



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



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

# Rapporto sulle verifiche tecnologiche per il Target Assembly di IFMIF

*G. Micciché, R. Giannusso, D. Bernardi, M. Agostini*

Rapporto sulle verifiche tecnologiche per il Target Assembly di IFMIF

G. Miccichè, D. Bernardi, R. Giannusso, M. Agostini (ENEA)

Novembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Fusione nucleare: Attività di fisica e tecnologia della fusione complementari ad ITER, denominate "Broader Approach"

Responsabile Progetto: Aldo Pizzuto, ENEA

Si Ringrazia Il Prof. Pietro Alessandro Di Maio del Dipartimento Energia dell'Università di Palermo per i preziosi suggerimenti e per il supporto fornito nella fase di definizione dell'attività di analisi per lo studio del fenomeno dello swelling sui sistemi filettati accoppiati.

**Titolo**

**Rapporto sulle verifiche tecnologiche per il Target Assembly di IFMIF**

**Descrittori**

**Tipologia del documento:** Deliverable

**Collocazione contrattuale:** Accordo di programma ENEA-MSE

**Argomenti trattati:** Qualifica Guarnizione, swelling, qualifica sistema a pattino.

**Sommario**

Questo documento descrive i risultati delle attività sperimentali e di simulazione per la qualifica del concetto Europeo del Target di IFMIF. In particolare sono riportati i risultati delle prove di qualifica della guarnizione di tenuta utilizzata dal bersaglio a baionetta, delle analisi numeriche relative al fenomeno dello swelling a cui sono soggetti i bulloni di serraggio e della simulazione delle sollecitazioni delle piastre di contrasto del sistema a pattino del bersaglio di IFMIF

**Note****Copia n.****In carico a:**

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE		NOME	G. Micciché	A. Aiello	P. Agostini
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA		REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	<b>IM-G-R-015</b>	0	<b>L</b>	2	34

### Lista degli acronimi

<b>BP</b>	Back Plate
<b>dpa</b>	displacement per atom
<b>FPY</b>	Full power year
<b>IFMIF</b>	International Fusion Materials Irradiation Facility
<b>IT</b>	Integral Target
<b>JAEA</b>	Japan Atomic Energy Agency
<b>RH</b>	Remote Handling
<b>RHE</b>	Remote handling Equipment
<b>TA</b>	Target Assembly
<b>TC</b>	Test Cell

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	<b>IM-G-R-015</b>	0	<b>L</b>	2	34

## SOMMARIO

1. INTRODUZIONE .....	6
2. DESCRIZIONE DEL CONCETTO EUROPEO DEL TARGET ASSEMBLY PER IFMIF .....	7
2.1 LA BACKPLATE A BIONETTA DEL TA EUROPEO PER IFMIF .....	11
3. VERIFICA DELLA GUARNIZIONE DI TENUTA DELLA BACKPLATE ...	12
3.1 CONDIZIONI DI PROVA E PREPARAZIONE DEL TEST DELLA GUARNIZIONE.....	13
3.2 OPERAZIONI DI ASSEMBLAGGIO DELLE SEZIONI DI PROVA.....	15
3.3 ANALISI POST PROVA .....	16
4. VALIDAZIONE DEL SISTEMA A PATTINO PER LA BACKPLATE DI IFMIF 22	
4.1 TEST DEL SISTEMA A PATTINO .....	23
5. PROBLEMATICHE INDOTTE DALLO SWELLING NELLA BACKPLATE DI IFMIF .....	26
5.1 CAMPAGNA DI RICERCA RELATIVA ALLO SWELLING .....	27
5.2 MODELLI FEM.....	28
5.3 RISULTATI .....	32
6. CONCLUSIONI .....	35
BILBLIOGRAFIA .....	37

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	<b>IM-G-R-015</b>	0	<b>L</b>	2	34

## 1. INTRODUZIONE

L'International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF) è prevalentemente finalizzato a testare, in un ambiente che riproduca le severe condizioni operative di un reattore a fusione, i materiali candidati all'impiego in un tal tipo di reattori, consentendo la realizzazione di uno specifico database delle proprietà termofisiche di materiali irraggiati da impiegare per il progetto, la costruzione, il licensing e le operazioni in sicurezza del reattore a fusione dimostrativo DEMO [1].

IFMIF è costituito da due acceleratori lineari continui da 40 MeV, deputati a depositare due fasci da 125 mA di deutoni su un target costituito da una corrente di litio liquido. Tali deutoni, interagendo con il litio secondo reazioni di "stripping", danno luogo all'emissione di un intenso flusso neutronico dell'ordine di  $10^{18} \text{ nm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , contraddistinto da un spettro energetico "duro" che, analogamente a quello di un plasma da fusione D-T, reca un picco in corrispondenza all'energia di 14 MeV. Questa popolazione neutronica consente l'irraggiamento di campioni di materiali in condizioni rappresentative di un tipico reattore a fusione con plasma D-T fino a tassi di danneggiamento dell'ordine di 50 dpa/fpy [1].

Attualmente il programma di R&D implementato per IFMIF è nella fase di Engineering Validation and Design Activities (EVEDA) che è parte del più ampio programma di ricerca sulla fusione nucleare denominato Broader approach agreement stabilito tra l'Europa ed il Giappone.

In tale contesto L'Italia ha, tra l'altro, la responsabilità della progettazione del concetto Europeo del Target Assembly (TA) di IFMIF.

La proposta Europea del concetto di TA per IFMIF è conosciuta come Target a Baionetta. Essa presenta alcune peculiarità, come la semplificazione delle operazioni di manutenzione, il miglioramento della disponibilità d'impianto e la riduzione del materiale attivato da smaltire, che hanno spinto la comunità di IFMIF ad investire nello sviluppo di tale concetto. La validazione del progetto di tale concetto di target passa comunque attraverso la verifica di alcune funzionalità senza le quali non è possibile garantire gli elevati standard di sicurezza richiesti durante il funzionamento.

Questo documento descrive i tests e le analisi teorico-computazionali a supporto dell'attività di progettazione Ingegneristica eseguite per la

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	<b>IM-G-R-015</b>	0	<b>L</b>	2	34

validazione di tale componente. In particolare dopo una breve introduzione al concetto di TA Europeo vengono discusse in dettaglio le attività relative a:

- 1) Qualifica del sistema di tenuta della Backplate;
- 2) Analisi del fenomeno di swelling sugli accoppiamenti bullonati della Backplate;
- 3) Analisi e test del sistema di bloccaggio della backplate mediante pattini.

## **2. DESCRIZIONE DEL CONCETTO EUROPEO DEL TARGET ASSEMBLY PER IFMIF**

IFMIF sarà provvisto di un Target a litio devoto a fornire il flusso neutronico ad alta energia richiesto per l'irraggiamento dei campioni dei materiali da qualificare. Attualmente si stanno sviluppando due concetti di TA per IFMIF: il primo conosciuto come Integral Target (IT) è un componente completamente saldato ed è connesso con la restante dell'impianto per mezzo di flange saldate, nelle parti in cui il litio è in contatto con l'accoppiamento, e di sistemi a connessione rapida nelle restanti parti. L'IT è sviluppato in Giappone dal JAEA. Il secondo è conosciuto come target con backplate a baionetta ed è sviluppato in Europa dall'ENEA. Tale concetto di Target prevede la connessione con l'impianto a litio e con l'acceleratore utilizzando esclusivamente sistemi a connessione rapida. Il concetto di Target Europeo è illustrato nelle figure 1 e 2. Il Target assembly a Baionetta è stato sviluppato con il preciso obiettivo di implementare alcune funzionalità in modo da:

- 1) Semplificare le operazioni di manutenzione remotizzata;
- 2) Migliorare la disponibilità d'impianto (duty cycle);
- 3) Ridurre la quantità di materiale da smaltire.

Le funzionalità implementate che permettono di raggiungere questi obiettivi sono sostanzialmente due:

- 1) la concezione del tipo di backplate che può essere rimpiazzata all'occorrenza, e

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	<b>IM-G-R-015</b>	0	<b>L</b>	2	34

2) il tipo di connessione del TA con la restante parte dell'impianto che fa esclusivamente uso di sistemi a rapida connessione.

Infatti:

- 1) la backplate del TA è il componente più esposto al flusso neutronico, Vedi Fig. 3, e come tale le condizioni in cui questo componente opera sono molto critiche. E' atteso che il suo tempo di vita sia limitato a causa del bombardamento neutronico che pregiudica le proprietà meccaniche dei materiali. Per tale motivo il concetto Europeo del TA è stato progettato con la possibilità di rimuovere solamente la backplate. Tale operazione di rimpiazzo pur essendo complessa viene eseguita comunque entro un tempo ben definito di 1,2 giorni ( ~9,5 ore);
- 2) Il tempo necessario per rimpiazzare la Backplate è sicuramente minore di quello richiesto per rimpiazzare l'intero target assembly. Ma l'utilizzo dei sistemi a rapida connessione utilizzati per questo tipo di target consente di raggiungere tempi di rimpiazzo sicuramente accettabili ( 2 giorni è la stima attuale).
- 3) rimpiazzare l'intero TA comporta lo smaltimento di circa 1 T di materiale mentre la sola Backplate ha un peso di circa 85 Kg.

Il Target a baionetta comprende, vedi fig. 1 e 2, il corpo del TA e la backplate (Bersaglio) rimovibile. Il corpo del TA a sua volta è costituito dalla tubazione di ingresso del litio, dal raddrizzatore di flusso, dall'ugello di iniezione del litio sul canale in cui avviene la reazione di stripping e dal sistema d'uscita che convoglia il litio nella tanca inferiore. Inoltre nella parte posteriore esso comprende l'interfaccia per la connessione con il beam dell'acceleratore.

Come anticipato la backplate rimovibile, mostrata in Fig. 4, è la parte che caratterizza questo tipo di target.

