

# Participarea Romaniei la EUROfusion WPMAG si cercetari complementare

---

**Director de proiect : Ion Tiseanu (INFLPR, [ion.tiseanu@inflpr.ro](mailto:ion.tiseanu@inflpr.ro))**  
**Microtomografia de raze X ca metoda de asigurarea calitatii in cercetarea-dezvoltarea sistemului de magneti al tokamakului DEMO**

DEMO va fi o instalatie tokamak de clasa "centrala energetica de fuziune nucleara" capabila sa furnizeze in reseaua elctrica cateva sute de MW la o descarcare. Proiectul EUROFUSION WPMAG are ca principal obiectiv elaborarea unui concept tehnic integrat al sistemului de magneti din tokamak-ul DEMO. Acest sistem de magneti DEMO este contituit din bobinele de camp toroidal (TF), sistemul de bobine de camp poloidal (PF) si solenoidul central (CS).

Sub-proiectul WPMAG-IAP este o parte a proiectului principal "Power Plant Physics & Technology" (PPPT) – "Magnet System" (WPMAG) si contine toate activitatile care trebuiesc indeplinite de IFA (Institutul de Fizica Atomica) in ceea ce priveste cercetarea si dezvoltarea conceptului de sistem de magneti supraconductor conventionali (de joasa temperatura) si avansati (de inalta temperatura).

In cadrul programului de lucru Magnet System (WPMAG) sunt implicate doua grupuri ale unitatii romanesti de cercetare: grupul de microtomografie cu raze X a Institutului de Fizica Laserilor, Plasmei si a Radiatiei (INFLPR) și grupul de supraconductibilitate, spintronică și stiința suprafețelor (C4S) a Universității Tehnice din Cluj-Napoca (UTCN).

Grupul de microtomografie cu raze X este implicat în examinarea noninvazivă a structurii supraconductorilor TF prin tomografie computerizata de raze X (XCT) iar grupul C4S va contribui la programul de lucru Advanced Magnet Technologies (AMT) a carui obiectiv este caracterizare benzilor supraconductoare HTS de înaltă temperatură, fabricate industrial.

**Perioada de desfasurare:** 2014- 2022

## **Obiective:**

- Studii de optimizare a metodelor de examinare prin tomografia de raze X (XCT) a prototipurilor de cablu supraconductor pentru tokamakul DEMO. Stabilirea parametrilor optimi de operare a sistemului XCT si a configuratiilor de scanare
- Aplicarea metodei optime de reconstructie in scopul examinarii arhitecturii cablurilor supraconductoare. Evaluarea calitativa a defectelor de deformare in urma procesului de compactare.
- Determinarea distributiei de spatii vide (voiduri) si a traiectoriilor firelor supraconductoare pe un segment de cablu.
- Testarea performantelor benzilor HTS disponibile pe piata (dependenta JC de rasucire si indoire axiala)

**Etapele si activitati:**

- Achizitionarea esantioanelor de conductor TF fabricate in contextul proiectului WPMAG. Evaluarea fezabilitatii examinarii prin tomografie de raze X.
- Studii de optimizare a masuratorilor de tomografie de raze X pe probe de supraconductor DEMO
- Achizitionarea benzilor supraconductoare de la SuperPower, American Superconductor si SUNAM. Masuratori preliminare ale  $JC(B,T)$  la diferite campuri (0-14T) si temperaturi (4-77K).
- Dezvoltarea de metode de reconstructie adecvate pentru examinarea cantitativa a cablurilor supraconductoare TF DEMO
- Evaluarea preliminara a defectelor de deformare a prototipurilor de cabluri DEMO
- Masuratori comparative de  $JC(B,T)$ . Proiectarea si realizarea echipamentului experimental pentru efectuarea testelor de torsiune si incovoiere.
- Procesarea avansata a datelor tomografice: i) pozitionarea strandurilor in sectiune; ii) calculul "void fraction" local; iii) determinarea traiectoriilor firelor in 3D.
- Determinarea dependentei curentului critic de unghiul de incovoiere si de torsiune. Discutarea rezultatelor experimentale obtinute prin raportarea acestora la stadiul actual de cercetare mentionat in literatura de specialitate.

**Parteneri externi:**

- Institutul National CD pentru Fizica Laserilor, Plasmei si Radiatiilor (INFLPR)
- Universitatea Tehnica Cluj-Napoca (UTCN)
- DEMO Magnet Conceptual Design and Advanced Magnet Technology
- Super Power Inc.( HTS Tapes)
- American Superconductor Corporation.( HTS Tapes)
- SuNAM Co. ( HTS Tapes)
- Fujikura Ltd. ( HTS Tapes)
- SuperOx.( HTS Tapes)

**Rezultatele obtinute:**

În perioada de raportare au fost efectuate următoarele activități de cercetare: primirea elementelor de proiectare ale conductoarelor TF fabricate în contextul WPMAG, captarea dimensiunii geometrice și propunerea nivelelor de condiționare (îndreptarea și/sau subțierea anvelopei) pentru o examinare optima. In continuare s-a dezvoltat o configuratie de scanare tomografica care sa fie utilizata in analiza nedistructiva a arhitecturii cablurilor supraconductoare de tip "Cable-in-Conduit-Conductor" (CICC) pentru instalatia tokamak DEMO. In instalatia tomografica din INFLPR s-a achizitionat si implementat un nou tip de detector de raze X de energii mari, cu rezolutie spatiaala foarte inalta de ~27 microni/pixel, ce este combinat cu modul de operare TDI (Time Delayed Integration). Acest

detector, in prezent aflat in faza de testare, ne va permite achizitia de radiografii digitale de mare fidelitate si cu raport semnal/zgomot imbunatatit.

