, il supporto non deve intralciare il posizionamento dell'elemento sul bancale. Il supporto deve permettere la totale introduzione del fascio nel tubo esagonale, mantenendo l'appoggio dello stesso.
- *Supporti sostegno del tubo esagonale in verticale:* devono sostenere il peso dell'elemento quando il bancale è in verticale. I supporti consistono in due semi-esagoni che hanno la base vincolata alla slitta e la parte apribile che si chiude sull'elemento e lo fissa al livello delle placchette distanziatrici che impediscono lo scivolamento.
- *Supporto griglia finale:* è un supporto atto a sostenere la griglia finale in fase di formazione del fascio. A banco ribaltato, in posizione verticale, il supporto di tale griglia deve portarsi fuori ingombro, per permettere il passaggio della slitta. Lo spostamento del supporto è azionato da un cilindro pneumatico tramite impulso manuale.

Al fine di evitare eventuali sovraccarichi nella fase di introduzione del fascio nel tubo esagonale, si possono prendere in considerazione due soluzioni:

- a) sul comando di traslazione della slitta si può prevedere un sistema (da definire fra rilevatore di coppia, frizione tarata, presso stato, etc.) che inibisca l'avanzamento della slitta in fase di introduzione fascio/tubo esagonale, quando lo sforzo di strisciamento superi un determinato valore di specifica (da definire);
- b) una fune in acciaio, vincolata al sistema di aggancio alla griglia, dotata di cella di carico, che consente il sollevamento del fascio, il peso dello stesso (subito, come taratura) ed il

 <b>FN S.p.A.</b> NUOVE TECNOLOGIE E SERVIZI AVANZATI	<b>SIGLA DI          IDENTIFICAZIONE</b>  LAM 070 R 381	Rev.            0  ALLEGATI
--	---	-----------------------------------

controllo di eventuali sovraccarichi in fase di introduzione. Con questo sistema, nel caso appunto si verificano condizioni non conformi, è possibile intervenire manualmente e correggere l'introduzione.

### **A3 – Cicli previsti**

Il banco deve essere predisposto e programmato per i seguenti cicli:

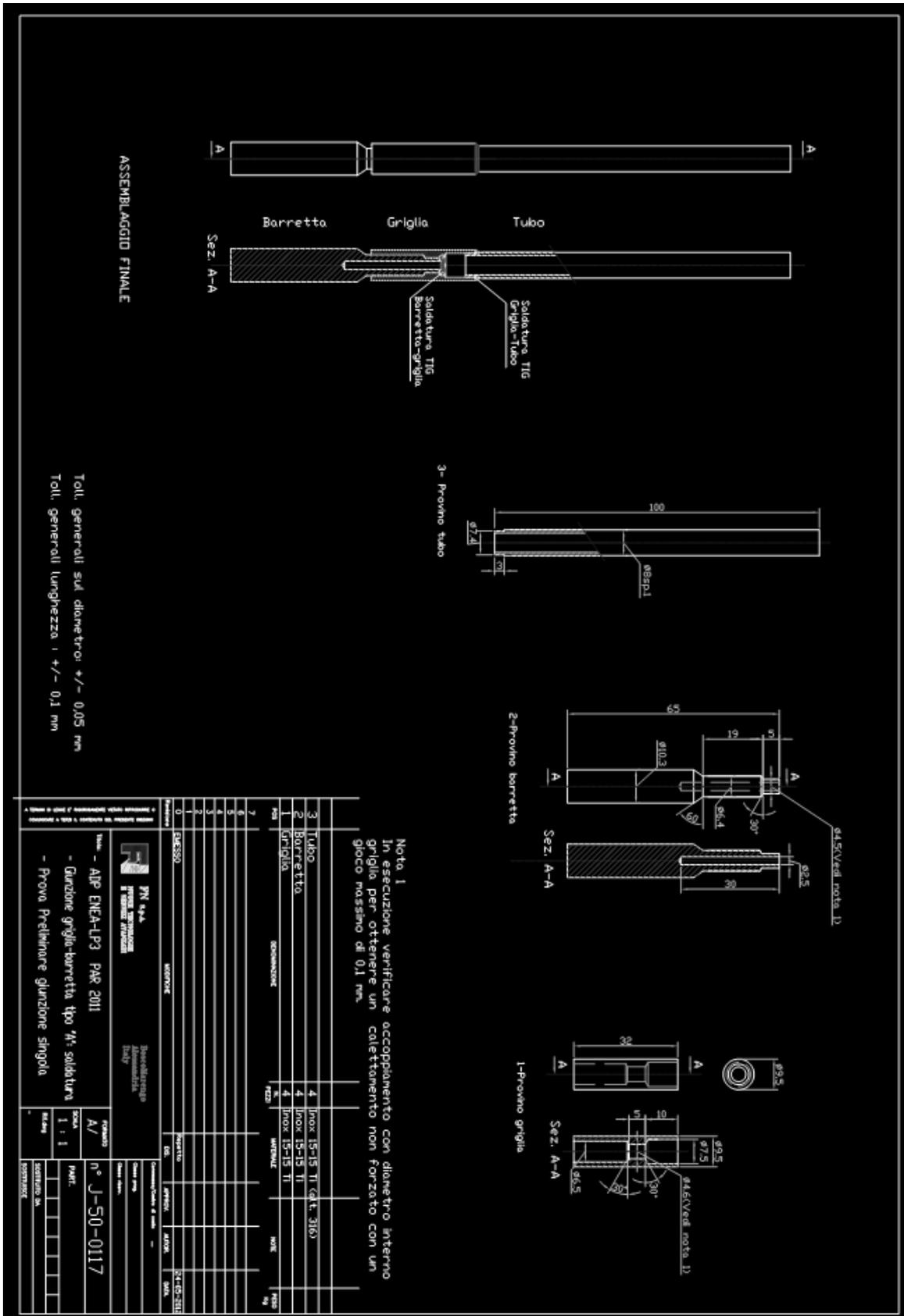
- ciclo di formazione del fascio
- ciclo di ribaltamento
- ciclo di introduzione del fascio nel tubo esagonale.