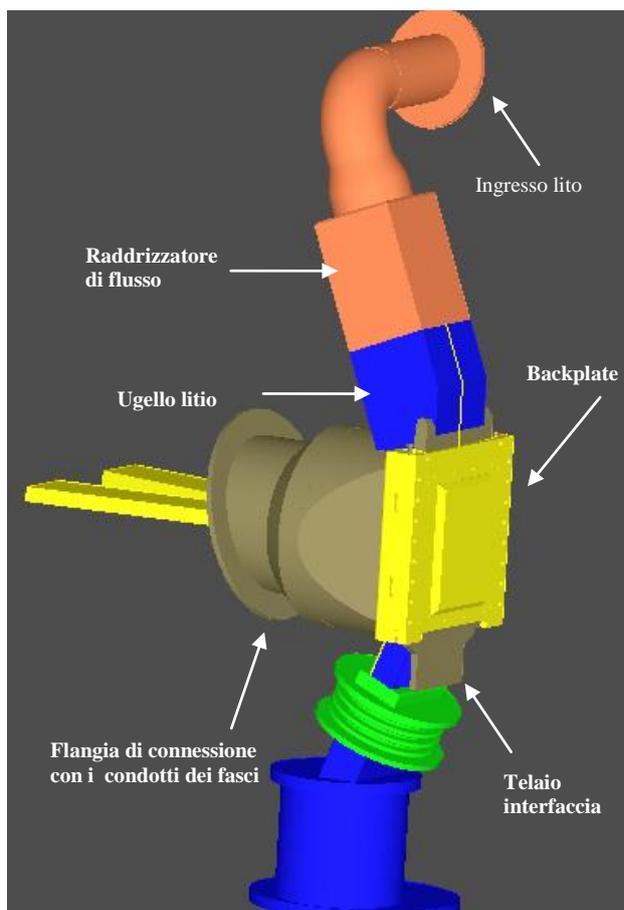


Fig. 1 Modello 3D del Target assembly di IFMIF

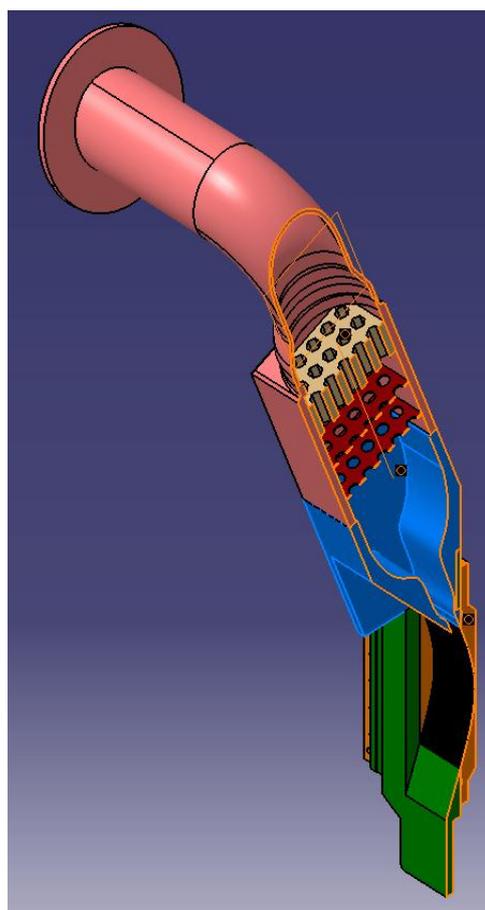


Fig. 2 Sezione del modello 3D del Target

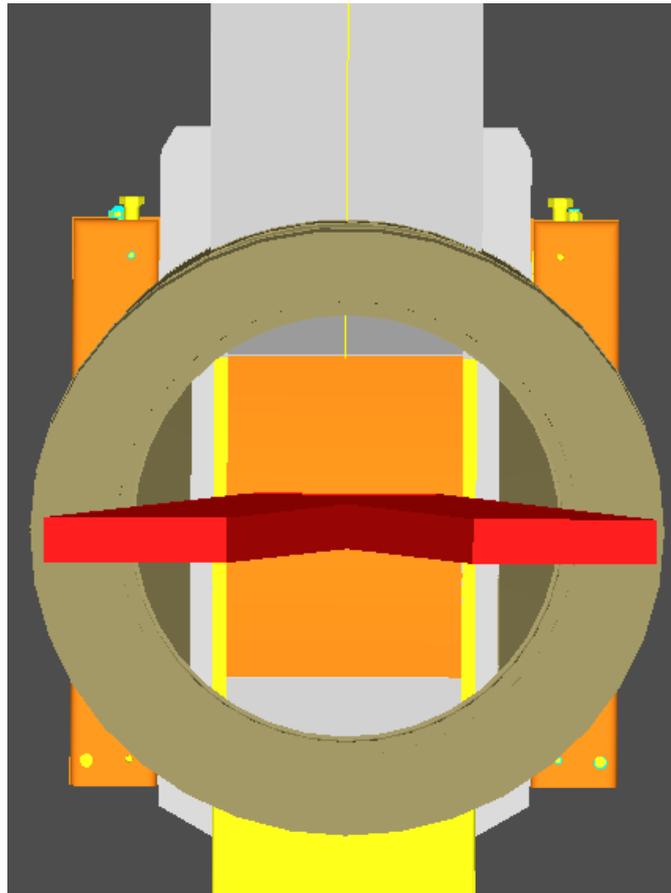


Fig3 Vista posteriore TA ( lato Beam)

**Sistema a pattino**

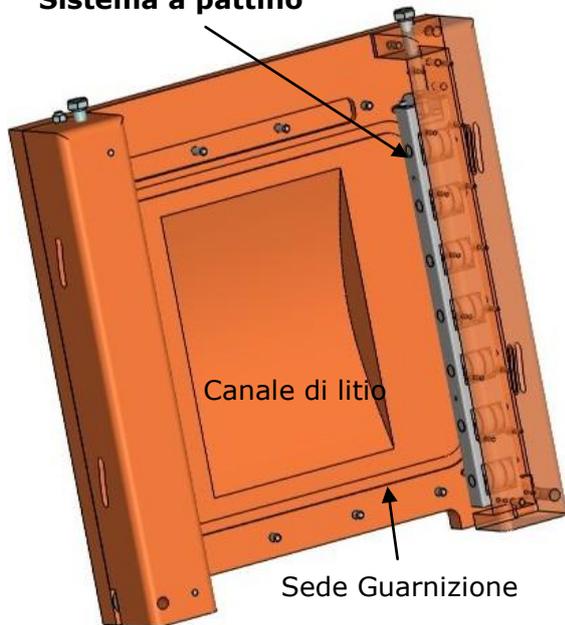


Fig.4 Modello 3D Backplate ( parte beam)

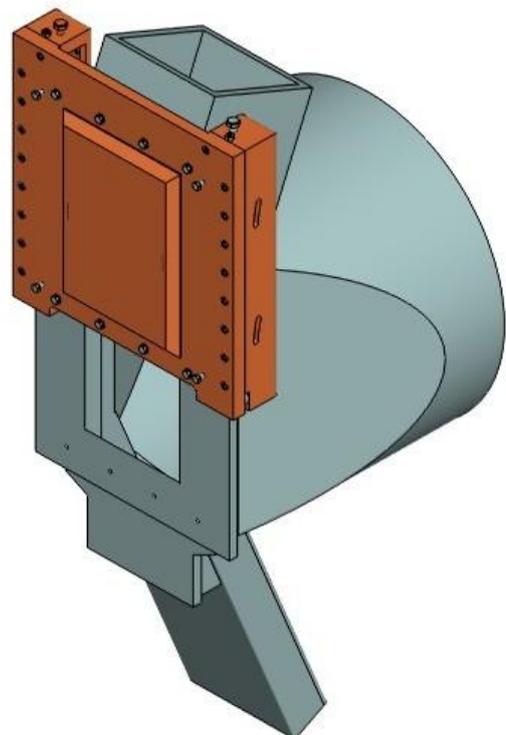


Fig. 5 Rimpiazzo della Backplate

## 2.1 LA BACKPLATE A BIONETTA DEL TA EUROPEO PER IFMIF

Il modello di backplate utilizzato dal concetto Europeo di TA di IFMIF è illustrato in Fig. 4 . Esso è costituito da una piastra su cui sono ricavati il canale in cui scorre il litio e la sede che ospita la guarnizione di tenuta che sigilla la camera del target stesso. Due supporti di contrasto a L, poste nella parte posteriore della piastra, ospitano i pattini del sistema di chiusura.

Il sistema di chiusura della backplate è stato concepito in modo da ridurre il numero di bulloni di bloccaggio. A tal fine la chiusura viene ottenuta manovrando 8 bulloni ( 4 nella parte superiore e 4 nella parte inferiore) e due pattini uno per ognuno dei due lati rimanenti ( vedi fig. 6). L'impiego quindi dei pattini per la chiusura dei segmenti laterali permette di ridurre il numero di bulloni da 16 ( 4 per ogni lato) a 10 .

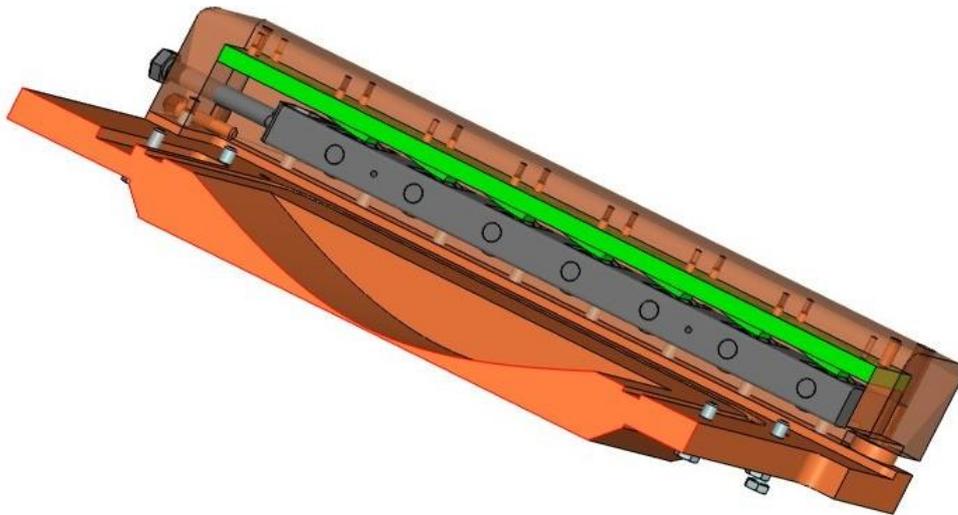


Fig. 6 Sistema di chiusura a pattino della Backplate

Il sistema di tenuta è realizzato mediante una guarnizione metallica per applicazioni nucleari. Essa dovrà garantire il mantenimento delle condizioni di vuoto previste nella camera del corpo del Target ( $10^{-3}$  PA) ed una perdita massima di  $10^{-10}$  mbar\*s/l/s.

Visto il tipo di applicazione tutti i materiali della guarnizione sono stati scelti (in particolare il materiale esterno della guarnizione) litio compatibili. La scelta è ricaduta su una guarnizione prodotta dalla Helicoflex, Tipo HNV

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	<b>IM-G-R-015</b>	0	<b>L</b>	2	34

200 (C ring-low delta data) a basso carico, avente e seguenti caratteristiche:

- 1) Materiale del liner esterno : Armco;
- 2) Materiale molla : Inconel x750;
- 3) Materiale del liner interno AISI SS 304;
- 4) Carico da applicare per il punto ottimo di tenuta: 170 N/mm

Naturalmente le condizioni di tenuta dipendono sia dalla qualità della guarnizione e dai materiali utilizzati, ma anche dal sistema di spinta che dovrà garantire l'esercizio di un carico costante nel tempo sulla guarnizione. Quindi ai fini della validazione del progetto del TA, in aggiunta alle attività di verifica neutronica, termomeccanica e termoidraulica, sono state individuate alcune attività sperimentali e teorico-computazionale da effettuare per alcuni specifici componenti e funzionalità del progetto ed in particolare:

- 1) Test della compatibilità dell'Armco con il Litio e verifica dell'assenza di permeazione del litio all'esterno del delta di tenuta della guarnizione;
- 2) Test della capacità del sistema a pattino di fornire e mantenere la spinta necessaria per il raggiungimento del punto ottimo di tenuta.

Inoltre sul sistema di bloccaggio della blackplate è stato eseguito uno studio sui fenomeni di swelling cui sono soggetti i bulloni in un ambiente in cui sono presenti neutroni. Queste attività di verifica e validazione vengono presentati nei prossimi paragrafi insieme ai risultati sperimentali e computazionali ottenuti.

### **3. VERIFICA DELLA GUARNIZIONE DI TENUTA DELLA BACKPLATE**

I punti centrali della verifica da eseguire sono quelli di valutare le capacità di tenuta della guarnizione proposta riproducendo nella maniera più fedele possibile le sue condizioni operative e di misurare la quantità di materiale del rivestimento in contatto con il litio che viene asportata per i noti fenomeni di corrosione che vengono appunto promossi dal contatto con il litio stesso. Di seguito vengono presentate le condizioni di prova, la preparazione dell'esperimento e le analisi post prova eseguite con i relativi risultati.