Adicional, am realizat o prima serie de masuratori XCT de energie inalta (450 keV) pe o macheta a cablului DEMO TF. Desi rezolutia spatiala a sistemului de XCT de inalta energie este semnificativ mai mica decat a microtomografului din INFLPR, prin imbunatatirea metodelor de post-procesare a imaginilor am obtinut o rata foarte buna de detectare a firelor. Acesta este un rezultat excelent luand in considerare ca diametrul firelor cablului DEMO TF este mult mai mare decat cel al firelor incluse in macheta noastra.

De asemenea obtinerea de imagini tomografice de mare fidelitate a permis determinarea automata a traiectoriilor firelor de-a lungul probelor. Acest lucru reprezinta ingredientul cheie pentru modelarea complexa a proprietatilor mecanice, electrice si magnetice ale cablurilor supraconductoare de interes pentru tehnologia de fuziune.

Recent, s-au realizat primele masuratori tomografice pe un prototip de cablu DEMO fabricat de ENEA Frascati. Metodologia de procesare de imagini a fost imbunatatita si testata pe o machete realizata anterior ce reprezinta un cablu JT60-SA constituit din trei sectiuni. Detectia si pozitionarea firelor supraconductoare s-a realizat prin dezvoltarea si implementarea unui metode fotometrice, care consta in fitarea distributiei nivelelor de gri din imaginile tomografoice utilizand functia profile Gaussiene 2D. Această metodologie a fost aplicata cu succes pe tomograme ale diferitelor tipuri de cabluri CICC (TFQL, JTF si DEMOI) atingand o rata de detectie a firelor de peste 95% .

Principalele etape ale algoritmilor fotometrici sunt:

1. Căutarea și localizarea valorilor de densitate mare de pixeli (puncte sursă), cu luminozitate pozitivă;
2. Aplicarea criteriilor de respingere pentru a distinge secțiunea “strand” de zgomotul de fond;
3. Aplicarea unei subrutine capabilă să distingă o clasă de detectii non-strand, inclusiv mantaua cablului CICC sau canalele interne de racire cu He.

Desi analiza fotometrica poate fi utilizata in detectarea prezentei firelor supraconductoare si a celor de Cu din cablurile DEMO, de zgomotul ridicat din imaginile tomografice asociate trebuie diminuat. In prezent lucram la imbunatatirea ratei de detectie a pozitiilor centroid prin adaptarea unor metode mai avansate de fitare neliniara ce se pot aplica datelor cu zgomot ridicat. Primele teste arata ca într-o formulare funcțională sau cumulativa, profilele Voight par sa se potriveasca mai bine decat cele Gaussiene.

#### **Publicatii:**

##### *Articole*

[1] Ion Tiseanu, Louis Zani, Catalin-Stefan Tiseanu, Teddy Craciunescu, Cosmin Dobra, Accurate 3D modeling of Cable in Conduit Conductor type superconductors by X-ray microtomography, Fusion Engineering and Design 07/2015; DOI: 10.1016/j.fusengdes.2015.06.111

[2] L. Zani et al., Applied Superconductivity, IEEE Transactions on (Volume:24 , Issue: 3 ) 2014.

[3] Ion Tiseanu, et al., Fus. Eng. Des., vol. 88, no. 9-10, pp.1613-1618, 2013.

**Persoanele de contact:** INFLPR – I. Tiseanu ([ion.tiseanu@gmail.com](mailto:ion.tiseanu@gmail.com)), UTC-N – T. Petrisor ([traian.petrisor@phys.utcluj.ro](mailto:traian.petrisor@phys.utcluj.ro))

---

## **Examinarea tomografică a prototipurilor de conductori DEMO-TF**

Sistemele bazate pe magneți supraconductori utilizați în reactoarele de fuziune se bazează pe conductori de tip CICC (Cable-in Conduit Conductor). Aceștia reprezintă o structură complexă care conține pachete de superconductori răsuciți din fire de Cu aranjate într-o configurație care permite răcirea acestora.

Microtomografia 3D a devenit o metodă eficientă pentru a furniza parametri geometrici precizi precum raportul de goluri locale și factorul de răsucire al firelor. În cadrul laboratorului de microtomografie din INFLPR, s-au dezvoltat modele numerice și activități experimentale pentru optimizarea tehnicilor de tomografie cu raze X care au fost utilizate pentru realizarea proiectului WPMAG.

Modelele numerice constau în realizarea unor simulări Monte Carlo privind generarea și transportul radiației X printr-o configurație tomografică cu scopul de a stabili aplicabilitatea analizei prin CT a unor structuri relativ mari de conductori DEMO TF. Atât superconductorii cât și îmbinările dintre acestea au fost analizate în două configurații diferite, ținându-se cont de tipul de sursă de raze X și energia fotonilor generați. Astfel s-a putut simula o serie de cazuri în care cablurile prezintă defecte microstructurale ale firelor supraconductoare precum goluri și fire deformate.

