



Ricerca di Sistema elettrico

Avanzamenti nella produzione dei componenti per la composizione delle casse di contenimento dei moduli del magnete toroidale di JT-60SA

Paolo Rossi, Antonio Cucchiario

Avanzamenti nella produzione dei componenti per la composizione delle casse di contenimento dei moduli del magnete toroidale di JT-60SA

Paolo Rossi, Antonio Cucchiaro

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: *A2 Realizzazione strutture di contenimento bobine toroidali JT-60SA*

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 ATTIVITÀ SVOLTE.....	5
2.2 MONITORAGGIO ATTIVITÀ.....	13
2.3 DOCUMENTI PRODOTTI.....	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 inoltre responsabile della fornitura in kind di:

- 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 d'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, poi divenuta GE (General Electric), 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, poi divenuta GE (General Electric) 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 attività di progettazione di massima dei componenti delle casse, realizzazione dei mock-ups rappresentativi dei componenti principali delle casse e l'ordine del materiale di costruzione delle 18 casse di contenimento.

Nel corso del 2013 sono state completate le attività di progettazione di dettaglio e la qualifica dei processi speciali. Durante le lavorazioni meccaniche iniziali è emerso che il materiale forgiato, ancorché rispondente alle specifiche di acquisto preparate da Fusion for Energy (F4E), ha evidenziato un comportamento fragile a bassa temperatura, non compatibile con il suo utilizzo alla temperatura operativa della macchina.

F4E ha fornito un nuovo materiale forgiato a partire dal 16 Maggio 2014 e di conseguenza WTO ha rimodulato le attività costruttive basandosi sul programma di consegna del nuovo materiale forgiato e massimizzando nel corso del 2014 la produzione di componenti in lamiera.

Le prime casse complete di tutti i componenti sono state realizzate e consegnate a partire da marzo del 2015. La produzione ha quindi rispettato il programma di realizzazione di 6 casse entro settembre 2015 e la settimana entro la fine del 2015.

In questo documento si riporta lo stato delle attività realizzate nel corso del 2016.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Attività svolte

Obiettivo del subtask a.2 nell'ambito del PAR 2015 era la realizzazione di 8 strutture di contenimento delle bobine toroidali di JT-60SA (chiamate casse o casing), 4 delle quali destinate ad ASG Superconductors (Genova, Italia) e le altre 4 destinate a General Electric (Belfort, Francia) che insieme alle prime 6 prodotte nel corso del precedente PAR 2014 fanno un totale di 14 casse di contenimento delle bobine toroidali di JT-60SA, delle diciotto previste complessivamente.

Ciascuna cassa di contenimento della bobina ha una forma di D ed è costituita principalmente da una gamba dritta, una gamba curva e da tre coperchi ([Figura 1](#)).

La gamba curva è composta da una lunga curva con sezione a forma di "C" all'interno della quale sarà alloggiata la bobina e all'esterno della quale sono saldati i supporti per le bobine poloidali, i blocchi di supporto gravitazionali e un port per le terminazioni elettriche della bobina.

La gamba dritta è composta di una parte dritta a sezione trapezoidale e due gomiti saldati alle estremità all'interno dei quali sarà alloggiata la bobina.

I componenti della cassa sono ottenuti dalla lavorazione di blocchi forgiati e laminati di vario spessore e lunghezza. In particolare i blocchi forgiati sono usati nella composizione dei gomiti della gamba dritta e nella composizione dei supporti esterni alla gamba curva. Le lamiere sono usate per realizzare tutti gli altri componenti e in particolare per la composizione delle basi e delle ali e della gamba curva e della parte dritta della gamba dritta. Anche i coperchi sono realizzati con lamiere tagliate, piegate e opportunamente saldate e cianfrinate.

Il ciclo completo di produzione è schematizzato in [Figura 2](#), dove, oltre quanto già descritto sono anche rappresentate le successive fasi di lavorazioni meccaniche di sgrossatura, finitura cianfrinatura ed i controlli di accettazione come i controlli non distruttivi sulle saldature, i controlli dimensionali, il leak test, il pressure test ed i controlli di rugosità superficiali.

Nell'ambito del PAR 2013 erano stati completati i componenti ricavati da laminati necessari alla composizione di 15 casse e due gomiti con materiale forgiato.