### 3.1 CONDIZIONI DI PROVA E PREPARAZIONE DEL TEST DELLA GUARNIZIONE

Il Target a litio di IFMIF è caratterizzato da una temperatura di esercizio compresa tra  $250 \div 300^{\circ}\text{C}$  (rispettivamente temperatura d'ingresso e di uscita del litio nel target). L'incremento di temperatura è dovuto alla potenza depositata nel flusso di litio da parte dei deutoni) e da un tasso di corrosione dell'ordine di  $1\mu\text{m}/\text{anno}$ .

Come anticipato la guarnizione utilizzata per garantire la tenuta tra la backplate e il corpo del target è una Helicoflex HNV200 in Armco/Inconel x750/SS304. Tale modello di guarnizione richiede un carico di  $170\text{N}/\text{mm}$  per il raggiungimento del punto di funzionamento ottimo per la tenuta. La guarnizione utilizzata per questo test è mostrata in fig. 7. Quando sulla guarnizione viene applicato il carico richiesto, i due dentini (delta in fig.7) della guarnizione, che sono a contatto con le due superfici da sigillare, deformandosi garantiscono la tenuta del sistema.

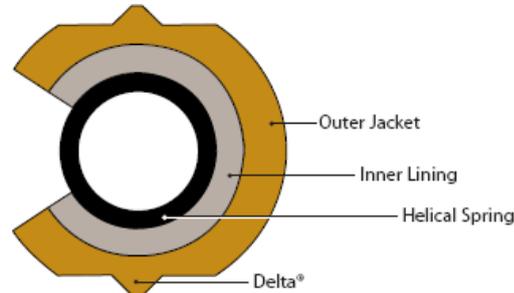


Fig. 7 Vista in sezione della Guarnizione Helicoflex

Qundi in accordo alle condizioni operative su esposte per il test della guarnizione sono state predisposte due sezioni di prova illustrate in Fig. 8 e 9. Le due sezioni di prova sono state realizzate in acciaio AISI 316L e possono contenere un volume di litio di 7g. Esse comprendono due parti: il contenitore in cui viene sciolto il litio ed il coperchio in cui è alloggiata la guarnizione (vedi Fig. 9).

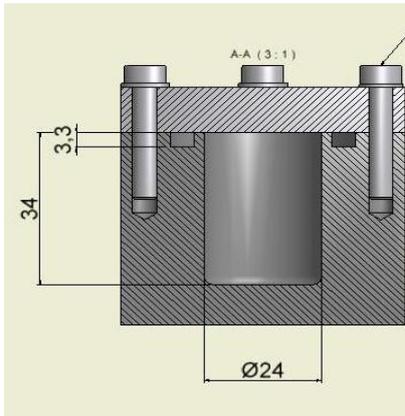


Fig. 8 Progetto sezione di prova



Fig. 9 Sezioni di prova realizzate

La chiusura delle sezioni di prova è stata realizzata mediante 8 bulloni M5 x 20 serrati con una coppia di 5 Nm per trasmettere il carico totale richiesto sulla guarnizione di ~1,9 T. Inoltre per garantire che almeno in un caso vi sia contatto tra il litio fuso e la guarnizione, uno dei due contenitori è stato provvisto di un piccolo canale che mette in comunicazione la sede in cui è alloggiata la guarnizione e la camera contenente il volume di litio fuso. La tabella seguente riepiloga le principali condizioni di prova.

Numero campioni	2	AISI 316L
Numero Guarnizioni	2	Helicoflex HNV200 Armco/Inconel x750/ 304L (D= 34,2 mm; $\phi$ =3,3 mm)
Fluido	Litio liquido (statico)	N = 300 ppm
Purificazione litio	Piastrina Titanio (5x5x1 mm)	600°C per 24h
Temperatura di prova	350°C costanti	Condizioni più gravose rispetto a quelle di IFMIF
Umidità residua	125 ppm	
Durata prova	2000 ore	

Prima dell'inizio delle operazioni di assemblaggio sono state eseguite le seguenti operazioni:

- 1) Lavaggio dei contenitori;
  - 2) Asciugatura/essiccazione dei contenitori (mantenuti in forno a 120°C per 24 h;
  - 3) Pesatura delle guarnizioni per la comparazione del peso post prova;
- I risultati di questa operazione di pesatura sono riportati nella seguente tabella.

N°	Campione	Peso pre (g)	Peso post (g)	Rugosità pre (Ra - Rt)	Rugosità post (Ra - Rt)	Note
<b>1</b>	<b>PM 11309</b>	<b>4.5176</b>		/	/	guarniz. Test
<b>2</b>	<b>PM 11409</b>	<b>4.5296</b>		/	/	guarniz. Test
<b>3</b>	<b>PM 11509</b>	<b>4.5717</b>		/	/	guarniz. Vergine
<b>4</b>	<b>PM 11609</b>	<b>4.5995</b>		/	/	guarniz. Scorta
<b>5</b>	<b>PM 11709</b>	<b>4.5440</b>		/	/	guarniz. Scorta

Pesi rilevati con bilancia Sartorius 220 g [Peso Rif. 15 g = 14.9974 g (11. 09. 09)]

### 3.2 OPERAZIONI DI ASSEMBLAGGIO DELLE SEZIONI DI PROVA

Tutte le operazioni di assemblaggio e riempimento delle sezioni di prova sono state eseguite in glove Box. La glove box è stata condizionata con sali igroscopici e successivamente sono stati eseguiti diversi flussaggi con Argon puro. Durante le operazioni di flussaggio è stato monitorato il tasso di umidità e le operazioni di assemblaggio sono partite una volta raggiunto il limite di 125 ppm di H<sub>2</sub> O (il valore minimo raggiungibile in glove box con le attrezzature disponibili).

La fig. 10 mostra le fasi iniziali delle operazioni di assemblaggio. Mentre la fig. 11 illustra lo stato delle sezioni di prova alla fine delle operazioni in glove box. Dopo l'estrazione dalla glove box le sezioni di prova sono state inserite in un ulteriore contenitore di sicurezza che è stato chiuso mediante saldatura ( Fig. 13).

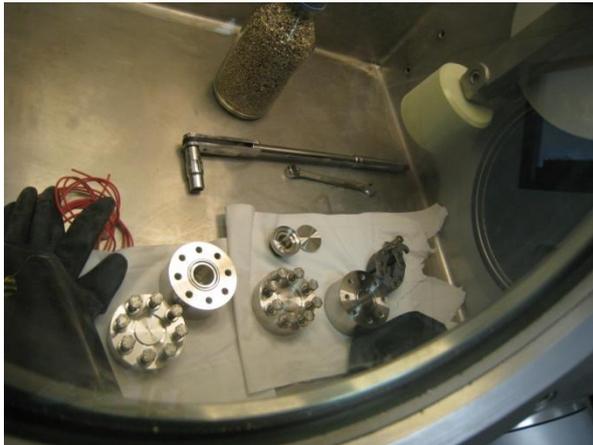


Fig. 10 Operazioni assemblaggio in GB



Fig. 11 Fase di chiusura delle sez. di prova



Fig. 12 Fase di chiusura



Fig. 13 Contenitori di sicurezza

Quest'ultima operazione si è resa necessaria per contenere all'interno del secondo contenitore eventuali perdite di litio dalle sezioni di prova . Infine le due sezioni di prova sono state poste in forno. La prova della durata di 2000 ore è stata eseguita seguendo la seguente procedura:

- 1) Riscaldamento delle sezioni di prova fino alla temperatura di 600°C per 24 ore per le esigenze di purificazione del litio ( Getter in Titanio);
- 2) Raffreddamento fino a 350°C e mantenimento di tale temperatura per 2000 ore per la verifica della tenuta.

### 3.3 ANALISI POST PROVA

Le analisi post prova sono state articolate secondo la seguente procedura:

- 1) Apertura delle sezioni di prova;
- 2) Lavaggio dei contenitori e delle guarnizioni

- 3) Pesatura delle guarnizioni;
- 4) Analisi stereoscopica delle guarnizioni;
- 5) Analisi SEM delle guarnizioni

**Apertura delle sezioni di Prova**

L'apertura delle sezioni di prova è stata effettuata in due fasi. Nella prima fase sono stati rimossi i cordoni di saldatura dei contenitori di sicurezza ed è stata verificata l'integrità delle sezioni di prova. Quindi le sezioni di prova sono state trasferite ed aperte nella Glove box( vedi Figure 14÷17). Anche in questo caso la glove box è stata opportunamente condizionata.



Fig. 14 fasi di apertura sezioni di prova



Fig. 15 fasi di apertura sezioni di prova

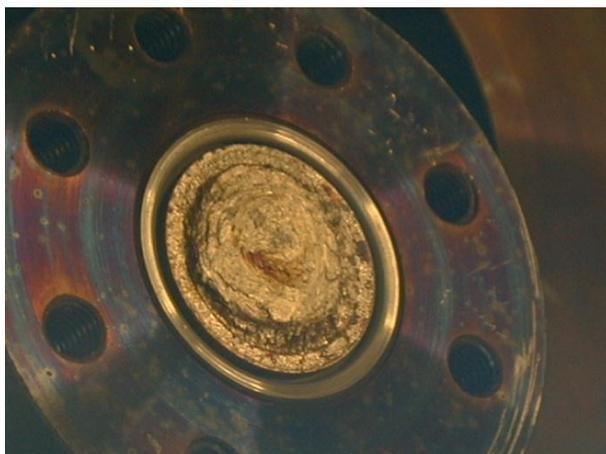


Fig. Coperchio contenitore con Guarnizione



Fig. 17 Coperchio Contenitore

### Lavaggio dei contenitori e delle guarnizioni

Il lavaggio dei contenitori e delle guarnizioni è stato effettuato sotto cappa con una soluzione di acido acetico, acqua ossigenata ed etanolo: (CH<sub>3</sub>COOH) + (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) + (CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH) (1:1:1). Questo tipo di soluzione, già ampiamente testata ha il vantaggio di non corrodere gli acciai.

### Pesatura delle guarnizioni

La pesatura post-prova delle guarnizioni è riportata nella tabella seguente.

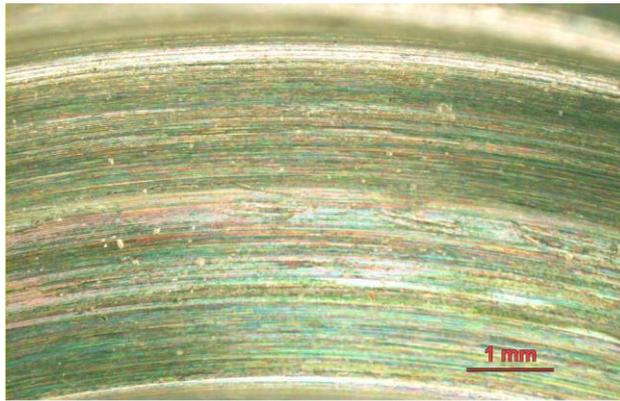
N°	Campione	Peso pre (g)	Peso post (g)	Rugosità pre (Ra - Rt)	Rugosità post (Ra - Rt)	Note
<b>1</b>	<b>PM 11309</b>	<b>4.5176</b>	<b>4.5080</b>	/	/	<b>guarniz. Test</b>
<b>2</b>	<b>PM 11409</b>	<b>4.5296</b>	<b>4.5296</b>	/	/	<b>guarniz. Test</b>

Pesi rilevati con bilancia Sartorius 220 g [Peso Rif. 15 g = 14.9974 g (11. 09. 09)]

Dalla pesatura eseguita si può rilevare che la guarnizione utilizzata con la sezione di prova in cui essa era posta in contatto con il litio ha avuto una riduzione di peso di 9,6 mg. Questa riduzione di peso è dovuta alla corrosione prodotta dal litio. A tale valore di riduzione di peso corrisponde un tasso di corrosione di 2,4 µm. Mentre la seconda guarnizione non ha avuto alcuna riduzione di peso. Questo significa che il litio non è riuscito a passare nella sede che ospita la guarnizione. Si sottolinea che questo secondo caso è in effetti più rappresentativo delle condizioni operative in cui si trova la guarnizione utilizzata nel target di IFMIF. Ma naturalmente l'obiettivo della prova era quello di verificare la compatibilità del materiale della guarnizione e la mancanza di penetrazione del litio all'esterno della linea di tenuta della guarnizione stessa.

