



## Ricerca di Sistema elettrico

Realizzazione dei componenti ricavati da laminati per la composizione di quindici casse di contenimento e di due gomiti in materiale forgiato

Paolo Rossi, Antonio Cucchiaro

REALIZZAZIONE DEI COMPONENTI RICAVALI DA LAMINATI PER LA COMPOSIZIONE DI QUINDICI CASSE DI CONTENIMENTO E DI DUE GOMITI IN MATERIALE FORGIATO

Paolo Rossi, Antonio Cucchiaro (ENEA)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Produzione di Energia Elettrica e Protezione dell'Ambiente

Progetto: Attività di fisica della Fusione complementari a ITER

Obiettivo: Realizzazione strutture di contenimento bobine toroidali JT-60SA

Responsabile del Progetto: Aldo Pizzuto, ENEA

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI .....	5
2.1 ATTIVITÀ SVOLTE .....	5
2.2 MONITORAGGIO ATTIVITÀ.....	13
2.3 <i>DOCUMENTI PRODOTTI</i> .....	13
2.4 DIFFUSIONE DEI RISULTATI.....	13
3 CONCLUSIONI.....	14
4 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	14

## Sommario

L'ENEA è impegnato nella Costruzione, Collaudo e Spedizione a Naka del Magnete Toroidale della Macchina Tokamak JT-60SA e di parte dei sistemi di alimentazione elettrica. Delle 18 bobine toroidali che costituiscono il magnete, 9 saranno realizzate dall'ENEA e 9 dal CEA Francese.

L'ENEA è responsabile della fornitura in kind di:

- Nove delle 18 bobine di NbTi che costituiscono l'intero magnete;
- Le casse di contenimento per tutte le 18 bobine costituite da componenti in acciaio austenitico;
- Le alimentazioni elettriche per un totale di 8 alimentatori ad alta tensione e corrente con relativi interruttori e trasformatori più quattro sistemi di interruzione della corrente continua. I contratti per la realizzazione delle bobine sono stati affidati rispettivamente da ENEA ad ASG Superconductors e dal CEA ad Alstom, mentre il contratto di fornitura delle casse di contenimento delle 18 bobine è stato affidato alla ditta Walter Tosto.

Il presente documento riporta lo stato delle attività contrattuali relative al contratto per la realizzazione delle casse di contenimento di JT-60SA..

## 1 Introduzione

Europa, Cina, Corea del Sud, India, Giappone, Federazione Russa e Stati Uniti hanno riunito i loro sforzi nel progetto ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) in costruzione a Cadarache in Francia. A margine dei negoziati per decidere il sito di ITER, Europa e Giappone hanno ratificato un accordo di collaborazione denominato "Broader Approach" (BA).

L'accordo, al quale l'Italia ha aderito, consiste in una serie di attività sia di fisica che di tecnologia che prevedono realizzazioni prototipiche di alto contenuto tecnologico e, tra gli altri, la realizzazione di un tokamak denominato JT60-SA, che sarà installato a Naka in Giappone.

Per finanziare l'accordo, Francia, Italia, Spagna, Germania e Belgio hanno offerto dei contributi finanziari per forniture 'in kind'. L'ENEA è impegnato nella costruzione del Magnete Toroidale della Macchina Tokamak JT-60SA e di parte dei sistemi di alimentazione elettrica.

Delle 18 bobine toroidali che costituiscono il magnete, 9 saranno realizzate dall'ENEA e 9 dal CEA Francese.

L'ENEA è responsabile della fornitura in kind di:

- Nove delle 18 bobine di NbTi che costituiscono l'intero magnete;
- Le casse di contenimento per tutte le 18 bobine costituite da componenti in acciaio austenitico;
- Le alimentazioni elettriche per un totale di 8 alimentatori ad alta tensione e corrente con relativi interruttori e trasformatori più quattro sistemi di interruzione della corrente continua.

