



ATTIVITÀ DI FISICA DELLA FUSIONE COMPLEMENTARI A ITER



REALIZZAZIONE DEI MODULI DI MAGNETE TOROIDALE

Gian Mario Polli

UT-FUS-Ingegneria Broader Approach

Direttore Esecuzione Contratto

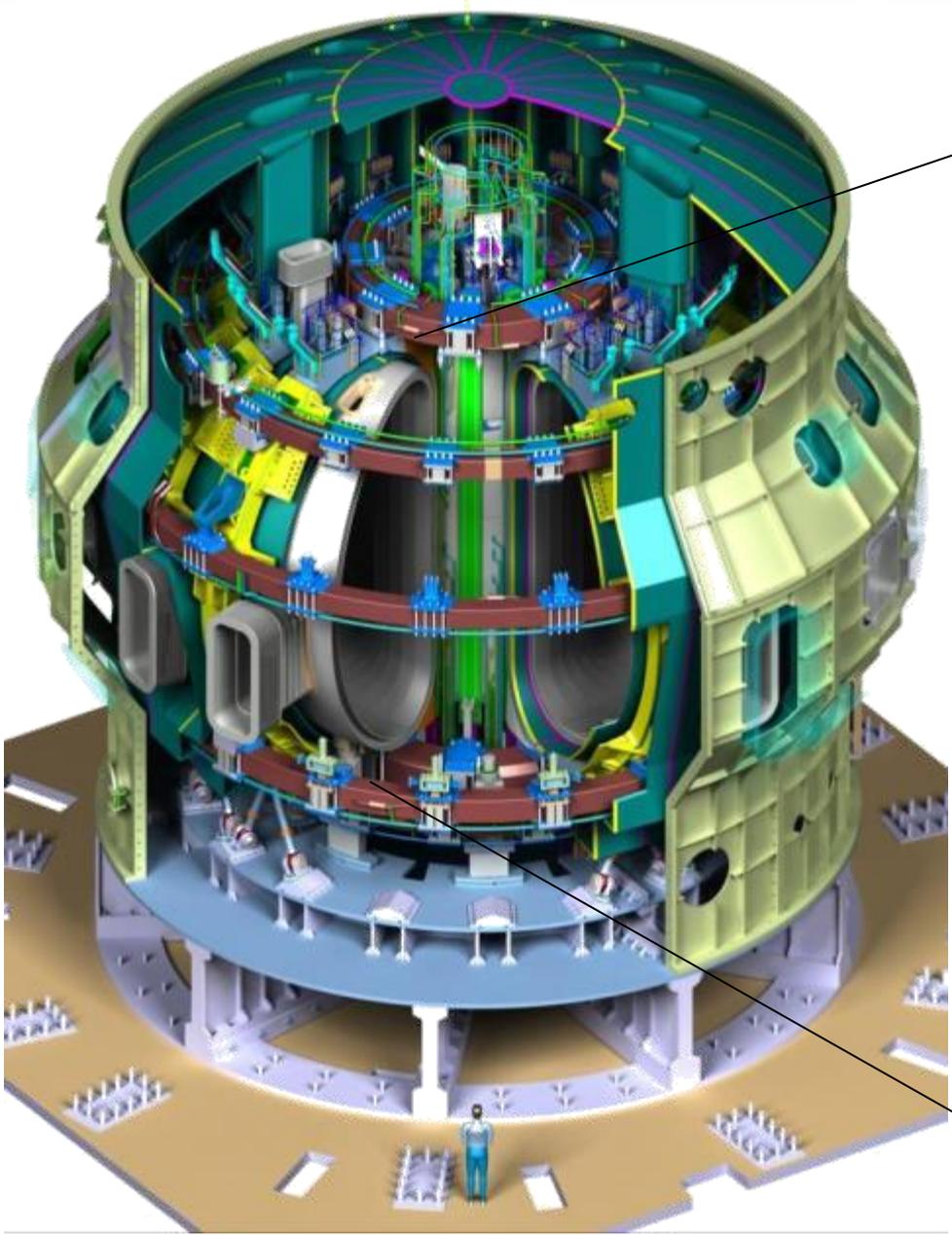
ENEA-ASG Superconductors

ENEA Sede Legale

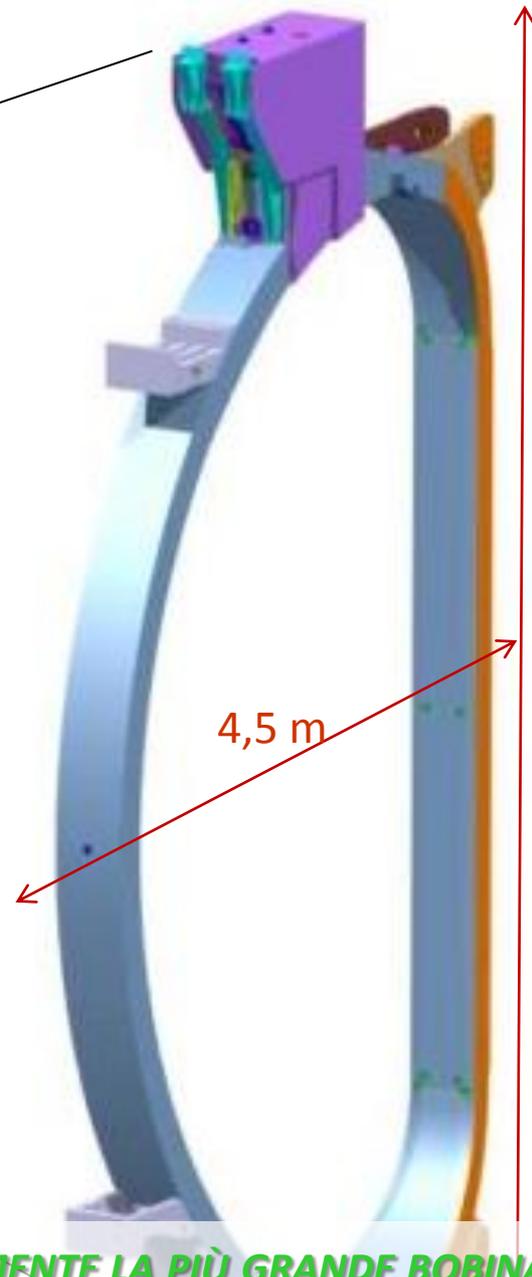
Via Giulio Romano, 41 - Roma

19 Giugno 2015

Il modulo di magnete TF



Tokamak JT-60SA



