



Ricerca di Sistema elettrico

Stato di fabbricazione dei 9 moduli di magnete TF di responsabilità ENEA del Tokamak JT-60SA

Gian Mario Polli, Antonio Cucchiaro

STATO DI FABBRICAZIONE DEI 9 MODULI DI MAGNETE TF DI RESPONSABILITÀ ENEA DEL TOKAMAK JT-60SA

Gian Mario Polli (ENEA-FSN), Antonio Cucchiaro (ENEA-FSN)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: GENERAZIONE DI ENERGIA ELETTRICA CON BASSE EMISSIONI DI CARBONIO

Progetto: B.3.2 – Attività di Fisica della Fusione Complementari a ITER

Obiettivo: **Macchina JT-60SA – subtask a1: Fornitura di 9 moduli di magneti di campo toroidale**

Responsabile del Progetto: A. Pizzuto, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE (STILE TITOLO 1).....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 PREPARAZIONE DEI COMPONENTI DELLA CASSA ED INSERIMENTO DEL WP	5
2.2 SALDATURA IN DIREZIONE TOROIDALE DEI COMPONENTI PRINCIPALI DELLA CASSA E IN DIREZIONE POLOIDALE DEI COPERCHI INTERNI 8	
2.3 IMPREGNAZIONE FINALE DI EMBEDDING	11
2.4 LAVORAZIONE MECCANICA DELLE SUPERFICI DI INTERFACCIA, ESEGUITA PRESSO UN SUB-FORNITORE DI ASG.....	13
2.5 INSERIMENTO SISTEMA FLUIDICO E STRUMENTAZIONE PER IL MANTENIMENTO ED IL CONTROLLO DELLA TEMPERATURA CRIOGENICA IN ESERCIZIO	16
2.6 PROVE FINALI DI ACCETTAZIONE	18
2.7 TEST CRIOGENICI ED ASSEMBLAGGIO DELLE STRUTTURE ESTERNE DI CONTENIMENTO	20
2.8 COSTRUZIONE DI 6 LUNGHEZZE DI CONDUTTORE PER MODULO SPARE	22
3 CONCLUSIONI.....	22
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	23
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	23

Sommario

In questo rapporto sono descritte le attività di manifattura dei moduli di magneti toroidale della macchina Tokamak JT-60SA in corso di costruzione in Giappone. La costruzione avviene nell'ambito del programma di collaborazione Europa-Giappone denominato "Broader Approach" al quale l'Italia partecipa attraverso la fornitura tra l'altro di 9 moduli di magneti superconduttivo realizzati da ASG Superconductors S.p.A. sotto la direzione di ENEA. Il contratto tra ENEA ed ASG è iniziato a Settembre 2011: durante il primo anno sono state progettate le attrezzature, realizzati i disegni esecutivi e avviate le attività di qualifica. Il secondo anno sono state completate le qualifiche dei processi inerenti la costruzione degli avvolgimenti di bobina ed è stato costruito il primo dei nove avvolgimenti previsti. Nel corso terzo e quarto anno tutti e nove gli avvolgimenti sono stati realizzati e testati e le attività di qualifica della fase di integrazione dei moduli sono state concluse. Alla fine del quarto anno è stata avviata la fase di integrazione del primo avvolgimento nella relativa cassa di contenimento in acciaio e nel corso del quinto anno altri 6 avvolgimenti sono stati inseriti nelle relative casse di contenimento. Il presente documento riporta delle attività svoltesi nel corso della quinta annualità relative all'integrazione di sei avvolgimenti.

1 Introduzione (stile Titolo 1)

La costruzione di nove moduli di magneti di campo toroidale per la macchina JT-60SA avviene nell'ambito del programma "Broader Approach" di collaborazione Europa-Giappone, in cui l'Italia è rappresentata anche da ENEA. Per il completamento della fornitura ENEA ha assegnato, nel Settembre del 2011, un contratto ad ASG Superconductors di Genova, leader mondiale nella fabbricazione di magneti per la fusione e la fisica delle alte energie. Il contratto prevede due fasi realizzative, una prima fase di fabbricazione degli avvolgimenti, seguita da una fase di integrazione degli avvolgimenti nelle relative casse di contenimento fornite da ENEA ad ASG. La prima fase è stata conclusa nella passata annualità ed è possibile trovare dettagliate descrizioni dei processi impiegati e dei risultati raggiunti nei rapporti sviluppati nelle passate annualità dell'Accordo di Programma. La fase di integrazione ha avuto inizio nella primavera del 2015 con la consegna del primo set di componenti della cassa ad ASG e con la conclusione dei processi di qualifica previsti. Da Maggio 2015 a Settembre 2016 sono stati incassati sette avvolgimenti ma non tutto il processo di integrazione, costituito di sei sotto-fasi, è stato già completato per tutti i sette moduli. Nel seguito viene riportata una dettagliata descrizione di ciascuna delle sotto-fasi che costituiscono l'integrazione e vengono discussi i risultati dei test di accettazione criogenici sui moduli già testati, previsti nelle specifiche tecniche. Infine, si riporta della costruzione di sei lunghezze di conduttore aggiuntive per la costruzione di un modulo "spare" avvenuta nel corso del 2016.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

I moduli di magneti toroidale, altrimenti detti *Toroidal Field Coil (TFC)*, sono costituiti da un avvolgimento di bobina impregnato sottovuoto con resina epossidica con la tecnica denominata *vacuum pressure impregnation (VPI)*. Gli avvolgimenti a loro volta sono ottenuti per sovrapposizione di sei doppi *pancake (DP)* a forma di D a partire da un cavo di 240 m di lunghezza di acciaio contenente al suo interno una treccia di materiale superconduttore in NbTi e Rame. Il cavo, denominato *cable in conduit conductor (CICC)*, sviluppa le proprietà superconduttive solo a temperatura criogenica pertanto durante l'esercizio un flusso di Elio a 4.5 K e 0.5 MPa di pressione verrà fatto fluire all'interno per assicurare la necessaria stabilità di funzionamento. Le dimensioni degli avvolgimenti, con una altezza complessiva di circa 8 m ed una larghezza in direzione radiale di circa 4.5 m, sono tali che i moduli TF di JT-60SA risultano ad oggi i più grandi mai realizzati.

I nove avvolgimenti realizzati sono stati terminati in anticipo rispetto alla previsione fatta da ASG in avvio di contratto nonostante i comprensibili ritardi nelle prime fasi, dovuti alla messa a punto dei parametri di manifattura. Il processo costruttivo degli avvolgimenti è stato anticipato da una intensa attività di qualifica dei processi speciali e di collaudo delle attrezzature realizzate. Analogo percorso di qualifica è stato seguito nella successiva fase di integrazione di cui si può ritrovare conto nei rapporti pubblicati nelle precedenti annualità. Come anticipato, la fase di integrazione è composta da sei sotto-fasi: *i)* preparazione dei componenti della cassa e del *winding pack (WP)* ed inserimento del WP; *ii)* saldatura in direzione toroidale dei componenti principali della cassa e in direzione poloidale dei coperchi interni; *iii)* impregnazione finale di *embedding*; *iv)* lavorazione meccanica delle superfici di interfaccia, eseguita presso un sub-fornitore di ASG; *v)* inserimento sistema fluidico e strumentazione per il mantenimento ed il controllo della temperatura criogenica in esercizio; *vi)* prove finali di accettazione. Prove di funzionamento in condizioni quasi operative sono poi condotte presso i laboratori di CEA a Saclay per misurare la temperatura di transizione da superconduttore a resistivo del modulo e la resistenza delle giunzioni elettriche interne ed esterne.