I contratti per la realizzazione delle bobine sono stati affidati rispettivamente da ENEA ad ASG Superconductors e dal CEA ad Alstom, mentre il contratto di fornitura delle casse di contenimento delle 18 bobine è stato affidato alla ditta Walter Tosto ed è partito il giorno 12/7/2012.

Nel corso del 2012 sono state completate dalla ditta le seguenti attività:

- redazione dei documenti contrattuali;
- ordine del materiale di costruzione delle 18 casse di contenimento;
- progettazione di massima dei componenti delle casse;
- realizzazione dei mock-ups

Nel corso del 2013 sono state eseguite le seguenti attività:

- Progettazione di dettaglio;
- la qualifica dei processi special;
- produzione dei componenti delle prime tre casse di contenimento delle bobine toroidali di JT-60SA.

Nel corso del 2014 sono proseguite le attività di produzione delle casse

In questo documento si riporta lo stato delle attività realizzate nel corso del 2014.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 Attività svolte

Il contratto di fornitura delle casse di contenimento delle 18 bobine è partito il giorno 12/7/2012.

Nel corso del 2012 le azioni principali relative alla documentazione e progettazione sono state l'ordine del materiale di costruzione delle 18 casse di contenimento, la progettazione di massima dei componenti delle casse, la validazione dei processi speciali (Electron Beam Welding EBW, Vibration Stress Relief VSR).

Le azioni invece relative alla produzione sono state la progettazione esecutiva e la successiva costruzione dei mock-ups rappresentativi dei componenti delle casse, la fornitura dei mock-ups, l'approvvigionamento dei materiali per la realizzazione di tutte le 18 casse (lamiera, forgiati, tubi, etc).

I mock-ups rappresentativi delle sezioni principali delle casse di contenimento di JT-60SA sono stati realizzati dalla ditta Walter Tosto in conformità alle specifiche tecniche contrattuali. I mock-ups sono stati consegnati ed accettati da ENEA e successivamente dalle ditte ASG Superconductors ed ALSTOM.

Nel corso dell'anno 2013 la progettazione di dettaglio delle casse, sia del tipo ASG che del tipo ALSTOM, è stata completata con due pacchetti distinti di documentazione, uno per ASG e uno per ALSTOM, completi di modelli CATIA 3D, disegni costruttivi 2D e welding maps.

I documenti di progettazione della Walter Tosto sono stati presentati ed approvati da ENEA in occasione di due meeting in giugno ed agosto 2013 in cui erano presenti ENEA, F4E, CEA, e separatamente ASG Superconductors (giugno 2013) ed ALSTOM (agosto 2013).

Nell'ambito del PAR 2012 sono iniziate quindi le attività di costruzione delle casse e sono stati completati i primi 3 set di componenti meccanici per la composizione della cassa che comprendono anche i gomiti realizzati in materiale forgiato.

Ciascuna cassa a forma di D è composta da un numero limitato di componenti per minimizzare le saldature necessarie alla chiusura finale dell'avvolgimento della bobina all'interno della cassa di contenimento.

La cassa è costituita principalmente da una gamba dritta, una gamba curva e dei coperchi per il contenimento della bobina.

La gamba curva è composta da due ali ed un'anima centrale con una curvatura a forma di "D". Ulteriori supporti sono saldati con processo TIG o ad elettrodo.

La gamba dritta è composta da un tratto dritto e due curve saldate alle estremità denominate "gomiti"; al suo interno è installato il tubo di raffreddamento chiamato "Cooling Channel".

Le curve della gamba dritta sono realizzate attraverso la lavorazione di un blocco forgiato dal quale si ricavano 2 semicurve che poi vengono saldate entrambe ad un'anima centrale composta da lamiera per formare il "gomito".

Le saldature principali delle ali all'anima sono in EBW (Electron Beam Welding) mentre la gamba dritta viene saldata alle curve per mezzo di una saldatura NGTIG (Tig Narrow Gap).