8,7 m

4,5 m

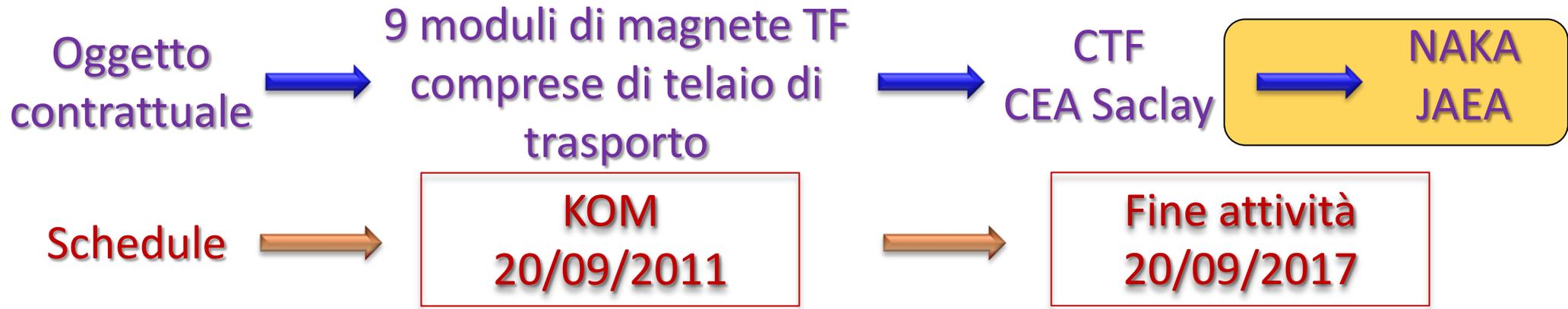
Modulo di magnete di campo toroidale (TF) JT-60SA

- 1368 m di cavo superconduttore
- 5 giunti elettrici
- 2 terminazioni
- 6 ingressi di He
- 13 isolatori elettrici

ATTUALMENTE LA PIÙ GRANDE BOBINA TF MAI REALIZZATA (IN ATTESA DI QUELLA DI ITER)

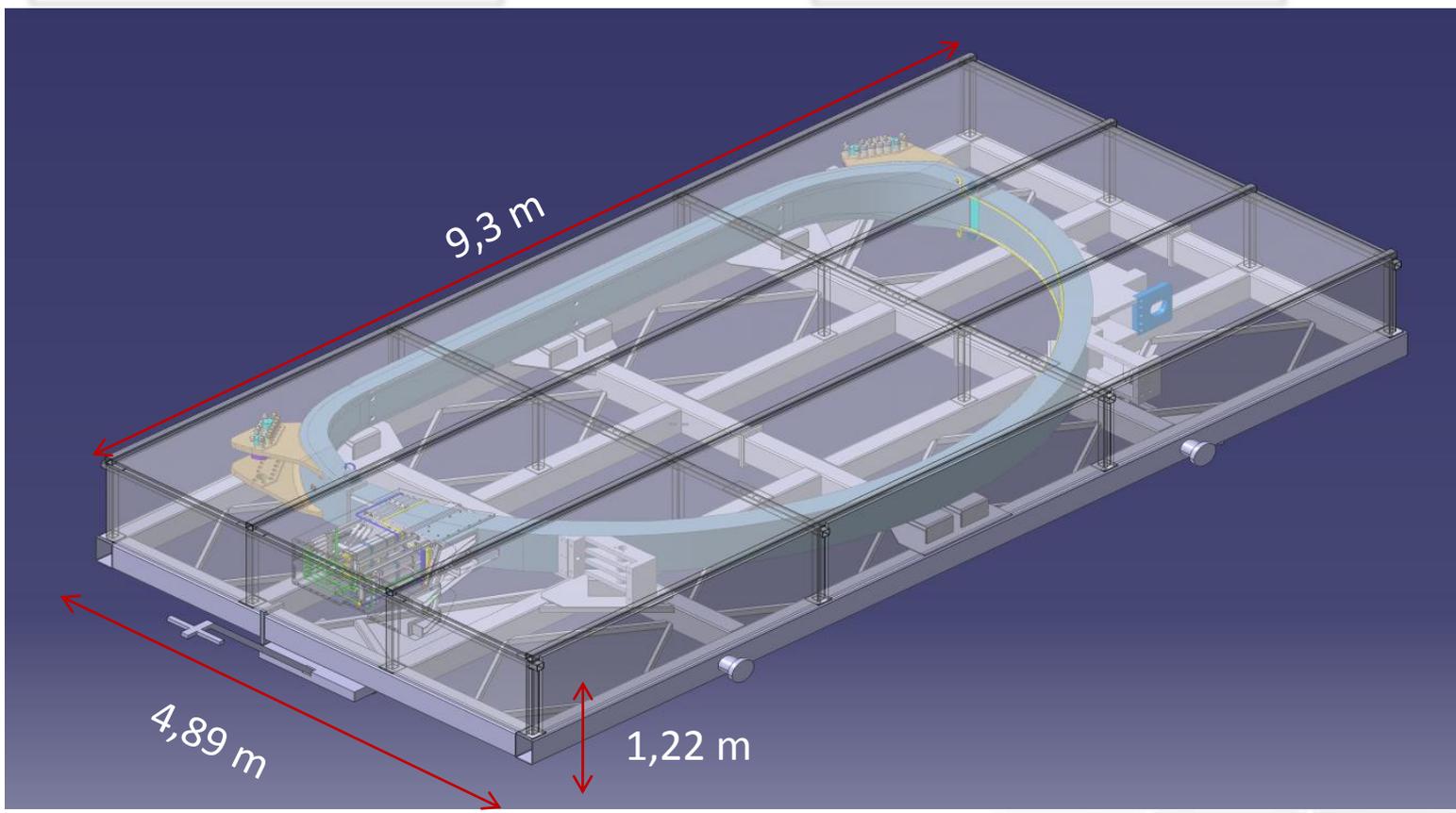
Contratto tra ENEA e ASG per la fornitura di 9 moduli di magneti TF