2.1 Preparazione dei componenti della cassa ed inserimento del WP

La prima operazione propedeutica all'incassamento consiste nel rivestimento della superficie del WP con uno strato di nastro distaccante in Tedlar® necessario ad assicurare lo scorrimento, durante le condizioni operative, tra WP e cassa ed evitare così il danneggiamento dell'isolamento contromassa. Successivamente viene applicato uno strato di 5 mm di tele di vetro sulla superficie del WP. Questo spessore corrisponde al *gap* nominale tra WP e cassa introdotto in fase di progetto per assicurare l'inserimento. Ulteriori spessori di tele di vetro e/o di fogli di vetroresina in G10 vengono applicati sul WP o direttamente sulla superficie interna della cassa per compensare *gap* aggiuntivi sui pezzi finiti. Infatti, tanto il WP quanto i componenti della cassa sono costruiti con delle tolleranze di fabbricazione che tendono ad aumentare lo spazio effettivo disponibile. Questo spazio verrà in un secondo tempo riempito da resina epossidica fatta permeare all'interno delle tele di vetro nel cosiddetto processo di *embedding*.

Al momento della stesura del presente rapporto, tutti e nove i WP prodotti sono stati preparati con 5 mm di tele di vetro avvolte (Figura 1 Vista d'insieme dell'officina ASG al termine della nastratura di *embedding* dei WP). Nell'immagine seguente si riconosce in primo piano il WP-09 e sullo sfondo altri sei WP già pronti per l'inserimento, mentre i WP mancanti sono già stati inseriti, al momento in cui l'immagine è stata scattata, nella relativa cassa di contenimento.



Figura 1 Vista d'insieme dell'officina ASG al termine della nastratura di *embedding* dei WP

La seconda operazione consiste nell'inserimento all'interno del WP del nucleo centrale dell'attrezzatura di inserimento. Si tratta di un telaio molto robusto dotato di supporti ad L in grado di afferrare dall'interno il WP e mantenerlo in posizione durante l'inserimento e la successiva saldatura dei componenti esterni della cassa (Figura 2 Inserimento del nucleo centrale all'interno del WP).



Figura 2 Inserimento del nucleo centrale all'interno del WP

Parallelamente i componenti esterni della cassa, gamba curva e gamba dritta, sono a loro volta preparati per l'inserimento. Questa attività consiste nell'applicazione di spessori di isolante sulla superficie interna della cassa e nel posizionamento ed allineamento delle due gambe nell'attrezzatura di inserimento.



Figura 3 Introduzione WP nell'attrezzatura di inserimento

L'immagine precedente (Figura 3 Introduzione WP nell'attrezzatura di inserimento) mostra l'istante in cui il WP, supportato dal nucleo centrale viene posizionato all'interno della struttura di inserimento, con le due gambe posizionate sui rispettivi carrelli per effettuare l'inserimento in orizzontale. La scelta di compiere l'inserimento in orizzontale è dettata dalla volontà di limitare le deformazioni indotte dal proprio peso che si verificherebbero in un inserimento in verticale. Completato l'inserimento delle ulteriori strutture di contenimento vengono montate sull'esterno della cassa e agganciate al nucleo centrale affinché l'assieme non subisca spostamenti nelle successivi fasi di lavorazione.

2.2 Saldatura in direzione toroidale dei componenti principali della cassa e in direzione poloidale dei coperchi interni

L'operazione seguente l'inserimento è costituita dalla saldatura dei componenti della cassa. Questi sono realizzati in acciaio inossidabile austenitico AISI 316L per l'assenza della transizione duttile-fragile di questo materiale e per la proprietà di essere debolmente paramagnetico così da non perturbare con la sua presenza il campo magnetico prodotto dal magnete. Esistono due tipologie di componenti della cassa: a) gamba curva e gamba dritta; b) coperchi. I primi due sono gli elementi strutturalmente più importanti e per questo possiedono gli spessori maggiori (50 mm). La saldatura tra gamba curva e gamba dritta riveste dunque un'importanza fondamentale per il funzionamento del modulo e la sua affidabilità nel tempo. I coperchi, presentano uno spessore inferiore (15-20 mm) e servono a chiudere la superficie interna generando una struttura di contenimento per l'avvolgimento magnetico contenuto al suo interno.



Figura 4 Modulo in posizione verticale per saldatura di giunzione delle gambe

L'immagine precedente (Figura 4 Modulo in posizione verticale per saldatura di giunzione delle gambe) mostra un modulo disposto in posizione verticale nell'attrezzatura di inserimento. E' visibile uno dei due cianfrini per la saldatura di unione tra gamba curva e gamba dritta aventi uno spessore di 50 mm. L'attività di qualifica, svolta su *mock-up* dei componenti della cassa con all'interno un *mock-up* del WP, ha consentito la messa a punto dei parametri di saldatura e la formazione del personale addetto all'esecuzione ed al controllo del giunto. La presenza dell'avvolgimento impregnato all'interno, oltre a rendere inaccessibile la

superficie interna per eventuali ispezioni, o riprese al rovescio del cianfrino, impone un limite sulla temperatura e quindi sui parametri di saldatura soprattutto nelle passate di radice. Il processo consiste in una prima fase con tecnica TIG manuale per l'unione della radice del cianfrino e le prime passate di riempimento, seguita da numerose passate MIG di riempimento fino al completamento dello spessore di 50 mm. A metà del processo viene eseguito un primo controllo ad ultrasuoni per identificare eventuali difetti nelle prime passate di radice; tale controllo è infine ripetuto al termine della saldatura. L'immagine seguente mostra un dettaglio della saldatura trasversale in corrispondenza del cosiddetto "vertical port", zona di uscita delle giunzioni elettriche interne (Figura 5 Dettaglio della saldatura trasversale in corrispondenza del *vertical port*). E' possibile riconoscere come il giunto saldato sia stato rasato per permettere l'accoppiamento della sonda ultrasonora utilizzata per l'ispezione finale. I parametri usati controllo permettono di riconoscere difetti bi-dimensionali fino ad una dimensione di 5 mm² che, se presenti, vengono rimossi con una procedura di riparazione collaudata in fase di qualifica.



Figura 5 Dettaglio della saldatura trasversale in corrispondenza del *vertical port*

A seguire il modulo viene spostato in un'altra stazione di lavoro per l'inserimento dei coperchi e della loro saldatura in direzione poloidale. In questo modo l'attrezzatura di inserimento viene liberata per un altro modulo.

L'immagine seguente (Figura 6 Saldatura di riempimento del cianfrino del coperchio della TFC-02) mostra un istante della saldatura di riempimento del cianfrino dei coperchi del modulo TFC-02. L'attività di saldatura è completata da un'indagine ultrasonora tesa ad escludere la presenza di difetti di dimensioni superiori a 5 mm².



Figura 6 Saldatura di riempimento del cianfrino del coperchio della TFC-02

La fase di saldatura è stata, al momento in cui si scrive, completata su 6 moduli di magnete. Un passaggio fondamentale, soprattutto nella saldatura dei primi moduli, è stato il monitoraggio con *laser tracker* della posizione delle mire montate sul WP. La saldatura, infatti, introduce significative deformazioni per limitare le quali, nella saldatura trasversale, i lembi di saldatura sono stati preparati con 5 mm di materiale aggiuntivo. Per valutare l'effetto della deformazione indotta dal processo di unione, la seguente figura (Figura 7 Distanza tra le mire centrali del WP durante la saldatura) riporta la distanza tra disposte sul piano equatoriale del WP. Nel grafico, l'asse delle ascisse riporta la fase del processo di integrazione considerata, mentre sull'asse delle ordinate è riportata la distanza in mm tra le mire. Si nota che, finchè il modulo è posizionato nella struttura di inserimento (posizioni 1-6) non si manifestano significative deformazioni, quando invece comincia la saldatura dei coperchi (posizioni 7-10) si assiste ad una deformazione che tende ad ovalizzare la forma a D originaria del modulo.