Dopo le lavorazioni dei componenti descritti sopra, è emerso che il materiale forgiato, e già acquistato dalla WTO, ancorché rispondente alle specifiche di acquisto preparate da F4E, ha evidenziato un comportamento fragile a bassa temperatura, non compatibile con il suo utilizzo alla temperatura operativa della macchina.

Una approfondita attività di indagine è stata condotta sul materiale da ENEA con il laboratorio specializzato in prove meccaniche e metallografiche RTM BREDA.

L'integrità strutturale delle casse di contenimento della bobina toroidale è essenziale per il corretto funzionamento del Tokamak JT-60SA, pertanto "Fusion for Energy" (F4E) si è impegnata a fornire, a sue spese nuovo materiale forgiato, con consegne mensili a partire dal 16 Maggio 2014 e completando la fornitura entro la fine del 2015.

In attesa della fornitura di F4E del nuovo materiale forgiato, le attività realizzative della WTO sono state modificate prevedendo il completamento dei componenti ricavati da laminati necessari alla composizione di 15 casse e due gomiti nel nuovo materiale forgiato. In particolare i componenti realizzati sono di seguito elencati:

- Componenti ricavati da laminati per la composizione di 15 gambe dritte;
- Componenti ricavati da laminati per la composizione di 3 gambe curve;
- 12 set di componenti per la composizione di ali e basi delle gambe curve;
- Due gomiti realizzati con il nuovo materiale forgiato.

Nell'ambito del PAR 2013 le attività costruttive in WTO hanno recepito il nuovo piano di fornitura basato sul programma di consegna del nuovo materiale forgiato e su richiesta di F4E ENEA e Walter Tosto hanno invertito l'ordine di consegna delle prime due casse.

Di seguito sono mostrate le immagini dei componenti realizzati.

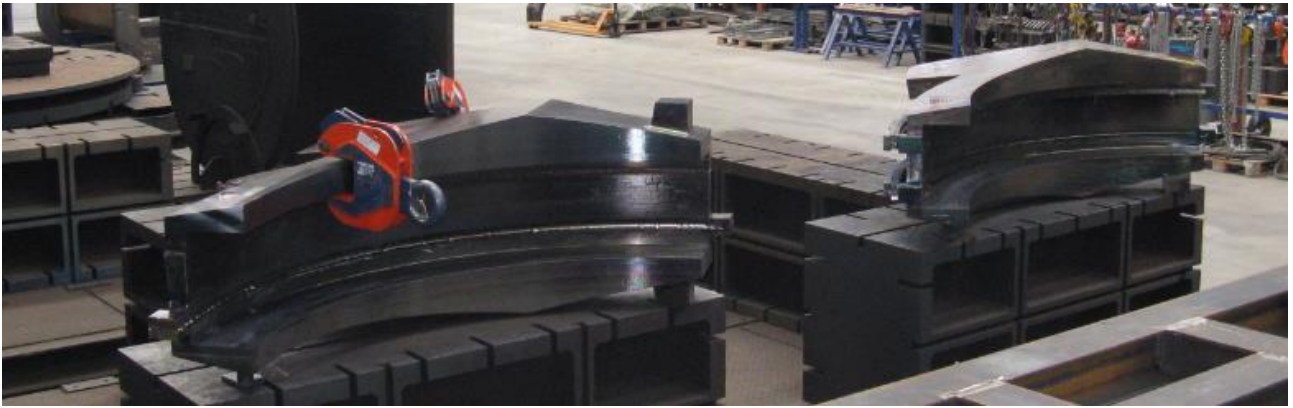


Figura 1: Gomiti della gamba dritta in materiale forgiato.



Figura 2: Tratti dritti delle gambe dritte



Figura 3: Cianfrini del tratto dritto della gamba dritta.