### Analisi stereoscopica e con Microscopica Elettronica a scansione delle guarnizioni e delle superfici delle sezioni di prova

Le analisi stereoscopiche sono state condotte sia sulle sezioni di prova sia sulle guarnizioni. Nelle figure 18 e 19 sono mostrate le analisi pre e post prova eseguite per la sezione di prova n° 1.



PM 11809 TEST RIG 1 [ 1 A ]  
SEDE GUARNIZIONE PRE PROVA

Fig. 18

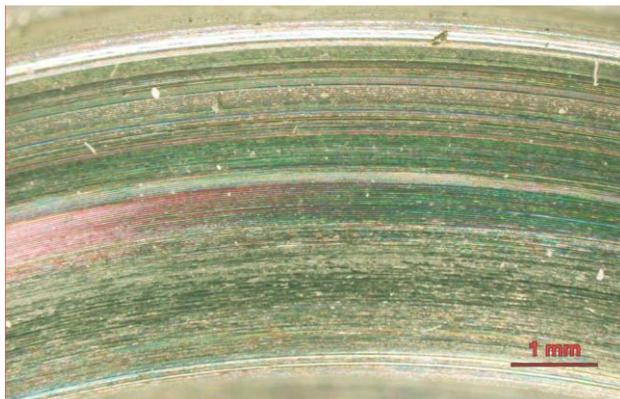


PM 11809 [ 1 A ] Test Rig 1 post prova in litio

Fig. 19

Le figure evidenziano che il litio, suppure in contatto con la guarnizione, non è permeato all'esterno del delta di tenuta della stessa. Quindi la guarnizione ha bloccato tutto il litio all'interno della propria sede.

Nelle figure 20 e 21 sono mostrate le immagini stereoscopiche eseguite sulla sezione di prova n°2. L'indagine evidenzia che in questo caso la guarnizione di tenuta non è mai stata in contatto con il litio durante tutta la durata della prova. In pratica il litio in presenza di superfici con bassa rugosità, come nel caso in oggetto, non è riuscito a bagnare la sede della guarnizione ed è rimasto confinato all'interno della camera.



PM 11909 TEST RIG 2 [ 2 A ]  
SEDE GUARNIZIONE PRE PROVA

Fig. 20 Immagine Stereoscopica sez. 2



PM 11909 [ 2 ] TEST RIG 2- post prova

Fig. 21 Immagine stereoscopica sez 2

Le analisi eseguite con microscopia elettronica a scansione sulla sezione di prova 1 e sulla guarnizione sono mostrate nelle figure 22÷25

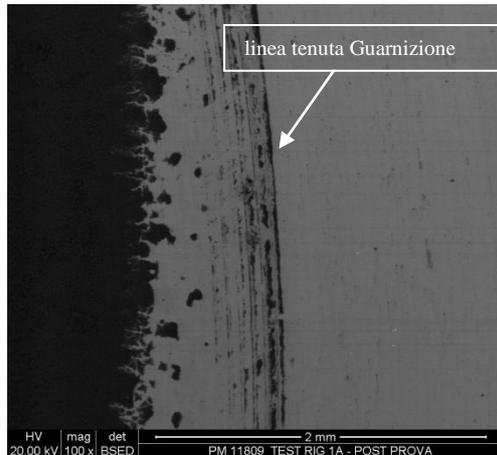


Fig. 22-sez di prova 1

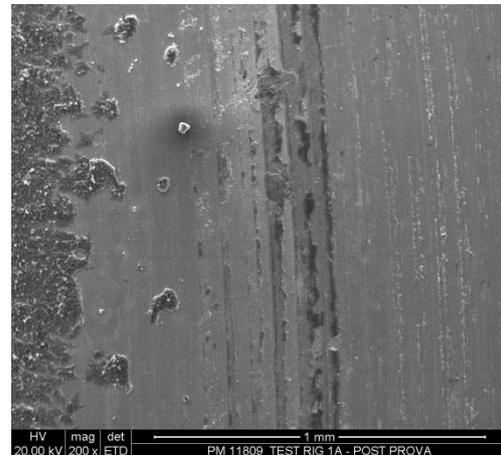


Fig. 23 sez. di prova

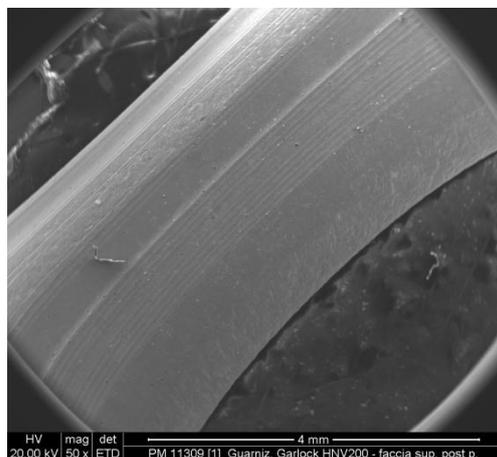


Fig. 24 Guarnizione

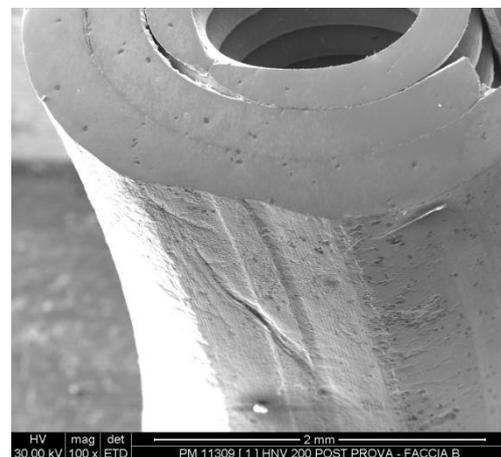


Fig. 25 Guarnizione

Le immagini SEM confermano la perfetta tenuta della guarnizione HNV 200 e l'integrità del delta di tenuta.

Le figure 26 e 27 mostrano le immagini SEM eseguite sulla seconda guarnizione, mentre nella figura 28 viene mostrata una guarnizione vergine allo scopo di avere un campione di riferimento per la comparazione. Esse mettono in evidenza la mancanza di corrosione confermando quindi quanto già osservato con le analisi precedenti fatte con la stereoscopia.

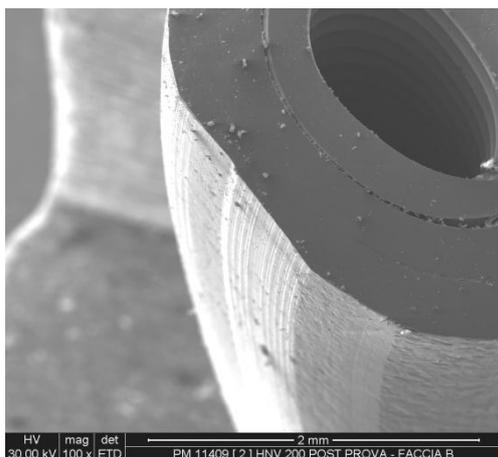


Fig. 26 2<sup>A</sup> Guarnizione

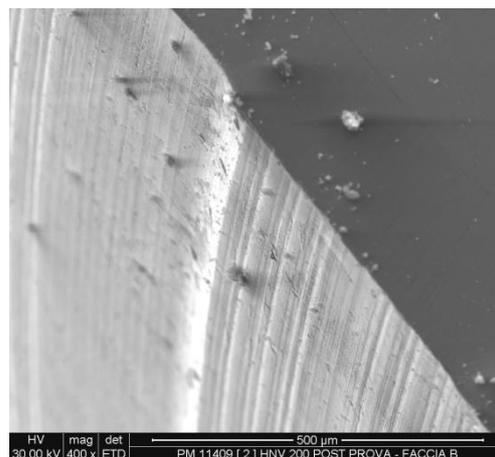


Fig. 27 2<sup>A</sup> Guarnizione

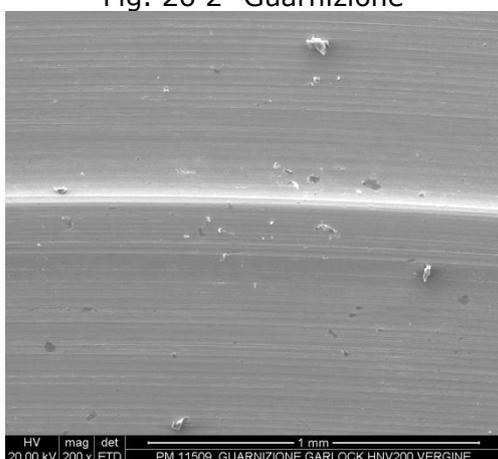
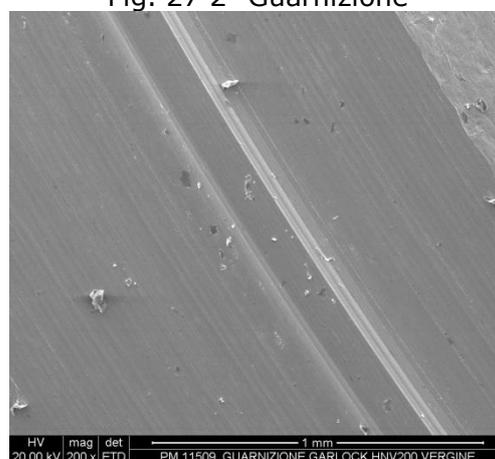


Fig. 28 Guarnizione Vergine



L'attività svolta ha evidenziato l' idoneità della guarnizione HNV 200 della Helicoflex, attualmente fino al limite di 2000 ore, per essere utilizzata in ambiente di litio. Si sottolinea che il test è stato eseguito in condizioni più gravose rispetto a quelle operative di IFMIF, almeno in termini di Temperatura (350°C contro i 300°C previsti per IFMIF). In particolare due aspetti fondamentali sono stati provati:

- 1) la guarnizione è idonea a bloccare la permeazione del litio;
- 2) in condizioni di funzionamento in stazionario del litio la guarnizione potrebbe non essere bagnata dal litio stesso con il conseguente vantaggio di aumentare la vita della guarnizione stessa.

Ulteriori tests saranno svolti in futuro considerando solamente la possibilità che il litio bagni effettivamente la guarnizione e con tempi di esposizione crescenti. In particolare una nuova campagna di test sarà svolta nel 2012 con la seguente matrice di prova:

Guarnizione tipo	Temperatura °C	Tempo di esposizione Ore	Note
HNV 200	350	3000÷7000	Litio puro; N < 30 ppm; getter di purificazione Titanio

#### 4. VALIDAZIONE DEL SISTEMA A PATTINO PER LA BACKPLATE DI IFMIF

Il sistema a pattino descritto in precedenza consente di chiudere le parti laterali della backplate manovrando semplicemente una vite di manovra. Il dispositivo a pattino è mostrato nella figura 29.