Contratto tra ENEA (C.R. Frascati) e ASG Superconductors S.p.A. di Genova

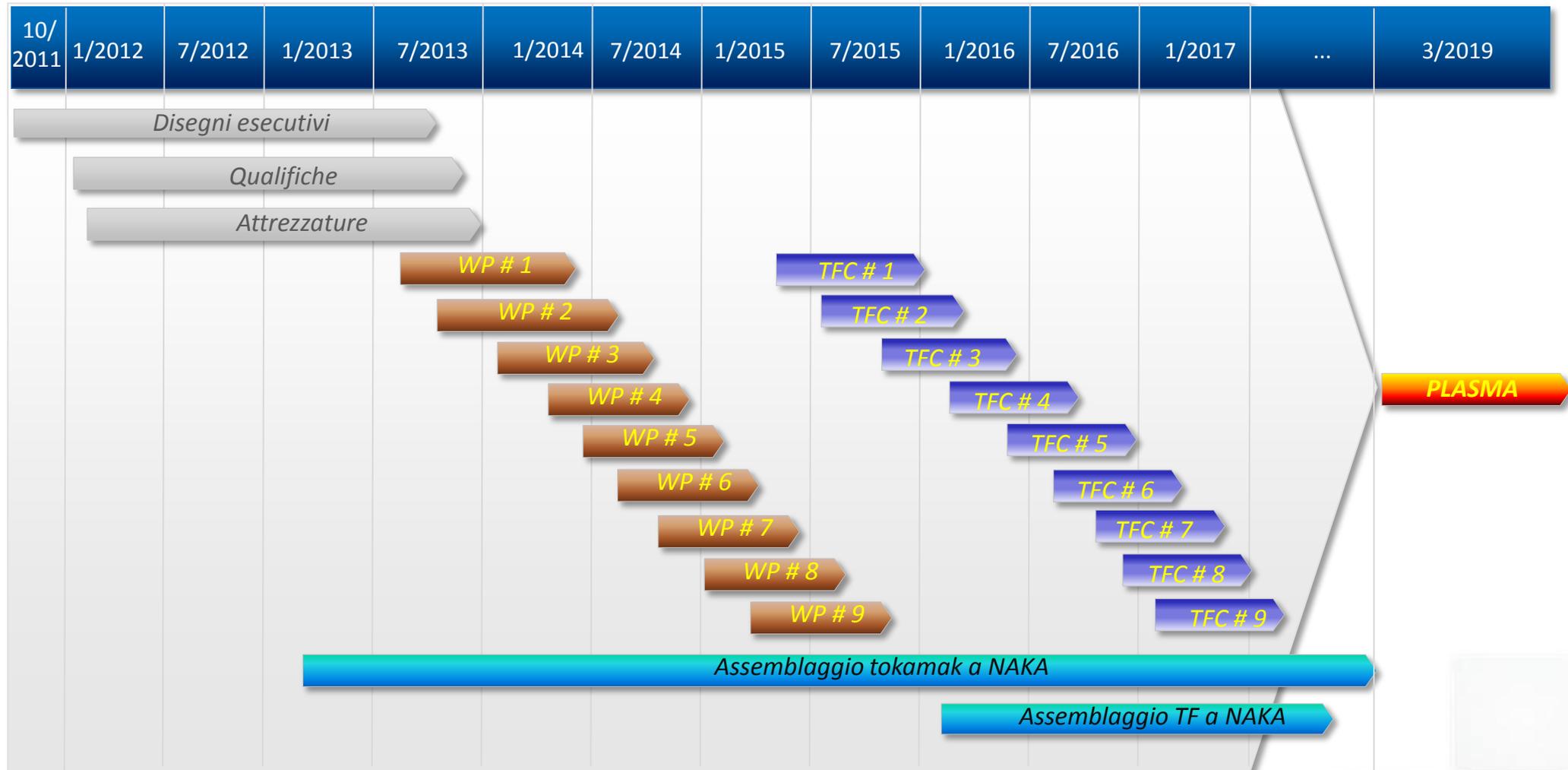


$M_{WP} = 6334.4 \text{ kg}$
 $M_{case} = 9324.4 \text{ kg}$
 $M_{coil} = 15830 \text{ kg}$
 $M_{frame} = 8000 \text{ kg}$
 $M_{tot} = 24000 \text{ kg}$