Figura 4: Attrezzature per la composizione della gamba dritta



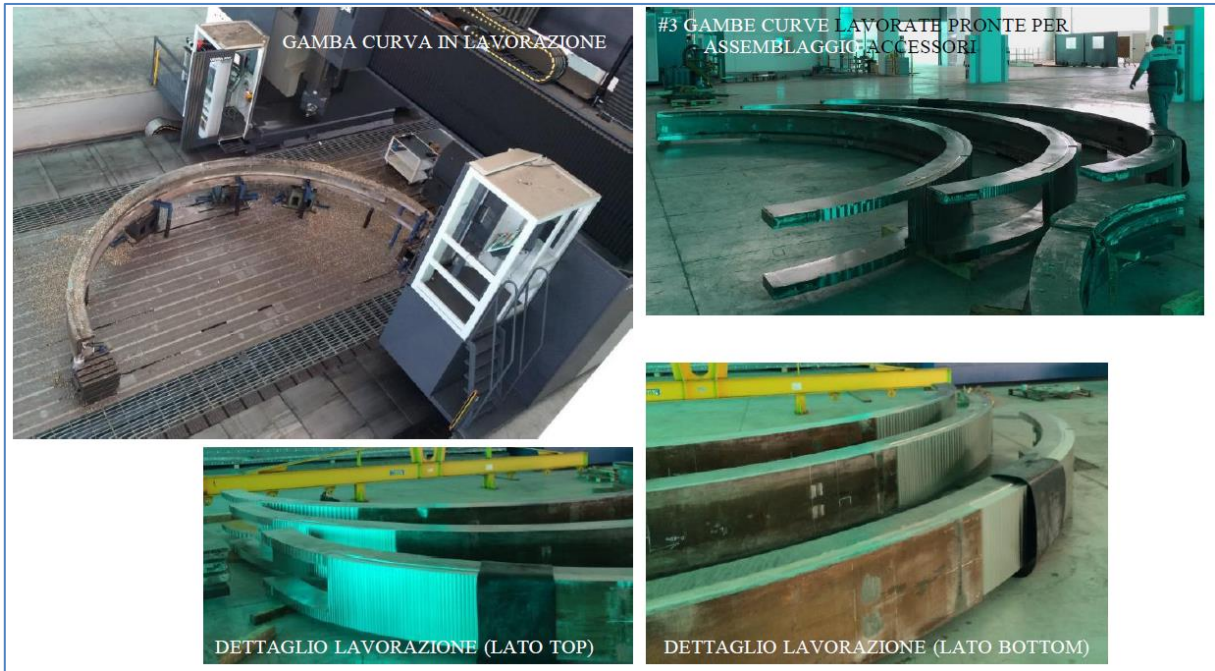


Figura 5: Lavorazione gambe curve

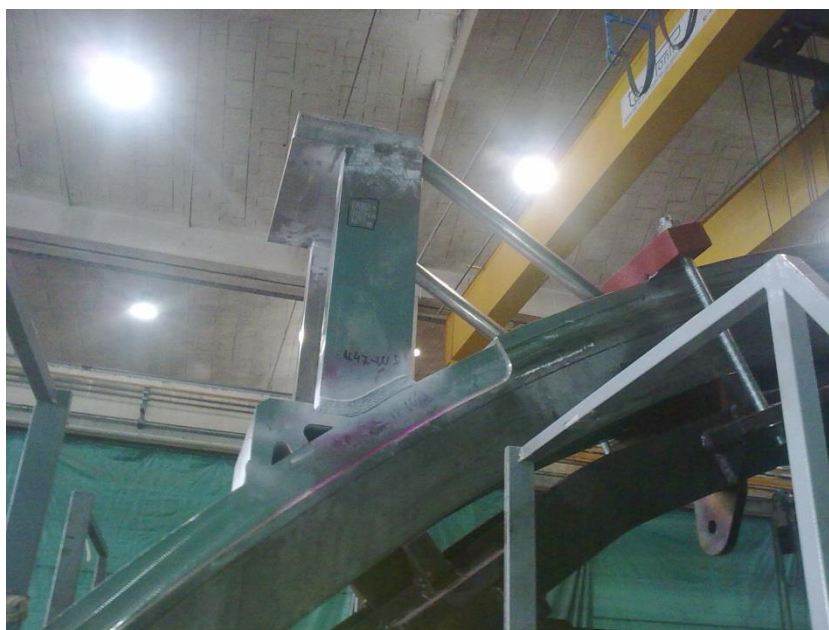


Figura 6: Gamba curva in fase di saldatura degli accessori esterni

**Figura 7: Vertical port saldato sulla gamba curva**



**Figura 8: Supporto saldato sulla gamba curva**



**Figura 9: Supporto saldato sulla gamba curva.**



Figura 10: gamba curva completa.



Figura 11: Accessori della gamba curva



Figura 12: Ali e basi delle gambe curve



Figura 13: Componenti delle ali e basi delle gambe curve

I disegni e i modelli sono stati revisionati al fine di accogliere particolarità costruttive adottate dalla cassa Alstom ed ASG. In particolare sono stati modificati i disegni dei coperchi dei vertical port sia per ASG che per ALSTO. ASG ha richiesto l'esecuzione di una serie aggiuntiva di fori filettati, mentre ALSTOM, che ha invece scelto di saldare direttamente tale coperchio al vertical port ha richiesto di eliminare completamente la foratura sul coperchio stesso. ALSTOM ha inoltre richiesto l'esecuzione di una lavorazione aggiuntiva sul cianfrino di saldatura traversa tra la gamba curva e la gamba dritta e la lavorazione di fori aggiuntivi sulle casse per l'inserimento di resina.

