

Specifiche Tecniche Relative alla Fornitura fornitura di campioni di cavo superconduttore ad alta temperatura critica (HTS) del tipo SECAS-BRAST

Rev 03 – 06/06/2024

1. Introduzione

Oggetto della presente fornitura è la produzione di campioni prototipo di cavi superconduttori basati su nastri HTS, del tipo *BRAST-SECAS*, recentemente proposto e sviluppato da ENEA. Le specifiche oggetto del presente documento sono state definite da ENEA per soddisfare i requisiti di performance di un conduttore per il progetto EUROFusion DEMO, che dovrà operare in un magnete Solenoide Centrale producendo un campo magnetico di 18 T con una corrente operativa di 60 kA.

La fornitura include i materiali e le prove necessarie per la messa a punto e qualifica dei diversi processi di produzione coinvolti. I nastri superconduttori HTS saranno invece forniti da ENEA in conto lavorazione, e non sono pertanto oggetto della presente fornitura.

2. Oggetto della fornitura

In particolare, è richiesta la fornitura di:

1. n° 2 campioni di conduttore del tipo SECAS di lunghezza 4 m, che saranno utilizzati per assemblare un campione SULTAN per test elettromagnetico, basati sul concetto di *Braided Stack of Tapes* (BRAST) da 12 mm, inseriti all'interno di profili triangolari scanalati in rame, assemblati a costituire un cavo settoriale attorno ad una spirale di acciaio, ed injackettati all'interno di una opportuna camicia di acciaio. Ciascuno di questi campioni dovrà essere dotato di una terminazione per la connessione agli alimentatori di corrente della facility sperimentale, e di una terminazione per la connessione ad una seconda gamba tramite un *bottom joint* → Campioni **SECAS-FS-1 e 2**;
2. n° 1 campione di conduttore identico a quello di cui al punto 1, ma lungo 1 m, e senza alcuna terminazione. Tale campione sarà utilizzato per test di AC losses o altri test che saranno definiti in seguito da ENEA → Campione **SECAS-FS-AC-1**;
3. n° 1 campione di conduttore del tipo SECAS di lunghezza 4 m, che sarà utilizzato per assemblare un campione SULTAN per test elettromagnetico, basato sul concetto di *Braided Stack of Tapes* (BRAST) da 4 mm, inseriti all'interno di profili triangolari scanalati in rame, assemblati a costituire un cavo settoriale attorno ad una spirale di acciaio, ed injackettati all'interno di una opportuna camicia di acciaio. Questo campione dovrà essere dotato di una terminazione per la connessione agli alimentatori di corrente della facility sperimentale, e di una terminazione per la connessione ad una seconda gamba tramite un *bottom joint* → Campione **SECAS-FS-3**;

4. n° 1 campione di conduttore identico a quello di cui al punto 3, ma lungo 1 m, e senza alcuna terminazione. Tale campione sarà utilizzato per test di AC losses o altri test che saranno definiti in seguito da ENEA → Campione **SECAS-FS-AC-2**.

A titolo illustrativo del concetto proposto, di cui si chiede di realizzare campioni prototipo per test sperimentali, si considerino le immagini riportate qui di seguito, e si faccia riferimento a quanto pubblicato in [1]. Per maggiori dettagli si considerino i disegni tecnici allegati alle presenti specifiche, che ne costituiscono parte integrante.