Nell'ambito del PAR 2014 sono state realizzate le prime 6 casse complete, tre per ASG e tre per GE con la consegna della prima per GE a partire da marzo 2014. La seconda cassa e terza cassa sono state completate e consegnate ad ASG in maggio e luglio 2015; la quarta cassa a GE in Agosto e infine la quinta e la sesta entrambe in settembre 2015 rispettivamente ad ASG e GE.

Chiaramente l'esperienza acquisita dopo la realizzazione delle prime due casse ha permesso di integrare alcune modifiche e di procedere con maggiore confidenza nella produzione ottimizzando il piano di produzione.

La settima cassa è stata completata e consegnata ad ASG in dicembre 2015. Quindi in totale nel corso del 2015 sono state prodotte 7 casse, 4 consegnate ad ASG e 3 consegnate a GE.

La produzione è proseguita fluidamente nel 2016; entro settembre sono state consegnate altre 7 casse, per un totale di 14 casse completate: 7 consegnate ad ASG e altre 7 consegnate a GE.

Tutte le casse completate e consegnate sono state utilmente poste in lavorazione da ASG e GE che hanno proceduto agevolmente con l'assemblaggio e saldatura dei componenti. Alcune bobine sono state completate e consegnate in Giappone presso il sito di costruzione di JT-60SA.

Per ottimizzare il ciclo di produzione sono utilizzate più macchine in parallelo su diversi componenti. La gamba curva viene per esempio lavorata esternamente su una macchina ([Figura 4](#)) prima della saldatura dei supporti esterni ([Figura 4](#)) per poi essere lavorata per step successivi fino all'ottenimento della geometria finale e poi cianfrinata ([Figura 4](#)).

Alcuni accorgimenti sono stati adottati nella produzione della gamba dritta al fine di perfezionare la geometria del canale interno. Dopo la saldatura traversa ([Figura 4](#)) della parte dritta ([Figura 4](#)) con i due gomiti realizzati dal materiale forgiato ([Figura 6](#)) la gamba viene poi lavorata fino all'ottenimento della geometria finale rimuovendo il sovrametallo per poi procedere alla saldatura del tubicino di raffreddamento e successiva lavorazione dei cianfrini di saldatura. Un minimo sovrametallo viene lasciato sul fondo della gamba per recuperare eventuali piccole deformazioni dovute alla saldatura dei tubi che potrebbero alterare la planarità richiesta.

Le cover sono ottenute per taglio da lamiera e successiva calandratura; sono poi assemblate su attrezzature dedicate per la lavorazione meccanica dei cianfrini (Figura 6). Le principali dimensioni e geometrie delle cover realizzate sono risultate in tolleranza; alcune non conformità minori sono state risolte con l'intervento della ditta e la collaborazione degli utenti finali (ASG e ALSTOM). Dopo il completamento delle prime casse, alcune modiche sono state introdotte sui cianfrini delle cover per ottenere un accoppiamento più preciso con i cianfrini delle gambe ed evitare non conformità. Completano la fornitura anche 4 piastre di chiusura della gamba curva (Figura 6).

Al termine della lavorazione meccanica di finitura finale sono stati introdotti controlli supplementari non richiesti dal codice: un controllo completo con liquidi penetranti al termine della lavorazione meccanica di finitura finale, al fine di individuare e rifinire anche il più piccolo difetto superficiale sui componenti (Figura 5) e un ulteriore controllo di tutte le saldature con ultrasuoni.

Inoltre sono state perfezionate le procedure per il controllo dimensionale, basato su Laser-tracker e software dedicato (Spatial Analyzer) sia durante gli step di lavorazione intermedi dei componenti meccanici sia per i controlli di accettazione finali (Figura 5). In particolare, al fine di accelerare le operazioni di collaudo dimensionale finale e di procedere prontamente con il packaging e spedizione dei componenti, le operazioni di misura finali sono effettuate da due operatori per mezzo di due laser tracker, uno rivolto verso l'esterno dei componenti e l'altro verso l'interno, permettendo così una scansione completa dei componenti in tempi ridotti (Figura 5), anche utilizzando particolari tool di misura (Figura 5).

L'acquisizione e gestione dei dati è operata per mezzo del software di misura Spatial Analyzer che permette di allineare e confrontare i punti di misura rispetto al modello CAD di riferimento dei componenti e di riportare efficacemente le deviazioni delle misure su specifici grafici (3).

