



Ricerca di Sistema elettrico

## Stato di fabbricazione dei 9 magneti di responsabilità ENEA del Tokamak JT-60SA

*Antonio Cucchiaro and Gian Mario Polli*

## STATO DI FABBRICAZIONE DEI 9 MAGNETI DI RESPONSABILITÀ ENEA DEL TOKAMAK JT-60SA

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

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Produzione di Energia Elettrica e Protezione dell'Ambiente

Progetto: B.3.2 Attività di fisica della Fusione complementari a ITER

Obiettivo: A1

Responsabile del Progetto: Ing. Aldo Pizzuto, ENEA

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 AVVOLGIMENTI DI BOBINA .....	5
2.2 INTEGRAZIONE FINALE .....	19
3 CONCLUSIONI.....	23
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	23
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	24

## Sommario

Nell'ambito dell'accordo denominato "Broader Approach" per la costruzione del *tokamak* JT-60SA, l'ENEA ha l'incarico di fornire 9 dei 18 moduli di campo toroidale (TF) del sistema magnetico JT-60SA. I restanti moduli saranno forniti dal *Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives* (CEA) controparte francese dell'ENEA. I 9 moduli italiani sono costruiti dall'ASG Superconductors S.p.A. a Genova sotto la supervisione di ENEA. Il coordinamento delle attività dei diversi contributori europei volontari al progetto è compiuto dall'agenzia Fusion for Energy (F4E) con sede a Garching, in Germania. Dal momento che il contratto tra ENEA e ASG è stato firmato nel 2011, tutte le attività di ingegneria relative alla produzione sono state già completate. Anche tutte le attrezzature necessarie nelle varie fasi di lavorazione sono state predisposte, ed infine tutti i processi produttivi ritenuti più critici sono stati qualificati. Verso la fine del 2013 l'attività manifatturiera ha avuto ufficialmente inizio con la produzione del primo doppio pancake (DP) di serie. I successivi cinque, che assieme al primo costituiscono il primo pacco di avvolgimenti (WP), sono stati completati entro la fine del 2013. In seguito nel corso del 2014, è stata completata l'impregnazione del primo WP, e parallelamente sono state avviate l'avvolgimento e le operazioni di impilaggio e impregnazione sotto vuoto del secondo, terzo e quarto WP. Al momento di scrivere tutti e 9 i WP previsti dalla fornitura sono stati impregnati, mentre l'incassamento del primo WP nella relativa cassa di contenimento è in corso. Sulla base dei risultati finora ottenuti e considerando che l'attività di avvolgimento e impregnazione è già stata conclusa, si può ritenere che la fornitura possa essere completata nei tempi previsti dal contratto.

## 1 Introduzione

L'esperimento JT-60SA è uno dei tre progetti in corso di realizzazione in Giappone nell'ambito dell'accordo denominato "*Broader Approach*", condotto congiuntamente da Europa e Giappone. La missione del progetto JT-60SA è quella di contribuire alla realizzazione in tempi rapidi dell'energia da fusione, affrontando questioni fondamentali di fisica e tecnologia per ITER e DEMO.

JT-60SA è una macchina di tipo *tokamak* superconduttrice il cui sistema magnetico è costituito da 18 moduli di campo toroidale (TF), 4 moduli del solenoide centrale (CS) e 6 bobine esterne per il campo di equilibrio (EF). Tutti i moduli, in quanto realizzati con materiale superconduttore di bassa temperatura critica, sono raffreddati da elio supercritico a 4.4 K e termicamente protetti in un criostato metallico.

Per ottemperare agli impegni presi nel "*Broader Approach*", nel settembre 2011 l'ENEA ha firmato con ASG *Superconductors* un contratto per la fornitura di nove moduli superconduttori TF. Ciascun modulo TF è costituito da un avvolgimento, o bobina (WP), inserito in una struttura di contenimento in acciaio austenitico AISI 316L fornita da ENEA. Ogni bobina è costituita da sei *doppi pancake* (DP) elettricamente collegati da cinque giunzioni interne poste sulla parte superiore della bobina e interfacciate esternamente attraverso una coppia di terminazioni. Ogni DP è ottenuto avvolgendo un cavo lungo 240 m di conduttore di tipo "*CICC*" ("*cable in conduit conductor*") costituito da una corda di fili di NbTi e rame inseriti in una camicia di acciaio austenitico AISI 316L. Ogni *pancake* ha sei spire lunghe 18,8 metri in media, pertanto ogni avvolgimento di bobina è costituito di 72 spire che trasportano una corrente di 25.7 kA e generano un campo magnetico di picco sul conduttore in condizioni di progetto di 5.65 T a cui corrisponde circa 1 K di margine di temperatura per stabilità termica. Gli avvolgimenti hanno un'altezza complessiva di circa 8 m (compresi i giunti interni) e una larghezza di circa 4,5 m. La sezione nominale è di 150 mm x 347 mm. Il peso totale è di circa 6,3 tonnellate. Una volta inserito nella cassa di contenimento e corredato di tutta la strumentazione e circuiteria idraulica, il modulo magnetico avrà un peso complessivo di 16 tonnellate che diventano 24 aggiungendo il peso del telaio di trasporto. Una volta completato, ogni modulo dovrà essere spedito alla *cold test facility* di Saclay, vicino Parigi, per essere sottoposto ad una serie di collaudi a temperatura criogenica prima di essere inviato in Giappone per il montaggio presso il sito di Naka.

L'attività contrattuale può essere divisa in tre fasi distinte: i) ingegneria; ii) avvolgimenti; iii) incassamenti. Alle attività di ingegneria, che comprendono tra gli altri la realizzazione dei disegni esecutivi di tutti i componenti e la progettazione delle attrezzature di produzione, sono stati dedicati i primi due anni di contratto. Nel corso del terzo anno, è stato possibile avviare la fase produttiva degli avvolgimenti, dopo il completamento della relativa qualifica; parallelamente è stata portata a termine la qualifica dei processi relativi alla terza fase produttiva. Il quarto anno ha visto l'avvio della fase di incassamento, tuttavia, a seguito di un ritardo nella consegna del primo gruppo di componenti della cassa, l'operazione di incassamento del primo modulo è stata conclusa con l'operazione di chiusura per saldatura della cassa stessa. Il modulo sarà quindi sottoposto alle operazioni finali di lavorazioni di macchina e assemblaggio del sistema di raffreddamento. Anche a seguito del ritardo nell'avvio della fase di incassamento, è stato però possibile completare tutti gli avvolgimenti di bobina previsti dalla fornitura in anticipo rispetto a quanto inizialmente preventivato. Questo risultato consente ad ASG di dedicare ora tutte le risorse alla fase finale in modo da completare la fornitura nei tempi e nelle modalità previste dal contratto.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

Nel seguito si descrivono nel dettaglio le attività svolte tra ottobre 2014 e settembre 2015 presso l'ASG *Superconductors* sotto la supervisione di ENEA. Prima vengono riportati i risultati relativi agli avvolgimenti di bobina e successivamente sono discusse le attività, tuttora in corso, di incassamento del primo modulo.

### 2.1 Avvolgimenti di bobina

Come precedentemente ricordato, ciascun avvolgimento di bobina ("*winding pack*" - WP) è costituito di 6 doppi "*pancake*" (DP) a forma di D, ciascun DP è costituito di 2 strati con 6 spire per strato, per un totale di 72 spire poste elettricamente in serie attraverso 5 giunti di connessione posti sulla sommità dell'avvolgimento. Ciascun DP è ottenuto a partire da una lunghezza di circa 226 m di cavo superconduttore

in NbTi. In prossimità del salto strato di ciascun DP è saldato un bocchello di ingresso del fluido criogenico di raffreddamento necessario per mantenere il conduttore allo stato superconduttivo. Pertanto, la lunghezza idraulica percorsa dall'Elio nel suo moto all'interno della camicia di acciaio che contiene il superconduttore è pari alla lunghezza di un singolo *pancake* ovvero circa 118 m. L'inserimento del bocchello di ingresso dell'Elio sull'avvolgimento ha costituito uno dei processi critici analizzati durante la fase di avvio: infatti la saldatura è posta in corrispondenza di una regione sollecitata meccanicamente e sottoposta a fatica. La saldatura è stata dunque sottoposta ad una estesa serie di controlli di produzione per assicurare la sua tenuta per tutta la durata di funzionamento della macchina. La saldatura del bocchello di ingresso di Elio rappresenta inoltre il primo *step* produttivo degli avvolgimenti DP, ed è stata per questo totalmente integrata nella cosiddetta "linea di avvolgimento". Si tratta di un impianto lungo circa 40 m e largo 15 m costituito da due carrelli su rotaia che possono ruotare rispetto ad un asse verticale e traslare orizzontalmente e che ospitano l'aspo svolgitore e la tavola di avvolgimento a forma di D realizzata con un'elevata accuratezza dimensionale per minimizzare l'errore introdotto sull'avvolgimento dal posizionamento del conduttore sulla stessa. Due ponti fissi disposti a circa 15 m l'uno dall'altro ospitano invece le attrezzature di piegatura, lavaggio del conduttore, sabbatura e nastratura. Tutti i dispositivi montati sulla linea di avvolgimento sono controllati elettronicamente per garantire le tolleranze di manifattura necessarie al corretto funzionamento dei moduli di magnete. L'immagine in Figura 1 mostra la linea di avvolgimento con in primo piano la tavola di avvolgimento con un DP completato in attesa di essere spostato nella successiva stazione di nastratura.