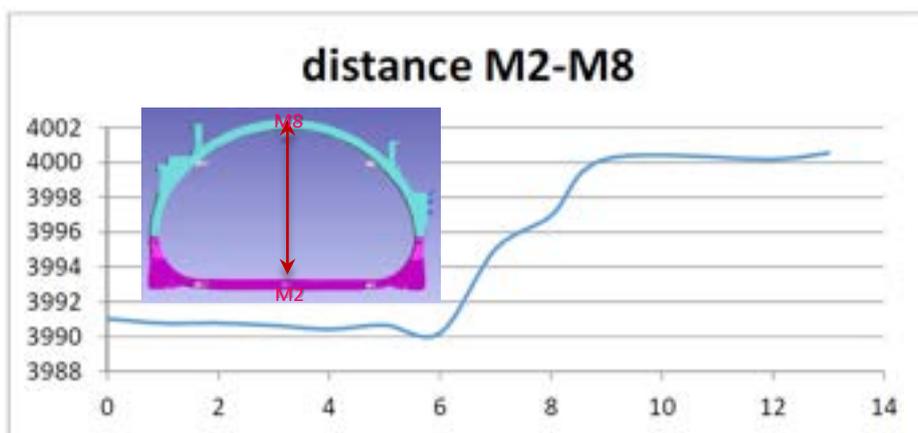


Figura 7 Distanza tra le mire centrali del WP durante la saldatura

2.3 Impregnazione finale di embedding

Una volta completata la saldatura dei coperchi, si passa alla fase di “*embedding*” che consiste nel riempimento a mezzo di resina epossidica degli spazi fra cassa e WP al fine di rendere la struttura monolitica. Come anticipato, l’avvolgimento è stato già avvolto da tele di vetro per colmare questo spazio, l’aggiunta della resina epossidica ha il compito di rendere questo strato compensativo rigido in grado di trasmettere le sollecitazioni di origine elettromagnetica alla struttura di contenimento. Il processo è costituito di due fasi: *i)* iniezione della resina a caldo; *ii)* polimerizzazione con ciclo di *curing*.

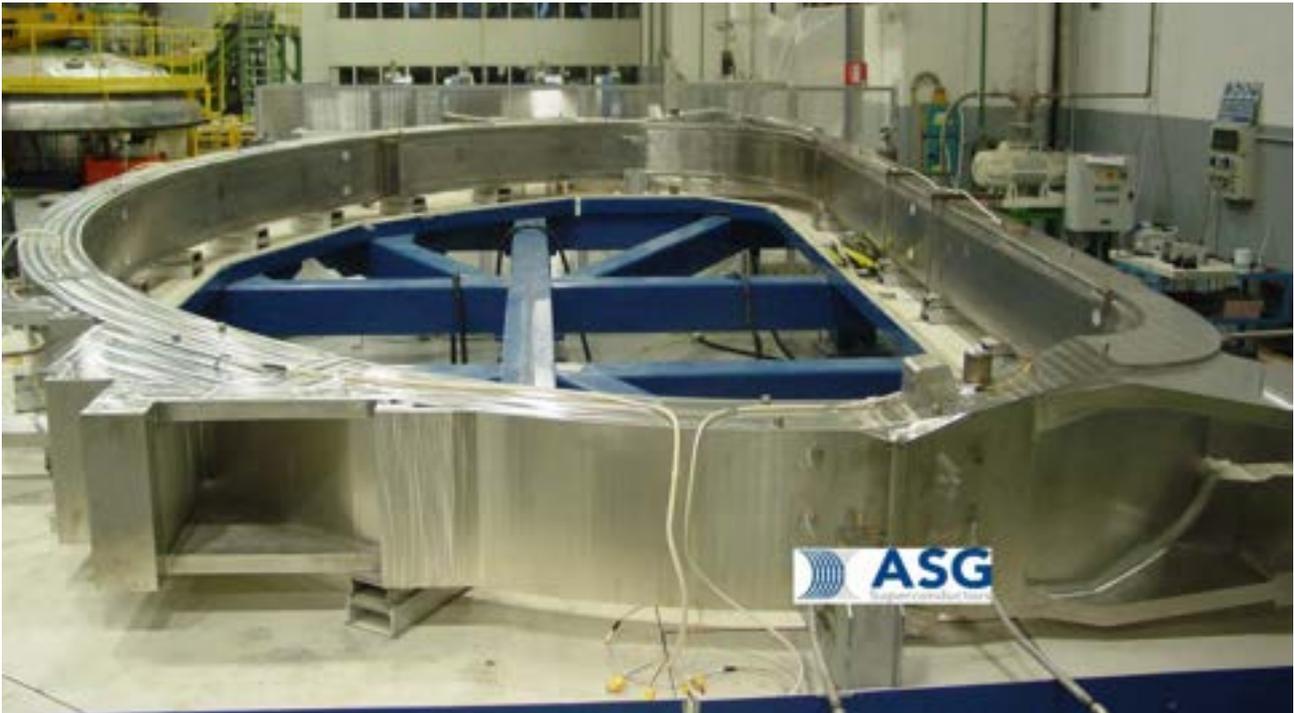


Figura 8 Preparazione del modulo per l'iniezione della resina

L’immagine precedente (Figura 8 Preparazione del modulo per l'iniezione della resina) è stata scattata prima dell’avvio del processo di impregnazione, si notano, in corrispondenza dei fori delle mire del WP sui coperchi, i tappi di *teflon* posti a chiusura delle aperture per impedire alla resina di uscire dal modulo durante l’impregnazione.

Successivamente il banco di lavoro su cui è collocato il modulo viene coperto da un involucro rigido termoisolato (Figura 9 Stazione di *embedding* in condizioni operative) ed il volume della camera viene portato alla temperatura prevista per l’esecuzione del ciclo di iniezione e polimerizzazione. Questo processo rappresenta una ripetizione dell’analogo processo di impregnazione del WP, tuttavia un’intensa attività di qualifica è stata condotta per valutarne l’efficacia in termini di riempimento dei vuoti e di temperatura di transizione vetrosa.

L’ultima operazione prima dello spostamento del modulo dalla stazione di *embedding*, riguarda la misura con *laser tracker* della posizione delle mire poste sul WP e delle superfici di interfaccia da lavorare (Figura 10 Misura con *laser tracker* delle superfici di interfaccia dopo *embedding*). Mentre la misura delle mire serve a misurare eventuali spostamenti dell’avvolgimento dopo il processo di impregnazione e a definire il sistema di riferimento locale solidale all’avvolgimento, la misura delle superfici di interfaccia è essenziale per la successiva fase di lavorazione.