Le principali dimensioni delle gambe dritte e gambe curve, come la geometria delle superfici interne delle gambe e la geometria di tutti i cianfrini e delle interfacce, sono risultate in tolleranza:

Le non conformità di tipo dimensionale e geometrico riscontrate e documentate, spesso relative a sovrametallo dei supporti esterni da rimuovere comunque in fase di lavorazione finale, non hanno in nessun caso avuto impatto sull'utilizzo dei componenti e sono pertanto state valutate come *non conformità minori*.

I pressure test (elio a 2.5 MPa per 1h) ed i leak test (leak rate a 2.5 MPa, limite di accettazione 10^{-8} Pa·m³/s) eseguiti alla presenza di una Terza Parte per la verifica della tenuta del tubicino per il raffreddamento, sono risultati tutti soddisfacenti così come i controlli di rugosità.

In Figura 14 è riportato lo stato delle attività relativo al termine del PAR 2015.

Nel corso del 2016 è stata richiesta da F4E la produzione di due bobine toroidali aggiuntive (spare) denominate 19° bobina (di produzione ASG) e 20° bobina (di produzione GE). La richiesta è stata concordata con ENEA e ovviamente si estende alla produzione di 2 casse aggiuntive a carico della ditta Walter Tosto. Tale supplemento di produzione seguirà senza soluzione di continuità la produzione delle prime 18 casse perché parte dei materiali di costruzione sono già disponibili e perché le fasi di approvvigionamento dei materiali rimanenti dovrebbero completarsi entro la fine del 2016. La produzione dei componenti base è in fase di preparazione e quindi il completamento e la consegna delle due casse aggiuntive seguiranno le prime 18 entro il primo semestre del 2017.

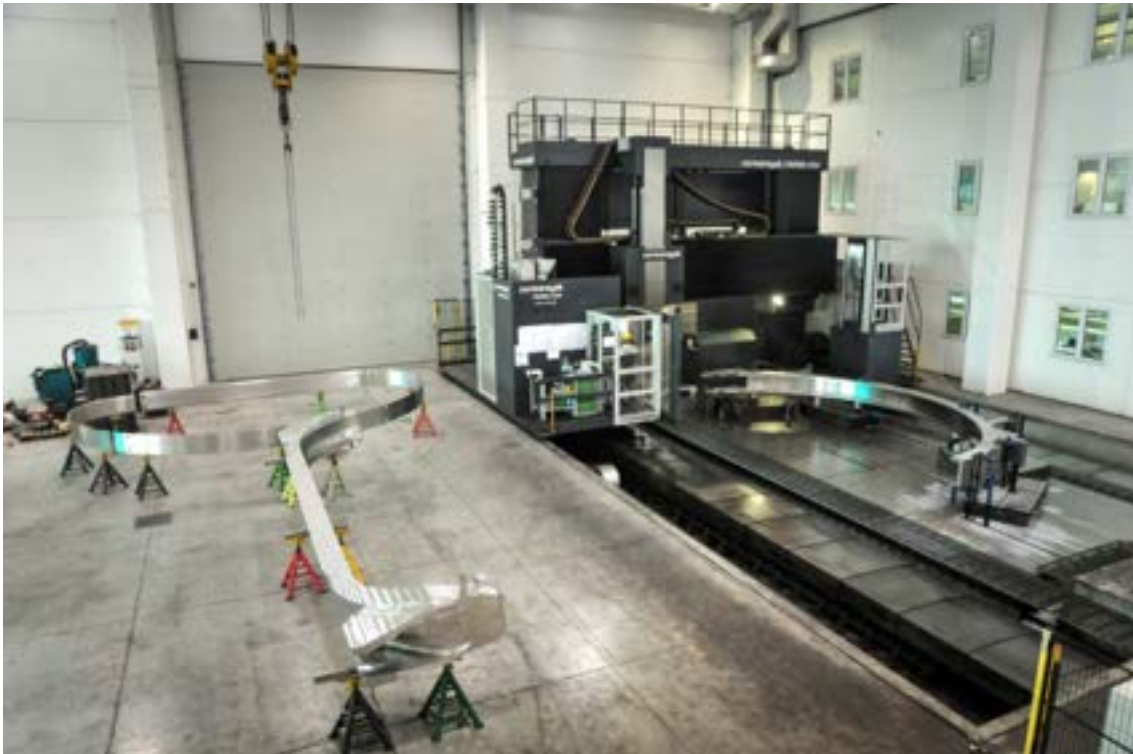


Figura 1: Componenti di una cassa di contenimento delle bobine toroidali di JT-60SA nelle officine della ditta Walter Tosto a Chieti.