**Figura 1** Vista della linea di avvolgimento presso ASG Superconductors S.p.A.

L'esperienza maturata nel corso del 2014 negli avvolgimenti dei 18 DP di serie costituenti i primi 3 WP ha consentito una sensibile accelerazione nel processo di avvolgimento come evidenziato in Figura 2 dove i

tempi di realizzazione del DP passano da 20 a soli 5 giorni solari nel corso dei primi avvolgimenti. Nello specifico le attività critiche che vengono svolte sulla linea di avvolgimento sono le seguenti:

- Montaggio conduttore su aspo svolgitore
- Preparazione scorta per secondo strato
- Piegatura conduttore per realizzazione salto strato
- Saldatura bocchello di ingresso dell'Elio
- Pulizia (con soluzione alcalina in vasca con sistema ultrasonoro), piegatura, sabbiatura e nastratura
- Posizionamento su tavola di avvolgimento
- Realizzazione secondo strato.

E' importante notare come la sabbiatura e la nastratura vengano svolte a valle della piegatura. Questa scelta è stata compiuta per evitare che i rulli danneggiassero la superficie del conduttore o il nastro di vetro avvolto a formare il 1 mm di spessore necessario a garantire l'isolamento tra le spire. La messa a punto di questo processo, ha rappresentato un importante traguardo ed è alla base dell'accelerazione visibile in Figura 2.

Completato l'avvolgimento, il singolo DP viene spostato su una postazione di nastratura e piegatura delle uscite elettriche e sottoposto a dei test elettrici e dimensionali. Successivamente il DP viene spostato nella stazione di impilaggio per la formazione del pacco di avvolgimenti. In questa fase il WP viene avvolto con nastro di vetro per arrivare a 2.5 mm di spessore che aggiunti agli 0.5 mm di spessore della nastratura di DP portano lo spessore della nastratura contro-massa a 3 mm totali. Inoltre le uscite elettriche costituite da 5 giunti elettrici interni e due terminazioni vengono montati e controllati. Il processo di costruzione dei WP si conclude con lo spostamento nella stazione di impregnazione sotto vuoto, dove il pacco di avvolgimenti viene avvolto da un lamierino in acciaio saldato completamente attorno al WP e pressato da un sistema di staffe montate su un tavolo sufficientemente rigido per assicurare la pressione prevista dal processo di impregnazione. Dopo la verifica della tenuta a vuoto della scatola di impregnazione, l'inserimento della resina può cominciare seguita dal processo di polimerizzazione che avviene seguendo un ciclo di riscaldamento definito dal produttore della resina epossidica utilizzata. Sia il processo di impilaggio che quello di impregnazione, appena descritti, sono stati ottimizzati nel corso della produzione dei primi avvolgimenti. Ciò ha consentito, come si vede in Figura 3, una significativa accelerazione nella produzione.

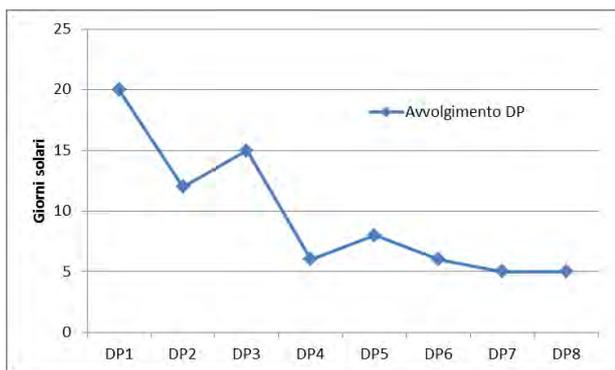


Figura 2 Tempi di produzione di un DP

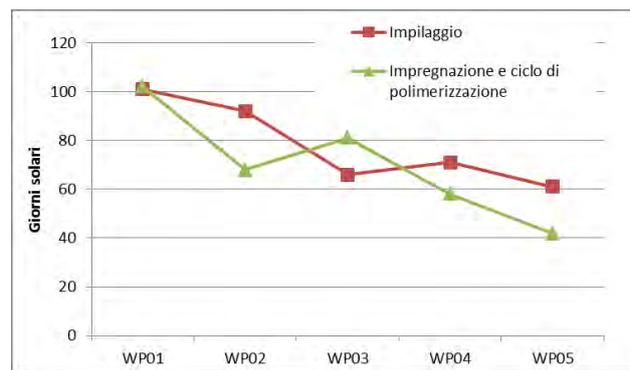


Figura 3 Tempi di produzione impilamento e impregnazione

Le precedenti considerazioni relative alle curve di apprendimento dei vari processi sono chiaramente esemplificate dalla seguente Figura 4 in cui sono mostrate tre curve di produzione degli avvolgimenti. La curva azzurra rappresenta l'andamento della produzione previsto all'avvio delle attività contrattuali. Si noti come fin da subito era chiaro che il completamento della prima bobina avrebbe richiesto un tempo superiore rispetto alle successive. Si nota inoltre una decelerazione nella seconda parte dovuta al

sopravvenuto carico lavorativo rappresentato dall'arrivo delle casse di contenimento. La curva rossa mostra invece la rimodulazione proposta da ASG a seguito dei ritardi nella consegna delle casse, mentre la curva verde rappresenta l'andamento reale della produzione. Come si può notare a partire da metà 2015 si è assistito ad una accelerazione nei processi produttivi dovuta proprio all'assenza delle casse e quindi alla possibilità di concentrare tutte le risorse sulla produzione degli avvolgimenti.