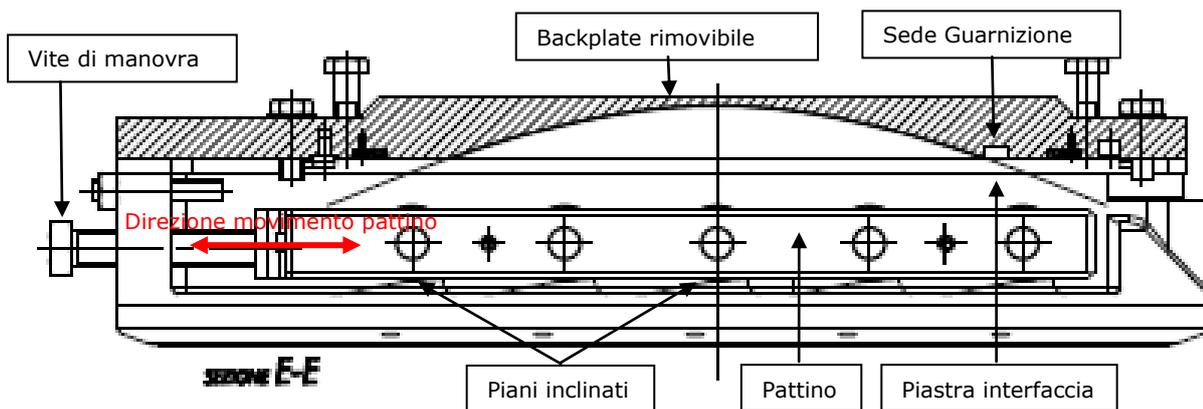


Fig 29 Dispositivo a pattino per la chiusura della Backplate di IFMIF

Un vite di manovra, solidale con il pattino, permette al dispositivo di avanzare in fase di chiusura ed indietreggiare in fase di apertura. Il pattino è fornito di scuscinetti che gli permettono di scorrere su dei piani inclinati. Quando il pattino comincia ad interferire con i piani inclinati la spinta assiale della vite di manovra viene trasformata in spinta normale alla direzione del movimento. La spinta normale non fa altro che esercitare questa forza sulla guarnizione per mezzo della piastra d'interfaccia tra pattino e backplate.

L'inserimento di questo dispositivo consente di risparmiare tempo durante le fasi di rimpiazzo della backplate stessa. Naturalmente tale sistema deve essere sufficientemente affidabile per garantire una continua e costante pressione sulla guarnizione in modo da mantenere il richiesto grado di

vuoto nella camera del TA. Non sono quindi ammessi fenomeni di rilassamento delle strutture che possono pregiudicare appunto le condizioni di funzionamento del target stesso. In effetti il problema di un'eventuale fenomeno di rilassamento delle strutture e la conseguente perdita del vuoto ha una ricaduta anche sul funzionamento dell'acceleratore. Da qui la necessità di validare questo componente.

#### 4.1 TEST DEL SISTEMA A PATTINO

La campagna sperimentale è stata eseguita considerando le condizioni di funzionamento operative del target:

- 1) Temperatura: RT e 300°C;
- 2) Pressione da esercitare sulla guarnizione: ~24 T;
- 3) Coppia di Serraggio: 40÷50 Nm
- 4) Carico di test: 8 T;

Per l'esecuzione del test è stato realizzato un prototipo in scala reale della zona del pattino. In totale sono state predisposte due sezioni di prova: una per l'esecuzione della prova a temperatura ambiente ed un'altra per l'esecuzione della prova a 300 gradi. In Fig. 30 è mostrata la sezione di prova per la prova a temperatura ambiente.

Il prototipo realizzato comprende: il pattino, il sistema di reazione, la simulazione della piastra d'interfaccia e della backplate. Inoltre per misurare la forza trasmessa dal pattino è stata inserita una cella di carico. I valori della forza trasmessa sono stati registrati da un sistema di acquisizione dati sviluppato utilizzando una scheda della National Instrument e labview come ambiente di sviluppo. Il sistema completo è mostrato in fig. 31.

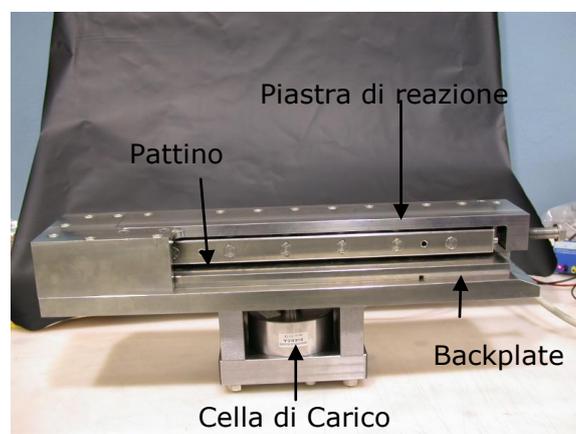


Fig. 30 Prototipo del sistema a pattino ( RT)



Fig. 31 Sistema per la verifica del sistema a pattino

Inoltre per la verifica delle deformazioni della piastra di contrasto sono stati inseriti due comparatori centesimali.

I risultati delle prove alla temperatura ambiente sono illustrate nel grafico di fig 32. Una volta raggiunta la spinta di 8T, il sistema è stato monitorato per un tempo totale di 4 ore acquisendo i valori di carico con una frequenza di 0,25 Hz. Il grafico mostra che sostanzialmente non vi sono apprezzabili fenomeni di rilassamento.

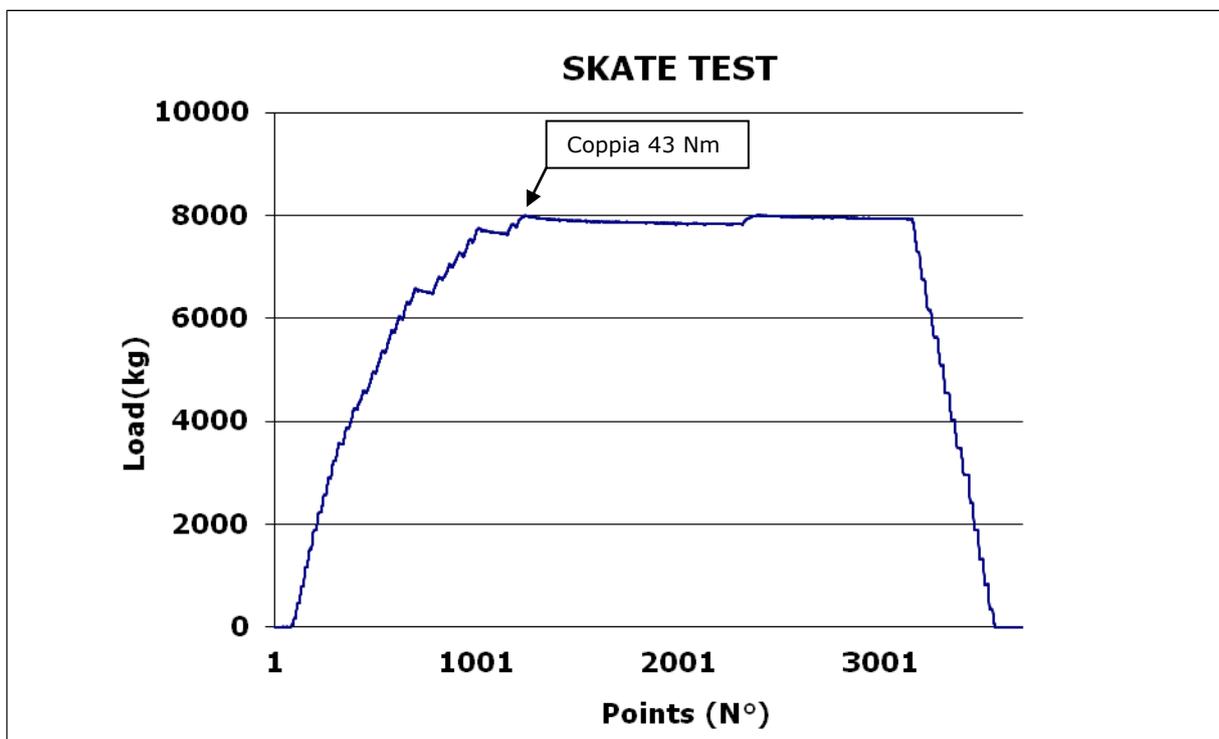


Fig. 32 Stabilità del carico trasmesso sulla guarnizione

Anche le deformazioni misurate sulla piastra di contrasto sono in linea con le simulazioni riportate nel rapporto (IM-G-R 010). E' stata inoltre verificata che la coppia di serraggio è in linea con quanto previsto dal calcolo teorico ( 43 Nm).

Le prove a 300°C sono state eseguite con la sezione di prova modificata secondo lo schema riportato in figura 33. Questa modifica si è resa necessaria perché il campo di lavoro della cella di carico era  $\ll$  300°C. Quindi per misurare la pressione esercitata dal pattino sono state utilizzate delle molle calibrate che sono mostrate in figura. 34

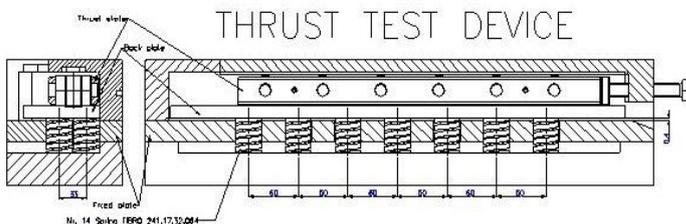


Fig. 33 sistema di test modificato



Fig. 34 Molle calibrate

Le molle (FIBRO 241.17.32.064) sono state scelte in modo che alla compressione massima (spiralì in contatto) corrisponde una forza di applicata di 8T.

Il sistema implementato comprendeva inoltre l'acquisizione dati, completo di sensori per il monitoraggio della temperatura. (Vedi Fig. 35)

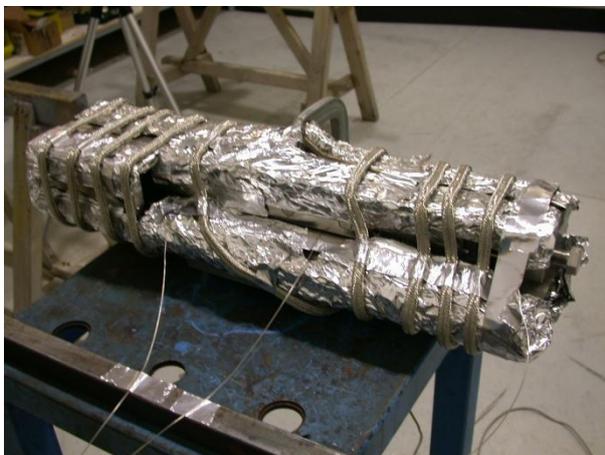


Fig. 35 Sistema di misura a 300°C

Il sistema è stato tenuto in temperatura per 24 ore. Il sistema non ha mostrato segni di rilassamento. Le molle sono rimaste compresse anche dopo il raffreddamento del prototipo. Anche la coppia utilizzata per il serraggio era in linea con quella misurate in precedenza. Vedi Fig. 36.