$h_{WP} = 7,33 \text{ m}$
 $w_{WP} = 4,37 \text{ m}$
 $h_{coil} = 8,43 \text{ m}$
 $w_{coil} = 4,51 \text{ m}$



Tempistica contrattuale



- Fase 0 -> attività di ingegneria ~ 27 mesi
- Fase 1 -> produzione bobine ~ 24 mesi
- Fase 2 -> incassamento e prove finali ~ 29 mesi

Fase 1: produzione bobine

La costruzione dei **moduli di magneti TF** si compone di due fasi distinte per le quali è stato necessario sviluppare attrezzature dedicate e qualificare processi speciali ad hoc

Il punto di partenza è costituito dal cavo superconduttore in NbTi (di tipo CICC, raffreddato da un flusso di He supercritico) fornito ad ASG da ENEA e costruito dal consorzio ICAS (di cui ENEA è socio maggioritario) nell'ambito di un contratto con l'agenzia europea F4E.

$I = 25.7 \text{ kA}$
 $B_{max} = 5.65 \text{ T}$
 $T_{op} = 4.4 \text{ K}$

$L_{hyd} = 114 \text{ m}$
 $N_{NbTi} = 324$
 $N_{Cu} = 162$
 $M_{dot} = 4 \text{ g/s}$

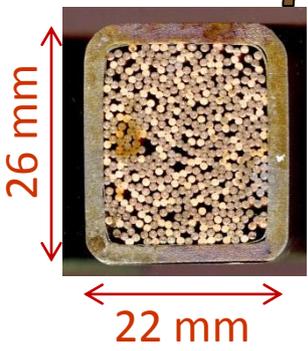
26 mm



22 mm

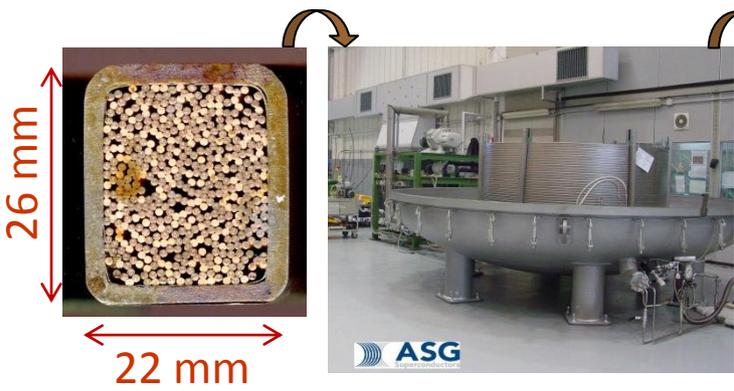
Fase 1: produzione bobine

Prima di essere impiegati in produzione i cavi vengono testati per verificarne le caratteristiche di tenuta e di portata



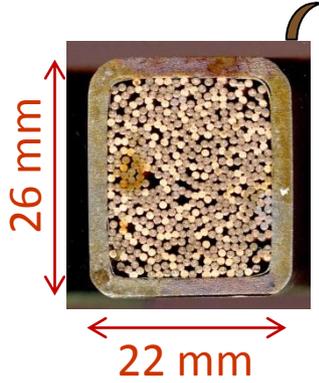
Fase 1: produzione bobine

Inserito nella linea di avvolgimento (lunga circa 30 m) il cavo viene raddrizzato, pulito, curvato, sabbiato, nastrato con nastro di vetro per l'isolamento interspira ed infine avvolto a forma di D per formare un doppio pancake (DP)



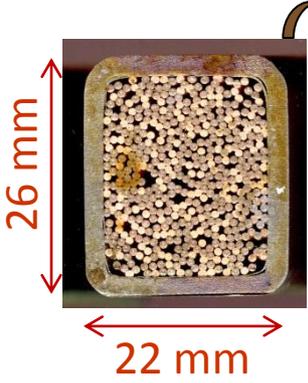
Fase 1: produzione bobine

Il DP viene prima nastrato, poi impilato, giuntato elettricamente con i DP adiacenti e infine nuovamente nastrato con nastro di vetro per dar vita all'avvolgimento di bobina (WP)



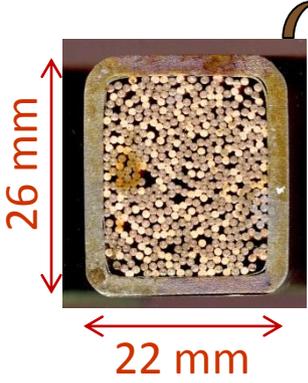
Fase 1: produzione bobine

Il WP deve quindi essere sottoposto ad un ciclo di impregnazione sottovuoto e successiva polimerizzazione