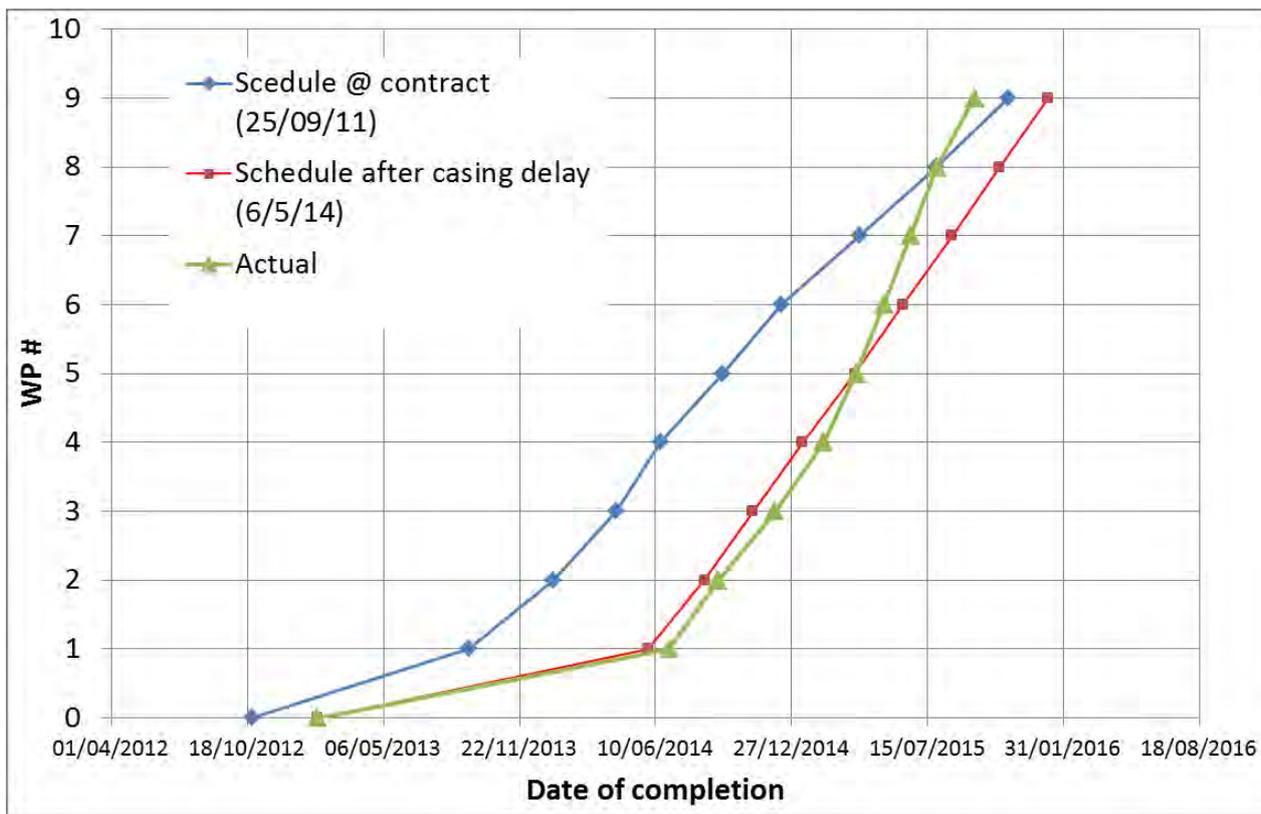


Figura 4 Tempistica di manifattura WP

Completata l'impregnazione i WP sono stati estratti dal banco di impregnazione, puliti degli eccessi di resina epossidica e ricoperti con una vernice conduttiva.

La successiva Figura 5 mostra il WP04 durante l'esecuzione della pulizia dopo l'estrazione dalla camera di impregnazione. Si noti che l'avvolgimento viene collocato su dei supporti mobili per facilitare la rimozione del lamierino di contenimento.

A seguire i WP vengono sottoposti ad una serie di collaudi che comprendono tra gli altri controlli di tenuta a vuoto. A questo scopo i WP vengono inseriti in una camera da vuoto appositamente progettata a forma di D con doppio anello di tenuta come si vede nella Figura 6.



Figura 5 Operazione di pulizia e verniciatura del WP04



Figura 6 Un WP viene inserito in camera da vuoto per l'esecuzione del test di tenuta

I collaudi finali sulla postazione mostrata in Figura 6 comprendono:

- Test di tenuta a vuoto (limite di accettabilità  $<1.0E^{-8}$  Pa·m<sup>3</sup>/s)
- Test di portata
- Paschen test semplificato con azoto

La successiva Figura 7 mostra un WP durante l'esecuzione del test di flusso. Si riconoscono le terminazioni a cui sono stati collegati i tubi di adduzione e rilascio dell'Azoto. Si nota inoltre che i giunti elettrici sono posti anche in connessione idraulica cosicché la lunghezza idraulica del flusso di azoto è pari a 12 volte la lunghezza prevista per il singolo pancake. Obiettivo del presente test è ovviamente di tipo comparativo per verificare che non siano presenti ostruzioni nel circuito idraulico indotte dal processo di impregnazione che possano aver danneggiato il conduttore.



Figura 7 Esecuzione test di flusso

L'ultima fase di collaudo degli avvolgimenti prevede i controlli dimensionali eseguiti con laser *tracker* che vengono svolti posizionando l'avvolgimento su dei supporti in vetronite come mostrato in Figura 8. Tali controlli sono destinati a verificare la correttezza di forma e dimensionale dell'avvolgimento che è un requisito essenziale per le caratteristiche magnetiche del modulo. Inoltre in questa fase i piani medi di riferimento della bobina vengono ricostruiti sulla base delle misure laser e i 12 *target* per la verifica della posizione della bobina nella cassa e successivamente per il montaggio del modulo vengono incollati sulla superficie interna. Nell'immagine è mostrata una panoramica della navata di produzione di ASG Superconductors. Si riconosce sullo sfondo la camera da vuoto e diversi telai di trasporto che ospitano le relative bobine in attesa del loro inserimento nella cassa di contenimento.



**Figura 8 Un WP pronto per l'esecuzione dei controlli dimensionali finali**

Le immagini riportate nella seguente tabella mostrano i 9 WP al termine dei collaudi previsti nella stazione di misura dimensionale

Tabella 1 WP al termine dei collaudi



WP-01



WP-02



WP-03



WP-04



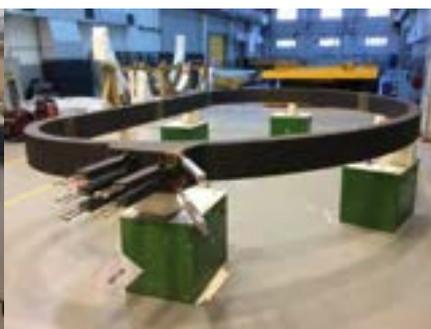
WP-05



WP-06



WP-07

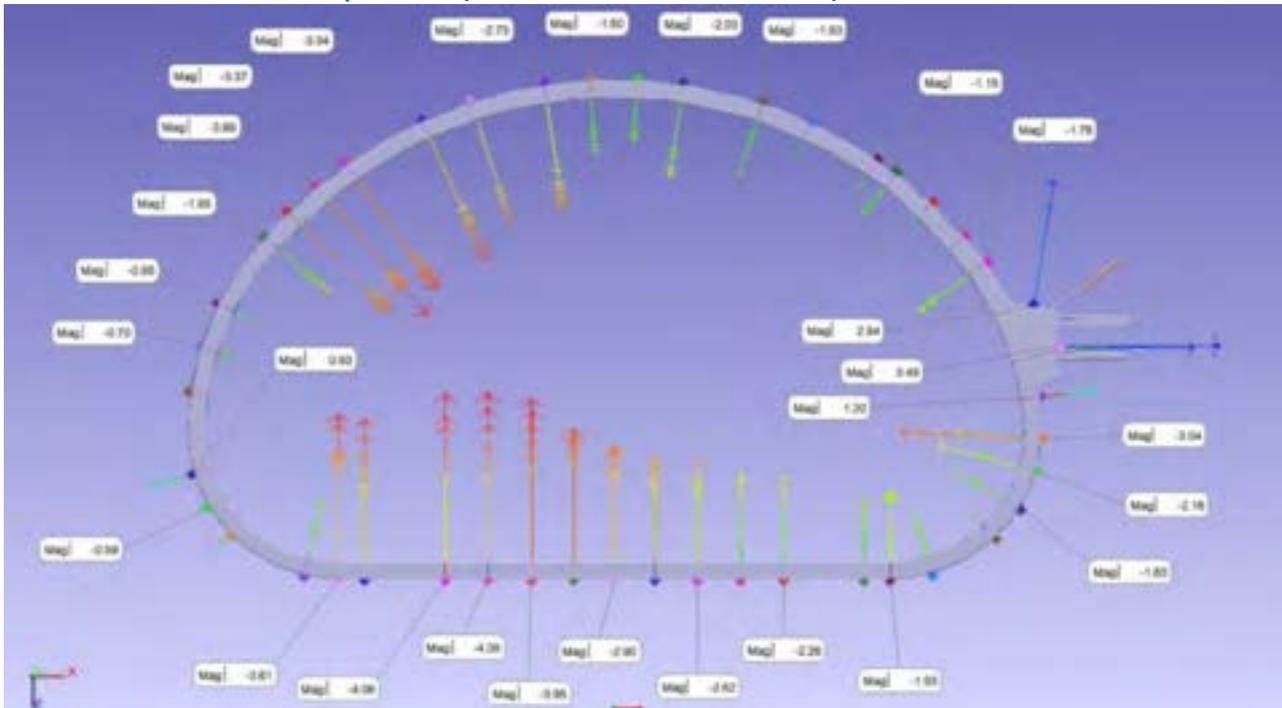


WP-08

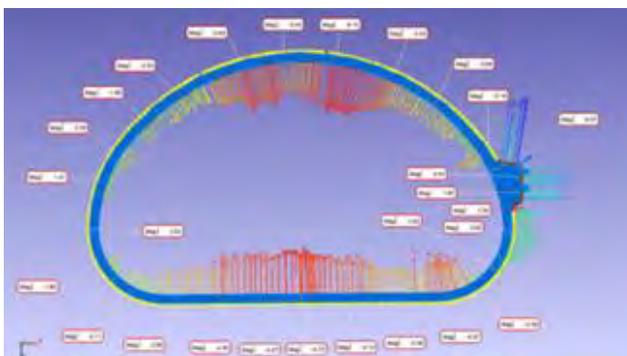


WP-09

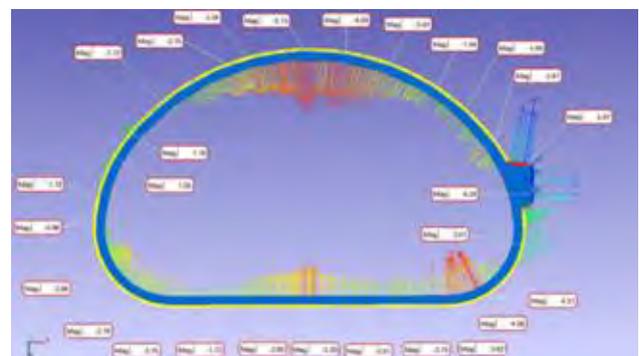
Il risultato dei controlli dimensionali è mostrato nelle seguenti Tabelle che mostrano lo scostamento della superficie interna e di quella esterna rispetto alla posizione teorica di ciascun WP prodotto (Tabella 2 Errori di forma della superficie esterna