Activitatea experimentală a fost realizată în vederea optimizării măsurătorilor prin CT asupra unor cabluri CEA DEMO aflate încă în stadiu de dezvoltare. Un algoritm automat bazat pe analiza fotometrică a fost dezvoltat pentru detecția firelor și determinarea centroizilor acestora. În plus, s-a dezvoltat o tehnică de îmbunătățire a rezoluției spațiale cu scopul vizualizării 3D a microstructurilor ale unui fir sau a unui triplet de fire de Nb<sub>3</sub>Sn.

## **Simulări Monte-Carlo privind analiza prin tomografie a conductorilor DEMO TF**

În 2017 s-a realizat un studiu de fezabilitate asupra analizei prin tomografie a cablurilor DEMO TF prin utilizarea unor modele numerice de simulare. Analiza cablurilor DEMO TF (ENEA) a căror nivel de compactare este foarte ridicat, a presupus realizarea unor simulări Monte-Carlo asupra configurației complete de tomografie. În cadrul acestor simulări s-a demonstrat că un sistem de tomografie cu un fascicul de energie mai mare de 300 keV este potrivit pentru inspecția îmbinărilor dintre cablurile DEMO TF. În cadrul acestor modelări numerice au fost simulate diferite scenarii de defecte microstructurale ale conductorilor.

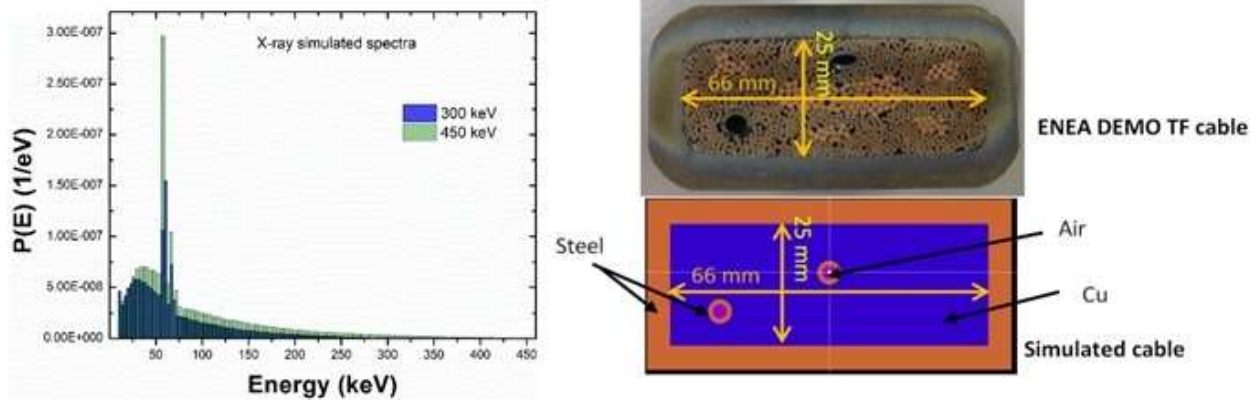


Figura 1. Stânga: spectrul de raze X simulat pentru un fascicul de electroni de energie 300 și 450 keV; Dreapta: Fotografia unui cablu DEMO TF (ENEA) și geometria corespunzătoare simulată.

Simularea s-a realizat în doi pași. În prima parte s-a generat spectrul de raze X prin simularea unei ținte de wolfram bombardată cu un fascicul de electroni de energie 300 și 450 keV. Programul de simulare Monte-Carlo (PENLOPE2014) poate genera liniile caracteristice ale wolframului, acest lucru fiind un aspect foarte important pentru o analiză detaliată. În a doua parte a modelării numerice, a fost simulat transportul fotonilor prin Cablu, ținând cont de configurația tomografică alcătuit dintr-o sursă de raze X de tip microfocș al cărui spectru a fost calculat în prima parte. Configurația geometrică simulată asupra cablului DEMO TF a fost prezentată în figura 1 dreapta. Modelarea numerică a fost optimizată astfel încât să se analizeze zona cea mai dificilă de penetrat de către radiația X, considerând astfel că rezultatele pot aplica și pe structuri mai puțin complicate decât îmbinările cablurilor DEMO TF.

Totuși, geometria prezentată în figura 1 dreapta nu este potrivită pentru inspecția firelor deoarece în această configurație firele supraconductoare sunt reprezentate ca o bucată uniformă de Cu. Pentru a simplifica geometria simulată și pentru a reduce timpul de calcul, cablul DEMO TF a fost reprezentat ca un obiect de 2x2.5 cm grosime care conține 24 de fire (1mm diametru) care sunt incluse într-un material omogen de Cu. În vederea obținerii unui studiu mai detaliat, detectorul de radiații a fost definit ca un paralelipiped dreptunghic alcătuit din oxisulfid de gadoliniu (GOS) având dimensiunile de 9x9x0.05 cm, iar sursa de raze X ca un fascicul conic de radiație cu apertură de 5 $\sigma$ . Simularea detecției unor defecte a fost implementată pentru câteva posibile configurații, atât pentru un spectru energetic obținut la 300 keV, cât și la 450 keV. Comparând rezultatele obținute s-a putut observa că ambele configurații tomografice sunt potrivite pentru a identifica tipul de defect pe baza intensității de semnal. De asemenea, s-a analizat cum este influențată intensitatea semnalului în funcție de grosimea învelișului de oțel al cablului. Astfel, s-a constatat că intensitatea semnalului crește semnificativ prin reducerea grosimii simulate a învelișului (de la 0.5 la 0.25 cm).