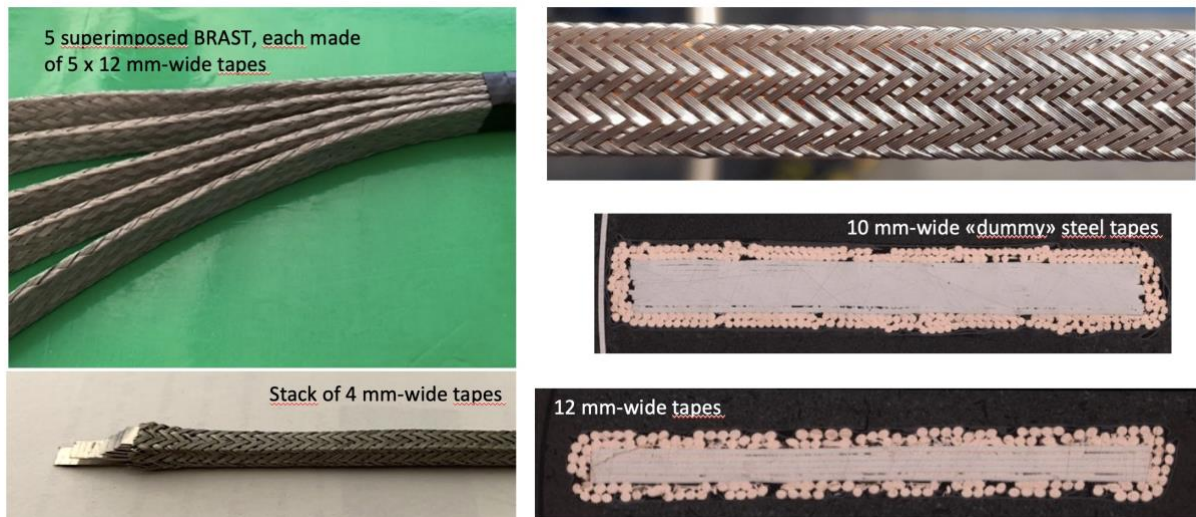


Fig. 1. Esempi di *Braided Stacks of Tapes* (BRAST), ottenuti tramite processo di trecciatura di nastri impilati, tramite sottili fili di rame (diametro compreso tra 0.10 mm e 0.25 mm). Step 1 di processo: fabbricazione dei BRAST richiesti.

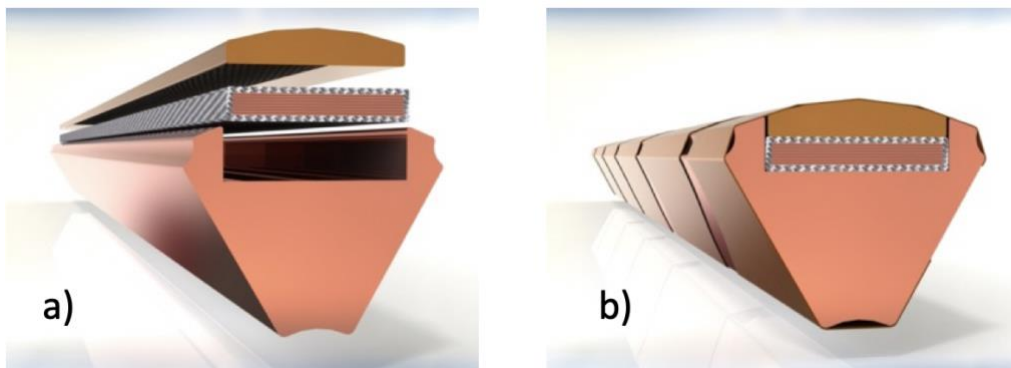


Fig. 2. Step 2 di processo: inserimento dei BRAST all'interno dei settori sagomati, e chiusura con riempitivo “tegolino” in rame e nastratura esterna in rame o acciaio a spirale aperta.

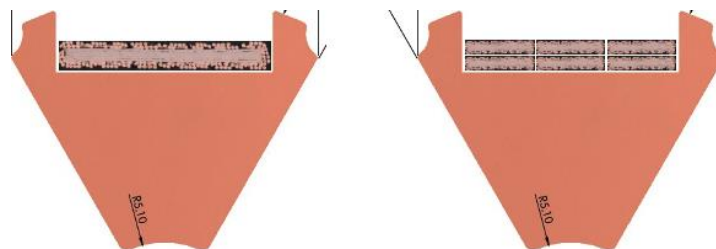


Fig. 3. Due opzioni di assemblaggio possibile. A sinistra, un BRAST costituito da 10 nastri di larghezza 12 mm, utilizzati per i campioni SECAS-FS-1 e 2 e SECAS-FS-AC-1; a destra, 6 BRAST, costituiti ciascuno da 5 nastri di larghezza 4 mm, utilizzati per i campioni SECAS_FS_3 e SECAS-FS-AC-2.