WP-01



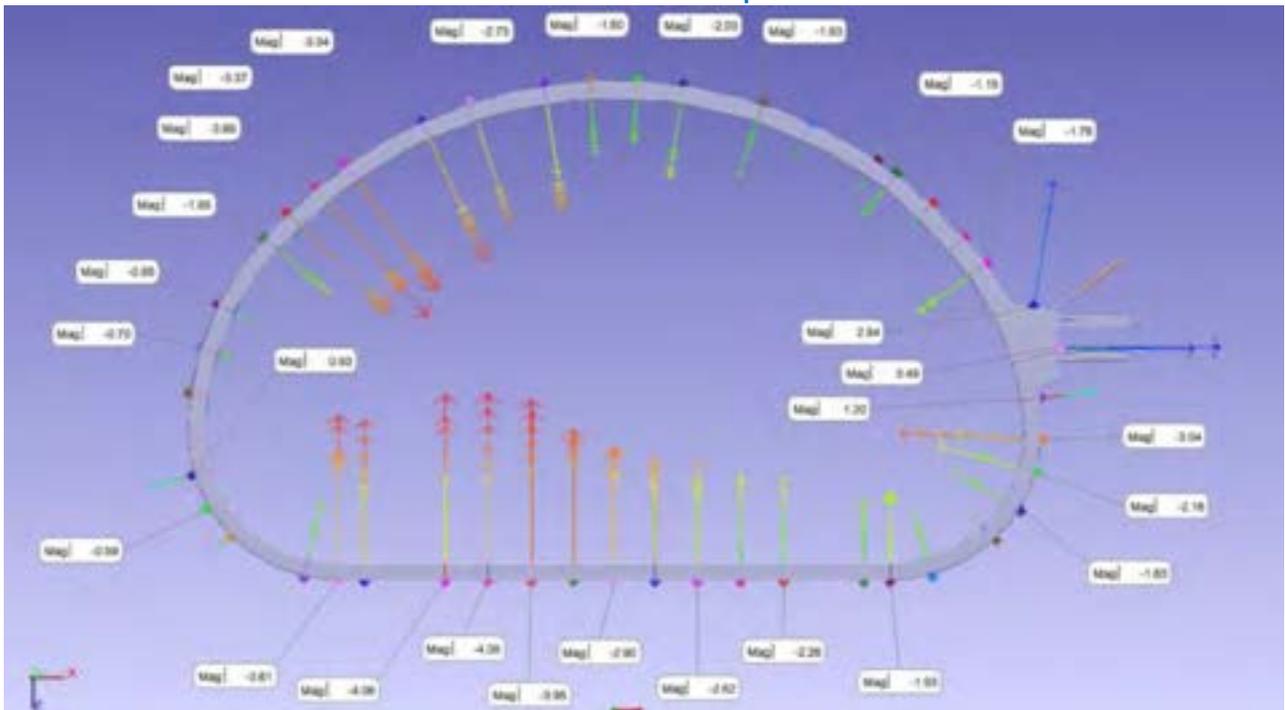
WP-02



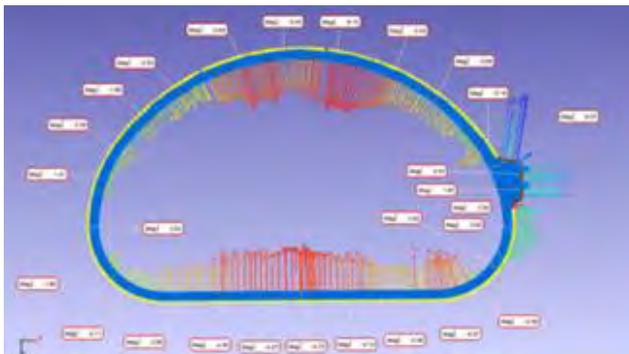
WP-03

e Tabella 3). Gli scostamenti sono contenuti entro le tolleranze previste dal progetto e sono mantenute nell'ordine di pochi millimetri. In questa direzione sono da intendersi i risultati mostrati nella successiva Tabella 4 che mostrano l'andamento della linea teorica di corrente ricostruita a partire dalle misure con laser tracker della superficie interna e di quella esterna dei WP. Si noti che in queste immagini gli scostamenti sono amplificati di un fattore 100. Tale analisi è estremamente importante non solo per la verifica delle prestazioni magnetiche dell'avvolgimento ma anche per preparare l'avvolgimento alla successiva fase di integrazione nella cassa di contenimento. I WP infatti devono essere inseriti nelle relative casse che possiedono un gioco nominale di 5 mm sul profilo esterno e di 10 mm su quello interno. Questo spazio, che è stato introdotto proprio per favorire la fase di inserimento, deve essere altresì compensato con tele di vetro e successivamente impregnato con resina epossidica per conferire al modulo la compattezza necessaria per trasferire i carichi elettromagnetici sulla struttura di supporto in acciaio austenitico. Come anticipato, lo scopo primario dei controlli dimensionali è tuttavia la verifica delle prestazioni magnetiche. Per questo è essenziale che gli avvolgimenti siano il più possibile omogenei in modo da limitare gli errori di campo magnetico generati.

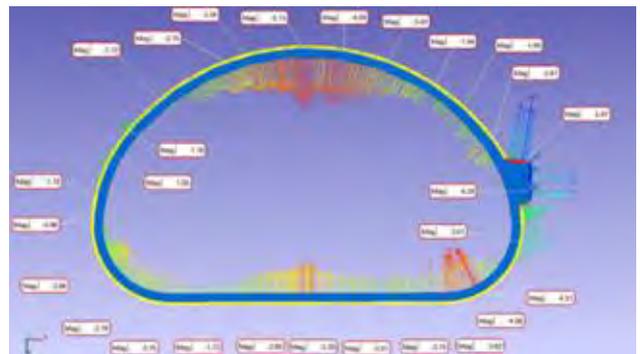
Tabella 2 Errori di forma della superficie esterna