### Evaluarea integrității structurale a cablului CEA DEMO prin tomografia de raze X

În 2017 a fost proiectat un nou model de cablu CEA DEMO alcătuit dintr-un mănunchi de fire supraconductoare de Cu, dar fără înveliș exterior. În acest stadiu de fabricare, analiza cablului prin tomografie de raze X este ideală deoarece absența învelișului permite achiziția datelor print-un raport semnal-zgomot ridicat Prin procesarea imaginilor și analiza fotometrică, s-a dezvoltat un algoritm de poziționare și detecție a firelor supraconductoare care se bazează pe detecția maximelor locale și integrarea distribuției Gausiene 2D eliptice. Algoritmul dezvoltat s-a dovedit a fi foarte eficient, având o rată de detecție foarte ridicată (figura 2.c). Realizând câteva adaptări și îmbunătățiri, care sunt momentan în curs de realizare, este posibil să se atingă o precizie de detecție și localizare a firelor de până la 100%.

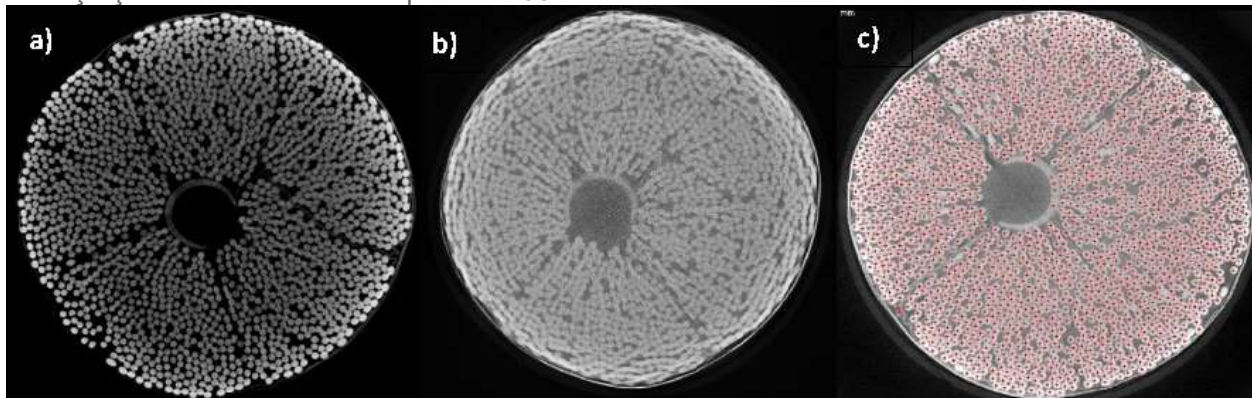


Figura 2. Vizualizarea în secțiune a cablului CEA DEMO prin tomografia de raze X obținută în următoarele condiții: a) cu împrăștieri scăzute a radiației de raze X, b) împrăștieri puternice a radiației de raze X, c) după aplicarea algoritmului de detecție a firelor pe o imagine obținută în cele mai dificile condiții (rata de detecție >98%);

---

### **Tehnici de caracterizare electrică, magnetică și de imagistică de raze X pentru modelarea 3D a firelor și cablurilor supraconductoare de interes pentru tehnologia de fuziune**

Proiectul urmărește studiarea potențialului materialelor supraconductoare de temperatură înaltă (HTS) și MgB<sub>2</sub> pentru aplicații în instalațiile avansate de fuziune (NEXT, DEMO). Scalarea sistemului de magneti de la tokamakul ITER pentru cerințele instalației DEMO prezintă câteva provocări legate de tehnologia actuală folosită, bazată pe supraconductori convenționali (de temperatură joasă). În ultimii ani s-a înregistrat un progres urias în fabricarea benzilor supraconductoare de temperatură înaltă (HTS). Deși benzile HTS sunt disponibile pe piață, comunitatea științifică face mari eforturi pentru a îmbunătăți proprietățile de supraconductivitate ale acestora.

Obiectivul general al proiectului este rezolvarea unor probleme cheie ale benzilor supraconductoare de temperatura inalta (HTS) pentru fabricarea bobinelor supraconductoare pentru energetica de fuziune. Acest obiectiv se va atinge prin:

- Dezvoltarea unor procese efective (scalabile industrial) pentru depunerea epitaxiala a filmelor nanocompozite YBCO / BZO si YTO prin metode chimice ce utilizeaza precursori "low florine".
- Investigarea si modelarea mecanismelor pinning in filmele epitaxiale YBCO.
- Efectul de dopare si metoda de fabricare a proprietatilor microstructurale ale MgB2.
- Testarea performantelor benzilor HTS disponibile comercial si corelarea rezultatelor obtinute cu cele obtinute in activitatea de cercetare pentru a prevedea dezvoltarile ulterioare in acest domeniu.

Un alt obiectiv important este dezvoltarea si utilizarea sistematica a analizei prin microtomografie de raze X ( $\mu$ XCT) a benzilor si firelor MgB2 ca metoda oficiala de inspectie a integritatii microstructurale.