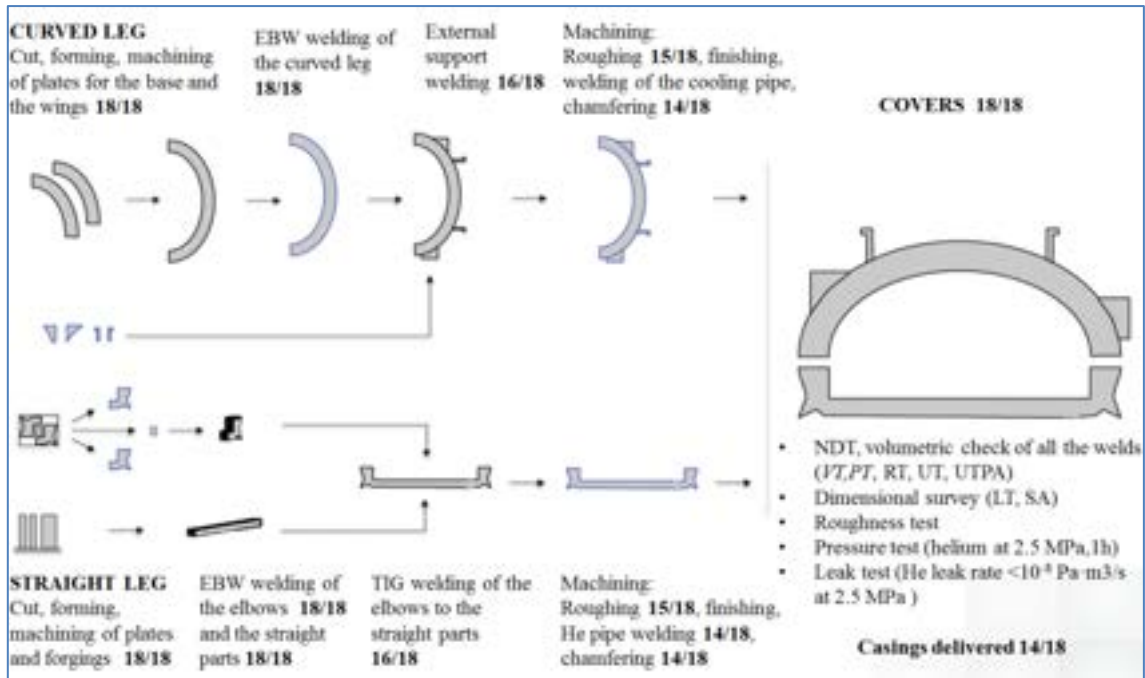


Figura 2: Ciclo di produzione delle casse di contenimento delle bobine toroidali di JT-60SA.



Figura 3: Lavorazioni di macchina sulla parte esterna della gamba curva nello stabilimento della ditta Walter Tosto a Ortona.



Figura 4: Saldatura dei supporti esterni alla gamba curva.



Figura 5: Parte dritta della gamba dritta.



Figura 6: Gomiti della gamba dritta.



Figura 7: Saldatura dei gomiti sulla parte dritta della gamba dritta.



Figura 8: Controlli con liquidi penetranti sulla gamba curva al termine delle lavorazioni finali di macchina.



Figura 9: Covers.



Figura 10: Miscellanea.



Figura 11: Controlli dimensionali finali della gamba dritta effettuati da due operatori con 2 laser tracker.



Figura 12: Controllo dimensionale della gamba dritta; particolare della misura effettuata con lo strumento T-probe.