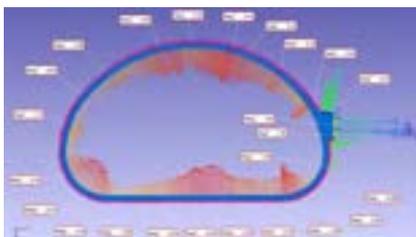
WP-01



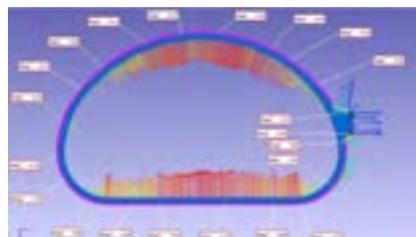
WP-02



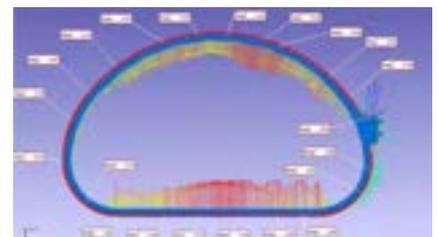
WP-03



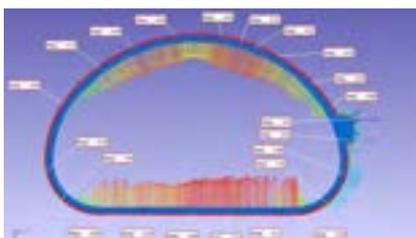
WP-04



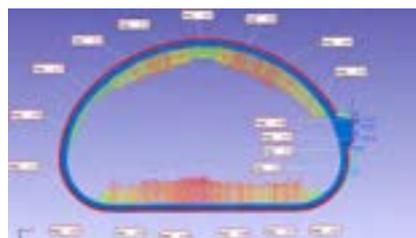
WP-05



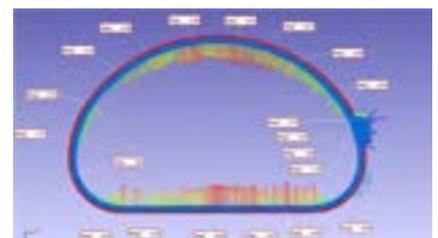
WP-06



WP-07

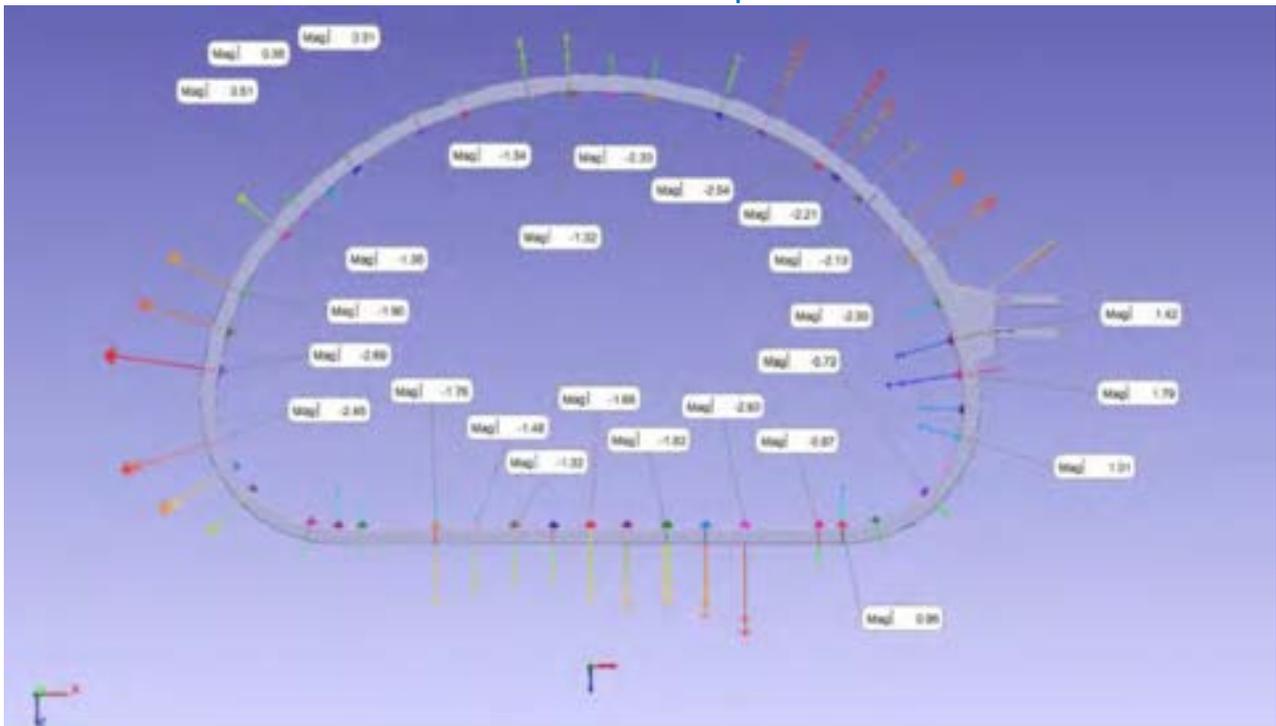


WP-08

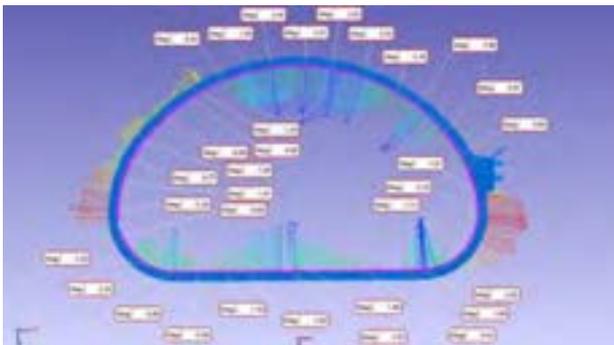


WP-09

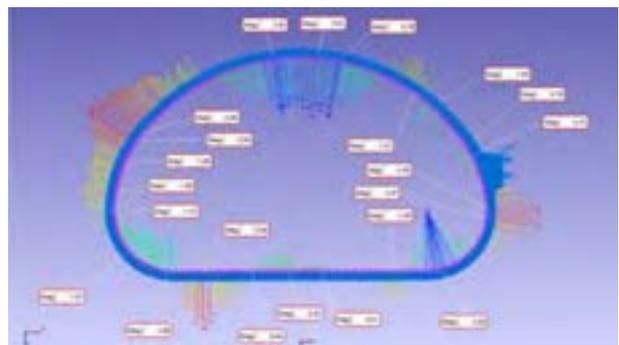
**Tabella 3 Errori di forma della superficie interna**