### **A4- Materiali e procedimenti costruttivi**

Tutte le operazioni della macchina devono avvenire in condizioni di pulizia nucleare, quindi tutti i particolari che vengono a contatto con le parti da assemblare o dell'elemento devono essere non contaminate o ossidabili (acciaio inox, nylon, pvc, etc.). Per le altre parti di macchina vale l'acciaio da costruzioni o qualsivoglia materiale idoneo.

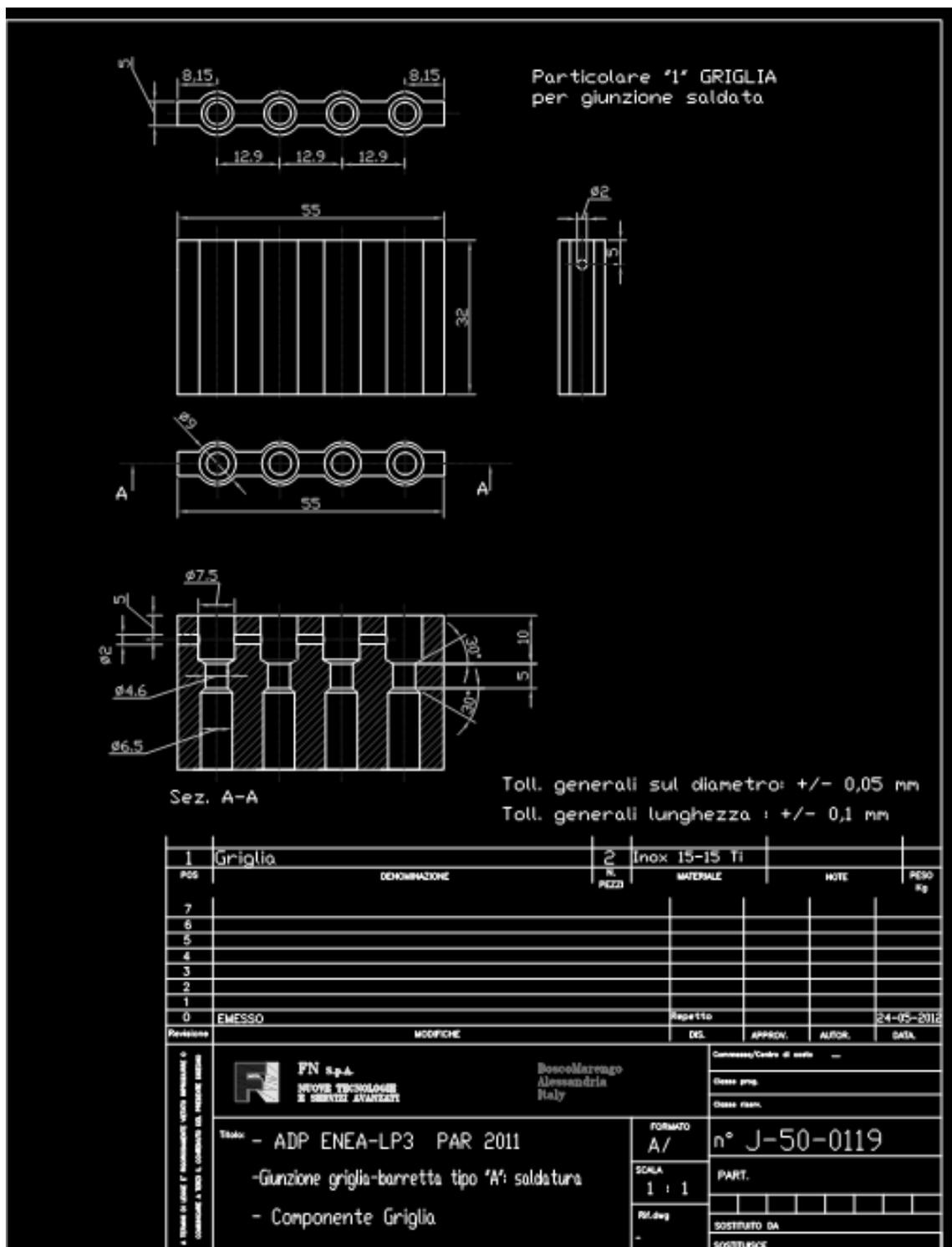


**Allegato 1**



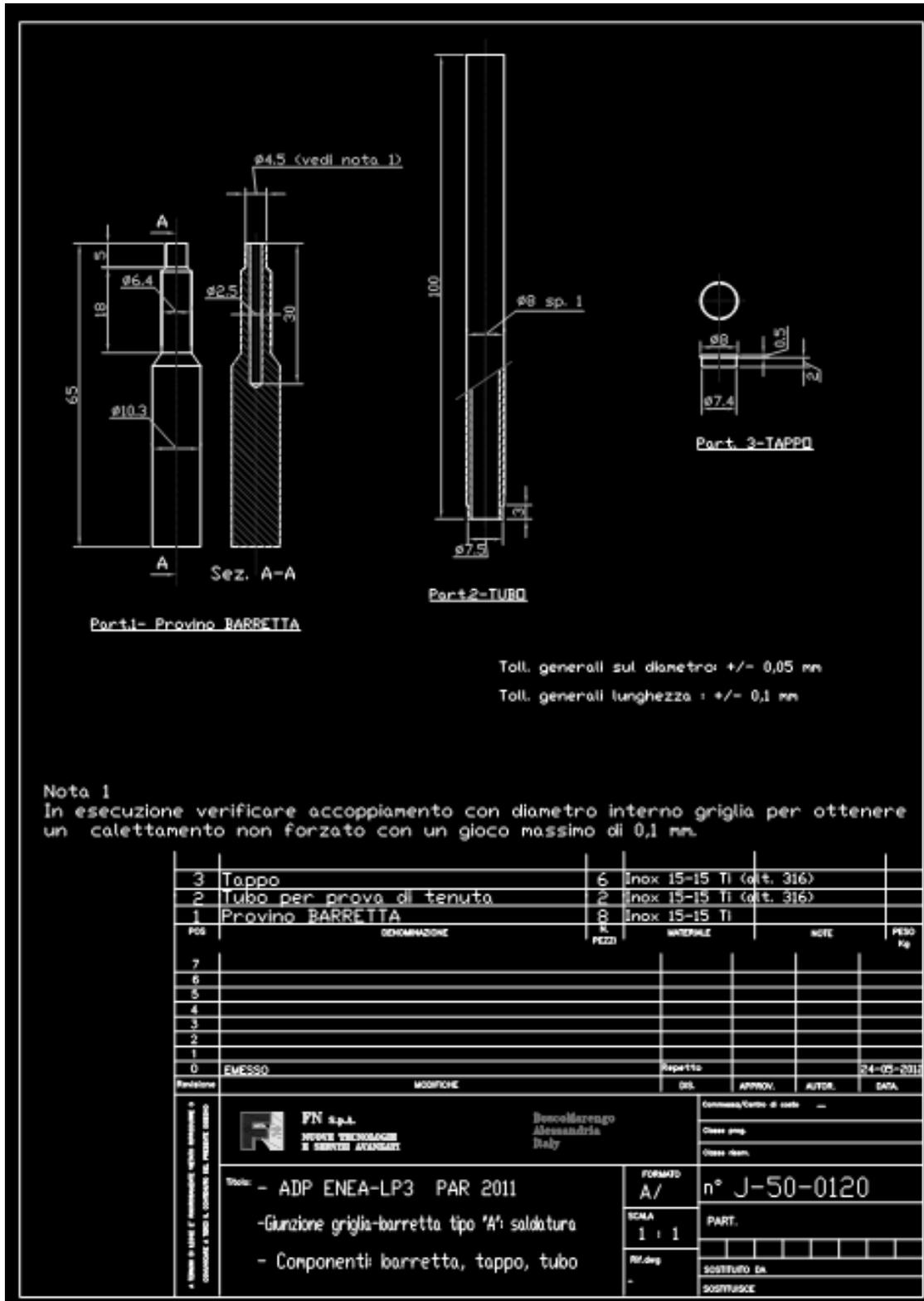


**Allegato 2**





**Allegato 3**

