

 ENEA NUC-FUSEN-COND	SPT-FATA	Pag. 1/8
	SPECIFICHE TECNICHE Fornitura di campioni di cavo superconduttore ad alta temperatura critica (HTS) per Quench test e di una bobina modello JCA ENEA-ENI	Rev. 0
		25/06/26

TITOLO	<i>Specifiche Tecniche per relative alla Fornitura di campioni di cavo superconduttore ad alta temperatura critica (HTS) per Quench test e di una bobina modello JCA ENEA-ENI</i>
Classificazione:	
Lista delle attività per fornitura di campioni di cavo superconduttore ad alta temperatura critica (HTS)per Quench test e di una bobina modello JCA ENEA-ENI	

1		05/06/25	A. Angrisani Armenio, G. de Marzi L. Muzzi.	G. Celentano
			Firma   	Firma
Rev	DESCRIZIONE	DATA	REDAZIONE	CONVALIDA

SPECIFICHE TECNICHE Fornitura di campioni di cavo
superconduttore ad alta temperatura critica (HTS) per
Quench test e di una bobina modello JCA ENEA-ENI

Rev. 0

25/06/26

 ENEA NUC-FUSEN-COND	SPT-FATA	Pag. 3/8
	SPECIFICHE TECNICHE Fornitura di campioni di cavo superconduttore ad alta temperatura critica (HTS) per Quench test e di una bobina modello JCA ENEA-ENI	Rev. 0
		25/06/24

SPECIFICHE TECNICHE PER FORNITURA DI CAMPIONI DI CAVO SUPERCONDUTTORE AD ALTA TEMPERATURA CRITICA (HTS) PER QUENCH TEST E DI UNA BOBINA MODELLO JCA ENEA-NI

Introduzione

Oggetto della presente fornitura è la produzione di cavi superconduttori basati su nastri HTS, del tipo BRAST-SECAS, recentemente proposto e sviluppato da ENEA. Al fine di verificare l'operatività di un sistema di "quench detection" basato su sensori in fibra ottica, sarà necessario assemblare un campione equipaggiato con tali sensori, da testare a corrente fino a 15000 A, ed in campo magnetico fino a 11 T nella facility svizzera SULTAN. Nel campione saranno indotti dei quench e sarà verificata la capacità dei sensori in fibra ottica di rilevare un tale evento. Il campione è costituito da due lunghezze dritte di conduttore di circa 3,5 m, collegate elettricamente da un bottom joint e con le opportune terminazioni per il collegamento all'alimentazione elettrica. In aggiunta, al fine di verificare la possibilità di avvolgere il cavo e dimostrare la performance su lunghezze maggiori, sarà necessario produrre una bobina modello costituita da tre spire, ed opportune terminazioni, per un test in azoto liquido ed auto-campo, da effettuarsi presso il Laboratorio Superconduttività di ENEA.

I requisiti di performance presi a riferimento per il conduttore HTS oggetto del presente contratto sono rappresentativi dell'operatività del modulo HTS del sistema Solenoide Centrale della Divertor Tokamak Test (DTT) facility.

La fornitura include i materiali, la messa a punto dei diversi processi di produzione, la manifattura delle lunghezze di conduttore, la progettazione del campione SULTAN e della bobina modello, la realizzazione di tutti i pezzi per il loro montaggio, e le spedizioni necessarie in tutte le fasi intermedie. I nastri superconduttori HTS saranno invece forniti da ENEA in conto lavorazione, e non sono pertanto oggetto della presente fornitura. L'assemblaggio delle terminazioni elettriche ed idrauliche dei campioni sarà realizzato da ENEA presso i propri laboratori, utilizzando i materiali e le componenti oggetto della presente fornitura.

Caratteristiche generali

La presente fornitura ha per oggetto la realizzazione di campioni prototipo di cavo superconduttore del tipo SECAS-BRAST, le relative strutture meccaniche per il test e una piccola bobina modello. Nello specifico è richiesta la fornitura di:

- Campioni di conduttore SECAS per test in SULTAN (Quench test):** n° 2 lunghezze di conduttore del tipo SECAS di lunghezza 4 m, che saranno utilizzate per assemblare un campione SULTAN per test elettromagnetico, basate 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, ed in jackettati all'interno di una opportuna camicia di acciaio. Per ciascuno di questi campioni dovranno essere forniti i componenti necessari per la realizzazione 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-JCA-Q1 e Q2;
- Campione di conduttore SECAS per prova di avvolgimento:** n° 1 campione di conduttore identico a quello di cui al punto 1, ma lungo circa 10 m. Campione SECAS-JCA-COIL1, da