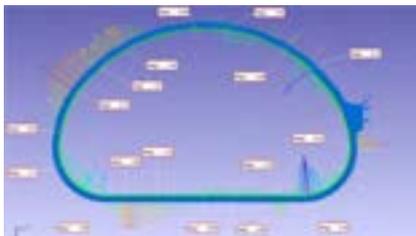
**WP-01**



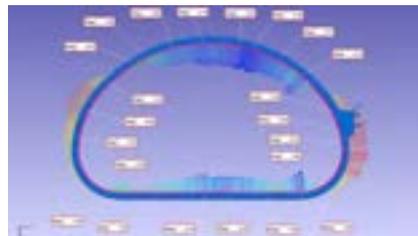
**WP-02**



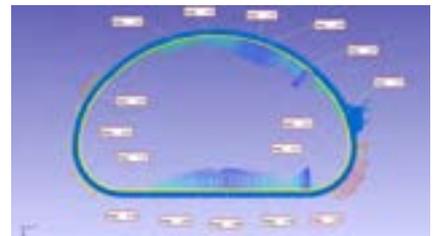
**WP-03**



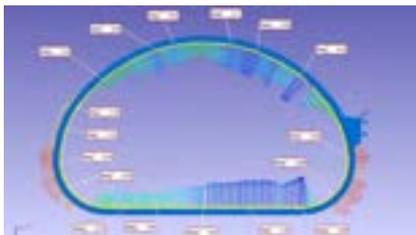
**WP-04**



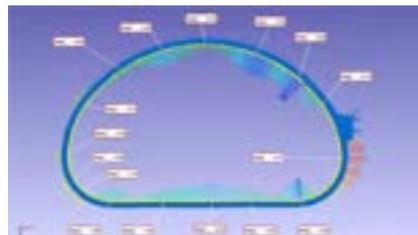
**WP-05**



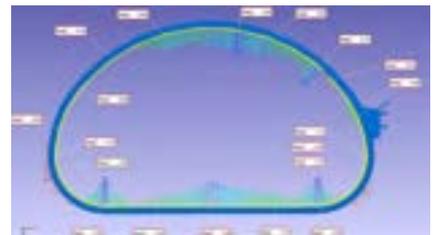
**WP-06**



**WP-07**

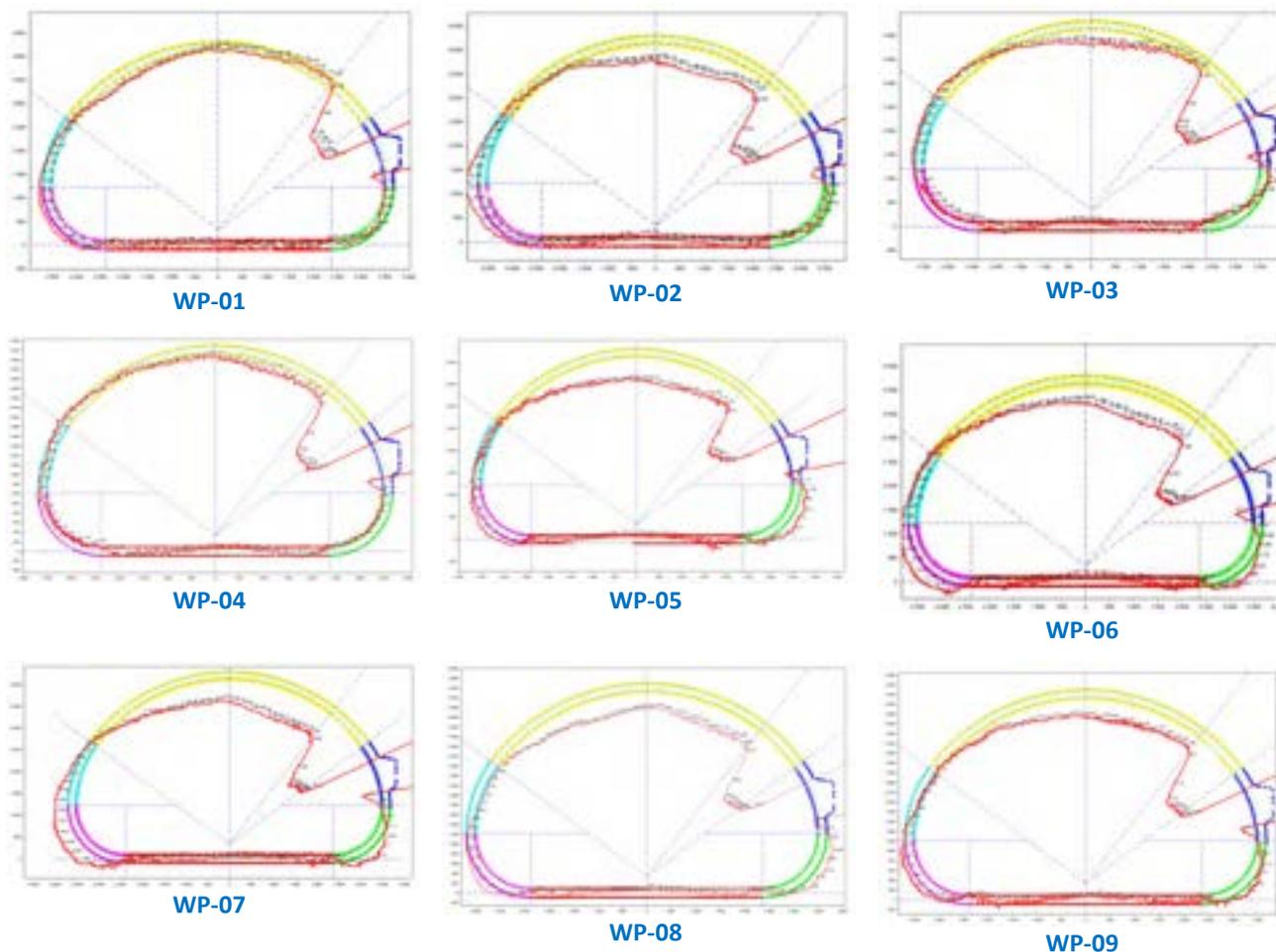


**WP-08**



**WP-09**

Tabella 4 Linea teorica di corrente dei WP



Le successive Figura 9 e Figura 10 mostrano il confronto eseguito sull'altezza e la larghezza dei 9 WP costruiti. E' possibile riconoscere che gli scostamenti sono contenuti all'interno degli intervalli di accettabilità previsti e che gli avvolgimenti presentano un elevato grado di omogeneità. In particolare si distinguono tre regione delimitate dalle linee rosse. La prima regione riguarda le sezioni di misura della gamba dritta dal piano di mezzeria all'inizio del tratto curvo, la seconda regione riporta le sezioni del tratto curvo, la terza regione riporta le sezioni discontinuità che corrisponde al tratto di salto-strato dove le dimensioni dell'avvolgimento sono variabili con continuità e arrivano a 170 mm. La Figura 11e la Figura 12 mostrano invece i valori massimi, minimi e medi dell'altezza e della larghezza delle sezioni trasversali misurate per ogni WP: da queste è possibile riconoscere come il valore medio sia pressoché costante tra i vari WP.

Per verificare la qualità, in termini geometrici, dell'avvolgimento prodotto, nella specifica tecnica è stato definito un calibro passa-non-passa che è mostrato in

Figura 13 e Figura 14. Con riferimento a questo per ogni WP sono state misurate i massimi ingombri verticali ed orizzontali sia interni che esterni.



Le successive Figura 15-Figura 18 mostrano i valori di ingombro massimo misurato per tutti e 9 gli avvolgimenti prodotti. Nelle figure il valore massimo ammissibile coincide con il valore massimo dell'asse verticale.

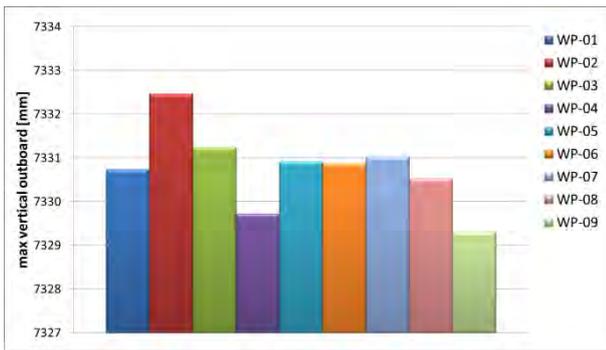


Figura 15 Altezza complessiva WP

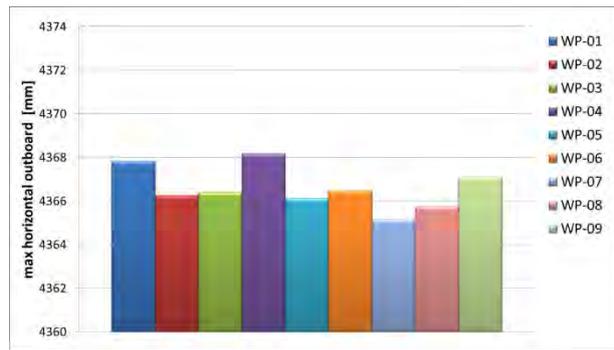


Figura 16 Larghezza complessiva WP

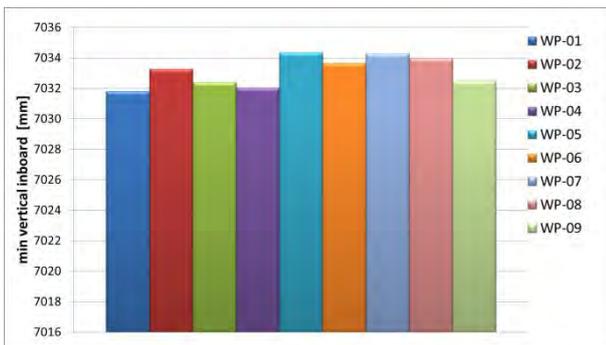


Figura 17 Altezza interna WP

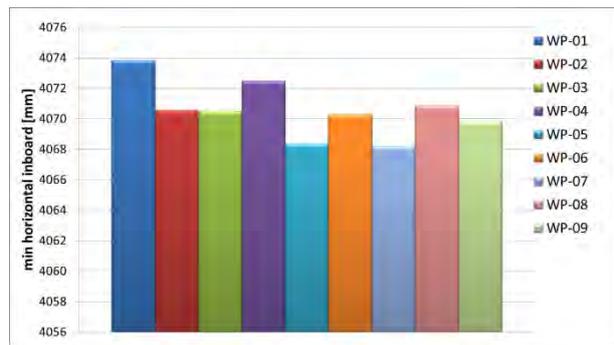


Figura 18 Larghezza interna WP

Completata la verifica delle caratteristiche geometriche degli avvolgimenti la successiva Figura 19 mostra l'andamento della portata di flusso di azoto all'interno degli avvolgimenti dopo il processo di impregnazione in funzione della caduta di pressione applicata esternamente. Anche in questo caso è possibile riconoscere un'elevata omogeneità dei risultati nonostante i cavi superconduttori che costituiscono gli avvolgimenti siano di fabbricazione distinta.

