



Ricerca di Sistema elettrico

# Rapporto tecnico per la valutazione dei risultati delle prove eseguite sui materiali

Paolo Rossi, Antonio Cucchiaro

Report RdS/PAR2013/202

## LA VALUTAZIONE DEI RISULTATI DELLE PROVE ESEGUITE SUI MATERIALI

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 SPECIFICA TECNICA DEL MATERIALE .....	5
2.2 PROVE MECCANICHE E METALLOGRAFICHE PRESSO RTM.....	6
3 CONCLUSIONI.....	8
4 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	8

## 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.

Il contratto di fornitura delle casse di contenimento delle 18 bobine è stato affidato alla ditta Walter Tosto.

La ditta ha scelto una composizione delle casse dove sono presenti componenti ottenuti da piatti e forgiati. Dopo le lavorazioni dei componenti ricavati da forgiati, è emerso che il materiale forgiato, e già acquistato dalla WTO, ancorché rispondente alle specifiche di acquisto, ha evidenziato un comportamento fragile a bassa temperatura, non compatibile con il suo utilizzo alla temperatura operativa della macchina.

Il presente documento riporta i risultati delle indagini effettuate da ENEA sul materiale.

## 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.

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.

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 dritta è composta da un tratto dritto e due curve saldate alle estremità dette "gomiti". I gomiti della gamba dritta sono realizzati 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.

Dopo le lavorazioni dei componenti descritti sopra, è emerso che il materiale forgiato, e già acquistato dalla WTO, ancorché rispondente alle specifiche di acquisto, 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.

Il presente documento riporta i risultati delle indagini effettuate da ENEA sul materiale.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 Specifica tecnica del materiale

La specifica tecnica della costruzione delle casse comprendeva una specifica tecnica dei materiali per la composizione delle casse, fornita da Fusion for Energy (F4E). Il materiale previsto è un acciaio inossidabile austenitico tipo 316L con una composizione leggermente modificata e riportata in Tabella 1.

Il materiale fornito sotto forma di lamiere deve rispondere alle norme ASTM A-480 and ASTM A-240.

Il materiale fornito sotto forma di forgiati deve rispondere alle norme ASTM A-484 and A473-01.

Il materiale deve soddisfare anche i seguenti requisiti:

- permeabilità magnetica relativa  $\leq 1.05$  at  $\sim 500$  Oe a temperature ambiente
- dimensione del grano  $\geq 2$  (ASTM E112-88)

**Tabella 1: Composizione chimica del materiale delle casse**

Element	Min	Max	
C	0.000	0.030	% weight
Si	0.000	0.750	% weight
Mn	0.000	2.000	% weight
P	0.000	0.035	% weight
S	0.000	0.015	% weight
N	0.08	0.110	% weight
Cr	17.000	18.500	% weight
Mo	2.500	3.000	% weight
Ni	12.500	14.000	% weight
Co	0.000	500	ppm

Le proprietà meccaniche richieste a temperatura ambiente sono quelle indicate dalle norme citate. Non sono specificati requisiti del materiale a temperature criogenica, ma era richiesta comunque la fornitura di provini a trazione per un eventuale ulteriore controllo .

Sono state acquisite da Walter Tosto 36 quadrotte di materiale forgiate per la realizzazione di 36 gomiti, 2 per ogni gamba dritta. Sono stati inoltre acquisiti altri blocchetti di materiale forgiato per la realizzazione di componenti accessori delle gambe curve.

Tutte le quadrotte ed i blocchetti provenivano da 8 colate diverse. Walter Tosto a quindi fornito, secondo la specifica tecnica e successivi accordi, 8 set di tre provini ( un set di tre provini per ogni colata, 1 provino per ogni direzione principale).

F4E ha eseguito quindi delle prove di trazione a 4K presso il laboratorio di prove meccaniche del KIT, che hanno dato 3 risultati anomali su 24 prove effettuate. Le tre prove anomale evidenziavano un comportamento fragile a bassa temperatura. Le tre prove anomale erano relative tutte e tre a provini ricavati nella direzione della spessore delle quadrotte (T).

## 2.2 Prove meccaniche e metallografiche presso RTM

Dopo le lavorazioni dei componenti descritti sopra, è stato possibile estrarre direttamente dalle quadrotte di materiale forgiato dei coupon sui quali effettuare ulteriori indagini approfondite.

A questo scopo ENEA si è avvalsa della collaborazione della ditta RTM BREDA per seguire prove meccaniche a temperatura ambiente e temperatura criogenica ed ulteriori prove metallografiche.

Sono state fatte inizialmente prove di trazione a temperatura ambiente e temperatura criogenica (4K) su provini estratti da un coupon di materiale di una colata che aveva evidenziato una rottura fragile già presso i laboratori del KIT.

I risultati delle prove meccaniche sono riportati nella seguente Tabella 2.