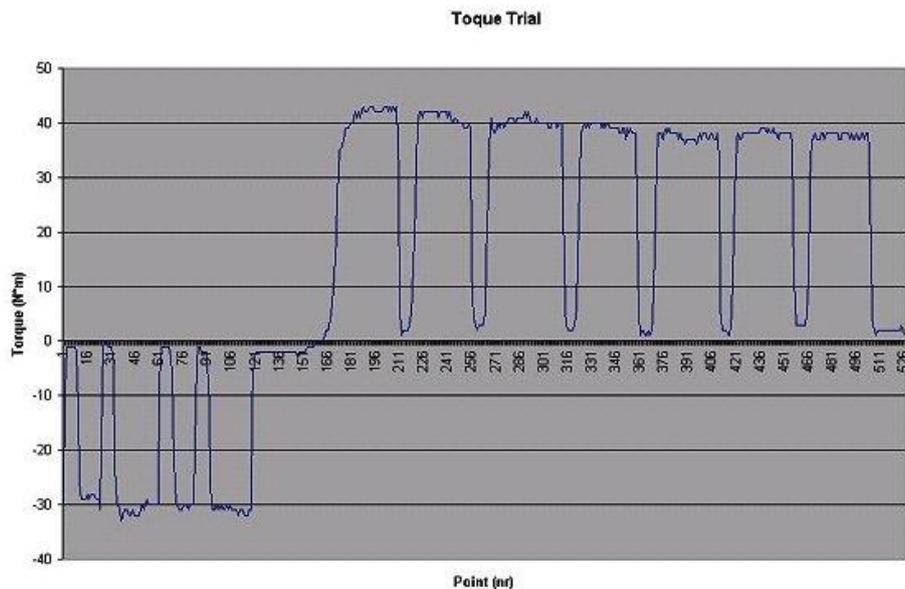


Fig. 36 Monitoraggio coppia di serraggio pattino

Le prove eseguite, seppure preliminari, hanno dimostrato che il sistema a pattino progettato risponde, con buoni margini di sicurezza, alle specifiche di progetto.

## 5. PROBLEMATICHE INDOTTE DALLO SWELLING NELLA BACKPLATE DI IFMIF

Gli effetti dello swelling indotto da irraggiamento neutronico devono essere presi in seria considerazione nella valutazione delle prestazioni termomeccaniche di quei componenti dei reattori a fusione esposti ad intense fluenze di neutroni altamente energetici, che si trovano ad operare in presenza di vincoli meccanici e/o gradienti termici. Ne consegue che, particolare attenzione deve essere prestata alla valutazione della potenziale influenza dello swelling da irraggiamento neutronico sulle prestazioni termomeccaniche della backplate del Target Assembly di IFMIF, dal momento che si prevede che questa sia sottoposta durante la sua vita operativa ad un intenso danneggiamento da irraggiamento neutronico. In particolare, a causa del ruolo centrale che giocano

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	<b>IM-G-R-015</b>	0	<b>L</b>	2	34

nell'assicurare la tenuta ermetica dell'intero sistema del Target Assembly, le connessioni filettate tra la backplate ed il suo quadro di supporto (frame) sono state oggetto di uno specifico studio volto a valutare se gli effetti dello swelling potessero danneggiarne l'integrità strutturale o aumentarne la coppia di svitamento, compromettendone le procedure di rimozione da remoto.

### **5.1 CAMPAGNA DI RICERCA RELATIVA ALLO SWELLING**

Nell'ambito del programma di sviluppo su IFMIF è stata eseguita una attività di ricerca atta ad investigare le problematiche termomeccaniche potenzialmente indotte dallo swelling da irraggiamento neutronico nelle connessioni filettate della back-plate del Target Assembly di IFMIF. A tal fine si è seguito un approccio di tipo teorico-numerico fondato sul Metodo degli Elementi Finiti e si è adottato un qualificato codice FEM commerciale, ampiamente utilizzato nell'ambito degli studi di termomeccanica computazionale di componenti di reattori a fusione.

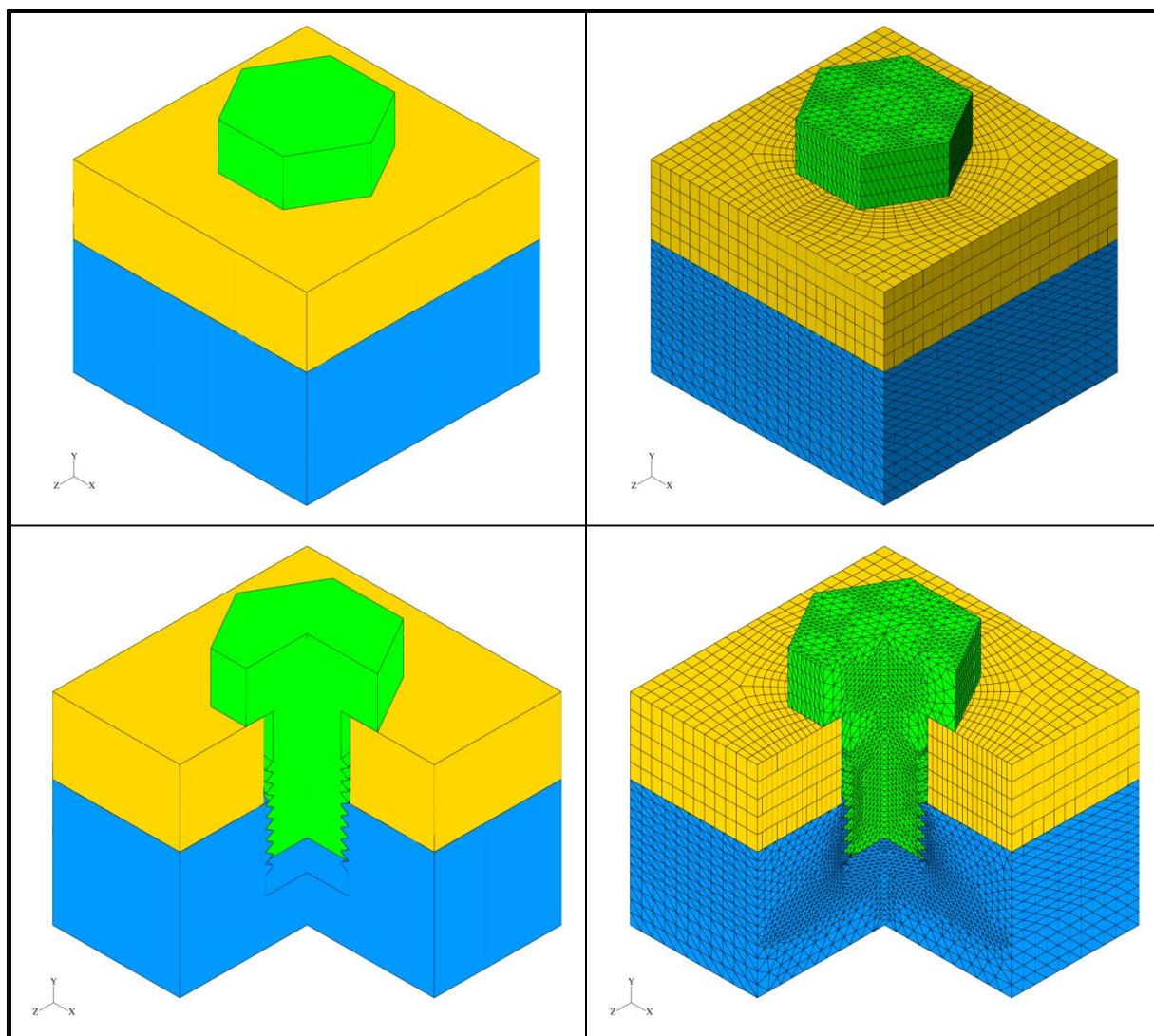
La campagna di ricerca ha mirato principalmente alla determinazione della massima deformazione volumetrica da swelling ( $\frac{\Delta V}{V} \%$ ) che possa essere accettata all'interno delle viti dei collegamenti filettati in esame, perché queste possano reggere in sicurezza lo stato tensionale termomeccanico che vi si desta e/o perché se ne possano evitare coppie di svitamento eccessivamente elevate durante le operazioni di rimozione da remoto. In particolare, l'attenzione si è focalizzata sulle viti di tipo M10, M12 ed M16, candidate ad essere adottate nella back-plate, investigando, per ognuna di esse, la dipendenza funzionale della massima tensione equivalente di Von Mises e della coppia di svitamento dalla deformazione volumetrica da swelling imposta.

Dal momento che la distribuzione spaziale di tale deformazione non è ancora stata determinata per l'assenza di dati in letteratura relativi all'EUROFER, per ogni tipologia di collegamento filettato presa in considerazione si è effettuata un'analisi parametrica, assumendo dei valori significativi di deformazione volumetrica da swelling e valutando, per ognuno di essi, tramite un'analisi FEM i corrispondenti valori della massima tensione equivalente di Von Mises e della coppia di svitamento. In particolare, sulla base di quanto riportato in [5,6], sono stati considerati valori di deformazioni da swelling variabili nell'intervallo

0.001% - 0.1%.

### 5.2 MODELLI FEM

Per ogni tipologia di vite considerata si è sviluppato un modello FEM 3D che la riproducesse realisticamente unitamente alla sua madrevite ed alla sua regione di influenza nella connessione backplate - frame. (Fig. 36,37). In particolare, un'analisi di sensitività ha indicato che allo scopo di avere risultati fisicamente significativi è sufficiente simulare un area di 5x5 cm attorno alla vite.



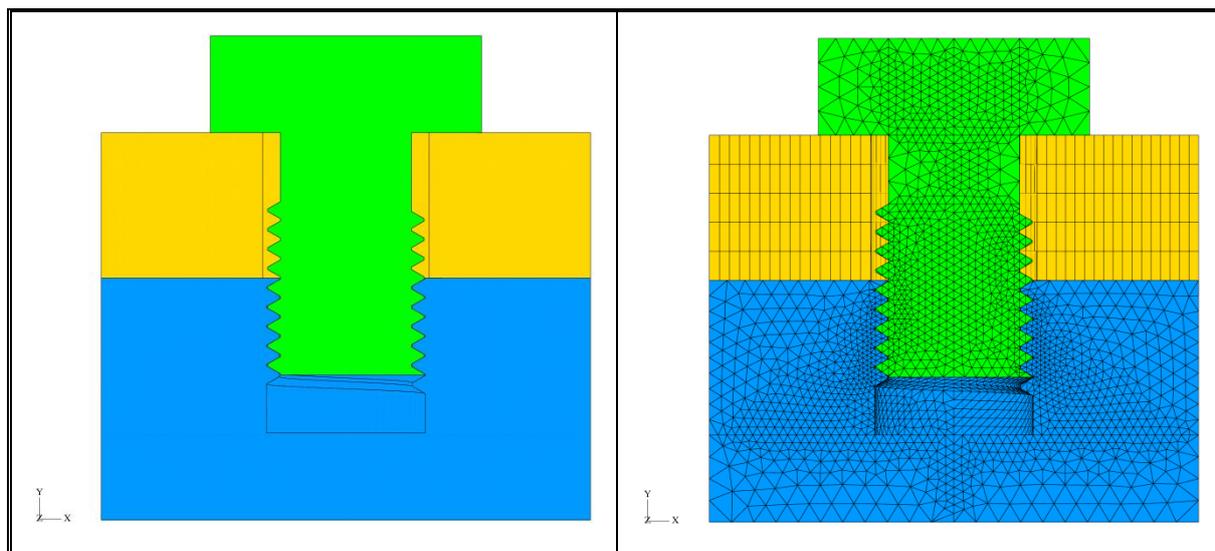
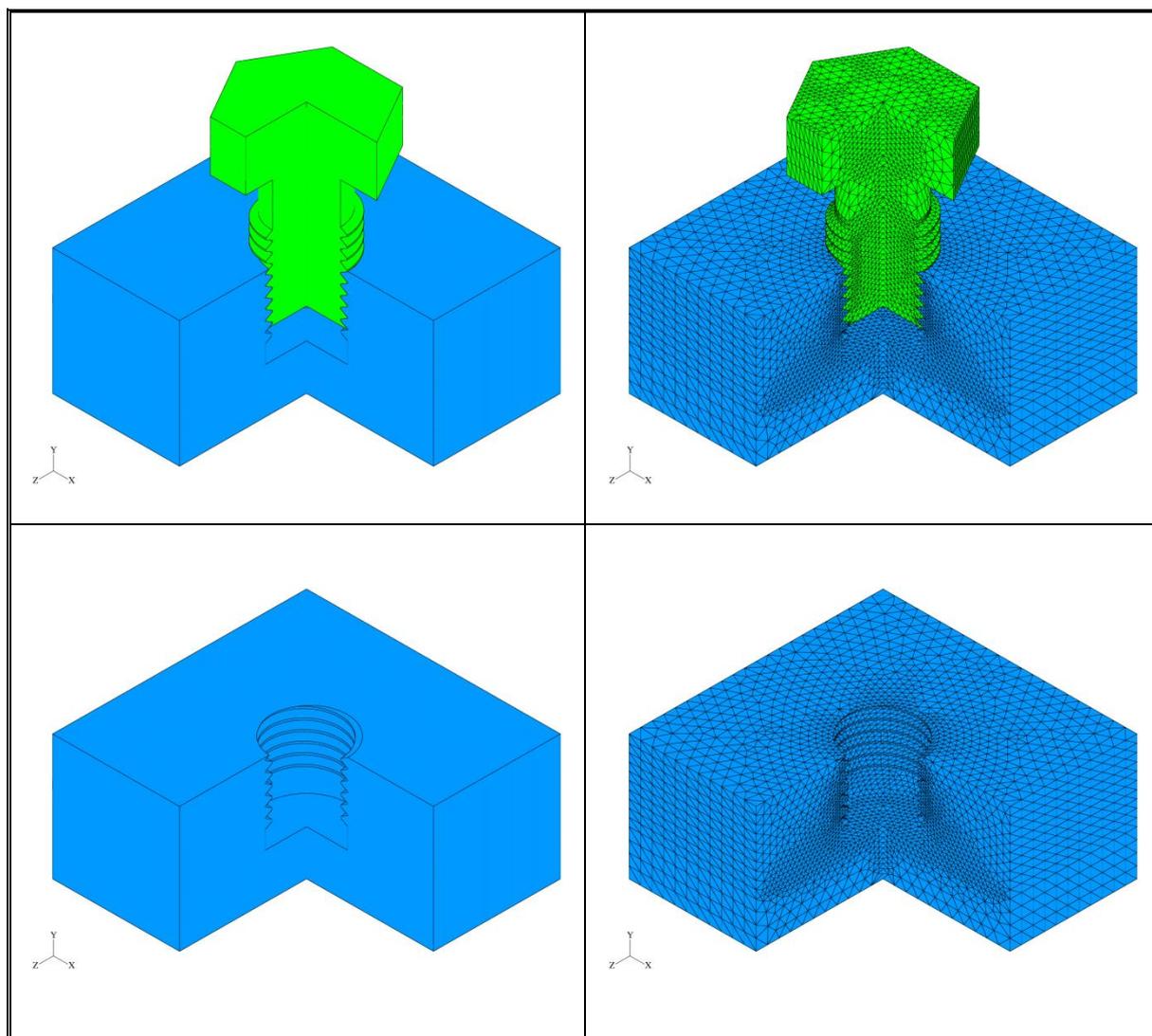