**Perioada de desfasurare:** 2014-2016

**Etape:**

- Depunerea si caracterizarea filmelor nanocompozite epitaxiale de YBCO /BZO
- Investigarea rolului centrilor de pinning BaZrO3 (BZO) in proprietatile de transport ale YBCO/BZO
- Modelarea mecanismului de pinning in filmele YBCO
- Testarea performantelor benzilor HTS disponibile comercial
- Urmarirea progresului in fabricarea industrial a benzilor HTS
- Maparea compozitiei 3D a benzilor HTS prin microtomografie de raze X ( $\mu$ XCT)
- Monitorizarea sintezei supraconductorilor de tip MgB2 prin  $\mu$ XCT

Analiza microstructurala a benzilor si firelor MgB2 prin  $\mu$ XCT

**Rezultate obtinute:**

Microtomografia de raze X ( $\mu$ XCT) a fost aplicata pentru analiza microstructurala a probelor supraconductoare de MgB2 in format "bulk", banda si filme subtiri.  $\mu$ XCT a fost folosita prima data pentru vizualizarea structurii unei benzi MgB2 a unui film subtire, precursor amorf, non-supraconductor de MgB2 depus pe un substrat de Al2O3 si a unui film subtire de MgB2 supraconductor reactat. Analiza microXCT arata ca benzile de MgB2 au o microstructura relativ uniforma fata de esantioanele de material bulk, dar se pot observa cu usurinta si regiuni cu densitati diferite. Imagini 3D, precum si sectiunile selectate, pot furniza de asemenea informatii referitoare la forma miezului benzii sau a compozitului "core-sheath", la geometria interfetei metal-supraconductor si la incidenta microfisurilor sau a porilor de dimensiuni mari.

În acest proiect am demonstrat că tehnica  $\mu$ XRT are câteva avantaje majore în caracterizarea firelor supraconductoare precum:

1.  $\mu$ XRT este utilă pentru descoperirea neinvazivă a macro-defectelor relevante ascunse și observarea formei lor 3D
2.  $\mu$ XRT permite vizualizarea 3D a integrității geometrice a componentelor firelor compozite și determinarea unor parametri geometrice în manieră calitativă și cantitativă
3.  $\mu$ XRT are un bun potențial pentru caracterizarea in-situ non-distructivă a firelor în timpul procesărilor termo-mecanice sau în timpul torsurii acestora
4.  $\mu$ XRT oferă noi posibilități în înțelegerea relațiilor dintre procesarea, arhitectura și caracteristicile supraconductoare ale firelor compozite. Astfel se pot fabrica fire cu caracteristici funcționale îmbunătățite sau optimizate.

Au fost raportate creșterea epitaxială și proprietățile supraconductoare ale filmelor nanocompozite YBCO-BaZrO<sub>3</sub> crescute pe substraturi de (100) STO single-crystalline printr-o tehnică de depunere bazată pe o soluție chimică „low fluorine”. Această metodă prezintă câteva avantaje: elimină evoluția acidului hidrofluoric și în consecință permite depunerea unor filme mai groase de YBCO, elimină problemele legate de sublimarea trifluoroacetatului de cupru și scurtează timpul de conversie a filmului precursor. Am observat că doparea filmelor YBCO cu BaZrO<sub>3</sub> este acompaniată de o creștere remarcabilă a parametrului c-axis lattice. Filme epitaxiale nanocompozite YBCO-BZO cu (005) factorul  $\omega$  FWHM la unghi mic de 0.1 grade au fost obținute pe substraturi de (100) STO, cu o grosime cuprinsă în intervalul 500-600 nm. În urma investigațiilor asupra secțiunii eficiente prin TEM s-au observat filme nanocompozite de YBCO dense și lipsite de fisuri. Centrul de pinning al particulei sferice BZO este distribuit uniform în matricea YBCO cu un diametru de 15-30nm. Valorile JC au arătat o intensificare a pinning-ului vortexului datorită densității crescute de defecte în matricea YBCO indusă de nanoparticule BZO orientate aleator. Proprietățile puternic intensificate ale supraconductorului YBCO au fost identificate pentru o concentrație molară de 10 % BZO.

#### **Determinarea factorului de torsură “twist-pitch” la un supraconductor Nb<sub>3</sub>Sn**

În această perioadă de raportare am realizat examinarea tomografică a unui fir supraconductor de Nb<sub>3</sub>Sn utilizat la fabricarea sistemului de magneti ITER și DEMO. Principalul scop al investigației non invazive este determinarea factorului de torsură a filamentelor de Nb<sub>3</sub>Sn înglobate în matricea de cupru. Determinarea factorului de torsură s-a realizat prin două metode: prima metodă constă în medierea factorilor de torsură obținuți din procesarea imaginilor tomografice ce au fost colectate prin scanări de înaltă rezoluție a unor porțiuni din firul supraconductor ce sunt distribuite echidistant; în a doua metodă se scanează întreaga lungime a firului însă rezoluția imaginilor tomografice este mult redusă față de cele obținute prin prima metodă.