 ENEA NUC-FUSEN-COND	SPT-FATA		Pag. 4/8
	SPECIFICHE TECNICHE Fornitura di campioni di cavo superconduttore ad alta temperatura critica (HTS) per Quench test e di una bobina modello JCA ENEA-ENI		Rev. 0
			25/06/24

utilizzare per la realizzazione di un avvolgimento modello di 3 spire su un raggio di 280 mm, da testare in auto-campo ed in bagno di azoto liquido presso il Laboratorio Superconduttività ENEA – Frascati.

- 3. Progettazione e fornitura di componenti e strutture meccaniche per l'assemblaggio:** Progettazione e realizzazione di tutti i materiali strutturali necessari per l'assembly del campione SULTAN, per il trasporto e per il test della bobina modello.
- 4. Campione di bobina modello costituito da 3 spire di conduttore SECAS:** Realizzazione della bobina modello di cui al punto 2, comprensiva delle terminazioni per la connessione agli alimentatori di corrente della facility sperimentale.

Per maggiori dettagli si faccia riferimento ai disegni tecnici allegati alle presenti specifiche, che ne costituiscono parte integrante (*Allegato 1* – profilo settoriale in rame; *Allegato 2* – tegolino in rame; *Allegato 3* – conduttore SECAS completo di jacket; *Allegati 4a e 4b* – specifiche tecniche di test e geometria campioni in SULTAN).

Attività relative al contratto

Per una migliore chiarezza delle attività relative al contratto in oggetto, abbiamo suddiviso la fornitura in diversi deliverable:

- **Deliverable 1 – Profili estrusi in rame**

D1.1: forniti in pezzature di lunghezza minima di 10 m. Il fornitore potrà decidere alternativamente di integrare il capillare all'interno dei tegolini in rame (si veda Deliverable D1.2). Quanto riportato negli Allegati 1 e 2 è da considerarsi un esempio di possibili configurazioni, a titolo illustrativo;

D1.2: 120 m di tegolino (filler) in rame con scasso per il contenimento della fibra ottica, come illustrato nell'Allegato 2, ottenuto tramite processo di estrusione a caldo oppure tramite laminazione o altre lavorazioni meccaniche, fornito in unità di lunghezza minima di 2 m.

- **Deliverable 2 – Cavi BRAST (BRAided Stack of Tapes)**

D2.1: 140 m di cavo del tipo BRAided Stack of Tapes (BRAST), realizzato utilizzando tape dummy di rame o di acciaio di larghezza 4 mm, da utilizzare per la qualifica del processo di trecciatura e per prove di avvolgimento. Il numero e lo spessore dei tape dummy utilizzati potranno essere scelti dal fornitore, in modo da garantire:

- a) uno spessore complessivo dello stack di nastri pari a 1.3 mm +/- 0.1 mm;
- b) uno spessore totale di acciaio pari a 0,6 mm +/- 0,1 mm.
- c) un numero di tape (di rame o di acciaio) maggiore o uguale a 10.

D2.2: 100 m di cavo BRAST realizzato utilizzando tape superconduttori HTS di larghezza 4 mm. Ciascun BRAST dovrà contenere al massimo 12 tape superconduttori: l'ENEA si riserva di comunicare al fornitore il numero esatto di tape superconduttori e tape dummy di rame da implementare in ciascun BRAST. I nastri HTS saranno forniti da ENEA in conto lavorazione. I tape potranno originare da produttori diversi: ENEA comunicherà al fornitore come distribuire i diversi tape nelle diverse unità di lunghezza di BRAST da produrre.

 ENEA NUC-FUSEN-COND	SPT-FATA	Pag. 5/8
	SPECIFICHE TECNICHE Fornitura di campioni di cavo superconduttore ad alta temperatura critica (HTS) per Quench test e di una bobina modello JCA ENEA-ENI	Rev. 0
		25/06/24

- a) I tape di acciaio e/o rame dummy saranno a carico del fornitore.
- b) I fili in rame costitutivi della treccia dovranno avere un diametro variabile tra 0,10 mm e 0,15 mm; è lasciata libera al fornitore la scelta sui dettagli della trecciatura (numero di fili, gruppi, passo di twist) che produca una copertura di superficie tra il 75% ed il 90%, con una treccia ben aderente allo stack di nastri.
- c) I cavi dovranno essere forniti in pezzature di lunghezza minima di 4 m.