Figura 9 Stazione di *embedding* in condizioni operative

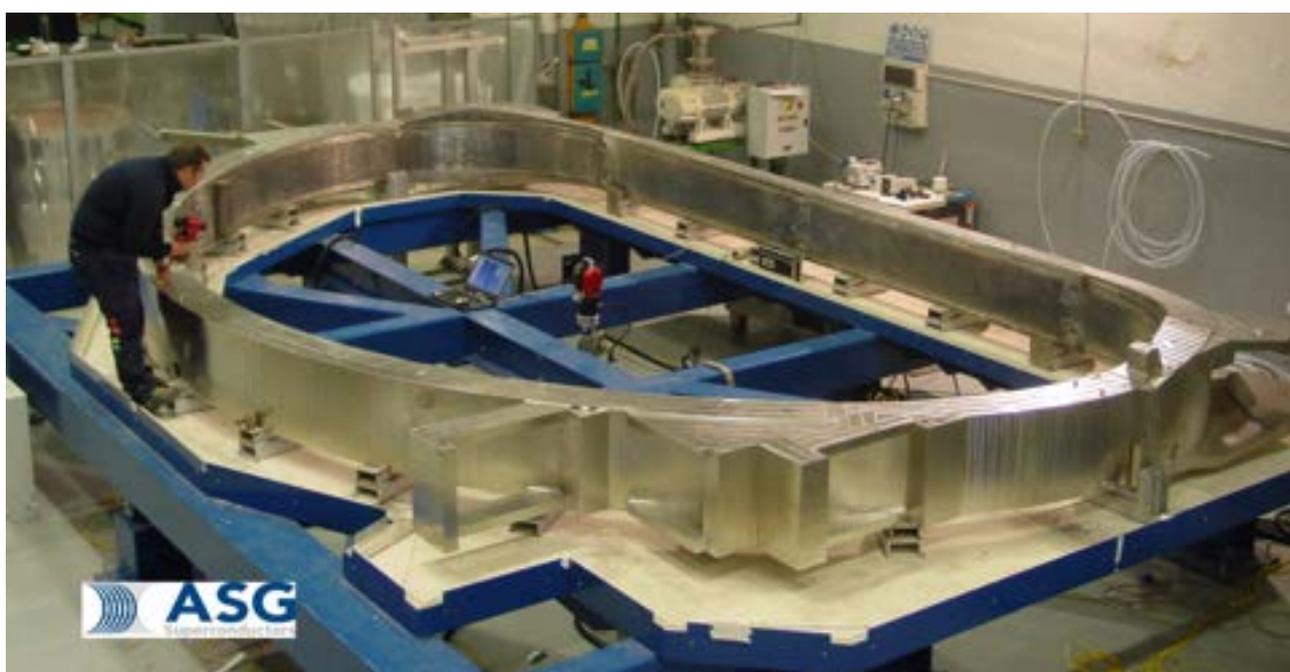


Figura 10 Misura con *laser tracker* delle superfici di interfaccia dopo *embedding*

Il risultato della misura è contenuto in un documento che accompagna il modulo fino alla fase successiva e di cui nella figura seguente (Figura 11 Misura delle superfici di interfaccia da lavorare sulla gamba curva) è possibile osservare un estratto. Si tratta della misura del sovrametallo, rispetto al nominale, nelle zone di

interfaccia. Si nota che il sovrametallo, che alla consegna della gamba curva era di 5 mm nominali, presenta una distribuzione non omogenea dovuta alla deformazione prodotta dalla saldatura. Analoghe mappe di sovrametallo sono state preparate per ognuna delle superfici da lavorare e per ognuna delle TFC finora prodotte.

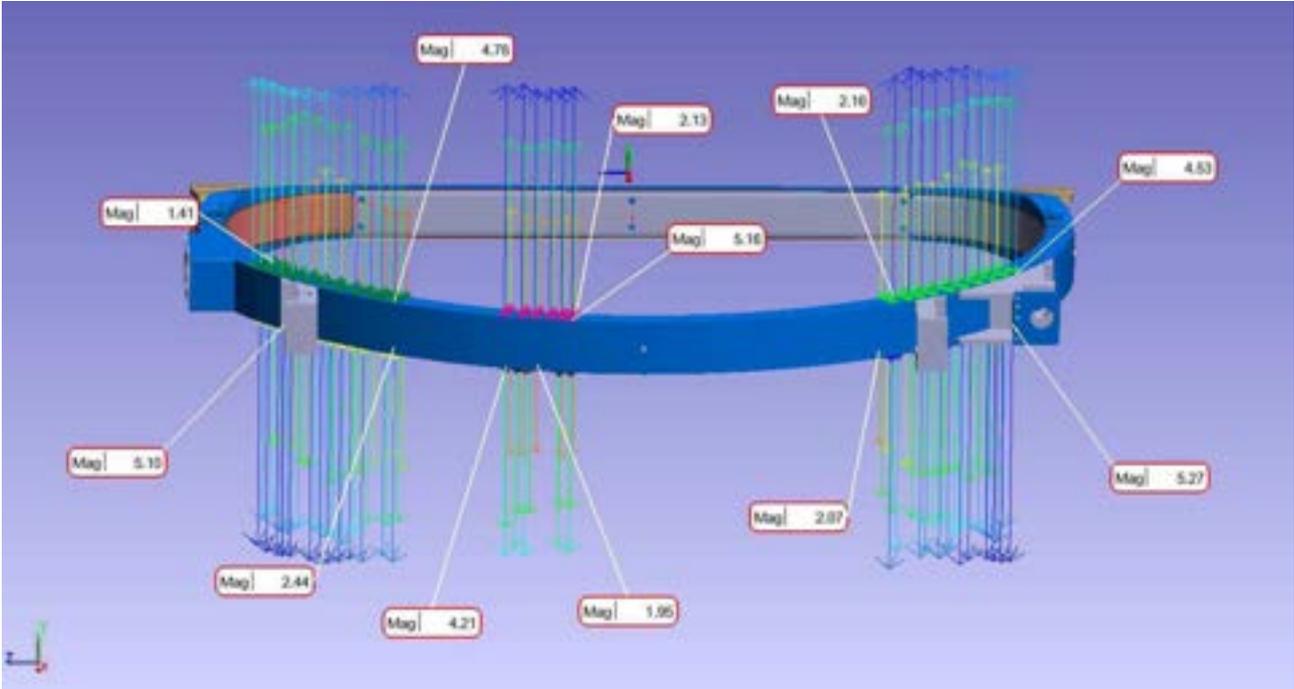


Figura 11 Misura delle superfici di interfaccia da lavorare sulla gamba curva

2.4 Lavorazione meccanica delle superfici di interfaccia, eseguita presso un sub-fornitore di ASG

Completato il processo di *embedding*, il modulo viene preparato per la spedizione all'impresa sub-appaltatrice delle lavorazioni per asportazione di truciolo necessarie alla costruzione delle superfici di interfaccia. L'immagine seguente (Figura 12 Modulo su telaio di trasporto per spedizione all'impresa responsabile delle lavorazioni di macchina) mostra un modulo rivestito con sacco barriera disposto sul telaio di trasporto.



Figura 12 Modulo su telaio di trasporto per spedizione all'impresa responsabile delle lavorazioni di macchina

La fase di lavorazione del primo modulo è stata preceduta dalla lavorazione del *mock-up* utilizzato per la validazione del processo di saldatura e di *embedding*. Questo *mock-up* è stato poi utilizzato come riferimento per le successive lavorazioni sul modulo completo. Nell'immagine seguente è rappresentata una fase di lavorazione della superficie di accoppiamento di "*wedging*" inclinata di 10° rispetto all'orizzontale.



Figura 13 Lavorazione della superficie di *wedging*

Le lavorazioni consistono in: asportazione dei sovrametalli nelle superfici di interfaccia e nella realizzazione delle forature per gli organi di collegamento da inserire al montaggio. Queste ultime devono essere realizzate con estrema precisione al fine di assicurare un corretto assemblaggio della macchina a Naka, pertanto la loro posizione e i relativi diametri sono controllati sia attraverso misuratori tradizionali che, dime di riferimento, dispositivi passa-non-passa ed infine con *laser tracker*.

L'immagine seguente (Figura 14 Fase di controllo dei fori per *Intercoil structures*) mostra un momento del collaudo delle forature necessarie per il collegamento tra moduli. Si nota la presenza di una dima che fornisce la posizione dei fori con precisione centesimale. Si notano inoltre tre dispositivi di misura del diametro, realizzati con tolleranza di accoppiamento compatibile con la tolleranza H7 del foro.