Prin utilizarea primei metode s-au obținut imagini radiografice clare ale filamentelor de Nb<sub>3</sub>Sn (Figura 1) cu o rezoluție de  $\sim 0.9 \mu\text{m}/\text{voxel}$ . Astfel s-a putut determina geometria și caracteristicile



dimensionale a fiecarui filament de Nb<sub>3</sub>Sn precum și a barierei de Nb care înconjoară miezul . Fiecare filament de Nb<sub>3</sub>Sn a fost analizat separat prin etape succesive de prelucrare a imaginii cum ar fi aliniere, filtrare și segmentare. Pe parcurs s-au putut observa și cuantifica erori de construcție atât a mantalei cât și a filamentelor. Luând în considerare rezoluția obținută, pentru un singur experiment de determinare a factorului de torsadă s-au putut investiga doar 1.2 mm din lungimea filamentelor din cei ~15 mm de interes. De aceea pentru determinarea factorului de răsucire a filamentelor s-au efectuat 10 măsurători distribuite echidistant de-a lungul lungimii firului, iar factorul de torsadă a fost determinat prin mediere. Rezultatele obținute au sugerat că filamentele de Nb<sub>3</sub>Sn realizează o răsucire completă (de 360 de grade) pe o lungime de 13.75 mm.

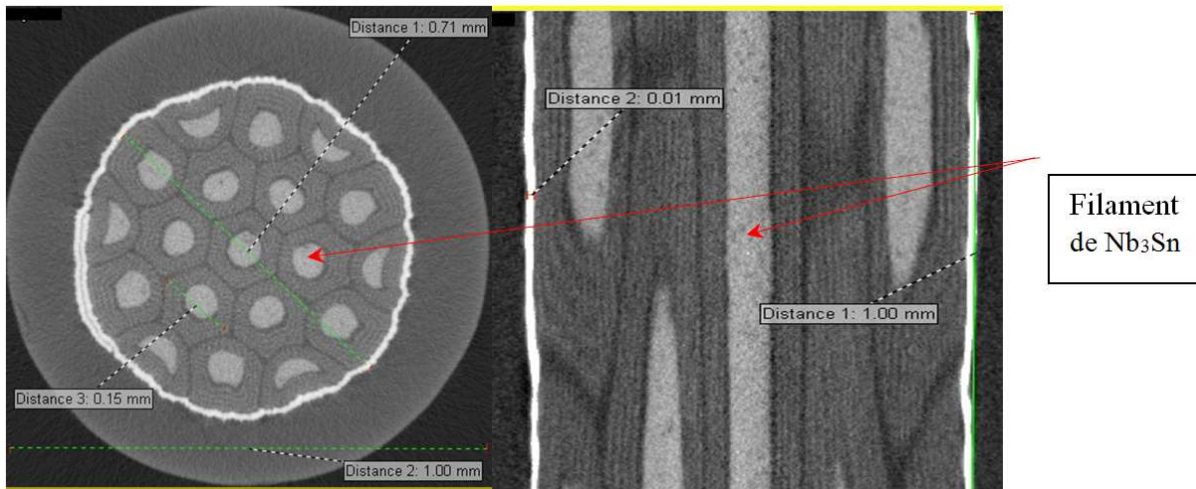


Figura 1 Secțiuni microtomografice ale unui fir de Nb<sub>3</sub>Sn: secțiune transversală– stanga, secțiune axială - dreapta. Componentele principale ale firului supraconductor: filamente, bariera Nb, matrice de cupru sunt foarte bine evidențiate în imaginile de înaltă rezoluție.

A doua metodă reprezintă o metodă de verificare a rezultatelor obținute în primul caz și constă în realizarea unui experiment neinvaziv de tomografie ce cuprinde toată lungimea firului supraconductor însă la o rezoluție de ~10.85 μm/voxel, adică cu peste un ordin de mărime mai slabă decât prima metodă. În acest caz filamentele nu se mai disting clar, însă pot fi identificate de-a lungul întregului fir supraconductor (~15 mm). Prin această metodă s-a putut valida valoarea factorului de torsadă calculată în prima metodă.

În următoarea etapă a acestui proiect se va utiliza o nouă configurație de tomografie ce se bazează pe un nou tip de detector de raze X de mare energie de tip TDI (Time Delay Integration).

#### Publicatii:

##### Articole

- [1] P. Badica, I. Tiseanu, G. Aldica, T. Craciunescu, V. Sandu, G. Jakob, M. Rindfleisch, Qualitative comparative analysis of MgB<sub>2</sub> powder-in-tube wires: superconductivity

and X-ray cone-beam microtomograph, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials , 17 , pag: 1636-1649 , 11-12 , 2015

**Persoane de contact:**

INFLPR – I. Tiseanu ([ion.tiseanu@gmail.com](mailto:ion.tiseanu@gmail.com)), UTC-N – T. Petrisor ([traian.petrisor@phys.utcluj.ro](mailto:traian.petrisor@phys.utcluj.ro))

---

**Dezvoltarea unei metode de exameninre prin tomografie computerizată de mare rezoluție pentru identificarea firelor supraconductoare și a cablurilor ce au fost supuse la teste mecanice**

Scopul acestui proiect a fost acela de a obține reconstrucții tomografice cu rezoluție ridicată de ordinul micronilor pentru a analiza performanța firelor supraconductoare care au fost dezvoltate pentru integrarea acestora in sistemele de confinare magnetică prin tehnologia de fuziune. Firele supraconductoare de Nb<sub>3</sub>Sn au fost analizate prin combinarea a doua metode si anume: radiografiere digitală utilizând un detector de tip TDI (8192x256 de pixeli pătrați cu latura de 27 μm) pentru detectarea neomogenitatilor și metoda de tomografie cu raze X (detector de tip “flat-panel” cu o matrice de 1929x1536 pixeli cu latura de 75 μm). Combinarea acestor două metode s-a realizat în cadrul laboratorului de microtomografie de raze X din INFLPR.