• **Deliverable 3 – Cavi SECAS assemblati**

Cavi del tipo SECAS assemblati, ottenuti tramite:

- a) inserimento di 2 BRASST all'interno di ciascun settore in rame. ENEA comunicherà al fornitore come distribuire le diverse unità di lunghezza di BRASST (di cui al Deliverable 2), potenzialmente contenenti tape diversi, nelle diverse pezzature di cavo.
- b) inserimento negli slot degli opportuni tegolini in rame, con funzione di contenimento per i BRASST;
- c) fasciatura esterna tramite nastriatura in acciaio con copertura della superficie tra il 60% e l'80%. Le caratteristiche del nastro per la fasciatura potranno essere scelte dal fornitore nel range: larghezza tra 15 mm e 30 mm, spessore 0,05 mm. Il nastro dovrà essere acquistato dal fornitore;
- d) "twistatura" dei 5 settori, per formare il cavo. Il passo di twist dovrà essere scelto dal fornitore nel range 350 ÷ 500 mm.
- e) Inserimento di tubicini capillari in acciaio per il contenimento di fibre ottiche. I capillari dovranno essere acquistati dal fornitore, con un diametro interno adeguato alla fibra ottica standard da 250 µm, e con un diametro esterno non superiore a 1,4 mm. Come anticipato ai punti D1.1 e D1.2, il fornitore potrà decidere se e come integrare il capillare all'interno dei settori oppure dei tegolini in rame. Quanto riportato nell'Allegato tre è da considerarsi un esempio di possibili configurazioni, a titolo illustrativo;
- f) Il fornitore potrà proporre una tecnica alternativa di assemblaggio del cavo (ad esempio, twistando prima i 5 settori, ed inserendo soltanto successivamente i BRASST, i capillari e tegolini), ma dovrà garantire un parziale disaccoppiamento elettrico tra settori adiacenti. La scelta tecnica dovrà eventualmente essere discussa con ENEA per approvazione.

Dovranno essere prodotte le seguenti lunghezze di cavo SECAS:

D3.1: 2 x lunghezze da ~ 4 m di cavo SECAS contenente: 2 BRASST superconduttivi e 3 BRASST dummy;

D3.2: 1 lunghezza da ~ 10 m di cavo SECAS contenente: 2 BRASST superconduttivi e 3 BRASST dummy.

Deliverable 4 – Cavi SECAS injackettati

Cavi SECAS di cui al Deliverable 3, "injackettati" tramite processo di inserimento e compattazione in tubi di acciaio AISI di spessore maggiore o uguale a 2,5 mm, seguendo quanto indicato nell'Allegato 3. Il processo di compattazione dovrà garantire una perfetta aderenza della parete interna del jacket alle costole più esterne dei profili in rame.

Per maggiore rappresentatività, è preferibile utilizzare tubi del tipo Round-in-Square (RiS, geometria esterna quadrata e foro tondo) in acciaio 316LN; se i tempi di fornitura non saranno compatibili con quelli del presente contratto, potranno essere utilizzati tubi tondi in acciaio 304L oppure 316L oppure 316LN. La sezione del conduttore SECAS (cavo injackettato) è illustrata nell'Allegato 3.

Dovranno essere prodotte:

 ENEA NUC-FUSEN-COND	SPT-FATA	Pag. 6/8
	SPECIFICHE TECNICHE Fornitura di campioni di cavo superconduttore ad alta temperatura critica (HTS) per Quench test e di una bobina modello JCA ENEA-ENI	Rev. 0
		25/06/24

D4.1: 2 x lunghezze da ~ 4 m di conduttore SECAS injackettato e compattato (campioni SECAS-JCA-Q1 e Q2), con le quali sarà necessario assemblare un campione SULTAN;

D4.2: 1 x lunghezza da ~ 10 m di conduttore SECAS injackettato e compattato (campione SECAS-JCA-COIL1), del quale sarà costituito il prototipo di bobina modello a 3 spire.

Dovranno essere previste prove iniziali di jacketing per la messa a punto dei parametri di processo, per le quali si potranno utilizzare settori vuoti, privi di BRAST.