Le operazioni meccaniche hanno impegnato la ditta nella gestione di importanti saldature con l'adozione di alcune misure precauzionali per poter controllare le possibili distorsioni sin dalle prime fasi di saldatura. Attrezzature di contenimento, dotate di opportuni rinforzi meccanici per mantenere la posizione dei componenti durante le operazioni di saldatura, sono state studiate in considerazione della singolarità dei componenti del Tokamak JT-60SA. Durante le operazioni di saldatura è stata attentamente monitorata la temperatura tra passate successive al fine di mantenere la temperatura del pezzo sempre all'interno di limiti consentiti. Controlli dimensionali laser-traker intermedi hanno consentito il controllo continuo delle deformazioni ed il rispetto delle tolleranze del manufatto. Nell'ambito del PAR 2013, sono state eseguite molte saldature con processo TIG (GTAW) e EBW (Electron Beam Welding). In particolare sono stati saldati con successo circa 40 metri complessivi in TIG e quasi 200 metri in EBW.

La WTO ha validato il processo di distensione per vibrazione su alcuni pezzi meccanici singoli per ottenere il rilassamento dei componenti prima di lavorazioni meccaniche con grande asportazione di materiale. Inoltre sono state emesse in forma draft le procedure per il controllo dimensionale dei componenti meccanici in costruzione e per le operazioni di carico, trasporto e scarico della fornitura.

Si riporta di seguito uno schema riepilogativo dello stato delle attività.