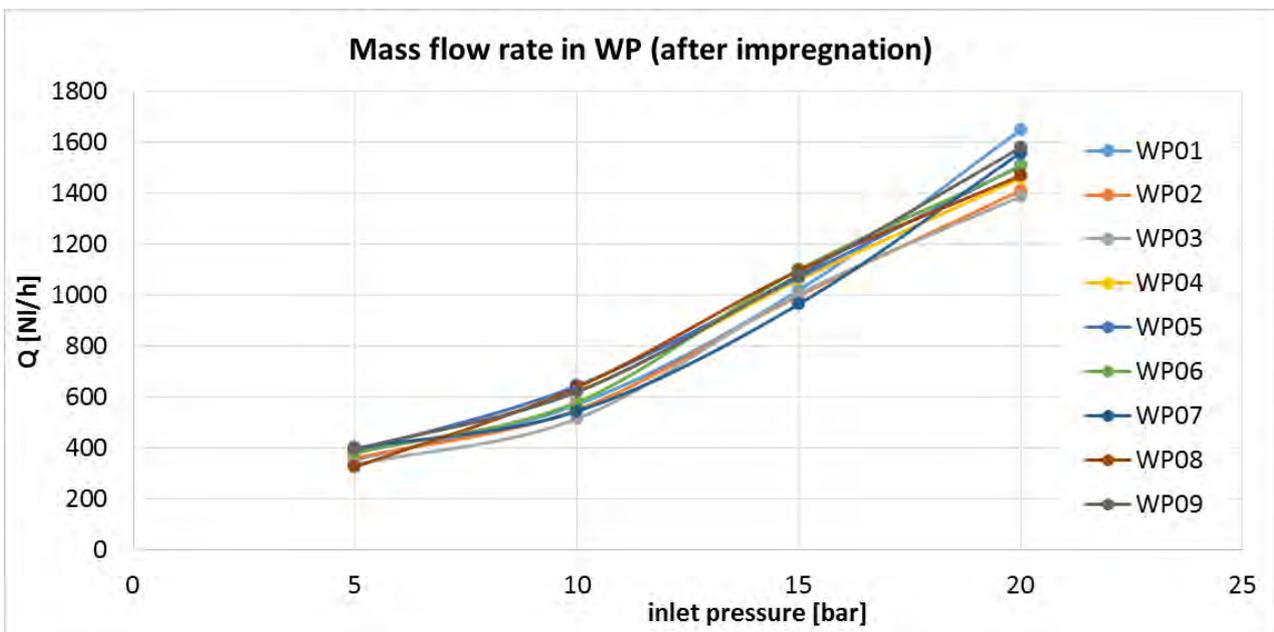


Figura 19 Flusso globale dopo impregnazione

Lo studio sulle prestazioni fluidiche degli avvolgimenti è stato condotto anche sui singoli DP che costituiscono il WP per valutare la necessità di bilanciamento. Tale studio è riportato nelle successive Figura 20 e Figura 21 che mostra in particolare i valori massimi, minimi e medi della portata con 15 bar di pressione in ingresso.

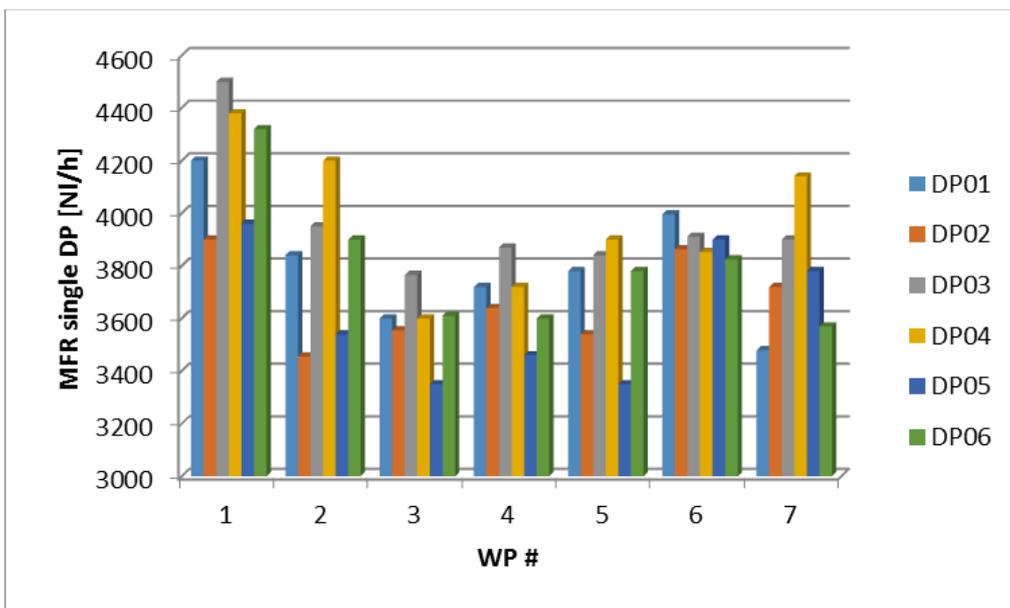


Figura 20 Portata di flusso per singolo DP

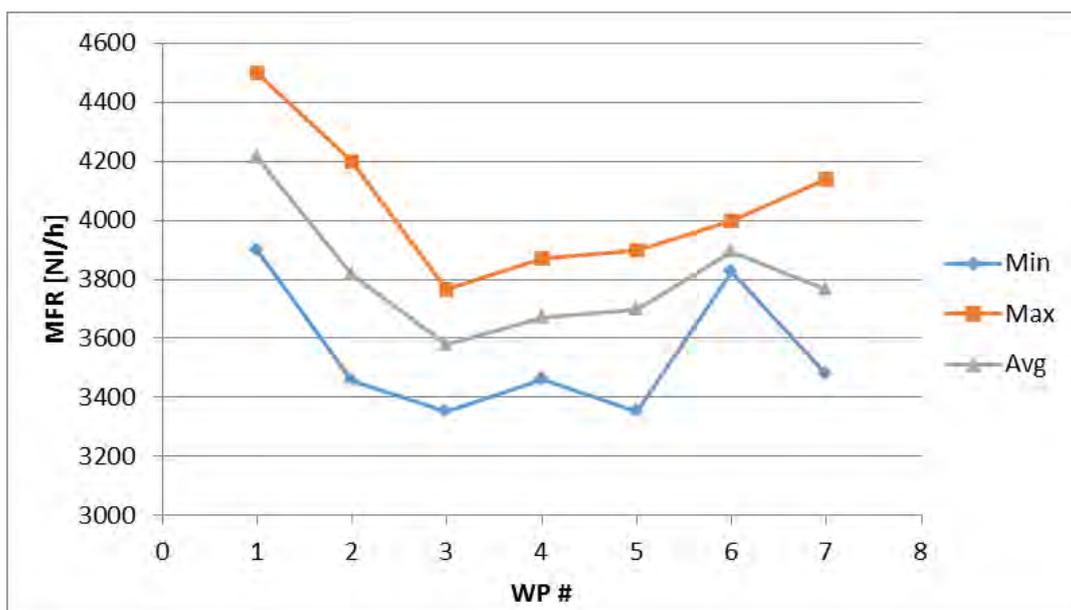


Figura 21 Portata di flusso per DP, massimo, minimo e valore medio

I collaudi finali degli avvolgimenti includono la misura della resistenza e induttanza degli avvolgimenti nonché la verifica della resistenza dell'isolamento elettrico. Quest'ultimo test è stato condotto anche in condizioni di vuoto (Paschen test). I risultati sono stati sempre positivi e non hanno comportato la necessità di alcuna riparazione.

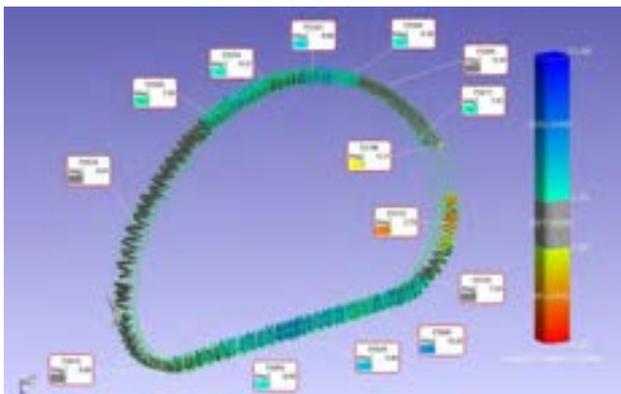
## 2.2 Integrazione finale

Terminati gli avvolgimenti e ricevuta la prima cassa di contenimento, l'attività di produzione è potuta proseguire nella seconda fase che consiste nell'incassamento della bobina all'interno della relativa cassa di contenimento. Questa fase prevede l'esecuzione dei seguenti passaggi:

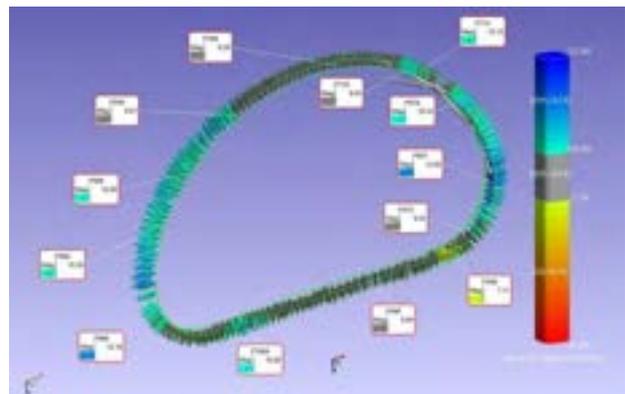
- a. Nastratura con tele di vetro per compensare il gap presente tra WP e cassa
- b. Inserimento nella cassa
- c. Saldatura trasversale di unione del tratto dritto con il tratto curvo
- d. Inserimento dei coperchi di chiusura sul profilo interno
- e. Saldatura dei coperchi
- f. Impregnazione sotto vuoto con resina epossidica
- g. Lavorazione meccanica per recuperare eventuali distorsioni e rimuovere il sovrametallo in eccesso previsto
- h. Montaggio del sistema di adduzione del flusso di Elio nel conduttore
- i. Collaudi finali di accettazione
- j. Imballaggio e spedizione

I punti *a*, *b*, *c*, *d*, *e* del precedente elenco, sono al momento attuale, già stati completati sul primo modulo. E' invece in corso la preparazione del primo modulo per l'impregnazione finale.