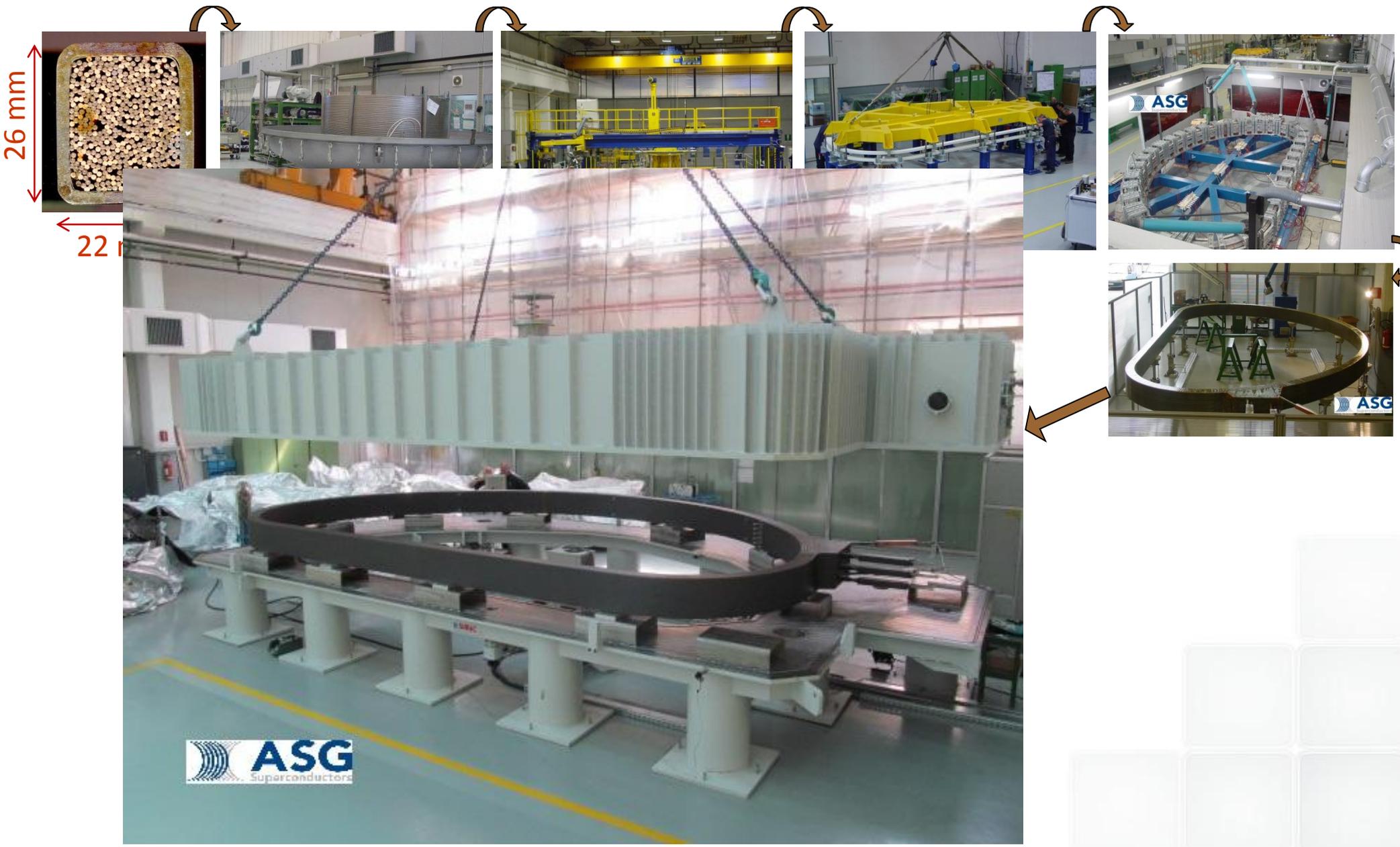
Fase 1: produzione bobine

Completata l'impregnazione la bobina viene pulita, rivestita di vernice conduttiva ed è quindi pronta per l'esecuzione dei collaudi previsti



Fase 1: produzione bobine

I collaudi includono verifiche geometriche, fluidiche, elettriche



Fase 1: produzione bobine

La costruzione delle **bobine** si compone di diversi passaggi intermedi per i quali è stato necessario sviluppare attrezzature dedicate e qualificare processi speciali ad hoc



Attrezzature:

- 1) camera da vuoto per test conduttori
- 2) linea avvolgimento
- 3) bilancino sollevamento DP/WP
- 4) stazioni di nastratura/impilaggio
- 5) banco di impregnazione sottovuoto
- 6) stazione di pulitura
- 7) camera da vuoto anulare per test finali
- 8) stazione di misura dimensionale con laser tracker