Incluso in questo Deliverable è la realizzazione di una sezione del conduttore tramite taglio ad elettroerosione, per verifica della geometria.

- **Deliverable 5 – Campione SULTAN (Quench test): progetto e componenti meccaniche**

Dovranno essere prodotti:

D5.1: Progetto e disegni tecnici di dettaglio, nonché fornitura di tutti i pezzi meccanici necessari all'assemblaggio di un campione del tipo SULTAN – Quench test, costituito da due delle lunghezze di conduttore di cui al **Deliverable 4.1**, ciascuna di ~3,5 m. L'Allegato 4a riporta le specifiche tecniche di test in SULTAN e della geometria tipica dei campioni da produrre; l'*Allegato 4b* riporta lo specifico caso dei conduttori HTS. Il campione, le strutture meccaniche, e le terminazioni che il fornitore progetterà e realizzerà dovranno essere compatibili con quanto illustrato in dettaglio nei documenti *Allegati 4a e 4b*. In particolare, il presente Deliverable dovrà includere:

- Pezzi in rame/acciaio per le terminazioni elettriche, con una faccia;
- Incluso nella fornitura è il processo di brasatura tra terminazioni elettriche e jacket di acciaio, che devono essere a tenuta di elio (inclusi processi di brasatura tra terminazioni e jacket di acciaio del cavo);
- Scarpe in rame per i giunti di connessione tra le due gambe adiacenti (bottom joint);
- Tubi per il circuito di raffreddamento del campione;
- Clamp in acciaio per il contenimento degli sforzi meccanici (da dimensionare per corrente operativa fino a 15000 A e campo di background di 11 T);
- Spessori in G10 (o equivalenti) per l'isolamento elettrico.

I disegni tecnici esecutivi e un report di valutazione dei carichi meccanici e dello stress sulle componenti strutturali dovranno essere sottoposti ad ENEA per approvazione prima dell'avvio della produzione.

- **Deliverable 6 – Bobina modello: realizzazione e struttura di supporto**

D6.1: Realizzazione e fornitura di una piccola bobina modello, costituita da 3 spire avvolte a layer, con una lunghezza di circa 10 m di conduttore, come indicato nel Deliverable 4 (campione SECAS-JCA-COIL-1). Il diametro interno di avvolgimento dipende dallo spessore del jacket di acciaio scelto. Per un jacket di spessore 2,5 mm, il diametro interno di avvolgimento dovrà essere: 579 +/- 3 mm; per un **jacket di spessore 4,5 mm** (come quello riportato come geometria ideale in *Allegato 3*) il diametro interno di avvolgimento dovrà essere: **575 +/- 3 mm**. Le 3 spire dovranno terminare con delle lunghezze dritte di conduttore, di lunghezza > 1 m, per poter realizzare le terminazioni elettriche per il test in azoto liquido fino ad una corrente massima di 10000 A.

Sono inclusi nel presente Deliverable:

- Struttura di supporto per il trasporto ed il test della bobina, da effettuarsi presso il Laboratorio Superconduttività di ENEA – Frascati, in bagno di azoto liquido, in auto-campo, e con una corrente massima di 10000 A;

	SPT-FATA	Pag. 7/8
	SPECIFICHE TECNICHE Fornitura di campioni di cavo superconduttore ad alta temperatura critica (HTS) per Quench test e di una bobina modello JCA ENEA-ENI	Rev. 0
		25/06/24

- b) Pezzi in rame/acciaio per le terminazioni elettriche della bobina;
- c) Processi di brasatura tra le terminazioni e il jacket di acciaio del cavo.

La struttura di supporto dovrà essere progettata per garantire la stabilità meccanica della bobina durante il trasporto e il test. Il fornitore dovrà fornire un disegno tecnico della struttura, da sottoporre ad approvazione di ENEA prima dell'avvio della produzione.

• Deliverable 7 –Report finale di produzione

Dovrà essere prodotto un rapporto finale contenente una descrizione dettagliata di quanto realizzato, incluse foto dei principali passaggi di realizzazione. A titolo non esaustivo, dovranno riportarsi:

- a) Una descrizione della geometria finale del conduttore, e delle sue dimensioni (jacket, cavo, BRAST, capillare, ecc.);
- b) Un dettaglio delle lunghezze di conduttore SECAS prodotte;
- c) Uno schema dei tape superconduttori utilizzati nei vari campioni;
- d) Un'immagine di un taglio ad elettroerosione;
- e) Un disegno tecnico del campione SULTAN, con il dettaglio delle componenti meccaniche e delle parti terminali;
- f) Un disegno tecnico della bobina modello, e delle strutture meccaniche di supporto;
- g) Analisi meccaniche di supporto per il dimensionamento delle strutture meccaniche del campione SULTAN e della struttura di supporto della bobina modello.