Figura 36. Modello geometrico (Vite M16)



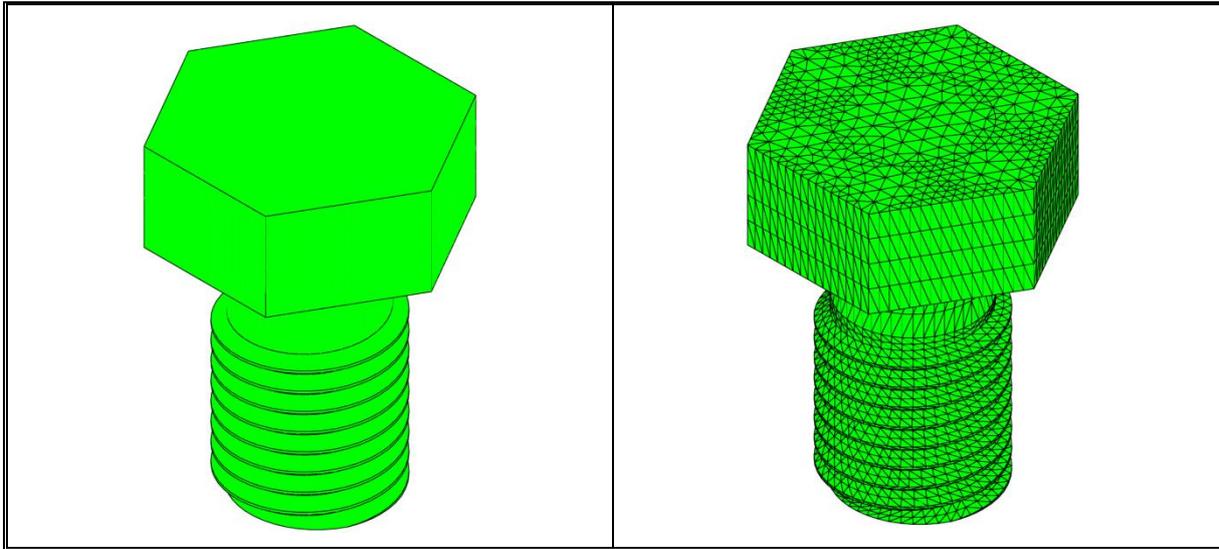


Figura 37 Modello geometrico (Vite M16)

Al fine di ottimizzare la discretizzazione del dominio spaziale per ottenere risultati sufficientemente accurati in tempi accettabili, si è condotta un'analisi di "mesh independency", che ha consentito di selezionare una mesh composta da  $\sim 38.000$  nodi connessi in elementi tetraedrici lineari (Fig. 36,37) in grado di garantire l'esecuzione di una tipica simulazione numerica completa in  $\sim 12$  ore con una workstation dotata di un processore AMD QuadCore 2.2 GHz e di 4 MB di memoria RAM.

Nello sviluppo del modello una particolare attenzione è stata prestata alla simulazione delle interazioni di attrito che avvengono tra la vite e la backplate o il frame. A questo scopo si è implementato un opportuno modello di contatto sia tra la vite ed i filetti della madrevite alloggiata nel frame, sia tra il sottotesta della vite e la superficie superiore della backplate. In particolare, al fine di simulare tali interazioni si è assunto un modello di attrito Colombiano ideale, caratterizzato in entrambi i casi da un fattore di attrito uniforme pari a 0.74.

Per quanto concerne il materiale strutturale del frame, della back-plate nonché della vite, coerentemente con le indicazioni date in [2,3] si è considerato l'EUROFER 97, per il quale si è adottato un modello costitutivo elastico ed idealmente plastico ed un complesso di proprietà termofisiche dipendenti dalla temperatura tratte da [7].

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	<b>IM-G-R-015</b>	0	<b>L</b>	2	34

Per quanto riguarda l'insieme dei vincoli imposti al modello, ai nodi giacenti sulla superficie inferiore del frame (regione in blu nelle figure 36,37) è stato impedito lo spostamento lungo la direzione assiale, ai nodi giacenti su due superfici laterali adiacenti della back-plate (superfici in giallo nelle figure 36,37) e del frame è stato impedito lo spostamento lungo la normale alla superficie di appartenenza, mentre alle due superfici laterali rimanenti della backplate e del frame si è imposto di subire uno stato di deformazione piana.

Allo scopo di simulare realisticamente lo stato tensionale che si genera all'interno del modello ad opera del processo di serraggio della vite, del riscaldamento del Target Assembly nonché, infine, degli effetti dello swelling durante la tipica vita operativa della backplate, ogni singola analisi è stata articolata in tre step.

Durante il primo step si è simulato lo stato tensionale che si genera nella vite, così come nel frame e nella back-plate, durante il processo di avvitamento e serraggio, assumendo che la backplate subisca un processo di riscaldamento virtuale dalla sua temperatura di riferimento efficace alla temperatura iniziale del frame e della vite, che è stata mantenuta costante. Infatti, dato che in tali condizioni l'espansione termica della backplate è contrastata sia dal frame che dalla vite, si sviluppa all'interno della vite stessa uno stato tensionale di trazione prevalentemente assiale, che si associa ad uno analogo stato di tipo compressivo sia nella back-plate che nel frame. In questo modo, variando opportunamente il valore della temperatura di riferimento efficace della back-plate, coerentemente con il tipo di vite esaminata, è stato possibile simulare lo stato tensionale che vi si ingenera allorché si applichi la coppia di serraggio di riferimento pari a 30 Nm.

Durante il secondo step, al fine di simulare il processo di riscaldamento dell'intero collegamento filettato, che ne precede l'irraggiamento, si è applicato un campo di temperatura uniforme conservativamente pari a 300°C all'intero modello.

Infine, durante il terzo step, dato che si prevede che la vite, il frame e la back-plate siano esposti ad un irraggiamento neutronico a temperatura costante, si è simulata la presenza del conseguente processo di swelling, imponendo al modello un campo di deformazioni distorsive tramite la

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	<b>IM-G-R-015</b>	0	<b>L</b>	2	34

definizione di un tensore di deformazioni uniforme ed isotropo, il cui invariante del primo ordine,  $\square_{sw}$ , rappresentativo della deformazione volumetrica da swelling, è stato direttamente fornito in input al codice.

Inoltre, risultando chiaro che questo comporti una sovrastima degli effetti termomeccanici dello swelling, si è assunto conservativamente di impedire ai nodi che giacciono sulle superfici laterali del frame e della backplate ogni spostamento lungo la direzione normale a tali superfici, mantenendone immutata per tutto il terzo step la posizione da essi guadagnata alla fine del secondo.

### 5.3 RISULTATI

Come indicato in precedenza, per ogni tipologia di collegamento filettato considerato (M10, M12, M16) si è condotta un'analisi parametrica al variare della deformazione volumetrica da swelling nell'intervallo 0.001% - 0.1%, con lo scopo specifico di valutare la massima tensione equivalente di Von Mises all'interno della vite e la coppia di svitamento.

Dal punto di vista qualitativo, si è osservato che, indipendentemente dal tipo di vite considerata, la imposizione di un campo uniforme di deformazioni da swelling determinerebbe l'espansione in direzione assiale, circonferenziale e radiale sia della vite, con i suoi filetti, che del frame, con i filetti della madre vite. Tuttavia, dato che si è assunto che le superfici laterali del modello non possano traslare lungo le loro normali, sia il frame che la backplate possono espandersi solo nella direzioni assiale e, verso l'interno, in quella radiale, inducendo una riduzione del diametro medio della madre vite. Ne segue che si desta uno stato tensionale compressivo e si formano nuovi contatti tra i filetti della vite e quelli della madre vite, che consentono alle loro superfici inferiori, originariamente separate da un gap, di scambiarsi azioni meccaniche (regioni in blu in figura 38).

Qualora la deformazione volumetrica da swelling sia sufficientemente elevata, anche le creste dei filetti possono giungere a contatto, a dispetto del gap che inizialmente li separa. Ne consegue che sia l'area dei contatti che la pressione alla loro interfaccia aumentano, determinando la conseguente crescita della coppia di svitamento. Tale processo perdura fin quando non si raggiunga la condizione di snervamento nei filetti, come

indicato dalla distribuzione della tensione equivalente di Von Mises in figura 39. Da tale momento in poi, per l'ipotesi di comportamento idealmente plastico del materiale strutturale, la deformazione da swelling è compensata dalla sola deformazione plastica, piuttosto che da quella elastica, determinando la fine del processo di aumento della pressione di contatto e conseguentemente della tensione equivalente di Von Mises nonché della coppia di svitamento.

Si noti che, lo stato tensionale compressivo che vi si desta può danneggiare il collegamento filettato, portandolo alla crisi strutturale, coerentemente con il valore della deformazione volumetrica da swelling.