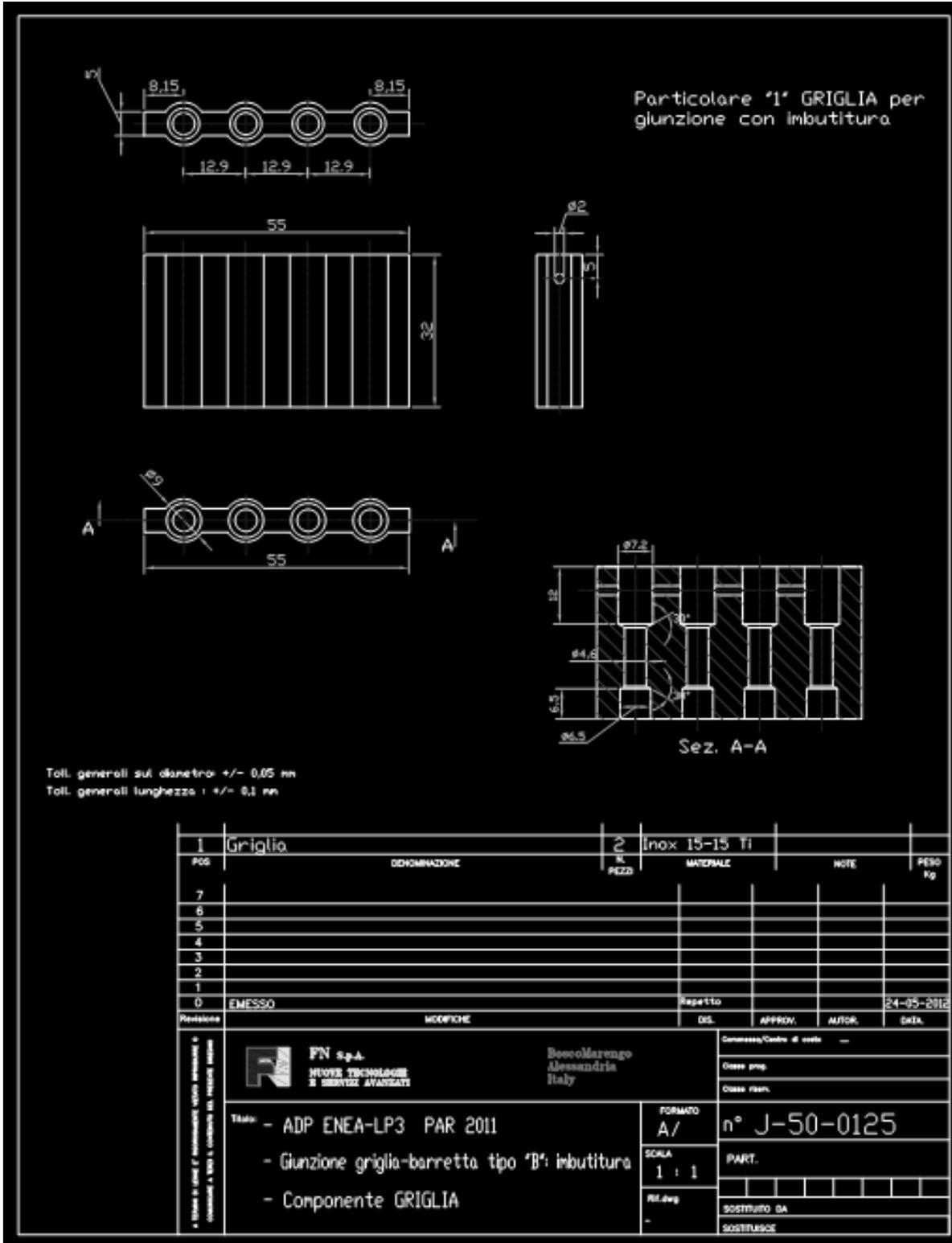






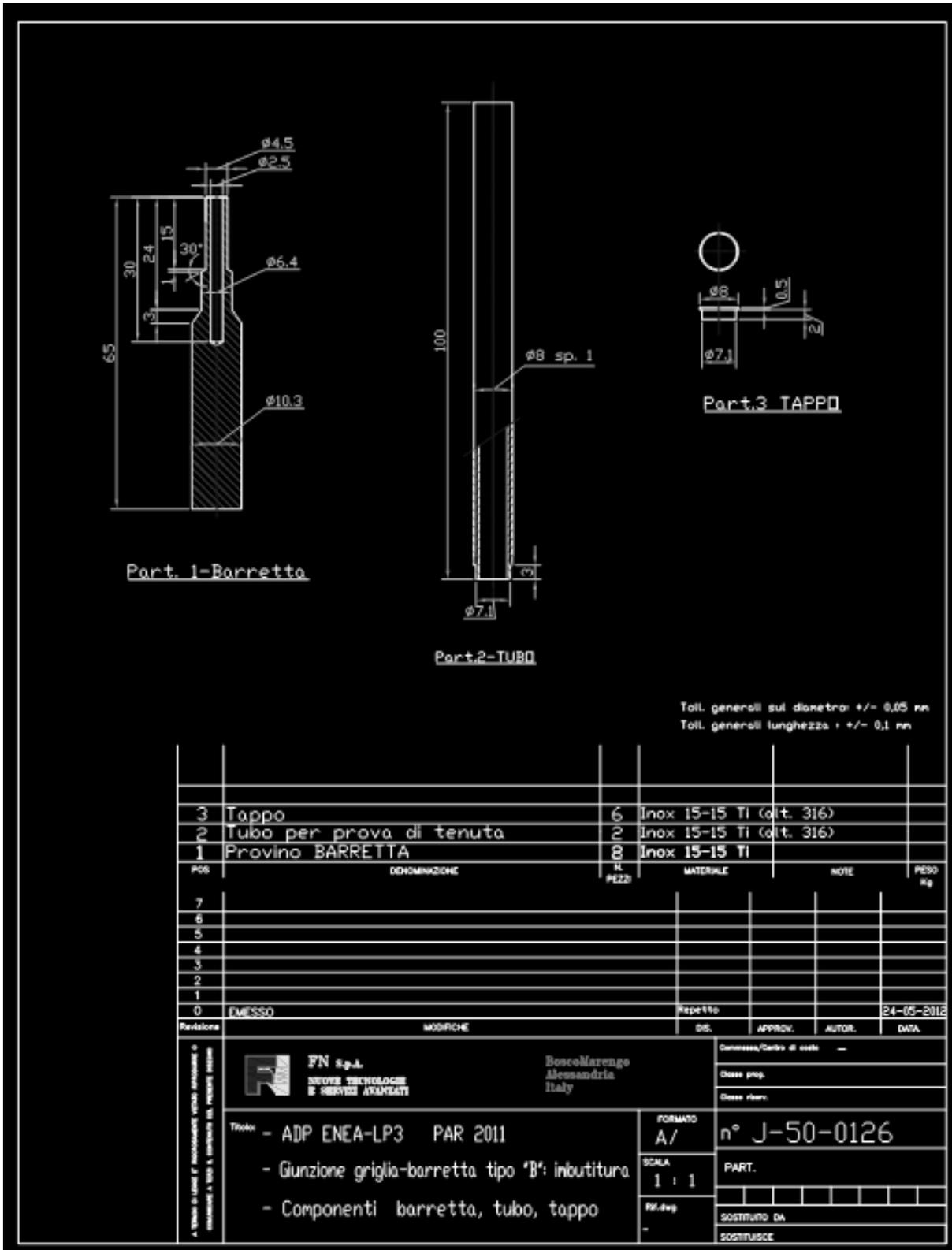


**Allegato 6**





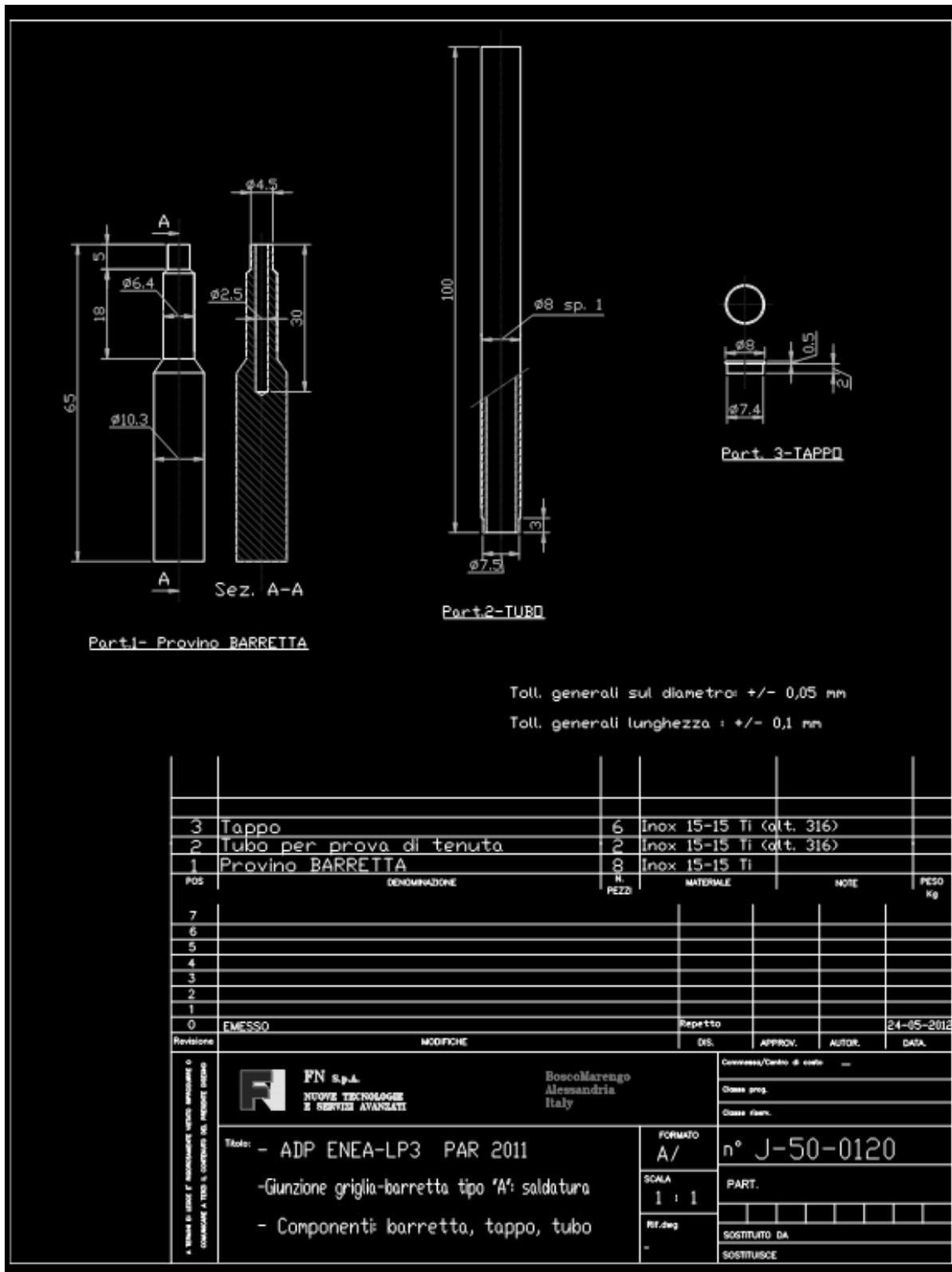