Utilizarea unui detector TDI într-un sisteme de tomografie cu raze X nu este o tehnică practică pentru o scanare tomografică, însă prezintă avantajul de a furniza imagini radiografice de calitate bună. De aceea, un număr mare de imperfecțiuni de fabricatie pot fi evidențiate utilizând acest detector TDI de mare precizie.

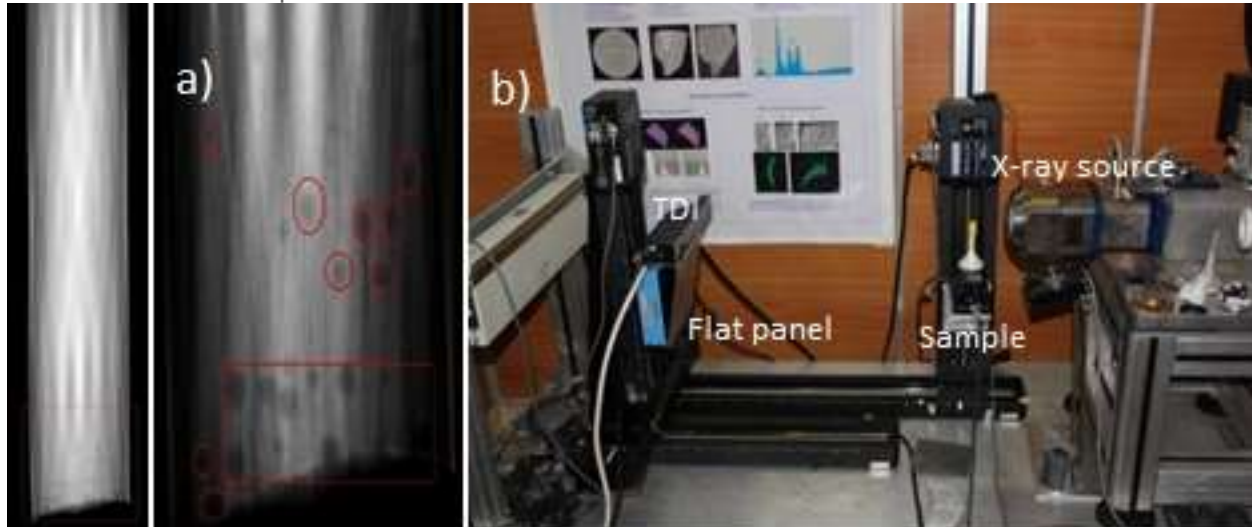


Figura 1. Radiografie digitala a unui fir supraconductor de Nb<sub>3</sub>Sn (a);Dispozitivul experimental de tomografiere cu detector TDI si Flat-panel (b);

În figura 2 b se poate observa că rezoluția imaginii tomografice este comparabilă cu cea din imaginea obținută cu ajutorul unui SEM (figura 2 a). Diametrul real al unui fir este de 1mm, fiind de asemenea determinat prin măsurarea coordonatelor din imaginea tomografică reconstruită.

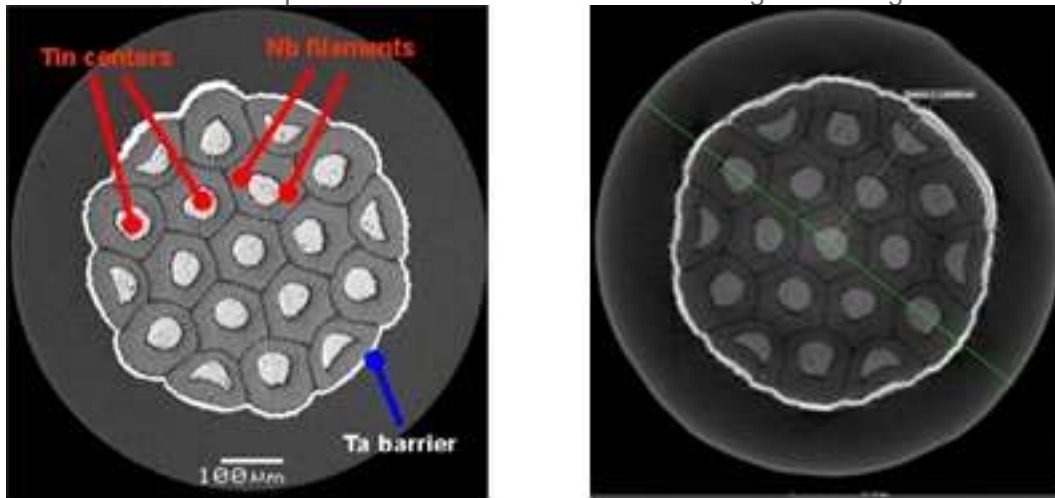


Figura 2 Imagine SEM a unui fir de Nb<sub>3</sub>Sn (a); Microtomografie de înaltă rezoluție comparabilă cu imaginea SEM (b);

Imaginile tomografice de raze X sunt utile pentru detecția golurilor generate de depunerile de Sn sau a imperfecțiunilor din barierele de Ta.