D'altro canto, l'aumento della coppia di svitamento può compromettere la fattibilità delle procedure di rimozione da remoto delle viti, dato che i tool da impiegare sono caratterizzati da una coppia massima tipicamente pari  $\sim 80$  Nm e l'applicazione di coppie superiori potrebbe determinare la rottura della vite con effetti disastrosi ai fini della possibilità di portare a compimento con successo la procedura di rimozione dell'intera backplate.

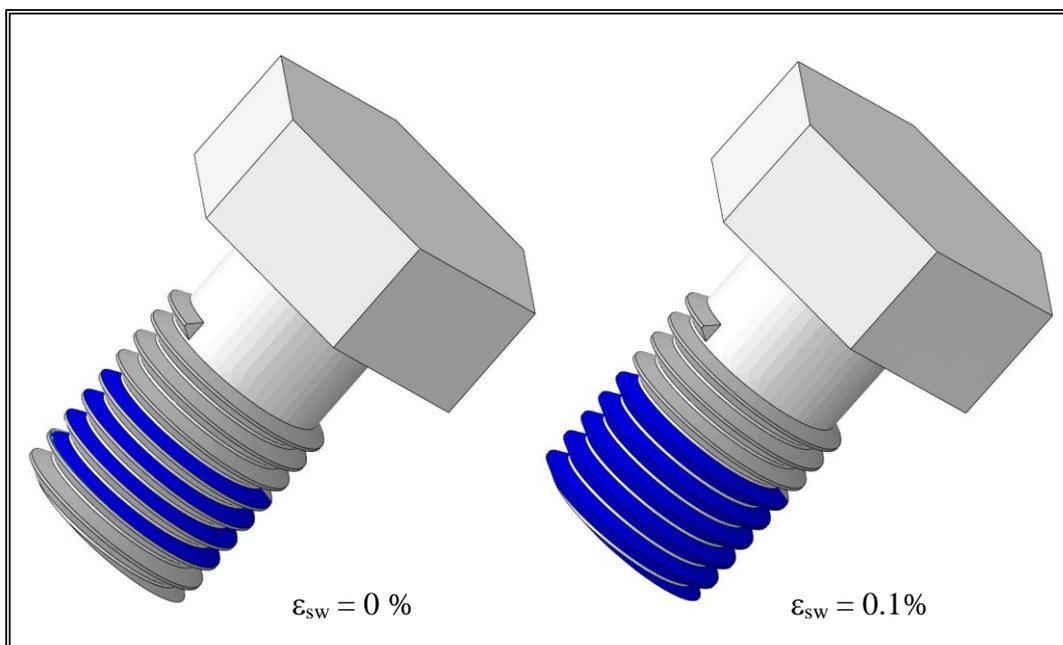


Figura 38. Distribuzione delle aree di contatto a differenti valori di  $\epsilon_{sw}$  (Vite M16).

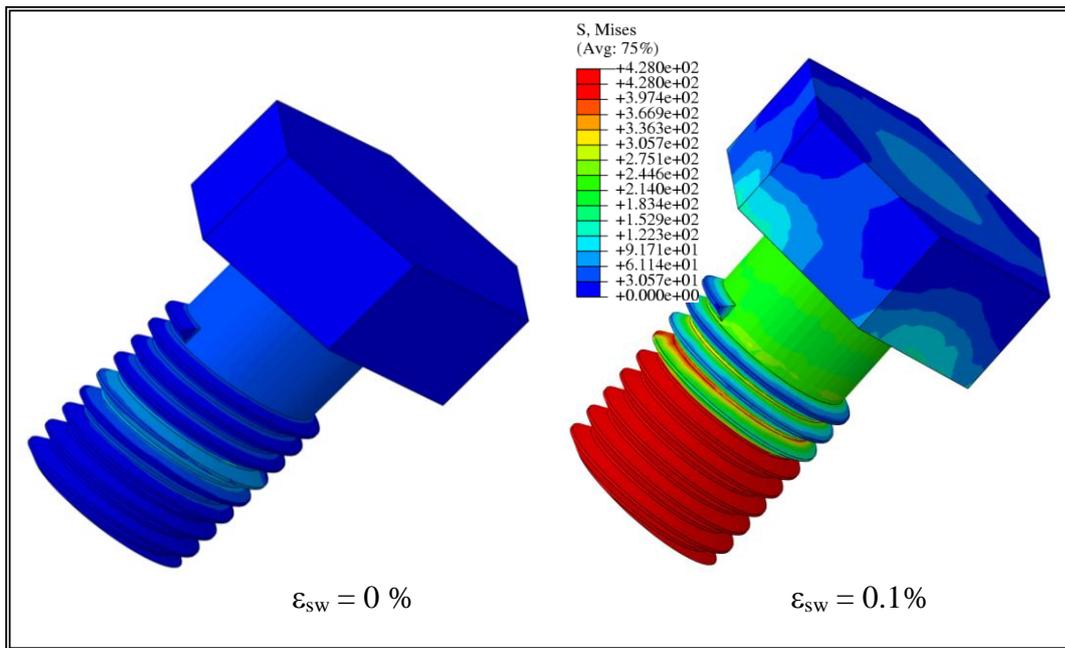


Figura 39. Distribuzione della tensione di Von Mises a differenti valori di  $\epsilon_{sw}$  (Vite M16).

Dal punto di vista quantitativo, si è focalizzata l'attenzione sulla dipendenza funzionale della coppia di svitamento dalla deformazione volumetrica da swelling, riportata in figura 40 per ogni tipo di collegamento filettato analizzato.

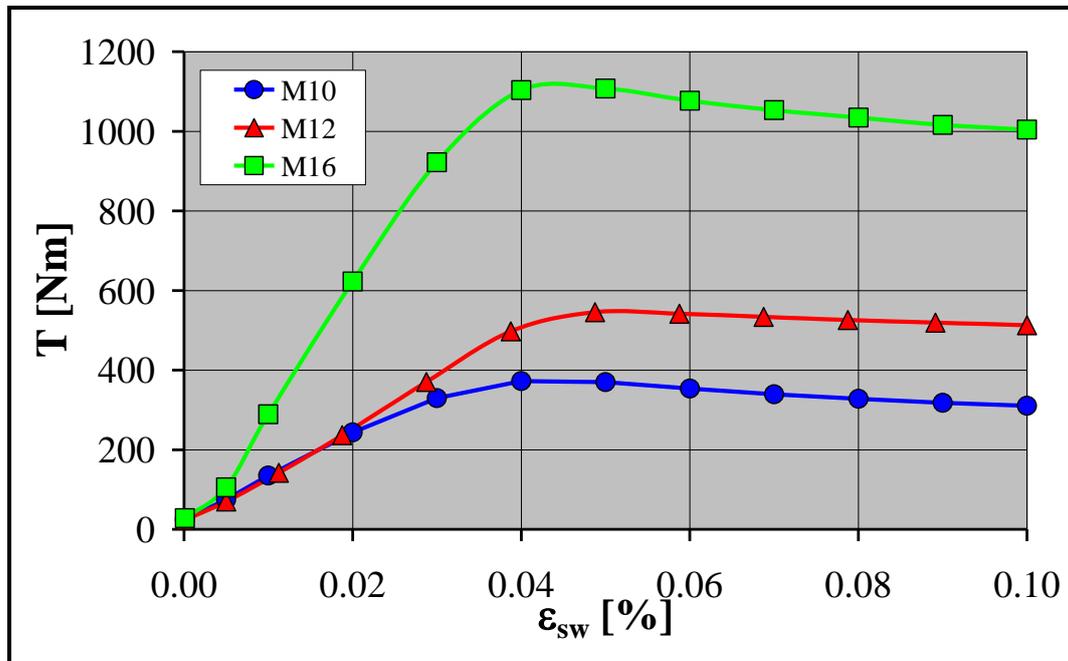


Figura 40. Coppia di svitamento vs. deformazione volumetrica da swelling.

Come si può dedurre dall'analisi dei risultati ottenuti, le dimensioni della vite sembrano influenzare significativamente il valore massimo della coppia di svitamento, che risulta essere tanto più alto quanto più elevato è il diametro della vite. D'altro canto, si deve sottolineare che questi valori massimi sono raggiunti in corrispondenza a deformazioni volumetriche da swelling pari a  $\sim 0.04 \div 0.05\%$ , in maniera sostanzialmente indipendente dal diametro della vite.

Infine, si osservi che, per ognuno dei collegamenti filettati presi in considerazione, si è determinata la massima deformazione volumetrica da swelling accettabile perché si possa evitare una coppia di svitamento superiore a 80 Nm. I valori ottenuti sono riportati nella tabella seguente.

<b>Vite</b>	$\square_{sw} [\%]$
M10	0.0055
M12	0.0055
M16	0.0038

## **6. CONCLUSIONI**

Nell'ambito del programma di ricerca e sviluppo su IFMIF è stata lanciata una campagna di ricerca tesa ad investigare le problematiche termomeccaniche potenzialmente indotte dallo swelling da irraggiamento neutronico nelle connessioni filettate della back-plate del TA di IFMIF. A tal fine si è seguito un approccio di tipo teorico-numerico fondato sul Metodo degli Elementi Finiti e sono state eseguite analisi parametriche al variare della deformazione volumetrica da swelling nell'intervallo  $0.001\% - 0.1\%$ , assumendo un set conservativo di condizioni al contorno.

Dal punto di vista qualitativo, i risultati ottenuti indicano che laddove la back-plate ed il relativo frame non siano completamente liberi di espandersi, lo swelling può indurre, da un canto, l'aumento della tensione equivalente di Von Mises nella vite fino allo snervamento e, d'altro canto,

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	<b>IM-G-R-015</b>	0	<b>L</b>	2	34

l'incremento della coppia di svitamento al punto da compromettere la fattibilità delle procedure di rimozione da remoto delle viti.

Dal punto di vista quantitativo, i risultati ottenuti, nelle ipotesi assunte, indicano che le viti dal diametro maggiore risultano più sensibili agli effetti termomeccanici dello swelling, specialmente per quanto concerne la dipendenza della coppia di svitamento dalla deformazione volumetrica da swelling.

Si segnala, infine, che ulteriori analisi di approfondimento dovranno essere condotte per investigare specificatamente la potenziale influenza sulle prestazioni termomeccaniche dei collegamenti filettati in presenza di swelling sia della morfologia della filettatura che della presenza di gradienti termici.

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	<b>IM-G-R-015</b>	0	<b>L</b>	2	34

## **BILBLIOGRAFIA**

- [1] IFMIF Comprehensive Design Report, IFMIF International Team, January 2004.
- [2] G. Micciché, B. Riccardi, Design, manufacture and testing of the IFMIF lithium target bayonet concept, *Fusion Engineering and Design* 75–79 (2005) 807–811.
- [3] IFMIF CDA Team, IFMIF International Fusion Materials Irradiation Facility Conceptual Design Activity – Final Report, M. Martone (Ed.), ENEA RT/ERG/FUS/96/11, December 1996.
- [4] G. A. Cottrell, Void migration, coalescence and swelling in fusion materials, *Fusion Engineering and Design* 66–68 (2003) 253–257.
- [5] Y. Miwa et alii, Swelling of F82H irradiated at 673 K up to 51 dpa in HFIR, *Journal of Nuclear Materials* 283–287 (2000) 334–338.
- [6] M. Frisoni, P. Agostini, D. Fasanella, G. Micciché, Preliminary evaluation of the expected radiation damage of the bayonet IFMIF back-plate, *Fusion Engineering and Design* 84 (2009) 784–787.
- [7] T. Chehtov, J. Aktaa, O. Kraft, Mechanical characterization and modelling of brazed EUROFER-tungsten-joints, *Journal of Nuclear Materials* 367–370 (2007) 1228–1232.