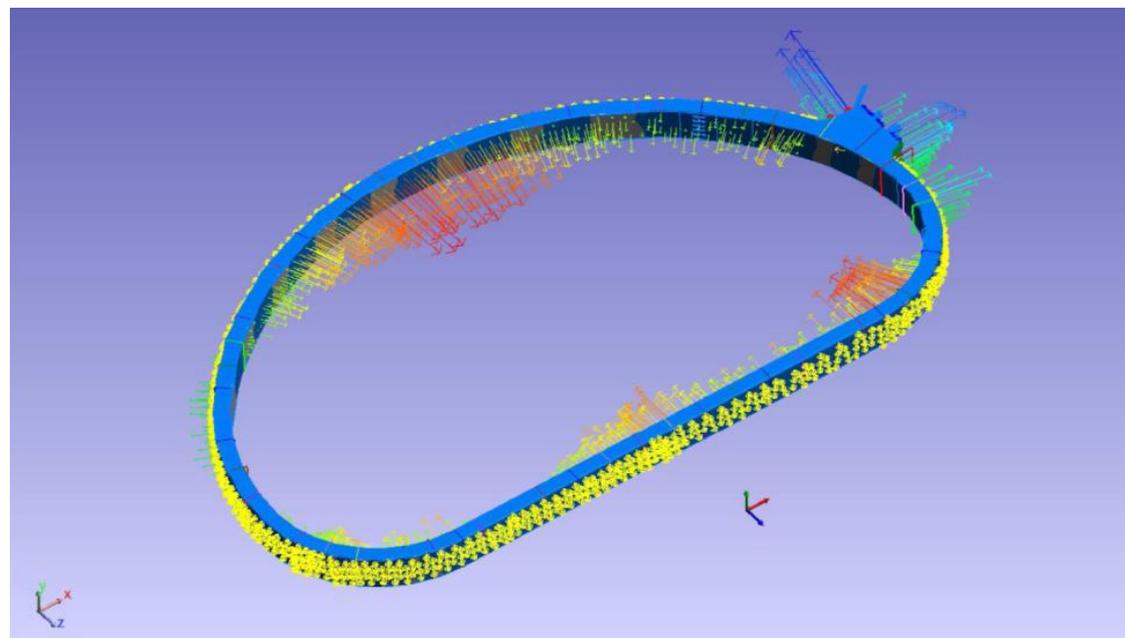
Processi speciali:

- 1) Resistenza a taglio isolamento
- 2) Saldatura inserto di Elio
- 3) Trave di impregnazione da 1 m
- 4) Giunto e terminazioni elettriche
- 5) Dummy DP

Requisiti definiti in specifica tesi a garantire elevata omogeneità di campo magnetico nel tokamak

Fase 1: produzione bobine

<i>WP #</i>	<i>Avvolgimento</i>	<i>Impilaggio</i>	<i>Impregnazione</i>	<i>Test</i>	<i>Controlli dimensionali</i>
01	✓	✓	✓	✓	✓
02	✓	✓	✓	✓	✓
03	✓	✓	✓	✓	✓
04	✓	✓	✓	✓	✓
05	✓	✓	✓	✓	✓
06	✓	✓	✓	✓	✓
07	✓	✓	✓	In corso	
08	✓	✓	In corso		
09	In corso	In corso			



Fase 2: incassamento e test finali

- I. Controllo visivo cassa alla ricezione
- II. Applicazione nastratura di vetro sul WP
- III. Inserimento WP nella cassa
- IV. Saldatura componenti cassa
- V. Impregnazione di embedding
- VI. Lavorazione meccanica superfici di interfaccia
- VII. Installazione circuito idraulico
- VIII. Prove di accettazione finali