La seguente tabella riassume i Deliverable di fornitura di cui al precedente paragrafo.

Deliverable Number	Breve Descrizione	Quantità
D1.1	Profilo settoriale in rame di cui all' <i>Allegato 1</i>	120 m
D1.2	Tegolino in rame di cui all' <i>Allegato 2</i>	120 m
D2.1	BRAST realizzato con tape dummy	140 m
D2.2	BRAST realizzato con tape superconduttori	100 m
D3.1	Cavo assemblato (settoe/BRAST/capillare per fibra ottica/tegolino/nastratura/twist)	2 x 4 m
D3.2	Cavo assemblato (settoe/BRAST/capillare per fibra ottica/tegolino/nastratura/twist)	10 m
D4.1	Conduttore SECAS Completo di jacket compattato	2 x ~ 4 m
D4.2	Conduttore SECAS Completo di jacket compattato	~ 10 m
D5.1	Componenti per terminazioni e strutture meccaniche	
D6.1	Bobina modello di 3 spire	
D7.1	Report finale	

Requisiti tecnici generali

Per tutti i Deliverable si applicano i seguenti requisiti generali:

- a) Le deformazioni agenti sui tape superconduttori HTS durante tutti i processi produttivi (trecciatura, jacketing, avvolgimento, ecc.) devono rimanere al di sotto dello 0,2% per evitare la degradazione delle prestazioni elettriche.

 ENEA NUC-FUSEN-COND	SPT-FATA	Pag. 8/8
	SPECIFICHE TECNICHE Fornitura di campioni di cavo superconduttore ad alta temperatura critica (HTS) per Quench test e di una bobina modello JCA ENEA-ENI	Rev. 0
		25/06/24

- b) La temperatura a cui i tape superconduttori HTS dovranno essere sottoposti durante tutti i processi produttivi non dovrà mai superare i 200 °C.
- c) Il fornitore dovrà definire e documentare le procedure di processo per ciascuna fase produttiva, e sottoporre ad ENEA per approvazione prima dell'avvio della produzione: processo di realizzazione del cavo con applicazione del twist; scelta del jacket di acciaio (geometria e dimensioni); disegni tecnici delle strutture meccaniche e terminazioni per il campione SULTAN, con analisi meccaniche a supporto; disegni tecnici della struttura di supporto della bobina modello, con analisi meccaniche a supporto.
- d) Per ciascuna fase produttiva il fornitore dovrà produrre e consegnare ad ENEA adeguata documentazione di tracciabilità e inspection records.
- e) Il rame impiegato per i profili settoriali dovrà essere del grado ETP (Electrolytic Tough Pitch) o superiore, con purezza $\geq 99,9\%$.
- f) I materiali in acciaio dovranno essere del tipo AISI 304L, 316L o 316LN, o superiori.
- g) Tutti i materiali consumabili (nastri, capillari, materiale di brasatura) saranno a carico del fornitore, salvo i tape HTS che saranno forniti da ENEA in conto lavorazione.
- h) Le spedizioni intermedie dei cavi (dalla ditta ad ENEA Frascati, da ENEA Frascati alla facility SULTAN e ritorno), trasporto e imballaggio, sono a carico del fornitore.

Tempi di consegna

La durata del contratto, inclusa la fornitura di tutto il materiale richiesto, è di 18 mesi (diciotto) dalla data del verbale di inizio esecuzione. Il luogo di consegna della fornitura è il C.R. ENEA di Frascati.

Valutazione economica

Per soddisfare tutte le nostre richieste, la stima economica totale del lavoro di fornitura secondo le specifiche tecniche si dovrebbe aggirare attorno ai **160.000,00 €**.

Le uniche ditte in Europa che potrebbero potenzialmente possedere competenze ed attrezzature adeguate alla fornitura richiesta sono le seguenti:

- ICAS s.r.l.
- ASG Superconductors.
- Nexans.