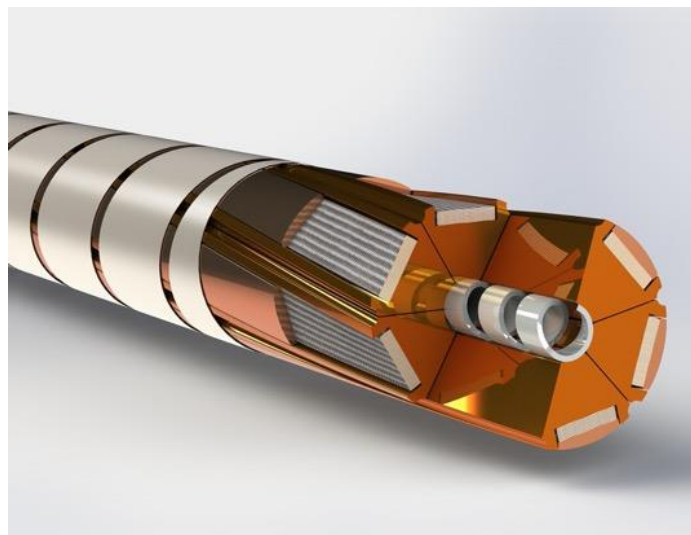


Fig. 4. Step 4 di processo: assemblaggio del *Sector Assembled Cable* (SECAS), costituito da sei settori con un passo di *twist* di 1200 mm attorno ad una spirale centrale, e chiusura tramite nastratura in acciaio a spirale aperta.

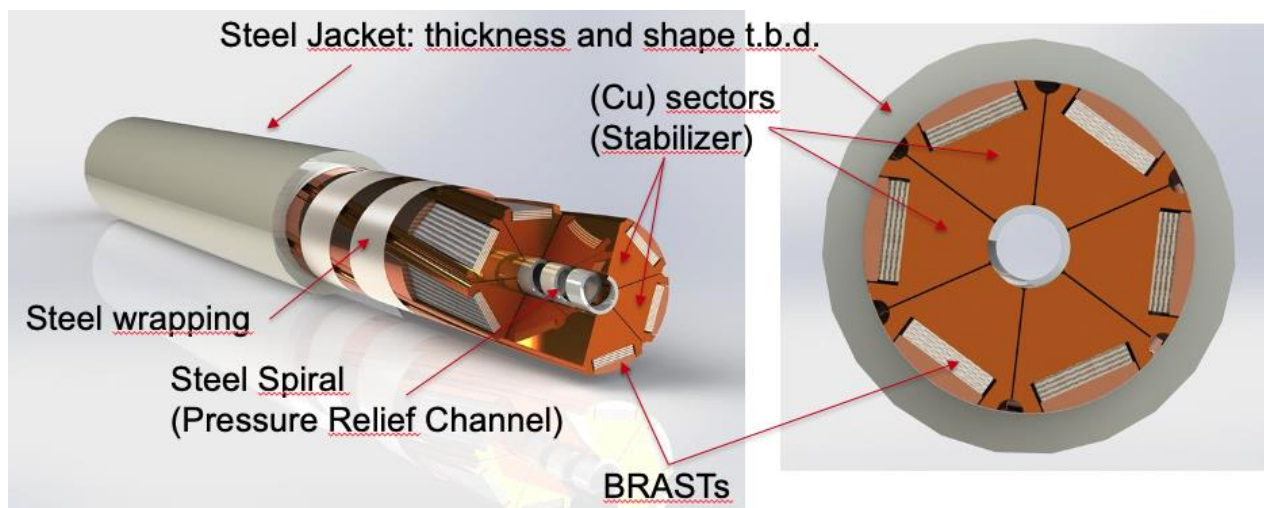


Fig. 5. Step 5 di processo: infilaggio all'interno di un opportuno tubo di acciaio e compattazione tramite laminazione.

3. Deliverable di fornitura

In maggior dettaglio, la fornitura può essere suddivisa nei seguenti Deliverable:

- **Deliverable 1:** 110 m di profili settoriali di forma triangolare in rame, come illustrati nell'*Allegato 1*, ottenuti preferibilmente tramite processo di estrusione a caldo, e forniti in barre dritte di lunghezza minima 4 m.
- **Deliverable 2:** 110 m di tegolino in rame, come illustrato nell'*Allegato 2*, ottenuti tramite processo di estrusione a caldo oppure tramite laminazione o altre lavorazioni meccaniche, e forniti in barre dritte di lunghezza minima 2 m. Tali tegolini dovranno essere dimensionati in modo tale che i nastri risultino leggermente pre-compressi dopo la compattazione finale del conduttore: il fornitore è libero di variare le misure indicate nell'*Allegato 2*, al fine di ottenere il risultato più soddisfacente.