Fase 2: incassamento e test finali

Inserimento del WP nel nucleo centrale dell'attrezzatura di incassamento



Fase 2: incassamento e test finali

Nastratura di embedding nominale



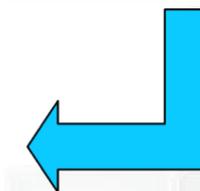
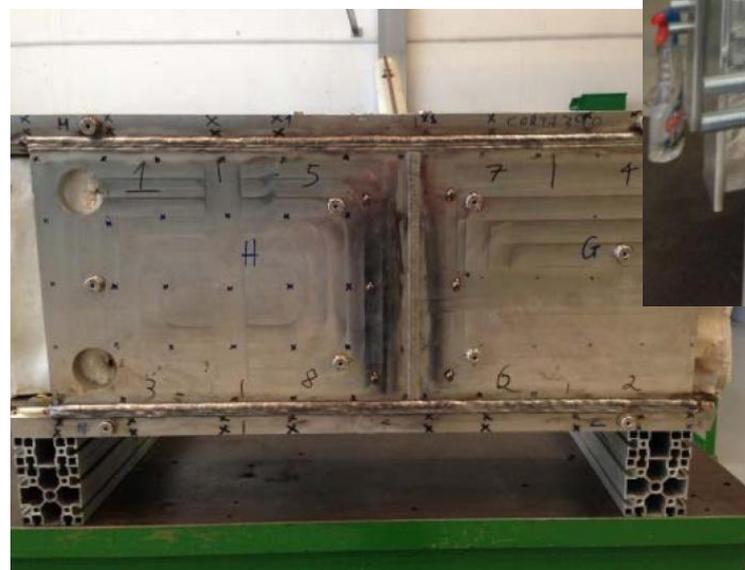
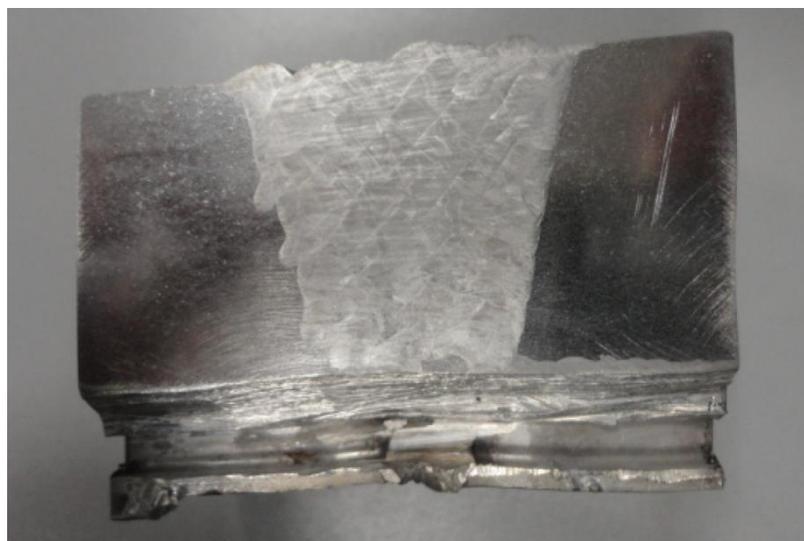
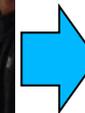
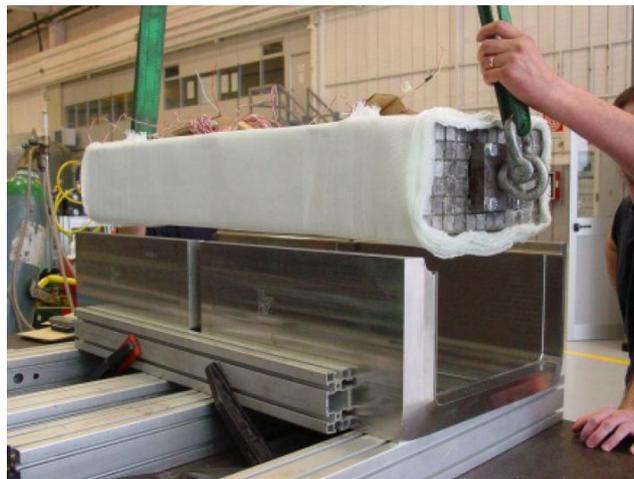
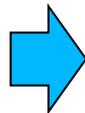
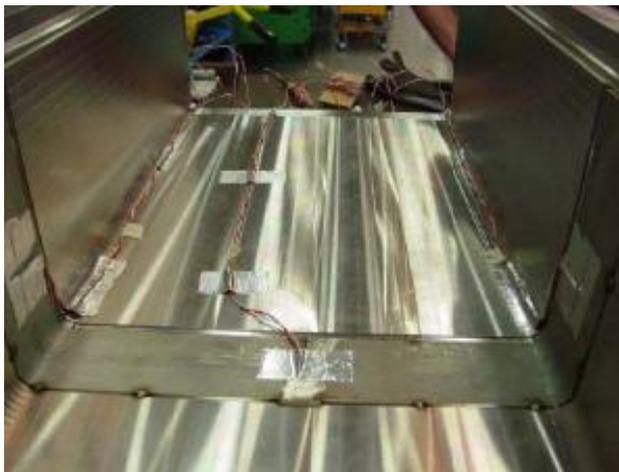
Fase 2: incassamento e test finali

Montaggio su attrezzatura di inerimento



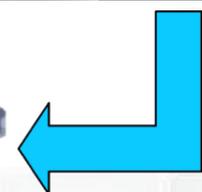
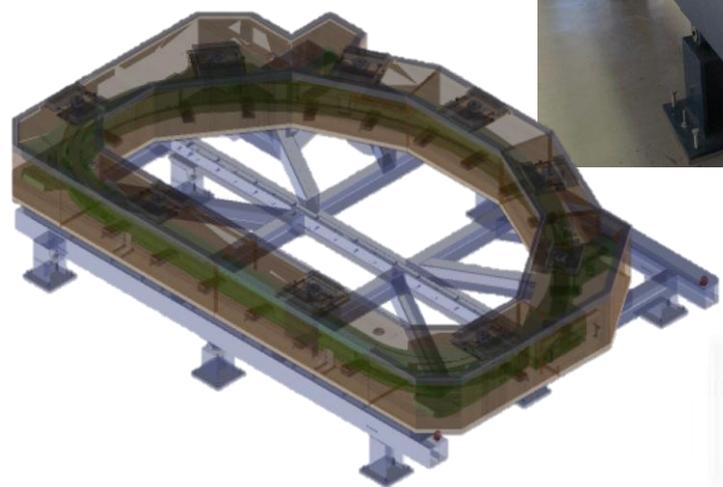
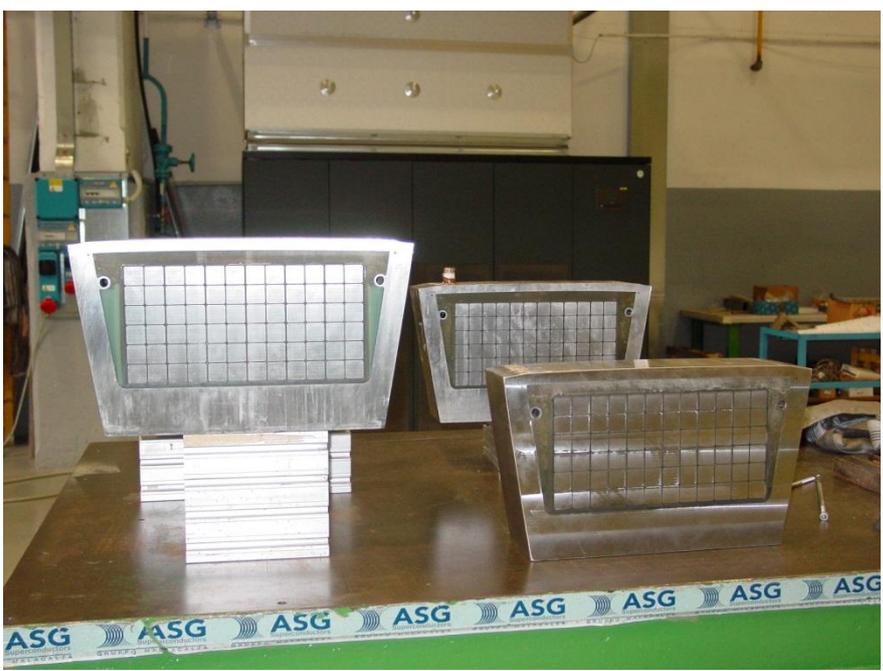
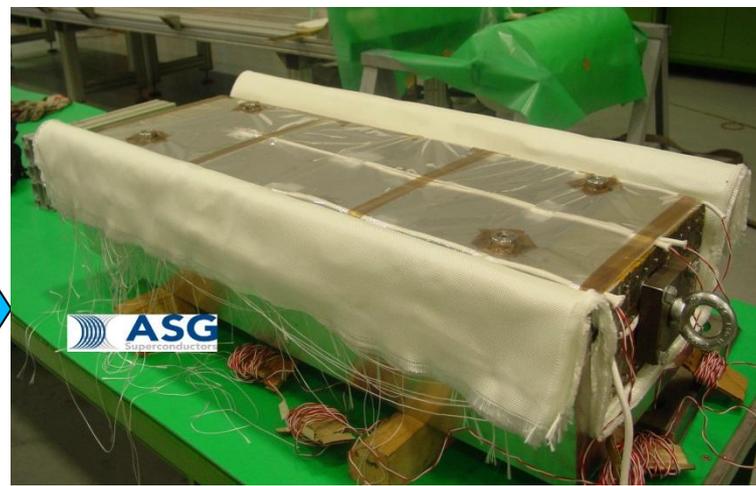
Fase 2: qualifiche processo inserimento e saldatura