**Tabella 2: Prove meccaniche sui forgiati**

Prog.	Data	Velocità di prova	Tipo di provetta	Senso	Temp [°C]	Dimensioni [mm]	So [mm <sup>2</sup> ]	Lo [mm]	Rm [MPa]	Rp0.2% [MPa]	Rp0.02% [MPa]	A4D [%]	A5D [%]	E [GPa]	Z [%]	Z.R. (+)
A01	06/11/13	A12	C	W	-269	Ø 8.99	63,3	36,0	1360	895	-	59	-	-	76	I
A02	06/11/13	A12	C	W	-269	Ø 8.99	63,5	36,0	1320	880	-	63	-	-	76	I
A03	06/11/13	A12	C	W	-269	Ø 8.99	63,3	36,0	1370	840	-	60	-	-	76	I
A04	06/11/13	A12	C	L	-269	Ø 8.99	63,5	36,0	1350	910	-	57	-	-	75	I
A05	06/11/13	A12	C	L	-269	Ø 8.99	63,5	36,0	1300	855	-	58	-	-	78	I
A06	06/11/13	A12	C	T	-269	Ø 8.99	63,3	36,0	800	755	-	2,8	-	-	13	E
A07	06/11/13	A12	C	T	-269	Ø 8.99	63,5	36,0	735	695	-	2,7	-	-	8,5	E
A08	12/11/13	A23	Cyl.	T	Amb.	Ø 8.99	63,5	36,0	425	220	-	13	-	-	13	E
A09	12/11/13	A23	Cyl.	L	Amb.	Ø 9.00	63,6	36,0	575	252	-	64	-	-	79	I

I risultati hanno confermato la rottura fragile dei provini ricavati nella direzione T, sia a temperatura ambiente che a temperatura criogenica di 4K.

E' stato quindi deciso di proseguire l'indagine anche su quadrotte relative a colate i cui provini avevano già dato risultati soddisfacenti nelle prove di trazione seguite al KIT a 4K su tutte e tre le direzioni.

Sono stati quindi forniti due coupon di materiale prelevati da queste due colate per eseguire ulteriori prove meccaniche.

I risultati delle prove meccaniche sono riportati nella seguente Tabella 3.

**Tabella 3: Ulteriori prove meccaniche su materiale forgiati**

	UTS, MPa	YS, MPa	Allungamento, %	Strizione, %
<b>8999, T (ns. A01)</b>	<b>422</b>	<b>236</b>	<b>Non rilevabile</b>	<b>31*</b>
<b>8999, W (ns. A02)</b>	<b>567</b>	<b>261</b>	<b>65</b>	<b>86</b>
<b>8535, T (ns. B01)</b>	<b>338</b>	<b>244</b>	<b>Non rilevabile</b>	<b>12*</b>
<b>8535, W (ns. B02)</b>	<b>550</b>	<b>261</b>	<b>68</b>	<b>85</b>

Anche queste ulteriori prove, eseguite a temperatura ambiente, hanno evidenziato una rottura di tipo fragile a temperatura ambiente sempre nella direzione T.

Sono state quindi eseguite delle analisi metallografiche sui provini caratterizzati da rottura fragile con i seguenti risultati :

- La struttura monofasica austenitica un poco bandata in bande a grano grosso e bande a grano fine.
- La zona della piatta della frattura (la cricca prematura) in corrispondenza di una area fortemente contaminata da precipitazione di fase Sigma.
- Le cricche secondarie formate in corrispondenza di zone di precipitazioni meno estese, ma simili -

Ulteriori esami metallografici approfonditi hanno confermato su tutte e tre le colate testate presenza di fase Sigma e presenza di aree isolate a grano grossolano in una predominante struttura a grado fine.

A seguito delle prove meccaniche e metallografiche effettuate da F4E presso il KIT e da ENEA presso RTM BREDA è emerso che il materiale forgiato, e già acquistato dalla WTO, ancorché rispondente alle specifiche tecniche del materiale preparate da F4E, ha evidenziato un comportamento fragile a bassa temperatura, non compatibile con il suo utilizzo alla temperatura operativa della macchina.

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.

### 3 Conclusioni

A seguito delle prove meccaniche e metallografiche effettuate da F4E presso il KIT e da ENEA presso RTM BREDA è emerso che il materiale forgiato, e già acquistato dalla WTO, ancorché rispondente alle specifiche tecniche del materiale preparate da F4E, ha evidenziato un comportamento fragile a bassa temperatura, non compatibile con il suo utilizzo alla temperatura operativa della macchina.

In sintesi sono state eseguite da RTM BREDA per conto di ENEA prove meccaniche di trazione a temperatura ambiente e a temperatura criogenica su provini rappresentativi di tre delle 8 colate totali acquisite da Walter Tosto. I risultati hanno evidenziato un comportamento fragile sulla direzione dello spessore delle quadrotte.

Gli esami metallografici hanno evidenziato la presenza di fase Sigma nei provini, quasi certamente causa delle rotture fragile dei provini

Fusion for Energy (F4E) si è quindi 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.

### 4 Abbreviazioni ed acronimi

BA Broader Approach

F4E Fusion for Energy

WT Walter Tosto

TF Toroidal Field