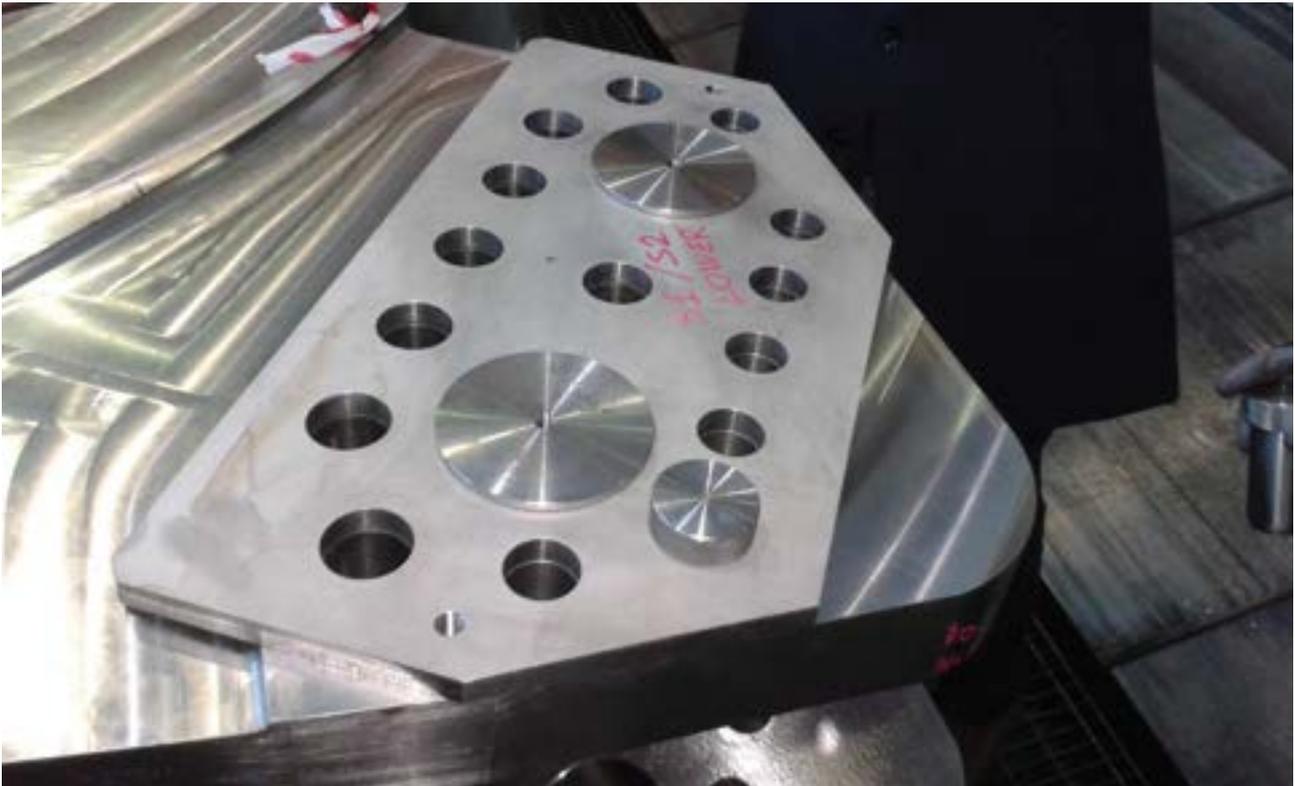


Figura 14 Fase di controllo dei fori per *Intercoil structures*

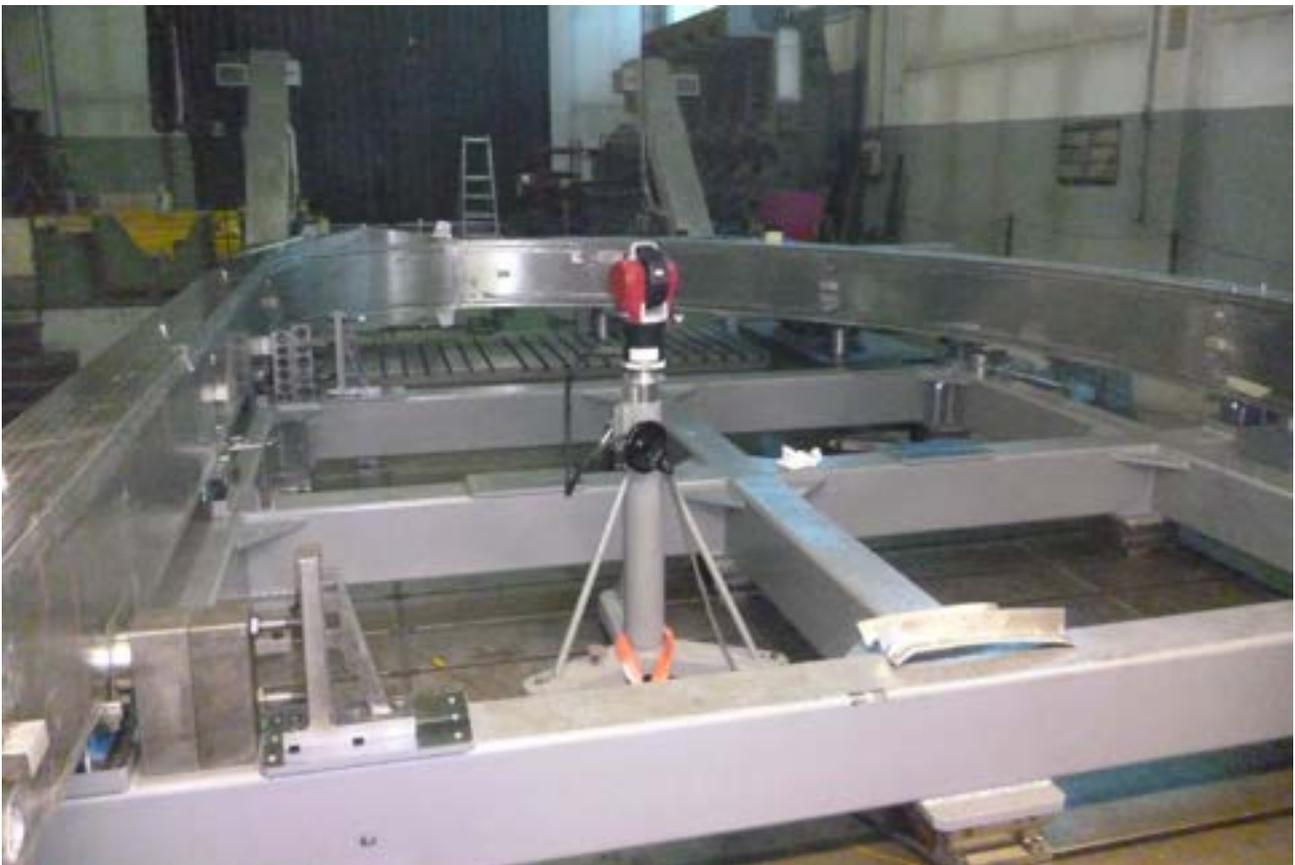


Figura 15 Misura con *laser tracker* del modulo al termine delle lavorazioni di macchina

L'immagine precedente (Figura 15 Misura con *laser tracker* del modulo al termine delle lavorazioni di macchina) mostra un momento della fase di misura con laser tracker eseguita al termine delle lavorazioni meccaniche con il modulo ancora piazzato sulla macchina utensile. In questo modo eventuali difetti potrebbero essere corretti senza spostare il modulo prima della spedizione a Genova per l'assemblaggio del circuito idraulico e l'esecuzione dei controlli di accettazione.