**Allegato 7**







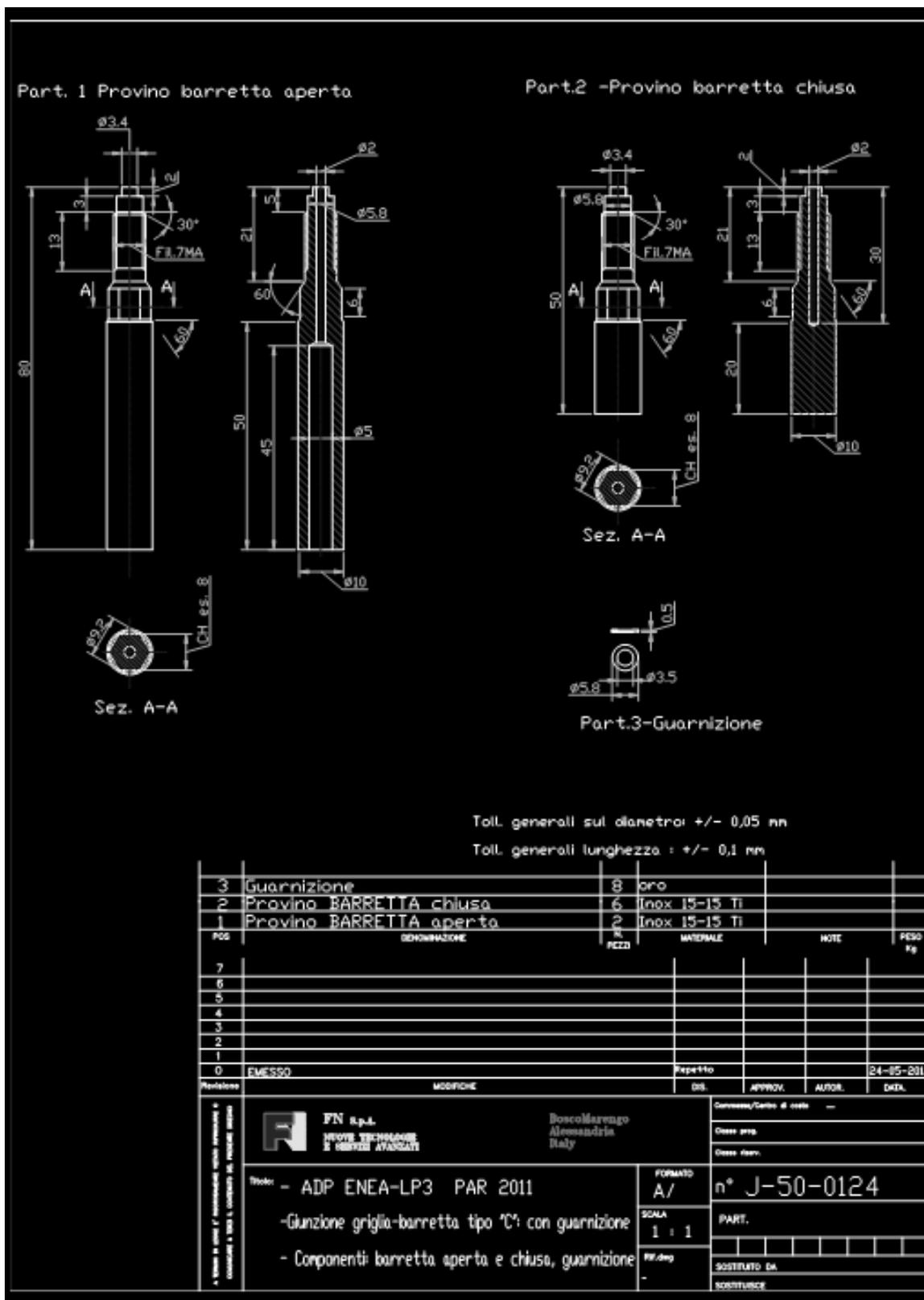
**Allegato 9**







**Allegato 11**





**Allegato 12**