- **Deliverable 3:** 20 m di cavo del tipo *BRAided Stack of Tapes* (BRAST), realizzato utilizzando tape *dummy* di acciaio di larghezza 4 mm, come illustrato in Fig. 1, da utilizzare per la qualifica del processo di trecciatura e per prove di avvolgimento; 190 m di cavo del tipo *BRAided Stack of Tapes* (BRAST), realizzato utilizzando tape HTS di larghezza 4 mm, come illustrato in Fig. 1. I nastri superconduttori e di acciaio saranno forniti da ENEA in conto lavorazione. I cavi dovranno essere forniti in pezzature di lunghezza minima 4 m. I fili in rame costitutivi della treccia dovranno avere un diametro variabile tra 0.10 mm e 0.25 mm, ed è lasciata libera al fornitore la scelta sui dettagli della trecciatura (numero di fili; gruppi; passo di twist) che produca una copertura di superficie di almeno l'80%, con una treccia che risulti ben aderente allo stack di nastri.

- **Deliverable 4:** 40 m di cavo del tipo *BRAided Stack of Tapes* (BRAST), realizzato utilizzando tape *dummy* di acciaio di larghezza 12 mm, come illustrato in Fig. 1, da utilizzare per la qualifica del processo di trecciatura e per prove di avvolgimento; 60 m di cavo del tipo *BRAided Stack of Tapes* (BRAST), realizzato utilizzando tape HTS di larghezza 12 mm, come illustrato in Fig. 1. I nastri superconduttori e di acciaio saranno forniti da ENEA in conto lavorazione. I cavi dovranno essere forniti in pezzature di lunghezza minima 4 m. I fili in rame costitutivi della treccia dovranno avere un diametro variabile tra 0.10 mm e 0.25 mm, ed è lasciata libera al fornitore la scelta sui dettagli della trecciatura (numero di fili; gruppi; passo di twist) che produca una copertura di superficie di almeno l'80%, con una treccia che risulti ben aderente allo stack di nastri.

- **Deliverable 5:** settori assemblati: inserimento di BRAST all'interno dei settori in rame, chiusura tramite tegolino in rame e fasciatura esterna con nastro in rame o in acciaio, con copertura del 50% della superficie del settore, come illustrato in Fig. 2. Dovranno essere prodotti: a) 54 m di settore riempito con 1 BRAST da 12 mm (Fig. 3-sinistra); b) 30 m di settore riempito con 6 BRAST da 4 mm (Fig. 3-destra). Per i settori di cui al punto b), è possibile che sarà necessaria una lavorazione tramite fresatura per l'allargamento della cava per l'inserimento dei 6 BRAST.

Le caratteristiche del nastro per la fasciatura dei settori saranno scelte dal fornitore nel range: larghezza tra 10 mm e 20 mm; spessore: tra 0.05 mm e 0.10 mm. Il nastro dovrà essere acquistato dal fornitore, e dovrà essere di rame oppure di acciaio inossidabile del tipo 304 L o superiore.

- **Deliverable 6:** cavo SECAS assemblato (come in Fig. 4), tramite riunitura di 6 settori attorno ad una spirale centrale in acciaio del tipo *ITER TF*, caratterizzata da: a) materiale: acciaio 304L o superiore; b) diametro esterno: 10 mm; b) larghezza della strip costituente: 6 mm; c) spessore della strip costituente: 1 mm; d) twist pitch: 9 mm. Al SECAS dovrà essere applicato un passo di *twist* di 1200 mm, e dovrà essere chiuso tramite nastratura in acciaio inossidabile del tipo 304 L o superiore, con copertura della superficie tra il 70% ed il 90%.

Le caratteristiche del nastro per la copertura esterna del cavo saranno scelte dal fornitore nel range: larghezza tra 20 mm e 40 mm; spessore: tra 0.10 mm e 0.2 mm. Il nastro dovrà essere acquistato dal fornitore, così come la spirale centrale in acciaio.

Si dovranno produrre: 2 lunghezze da 4 m ed 1 lunghezza da 1 m di SECAS con BRAST da 12 mm; 1 lunghezza da 4 m ed 1 lunghezza da 1 m di SECAS con BRAST da 4 mm.