Prima di concludere la descrizione di questa fase di fabbricazione è doveroso menzionare che, nel corso delle attività di lavorazione del secondo modulo a Marzo 2016, la rottura di un sistema di frenamento del carro ponte ha provocato la caduta del modulo da un'altezza di circa 2 m. A seguito della caduta, il modulo ha subito una deformazione plastica fuori del piano di circa 15 mm. Per poter decidere se il modulo sia recuperabile, è stata avviata una campagna di verifiche che prevede anche la costruzione di mock-up in scala. Attualmente il modulo TFC-02 è posto in "quarantena" in attesa di conoscere l'esito delle verifiche in corso.

2.5 Inserimento sistema fluidico e strumentazione per il mantenimento ed il controllo della temperatura criogenica in esercizio

L'ultima fase di fabbricazione su ciascun modulo viene svolta presso l'ASG Superconductors S.p.A. a Genova e consiste nell'installazione del circuito idraulico di raffreddamento composto di due circuiti paralleli: uno per la cassa di contenimento ed un altro per l'avvolgimento



Figura 16 Preparazione della zona degli ingressi di Elio

Il raffreddamento del WP alla temperatura dell'Elio liquido (4.5 K) è possibile in quanto il conduttore che lo costituisce è realizzato con tecnica "*cable in conduit*", dove l'Elio viene fatto scorrere per effetto di una pressione di ingresso di circa 0.5 MPa. L'Elio viene immesso nel WP attraverso sei condotti, uno per DP, sul lato interno della gamba curva del modulo. Questi condotti vengono poi interrotti elettricamente da un set

di isolatori elettrici ed infine collegati ad un collettore con un unico ingresso. L'Elio, terminata il suo percorso nel WP, viene fatto uscire dai giunti elettrici: cinque interni e due terminazioni esterne. Nuovamente i condotti di uscita vengono interrotti dalla presenza di sette isolatori elettrici per poi confluire in un collettore collegato ad una sola uscita. Alle estremità dei condotti sono montati delle valvole di chiusura del circuito che, per la spedizione viene mantenuto in pressione. Il circuito di raffreddamento della cassa è composto di due parti: una coppia di tubi sono saldati all'interno della gamba dritta sul lato esposto al plasma, un'altra coppia è saldata esternamente alla gamba curva nel lato rivolto al plasma.

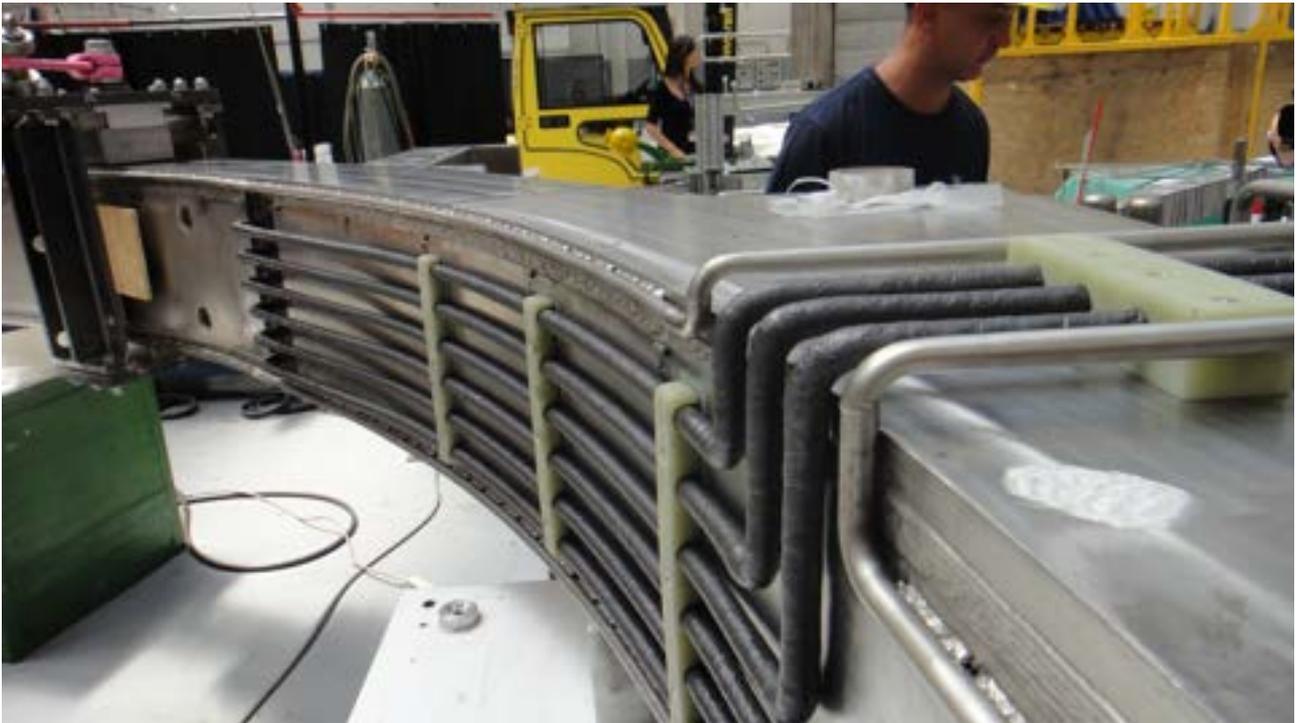


Figura 17 Vista del circuito di raffreddamento del WP e della cassa sul lato interno della gamba curva



Figura 18 Vista delle uscite dei circuiti idraulici e degli isolatori elettrici montati

Le immagini precedenti mostrano tre momenti della fase di assemblaggio del circuito di raffreddamento. In particolare la prima (Figura 16 Preparazione della zona degli ingressi di Elio) mostra la fase di preparazione della superficie interna della gamba curva in corrispondenza dei sei ingressi di Elio. Si riconoscono inoltre i due tubi di raffreddamento della cassa saldati sulle estremità. La saldatura di questi ultimi, è stata qualificata anche con *mock-up* in scala e testata alla temperatura dell'Azoto liquido.

L'immagine successiva (Figura 17 Vista del circuito di raffreddamento del WP e della cassa sul lato interno della gamba curva) mostra la disposizione dei tubi in uscita dall'ingresso di Elio che scorrono sul lato interno per poi piegare verso il lato ed uscire sulla sommità del modulo. È possibile riconoscere che i tubi di raffreddamento dell'avvolgimento sono stati isolati elettricamente e ricoperti di una vernice conduttiva resistente alle temperature criogeniche del modulo.

L'ultima immagine infine (Figura 18 Vista delle uscite dei circuiti idraulici e degli isolatori elettrici montati) mostra la disposizione dell'impianto sulla sommità del modulo. Si riconoscono i quattro tubi, due per l'ingresso e due per l'uscita, di collegamento del circuito idraulico al refrigeratore. Si notano inoltre i tredici isolatori elettrici che disaccoppiano l'avvolgimento dalla massa e i due collettori a valle degli isolatori.

2.6 Prove finali di accettazione

Terminato l'assemblaggio il modulo viene testato a temperatura ambiente prima di essere spedito. I test consistono in tre tipologie:

- Test elettrici
- Test idraulici
- Test dimensionali

I test elettrici prevedono la misura della resistenza elettrica dell'avvolgimento a temperatura ambiente, la verifica della resistenza dell'isolamento ed il cosiddetto Paschen test. Quest'ultimo è effettuato in condizioni di vuoto variabile all'interno di una camera da vuoto applicando una differenza di potenziale di 3.8 kV tra l'avvolgimento e la cassa. Scopo di questo test è verificare la presenza di punti deboli nell'isolamento del circuito idraulico.