**Tabella 1: Stato delle attività di produzione delle casse**

COIL CASING	STRAIGHT LEG				CURVED LEG				ELBOWS			CAS		
	CUT	FIT UP	EB WELD	COVERS	CUT/ROLL	TIG WELD	EB WELD	COVERS	CUT	FIT UP	EB WELD			
1° COIL CASING COIL CASING SET- CS1 (ASG)	done	done	done	done	done	done	done	done	done	done	done	2014		
2° COIL CASING COIL CASING SET- CS10 (ALSTOM)	done	done	done	done	done	done	done	done	done	done	done	2014		
3° COIL CASING COIL CASING SET- CS11 (ALSTOM)	done	done	done	done	done	done	done	done	done	2014	2014	2015	2015	
4° COIL CASING COIL CASING SET- CS2 (ASG)	done	done	done	done	done	done	done	done	done	2015			2015	
5° COIL CASING COIL CASING SET- CS12 (ALSTOM)	done	done	done	done	done	done	done	done	done				2015	
6° COIL CASING COIL CASING SET- CS3 (ASG)	done	done	done	done	done	done	done	done	done				2015	
7° COIL CASING COIL CASING SET- CS13 (ALSTOM)	done	done	done	done	done	done	done	done	done				2015	
8° COIL CASING COIL CASING SET- CS4 (ASG)	done	done	done	done	done	done	done	done	done				2015	
9° COIL CASING COIL CASING SET- CS14 (ALSTOM)	done	done	done	done	done	done	2015	done	done	2016			2016	
10° COIL CASING COIL CASING SET- CS15 (ALSTOM)	done	done	done	done	done	done		done	done				done	2016
11° COIL CASING COIL CASING SET- CS5 (ASG)	done	done	done	done	done	done		done	done				done	2016
12° COIL CASING COIL CASING SET- CS16 (ALSTOM)	done	done	done	done	done	done		done	done				done	2016
13° COIL CASING COIL CASING SET- CS6 (ASG)	done	done	done	done	done	done		done	done				done	2016
14° COIL CASING COIL CASING SET- CS17 (ALSTOM)	done	done	done	done	done	done	2014	done	done	2017			2016	
15° COIL CASING COIL CASING SET- CS18 (ASG)	done	done	done	done	done	done		done	done				done	2017
16° COIL CASING COIL CASING SET- CS7 (ALSTOM)	done	done	done	done	done	done		done	done				done	2017
17° COIL CASING COIL CASING SET- CS8 (ALSTOM)	done	done	done	done	done	done		done	done				done	2017
18° COIL CASING COIL CASING SET- CS9 (ASG)	done	done	done	done	done	done		done	done				done	2017

## 2.2 Monitoraggio attività

ENEA ha monitorato le attività della ditta Walter Tosto con contatti settimanali per telefono o in videoconferenza. ENEA ha inoltre organizzato incontri con frequenza mensil, la maggior parte dei quali presso gli stabilimenti di produzione della ditta.

In particolare si sono tenuti i seguenti Progress Meeting:

- Progress meeting n° 8, presso Società delle Fucine, Terni, il 20/12/2013;
- Progress meeting n° 9, presso Walter Tosto, Chieti, il 21/02/2014;
- Progress meeting n° 10, presso Walter Tosto, Chieti, il 2/4/2014;
- Progress meeting n° 11, presso Walter Tosto, Chieti, il 16/7/2014;
- Progress meeting n° 12, presso Walter Tosto, Chieti, il 7/8/2014;
- Progress meeting n° 13, presso Walter Tosto, Chieti, il 16/9/2014;

A chiusura dei progress meeting WT ha prodotto le minute degli incontri.

## 2.3 Documenti prodotti

Si riporta di seguito l'elenco dei documenti prodotti da ENEA:

- ( 1 ) Deviation notice n.2 ( doc. DN-JT60CC-02 )
- ( 2 ) Deviation notice n.3 ( doc. DN-JT60CC-02 )

Si riporta di seguito un elenco dei documenti prodotti dalla ditta:

- ( 3 ) Detail Design ASG Casing type, (3D model 3D-12110.01 Rev agosto2014)
- ( 4 ) Detail Design ALSTOM Casing type, (3D model 3D-12110.02 Rev agosto2014 )
- ( 5 ) Detail Design ASG Casing type, (drawings DWG-12110.01 Rev agosto2014 )
- ( 6 ) Detail Design ALSTOM Casing type, (drawings DWG-12110.02 Rev agosto2014 )
- ( 7 ) Validation of Vibration for Stress Relief (VSR) treatment ( doc. VVSR-12110);

Tutti i documenti sono conservati nell'archivio interno ENEA delle attività relative a JT-60SA ([https://www.afs.enea.it/project/archivio\\_jt60sa/](https://www.afs.enea.it/project/archivio_jt60sa/)):

## 2.4 Diffusione dei risultati

La diffusione dei risultati delle attività è stata effettuata con frequenza settimanale presso le altre associazioni europee (F4E, CEA) impegnate nel progetto JT-60SA attraverso la presentazione di resoconti dettagliati delle attività in corso.