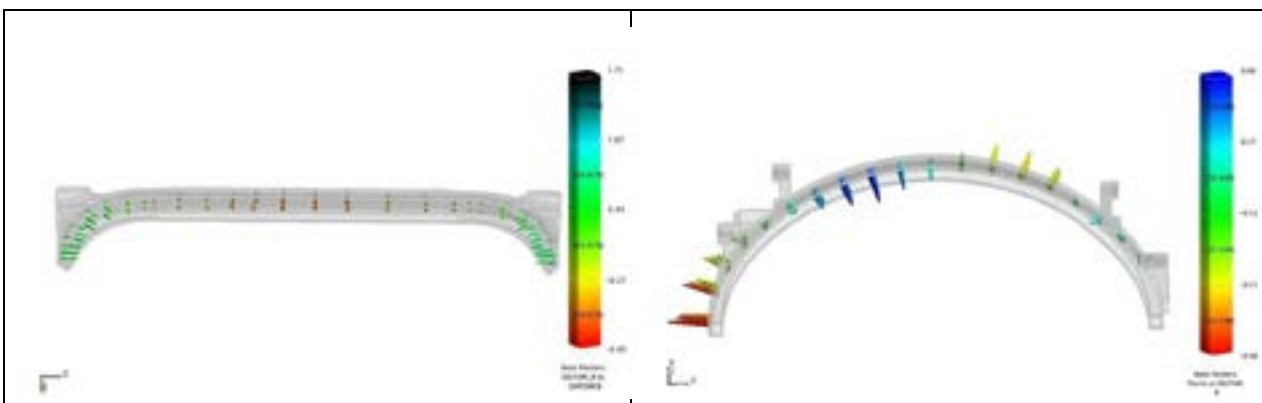


Figura 13: Misure della base della gamba dritta e della base della gamba curva ASG-F effettuate con laser tracker; grafici delle deviazioni rispetto al modello nominale eseguiti con il software di misura Spatial Analyzer.

COIL CASING	CURVED LEG				STRAIGHT LEG						COVERS	CS SET DEL
					STRAIGHT PART		ELBOWS		FIT_UP/ TIG WELD	MACHINING/ CHAMFERING		
	CUT/ROLL/ TIG WELD	FIT-UP/ EB WELD	Accessories	MACHINING/ CHAMFERING	CUT/FIT UP	EB WELD	CUT	FIT UP/ EB WELD				
1° CASING - CS10 (ALSTOM-A)	done	done	JTAL4006-A	JTAS4006-A	done	JTAS4001-A	done	done	JTAL4010-A	JTAS4010-A	done	4/2015
2° CASING - CS1 (ASG-A)	done	done	JTAL4006-A	JTAS4006-A	done	JTAS4001-A	done	done	JTAS4010-A	JTAS4010-A	done	5/2015
3° CASING - CS2 (ASG-B)	done	done	JTAS4006-B	JTAS4006-B	done	JTAS4001-B	done	done	JTAS4010-B	JTAS4010-B	done	7/2015
4° CASING - CS11 (ALSTOM-B)	done	done	JTAL4006-B	JTAL4006-B	done	JTAS4001-A	done	done	JTAL4010-B	JTAL4010-B	done	8/2015
5° CASING - CS3 (ASG-C)	done	done	JTAS4006-C	JTAS4006-C	done	JTAS4001-C	done	done	JTAS4010-C	JTAS4010-C	done	9/2015
6° CASING - CS12 (ALSTOM-C)	done	done	JTAL4006-C	JTAL4006-C	done	JTAS4001-C	done	done	JTAL4010-C	JTAL4010-C	done	9/2015
7° CASING - CS4 (ASG_D)	done	done	JTAS4006-D	JTAS4006-D	done	JTAS4001-D	done	done	JTAS4010-D	JTAS4010-D	done	12/2015
8° CASING - CS13 (ALSTOM_D)	done	done	JTAL4006-D	JTAL4006-D	done	JTAS4001-D	done	done	JTAL4010-D	JTAL4010-D	done	1/2016
9° CASING - CS5 (ASG-E)	done	done	JTAS4006-E	JTAS4006-E	done	JTAS4001-E	done	done	JTAS4010-E	JTAS4010-E	done	2/2016
10° CASING - CS14 (ALSTOM-E)	done	done	JTAL4006-E	JTAL4006-E	done	JTAS4001-E	done	done	JTAL4010-E	JTAL4010-E	done	4/2016
11° CASING - CS6 (ASG-F)	done	done	JTAS4006-F	JTAS4006-F	done	JTAS4001-F	done	done	JTAS4010-F	JTAS4010-F	done	6/2016
12° CASING - CS15 (ALSTOM-F)	done	done	JTAL4006-F	JTAL4006-F	done	JTAS4001-F	done	done	JTAL4010-F	JTAL4010-F	done	7/2016
13° CASING - CS7 (ASG-G)	done	done	JTAS4006-G	JTAS4006-G	done	JTAS4001-G	done	done	JTAS4010-G	JTAS4010-G	done	8/2016
14° CASING - CS16 (ALSTOM_G)	done	done	JTAL4006-G	JTAL4006-G	done	JTAS4001-F	done	done	JTAL4010-G	JTAL4010-G	done	9/2016
15° CASING - CS8 (ASG-H)	done	done	done	ongoing	done	JTAS4001-H	done	done	done	ongoing	done	2016
16° CASING - CS17 (ALSTOM-H)	done	done	done		done	JTAS4001-H	done	done	done		done	
17° CASING - CS9 (ASG-I)	done	done			done	JTAS4001-I	done	done			done	2017
18° CASING - CS18 (ALSTOM-I)	done	done			done	JTAS4001-I	done	done			done	
19° CASING - CS19 (ASG-J)							done	done				2017
20° CASING - CS18 (ALSTOM-J)												