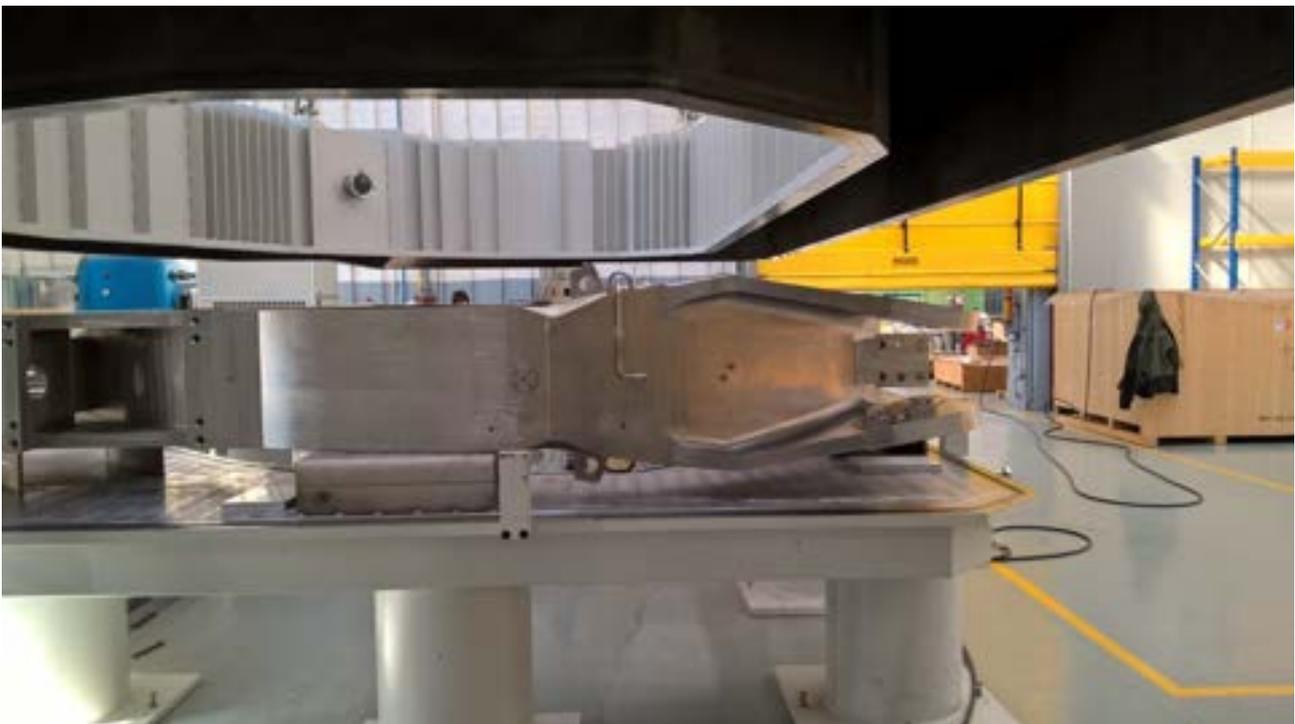


Figura 19 Inserimento del modulo nella camera da vuoto per l'esecuzione dei test finali

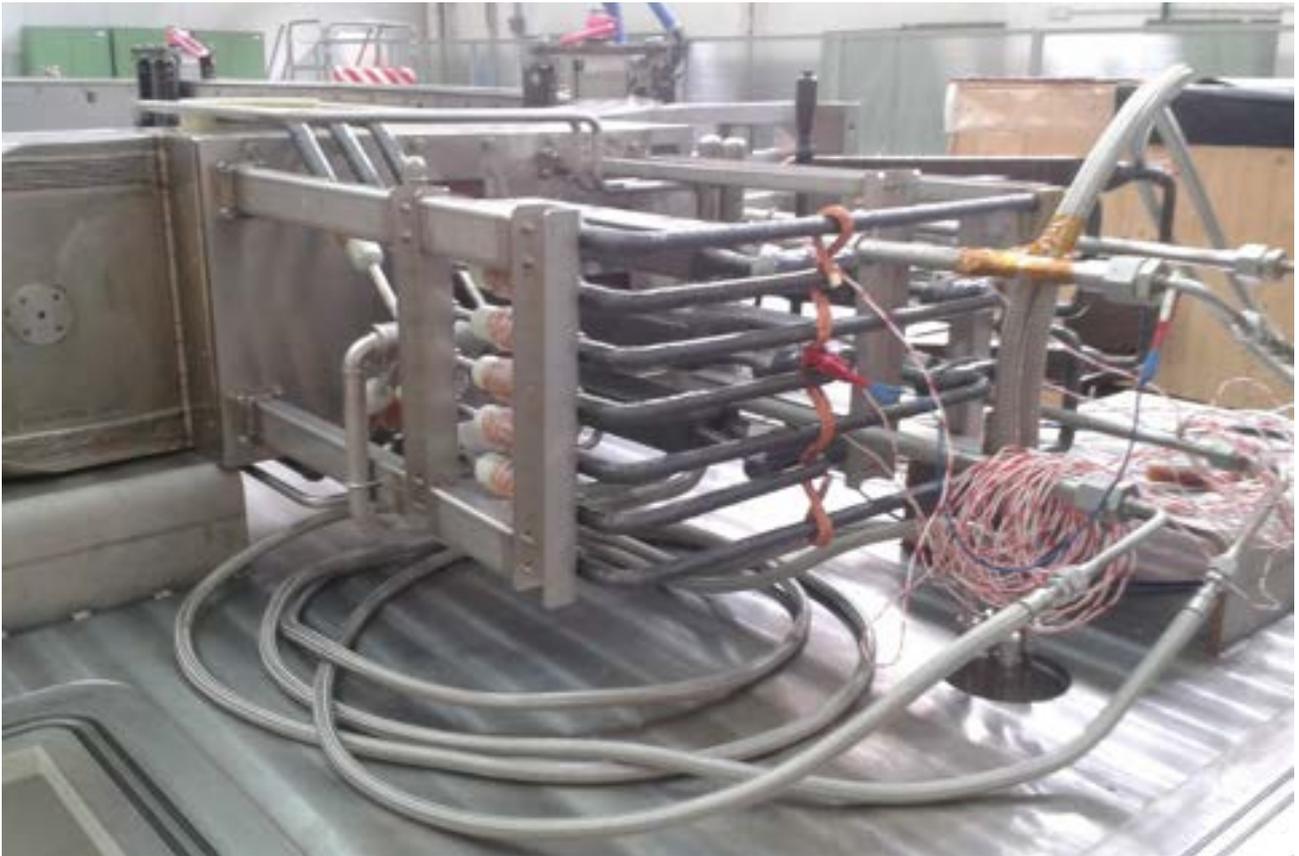


Figura 20 Esecuzione dei collegamenti elettrici per la prova di Paschen

I test idraulici consistono nella misura della caduta di pressione nel circuito e della tenuta della pressione all'interno della camera da vuoto.

Le misure dimensionali servono a caratterizzare il modulo e a definire eventuali interferenze al montaggio della macchina.