- **Deliverable 7:** cavi SECAS "in jackettati" (come in Fig. 5 e meglio riportati nell'*Allegato 3*) tramite processo di inserimento e compattazione in tubi di acciaio di spessore maggiore o

uguale a 3 mm. Il processo di compattazione dovrà garantire una perfetta aderenza della parete interna del jacket alle costole più esterne dei profili in rame.

I tubi di acciaio dovranno essere del tipo 304 L oppure 316 L, o superiori. Le caratteristiche geometriche dei tubi potranno essere scelte dal fornitore, possono essere sia del tipo “*Round-in-Square*” (*RiS*) (a geometria esterna quadrata), oppure tondi. Nel caso di tubi *RiS*, con “spessore” dovrà intendersi quello misurato nel punto di minimo. I tubi dovranno essere acquistati dal fornitore.

Si dovranno produrre: 2 lunghezze da 4 m ed 1 lunghezza da 1 m di SECAS in jackettato con BRAFT da 12 mm; 1 lunghezza da 4 m ed 1 lunghezza da 1 m di SECAS in jackettato con BRAFT da 4 mm.

Si dovranno prevedere delle prove iniziali di jacketing per la messa a punto dei parametri di processo, e si potranno in tal caso utilizzare anche settori vuoti, privi di BRAFT.

- **Deliverable 8:** quattro tagli ad elettroerosione dei conduttori prodotti, per effettuare un’analisi di immagine. ENEA indicherà al fornitore le lunghezze su cui effettuare queste sezioni, tra tutte quelle prodotte, di cui al Deliverable 7.

- **Deliverable 9:** Progetto di un campione del tipo *SULTAN*, assemblato con due tra le lunghezze di conduttore SECAS di cui al Deliverable 7, che saranno scelte da ENEA. A titolo di esempio illustrativo a cui riferirsi, l’*Allegato 4* riporta i disegni tecnici di un analogo campione del tipo *SULTAN* che è stato prodotto in passato per un diverso progetto. Si richiede la progettazione ed i disegni tecnici esecutivi per tutti i pezzi meccanici necessari all’assemblaggio, al montaggio nella facility sperimentale, e al test operativo a temperatura criogenica e a piene condizioni operative. Le terminazioni ed il giunto di connessione dovranno essere progettate per poter sostenere una corrente operativa fino a 90 kA. Le strutture meccaniche (clamp) dovranno essere tali da sostenere i carichi elettromagnetici generati con corrente operativa di 90 kA e campo di background di 11 T. I disegni costruttivi di dettaglio dovranno includere i pezzi in rame/acciaio per realizzare le terminazioni; le scarpe di rame per realizzare il giunto di connessione tra due gambe adiacenti; i tubi per il circuito di raffreddamento del campione; le clamp di acciaio per il contenimento degli sforzi meccanici; gli spessori in vetroresina per l’isolamento elettrico. I disegni tecnici, ed un report di valutazione dei carichi meccanici e di analisi strutturali per i pezzi meccanici, dovranno essere sottoposti ad ENEA per approvazione.

- **Deliverable 10:** realizzazione di tutti i pezzi meccanici di cui al Deliverable 9, necessari all’assemblaggio di un campione del tipo *SULTAN* (fatto da due lunghezze da 4 m di conduttore SECAS di cui al Deliverable 7) e alla preparazione della terza lunghezza da 4 m per un successivo campione del tipo *SULTAN*.

4. Tempi di consegna

La durata del contratto, inclusa la fornitura di tutto il materiale richiesto, è di mesi 6 (sei) dalla data del verbale di inizio esecuzione. Luogo di consegna fornitura è il C.R. ENEA di Frascati.

5. References

[1] L. Muzzi *et al.*, *Design and Feasibility Assessment of an HTS Sector Shaped High-Current Conductor for Fusion Coils*, IEEE Trans. Appl. Supercond. Volume: **33**, Issue: 5, Art ID: 4200106 (August 2023); DOI: [10.1109/TASC.2023.3236592](https://doi.org/10.1109/TASC.2023.3236592) .

Giuseppe Clementino

A stylized handwritten signature, likely belonging to Giuseppe Clementino, consisting of a large loop and a trailing flourish.