La presentazione delle attività è stata effettuata in ambito internazionale nei Technical Coordination Meeting (TCM), incontri tra tutti i partecipanti al progetto JT-60SA, tra cui le associazioni giapponesi (JAEA) ed europee. In particolare nel periodo di riferimento i TCM si sono tenuti:

- Garching, Germania, 26-27 Febbraio 2014
- Naka, Giappone 4-5 Giugno 2014

Nel corso del 2014 sono stati pubblicati i seguenti articoli:

- “Technical aspects and manufacturing methods for JT-60SA TF coil casings” sulla rivista Fusion Engineering and Design, Edizioni Elsevier, presentato al 11th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT), Barcellona, Spagna, 16-20 September 2013
- “Manufacturing of the First Toroidal Field Coil for the JT-60SA Magnet System”, e
- “Qualification process and quality control planning for JT-60-SA toroidal field coils” entrambi pubblicati in Proceedings del 25th Symposium on Fusion Engineering SOFE, San Francisco, USA, June 10-14 2013

Inoltre la ditta Walter Tosto ha partecipato al Monaco ITER International Fusion Energy Days (MIIFED 2013), Dec 2-4 2013, con un poster dal titolo “ JT-60SA TF coil casings: technical solutions and manufacturing strategy”.

Lo stato delle attività relativo alla realizzazione delle casse di contenimento dei magneti toroidali è stato presentato con due presentazioni in occasione dei due seguenti seminari dedicati alla ingegneria e costruzione della macchina tokamak JT-60SA e tenuti presso il CR ENEA di Frascati:

- “Progressi nell’ingegneria e costruzione della macchina Tokamak JT-60SA”  
Antonio Cucchiaro, Gian Mario Polli, Paolo Rossi, Alessandro Lampasi, Pietro Zito  
ENEA, Frascati, 12 dicembre 2013, 9.30-12.00, Aula Angelo Marino
- Avanzamenti nell’ingegneria e costruzione della macchina Tokamak JT-60SA  
Antonio Cucchiaro, Gian Mario Polli, Paolo Rossi, Alessandro Lampasi, Pietro Zito  
ENEA, Frascati Lunedì, 30 giugno, 2014, ore 9.30 – 12.00, Aula Angelo Marino

### 3 Conclusioni

Dopo le lavorazioni curve della gamba dritta, è emerso che il materiale forgiato, e già acquistato dalla WTO, ancorché rispondente alle specifiche di acquisto preparate da F4E, ha evidenziato un comportamento fragile a bassa temperatura, non compatibile con il suo utilizzo alla temperatura operativa della macchina.

“Fusion for Energy” (F4E) si è impegnata a fornire, a sue spese, nuovo materiale forgiato, con consegne mensili a partire dal 16 Maggio 2014 e completando la fornitura entro la fine del 2015.

Nell’ambito del PAR 2013 le attività costruttive in WTO hanno recepito il nuovo piano di fornitura basato sul programma di consegna del nuovo materiale forgiato e quindi il piano di realizzazione delle casse è stato modificato massimizzando la produzione di componenti in lamiera prevedendo il completamento dei componenti ricavati da laminati necessari alla composizione di 15 casse e due gomiti nel nuovo materiale forgiato.

La produzione ha rispettato il programma e si prevede il completamento delle prime due casse intorno alla fine del 2014

### 4 Abbreviazioni ed acronimi

BA Broader Approach

F4E Fusion for Energy

WT Walter Tosto

TF Toroidal Field