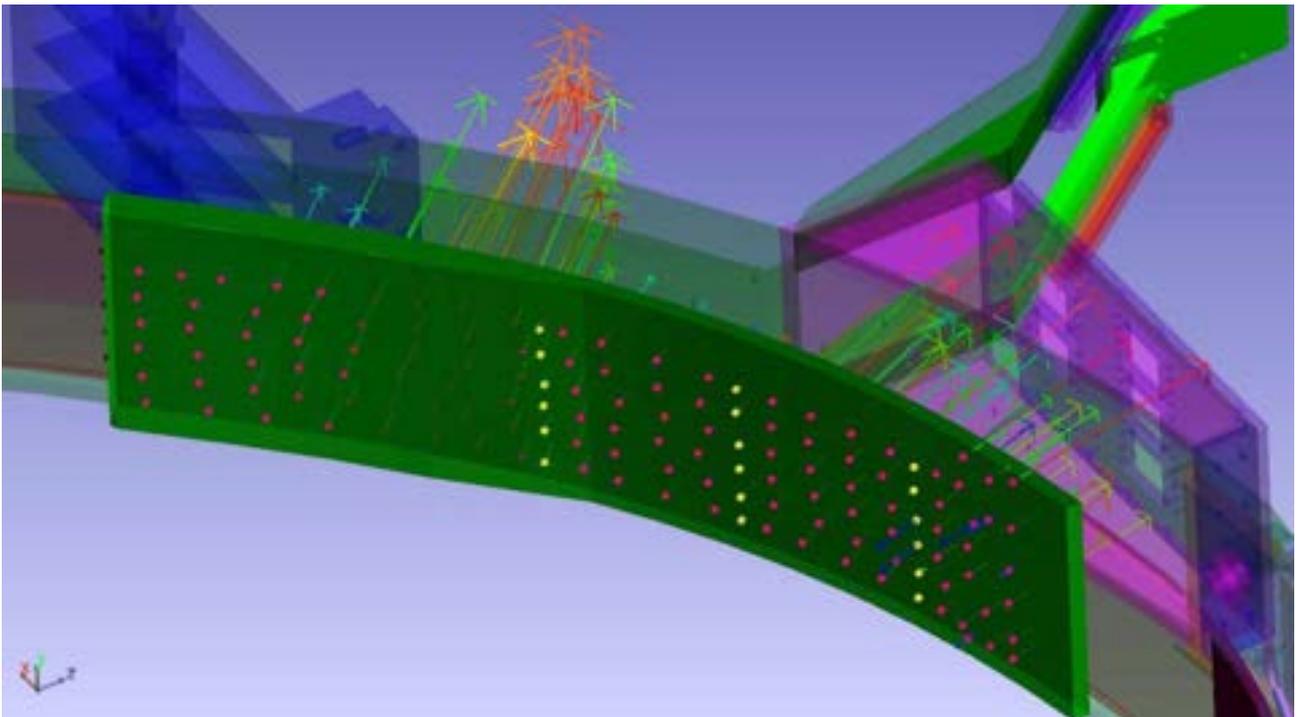


Figura 21 Controllo dell'ingombro dei tubi di ingresso Elio verso lo schermo termico della macchina

Terminati i collaudi con esito positivo, il modulo viene caricato sul telaio di trasporto e spedito alla *facility* per i test criogenici (Figura 22 Partenza del modulo per la *facility* dei test criogenici).



Figura 22 Partenza del modulo per la *facility* dei test criogenici

2.7 Test criogenici ed assemblaggio delle strutture esterne di contenimento

Presso il laboratorio CEA di Saclay, vicino Parigi, vengono eseguite le misure elettriche e funzionali dei moduli. I test sono svolti all'interno di un criostato ed il modulo viene raffreddato da un flusso di Elio alla temperatura di 4.5 K per simulare le condizioni operative. I test prevedono misure alla corrente nominale (25700 A) della resistenza dei giunti e misure di *quench* per mezzo di un innalzamento lento e controllato della temperatura di ingresso dell'Elio. Le misure finora condotte su cinque moduli, tre di produzione francese e due di provenienza italiana, non hanno mostrato significative dispersioni e tutti i parametri di controllo principali si sono mantenuti all'interno dei valori previsti in specifica. In particolare la resistenza dei giunti elettrici è sempre stata inferiore ai 2 nOhm così come la temperatura di *quench* è sempre stata di 7.50 ± 0.05 K. L'immagine seguente (Figura 23 Inserimento del modulo TFC-01 nel criostato per le misure criogeniche) mostra l'inserimento all'interno del criostato del primo modulo ENEA. Si noti che, per effetto della forza di Lorentz, il modulo tende a deformarsi di circa 50 mm in direzione radiale non avendo un contenimento che, nelle condizioni operative, sarà invece assicurato dalla presenza dei moduli adiacenti, nelle superfici di *wedging*, e delle cosiddette *Outer Intercoil Structures* (OIS) che pongono in connessione meccanica le superfici esterne delle gambe curve dei moduli.



Figura 23 Inserimento del modulo TFC-01 nel criostato per le misure criogeniche

Completati i test elettrici, sui moduli vengono montate le rispettive OIS. La seguente immagine (Figura 24 Vista del modulo al termine del *pre-assembly* dell'OIS.) mostra il modulo TFC-01 al termine di questa operazione di *pre-assembly*.



Figura 24 Vista del modulo al termine del *pre-assembly* dell'OIS.

Infine il modulo viene preparato per la spedizione in Giappone dove avverrà l'assemblaggio finale per la costruzione del *tokamak* JT-60SA. Il viaggio in nave fino al porto di Hitachi ha una durata di circa 2 mesi ed il trasporto al sito di Naka avviene in pochi giorni con un trasporto su strada.



Figura 25 Il primo modulo viene preparato per la spedizione in Giappone.

2.8 Costruzione di 6 lunghezze di conduttore per modulo spare

Nel corso del 2015 è stata approvata, tra Europa e Giappone e poi ratificata dai singoli Paesi partecipanti, la decisione di far costruire ad ENEA e a CEA un modulo *spare* ciascuno oltre ai 9 moduli inizialmente previsti. Per far fronte a questo impegno nel corso del 2016, ENEA ha affidato all'impresa che ha realizzato tutti i conduttori CICC di tipo TF il compito di costruire altri 6 unità di conduttore da 240 m. Il contratto relativo, siglato tra le parti a Gennaio 2016 si è concluso a Giugno 2016 con la consegna dei conduttori ad ASG Superconductors S.p.A. dove è stata avviata l'attività di fabbricazione degli avvolgimenti per la composizione della bobina. Il completamento dell'avvolgimento avverrà entro il 2016, mentre la fase di integrazione del WP nella cassa di contenimento comincerà non appena il relativo set di componenti della cassa sarà reso disponibile. Tanto la fabbricazione dei conduttori che quella degli avvolgimenti e dell'integrazione in cassa avvengono nel rispetto delle specifiche tecniche originali e delle relative integrazioni già decise nel corso della realizzazione della fornitura principale.

3 Conclusioni

La fornitura di nove moduli di magneti di campo toroidale, più uno *spare*, della macchina JT-60SA sotto la responsabilità di ENEA sta procedendo con regolarità. Ad oggi due moduli sono stati testati con successo presso la test *facility* di Saclay ed uno di essi è in viaggio verso il Giappone. Un modulo è prossimo alla spedizione a Saclay, un altro sta per rientrare in ASG dopo le lavorazioni di macchina ed uno subentrerà al suo rientro. Un sesto avvolgimento sta per essere inserito nella relativa cassa di contenimento. Il modulo

TFC-02 è in quarantena in attesa di concludere le indagini numeriche e sperimentali che dovrebbero stabilire se il danno sia recuperabile ed entro quali limiti. La produzione dei nove moduli della fornitura principale dovrebbe concludersi entro il 2017 mentre il modulo *spare* verrà consegnato all'inizio del 2018.

4 Riferimenti bibliografici

5 Abbreviazioni ed acronimi

DP	= Double Pancake
WP	= Winding Pack
TF	= Toroidal Field
TFC	= Toroidal Field Coil
PF	= Poloidal Field