2 differenti mock-up delle casse sono stati forniti ad ASG da ENEA per qualificare i processi di inserimento, saldatura ed impregnazione finale



Fase 2: qualifiche processo embedding

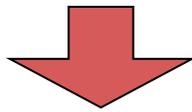
2 differenti mock-up delle casse sono stati forniti ad ASG da ENEA per qualificare i processi di inserimento, saldatura ed impregnazione finale



Fase 2: programma temporale attività

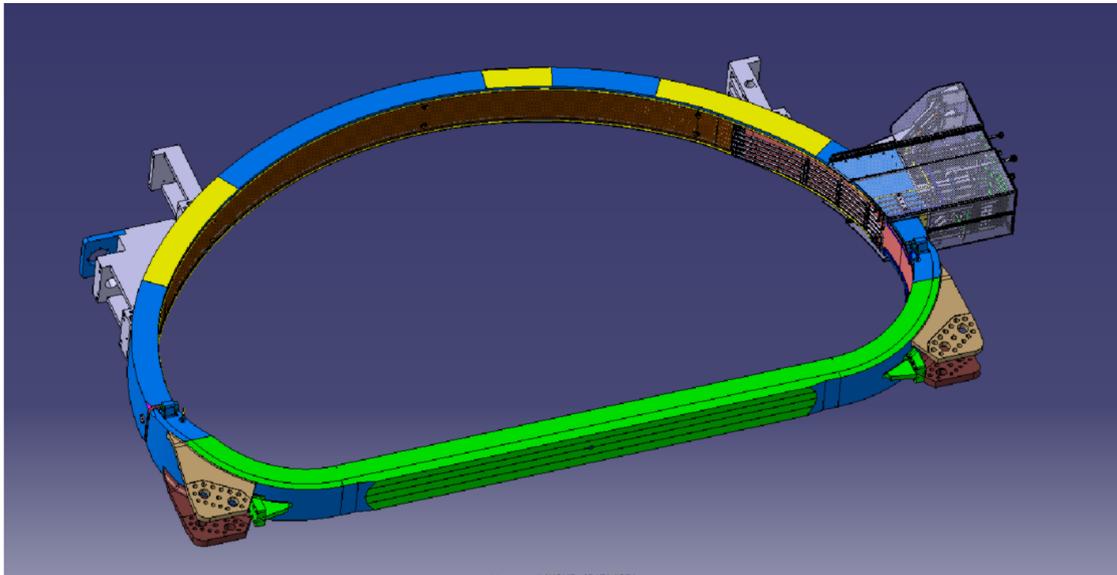
Il primo set di componenti della cassa è stato consegnato a metà maggio 2015

- Incassamento (comprensivo di controlli e inserimento riempitivi) -> 1,5 mese
- Saldatura trasversale e coperchi (comprensivo dei controlli) -> 1,5 mese
- Impregnazione -> 1 mese
- Lavorazioni finali di macchina -> 1 mese
- Installazione circuito idraulico e controlli finali -> 1 mese



✓ 6 mesi per modulo dalla data di consegna della relativa cassa

✓ TFC-01 consegnato a Saclay (Cold test facility) entro dicembre 2015



- ☑ Tutti i processi di qualifica sono stati completati (sia per la fase 1 che per la fase 2)
- ☑ Tutte le attrezzature sono state collaudate (sia per la fase 1 che per la fase 2)
- ☑ 7 bobine (WP) sono complete, le rimanenti 2 saranno completate per settembre 2015
- ☑ La fase 2 di incassamento ha avuto inizio a metà maggio 2015, si prevede che il primo modulo verrà spedito al sito di Saclay entro la fine del 2015
- ☑ I restanti moduli verranno completati entro 6 mesi dalla consegna dei componenti della cassa