Figura 14: Stato delle attività, settembre 2016.

2.2 Monitoraggio attività

ENEA ha monitorato le attività della ditta Walter Tosto con contatti quotidiani in teleconferenza e/o in videoconferenza. ENEA ha inoltre organizzato incontri con frequenza bisettimanale presso gli stabilimenti di produzione della ditta. In alcune occasioni hanno partecipato direttamente gli altri partner internazionali del progetto JT-60SA e in particolare:

2.3 Documenti prodotti

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

- (3) ADP-JT60CC-04 (MDB-12110.01-04)
- (4) ADP-JT60CC-05 (MDB-12110.01-05)
- (5) ADP-JT60CC-06 (MDB-12110.01-06)
- (6) ADP-JT60CC-07 (MDB-12110.01-07)
- (7) ADP-JT60CC-13 (MDB-12110.02-13)
- (8) ADP-JT60CC-14 (MDB-12110.02-14)
- (9) ADP-JT60CC-15 (MDB-12110.02-15)
- (10) ADP-JT60CC-16 (MDB-12110.02-16)

Tutti i documenti sono conservati nell'archivio interno ENEA delle attività relative a JT-60SA (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 diffusa in ambito internazionale nei Technical Coordination Meeting (TCM), incontri tra tutti i partecipanti al progetto JT-60SA, tra cui le associazioni giapponesi (QST) ed europee. In dettaglio, nel periodo di riferimento i TCM si sono tenuti:

- Naka, Giappone 24-25 febbraio 2016;
- Aviles, Spagna, 6-7 luglio 2016.

Nel corso del 2016 è stato pubblicato il seguente articolo:

- “Manufacturing of the casing components for the JT-60SA toroidal field coils” sulla rivista IEEE Transactions on Applied Superconductivity (Volume: 26, Issue: 4, June 2016) presentato al 24th International Conference on Magnet Technology (MT), Seoul, Korea, 18-23 ottobre 2015.

Lo stato delle attività relativo alla realizzazione delle casse di contenimento dei magneti toroidali è stato inoltre presentato nel 2016 nel corso della seguente conferenza:

- “Status of casing manufacturing for JT-60SA toroidal field coils” al Symposium on Fusion Technology (SOFT 2016) Praga, Repubblica Ceca, 5-9 settembre 2016.

3 Conclusioni

Obiettivo del subtask a.2 nell’ambito del PAR 2015 era la realizzazione di 8 strutture di contenimento delle bobine toroidali di JT-60SA (chiamate casse o casing), 4 delle quali destinate ad ASG Superconductors (Genova, Italia) e le altre 4 destinate a General Electric (Belfort, Francia).

Il risultato è stato ottenuto con la realizzazione e la consegna delle 8 casse previste nel PAR 2015 che seguono le prime 6 prodotte nel corso del precedente PAR 2014. In totale finora sono state quindi completate 14 casse di contenimento delle bobine toroidali di JT-60SA, delle diciotto previste complessive. Ulteriori 4 casse sono in fase di composizione e/o lavorazione meccanica; entro la fine del 2016 è previsto il completamento e la consegna della 15° e della 16° cassa rispettivamente ad ASG e ALSTOM e le ultime due saranno consegnate nei primi mesi del 2017.

La produzione ha quindi rispettato il programma di realizzazione di 8 casse, arrivando così al completamento delle prime 14 casse.

Si prevede inoltre il completamento delle 18 casse e di ulteriori 2 casse “spare” entro il primo semestre del 2017.

4 Abbreviazioni ed acronimi

ASG	ASG Superconductors
BA	Broader Approach
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
F4E	Fusion for Energy
GE	General Electric
JAEA	Japan Atomic Energy Agency
QST	National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology
TF	Toroidal Field
WT	Walter Tosto