E' opportuno segnalare che in attesa di ricevere la prima cassa di contenimento, sono state effettuate diverse analisi numeriche per valutare virtualmente l'accoppiamento tra la cassa e gli avvolgimenti prodotti. A tale riguardo le Figura 22 e Figura 23 mostrano il risultato di questa analisi che ha consentito di modulare opportunamente il quantitativo di tele di vetro da applicare sull'avvolgimento prima del suo effettivo inserimento.



**Figura 22 Analisi del gap tra avvolgimento e cassa sul profilo esterno**



**Figura 23 Analisi del gap tra avvolgimento e cassa sul profilo interno**



**Figura 24 Inserimento del primo avvolgimento nell'attrezzatura di inserimento**



**Figura 25 Inserimento nella prima cassa**

La Figura 24 e la Figura 25 mostrano due fasi preliminari dell'inserimento del primo avvolgimento nella relativa cassa di contenimento mentre la successiva Figura 26 mostra il posizionamento in verticale del modulo in vista della saldatura trasversale con metodo TIG dei componenti della cassa. Tale operazione che interessa uno spessore di circa 50 mm di acciaio austenitico è stata anticipata da un'intensa attività di qualifica sia dei metodi di saldatura che dei successivi metodi di controllo non distruttivo che sono

necessari per assicurare l'assenza di difetti nelle saldature stesse che potrebbero altresì limitare la vita a fatica del modulo.



**Figura 26** Avvio delle operazioni di saldatura trasversale

Come anticipato, le attività di integrazione del primo modulo stanno proseguendo e si prevede il completamento con la spedizione al sito francese di Saclay, dove verrà testata in condizioni criogeniche, entro la fine del 2015. In parallelo le attività di incasso del secondo modulo sono cominciate e verranno concluse nel primo quarto del 2016.

La Figura 27 mostra il primo modulo durante l'esecuzione della saldatura dei coperchi.



**Figura 27 Saldatura coperchi**

La Figura 28 mostra un particolare del cosiddetto *vertical port*, ovvero l'area superiore del modulo da cui fuoriescono i giunti elettrici di collegamento tra i diversi DP che costituiscono il WP.



**Figura 28** Chiusura port verticale giunti elettrici

La Figura 29 mostra il primo modulo completo nella fase di preparazione prima dell'impregnazione finale di *embedding*.



**Figura 29** Preparazione modulo per impregnazione finale

La Figura 30 mostra il secondo WP fasciato con tele di vetro e pronto per essere inserito nella relativa cassa di contenimento mostrata sullo sfondo. E' evidente da queste immagini che l'attività di incasso procede in parallelo nei diversi stadi produttivi elencati.

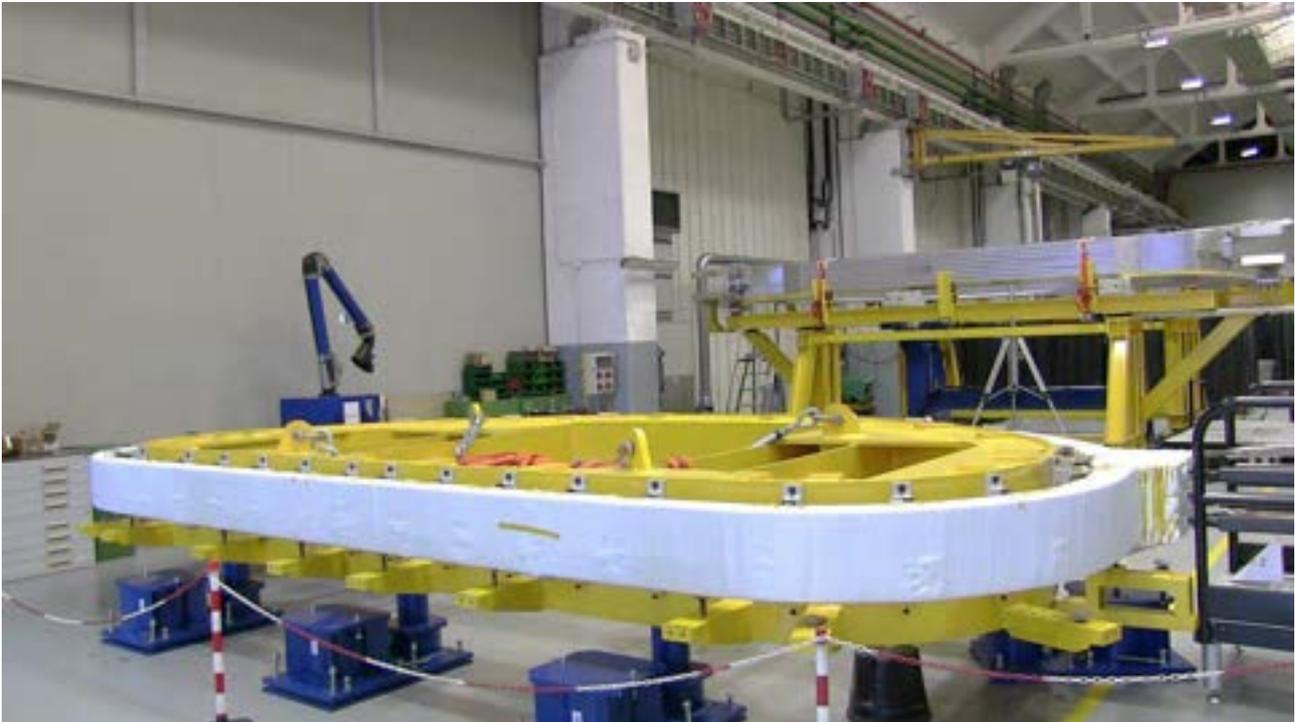


Figura 30 Preparazione inserimento WP02

### 3 Conclusioni

Il completamento di tutti gli avvolgimenti previsti dalla fornitura costituisce un importante traguardo nelle attività contrattuali. In virtù di questo risultato l'attività produttiva può adesso concentrarsi totalmente nella fase finale di incasso. A tal riguardo si prevede che il primo modulo di magneti toroidali sarà completato entro la fine del 2015 e che i successivi saranno spediti al sito di CEA per le prove di accettazione a freddo previste, con una frequenza di un modulo ogni 45 giorni. Si stima infatti che l'attività di integrazione richieda circa sei mesi per poter essere completata dal momento della ricezione della cassa.

### 4 Riferimenti bibliografici

1. Spears, B., "Plant Integration Document"  
[https://users.jt60sa.org/?uid=222UJY&version=v3.8&action=get\\_document](https://users.jt60sa.org/?uid=222UJY&version=v3.8&action=get_document)
2. Polli, G.M., "TFC Integration ENEA / ASG update", proceedings of 23<sup>rd</sup> JT-60SA Technical Coordination Meeting, 29-30 September 2015, Genova, Italy.
3. Shibamura, K., et al., "Assembly study for JT-60SA tokamak" (2013) Fusion Engineering and Design, . Article in Press.
4. Davis, S., et al., "The JT-60SA toroidal field magnet design for assembly", (2012) IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 22 (3), art. no. 6151052, .
5. Barabaschi, P., et al., "JT-60SA scientific programme toward ITER and DEMO", (2011) 38th EPS Conference on Plasma Physics 2011, EPS 2011 - Europhysics Conference Abstracts, 35 1, pp. 177-180.

6. V. Cocilovo, et al., "Qualification Process and Quality Control Planning for JT-60SA Toroidal Field Coils Construction", paper presented at this conference.
7. Decool, P, et al., "JT-60SA TF magnet joints developments and prequalification", (2012) IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 22 (3), art. no. 6069839, .

## 5 Abbreviazioni ed acronimi

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