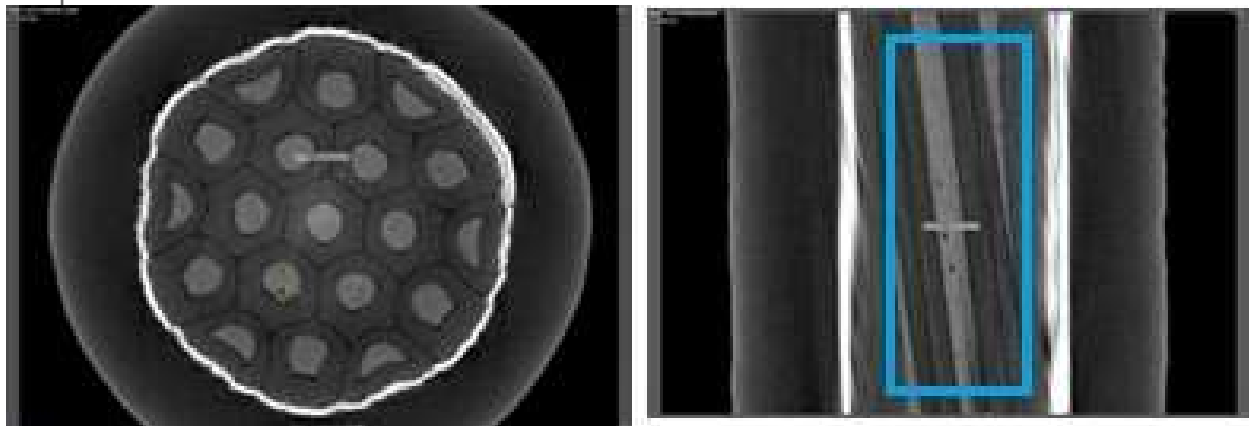
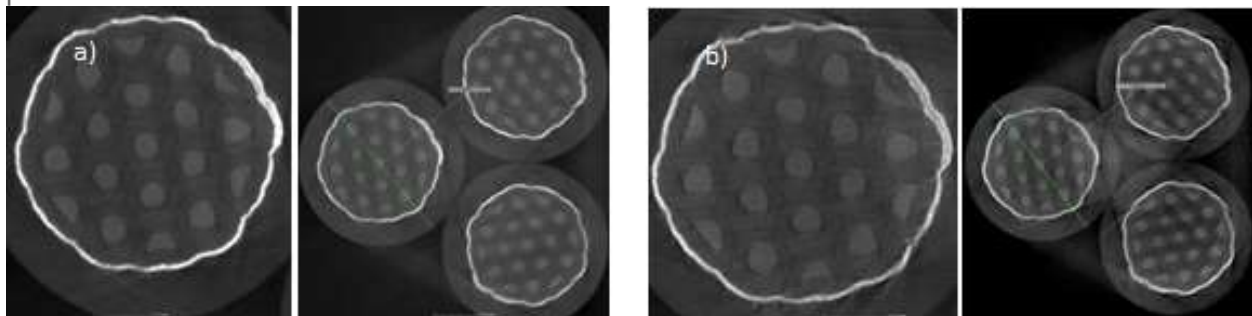


Figure 3 Imperfecțiuni geometrice din firele de Nb<sub>3</sub>Sn vizualizate prin XCT;

Rezoluția spațială a fost îmbunătățită prin aplicarea unei analize tomografice extinse numită FOV - Field Of View, cunoscută ca o tehnică de scanare asimetrică. Configurația de scanare asimetrică presupune că sursa de raze X, axa de rotație a obiectului scanat și centrul imaginii al detectorului se afla în același plan imaginar. În plus, pentru această configurație, detectorul este deplasat de la traiectoria incidentă a razelor X astfel încât acestea să aibă vedere doar la jumătatea obiectului scanat. Așadar, scanarea se realizează utilizând un detector virtual al cărui număr de pixeli este dublat pentru fiecare linie.

Imaginile reconstruite arată că tehnica de scanare asimetrică prezintă potențial de îmbunătățire a contrastului și a rezoluției. Trebuie menționat faptul că zgomotul static al imaginii tomografice obținute prin această configurație este același ca în cazul unei măsurători obținute prin configurație simetrică.

În figură 4 este prezentată o comparație între scanările simetrice și prin FOV asupra unui sigur fir și un triplet de fire de Nb<sub>3</sub>Sn. Proba cu triplet de fire este alcătuită din trei fire WST-19, împreună și învelite într-o teacă din fibra de carbon care este puternic transparentă la radiația X, simulând astfel o bobinare reală utilizată în construcția magneților puternici. În acest caz, procesul de scanare tomografică necesită utilizarea unei puteri ridicare a sursei de raze X, astfel încât radiația să penetreze firele răsucite.



*Figura 4* Secțiune prin reconstrucție XCT asupra firelor individuale sau triplet în configurație simetrică (a) sau asimetrică (b);

Conform figurii 4 a, b, în cazul scanării simetrice (rezoluția voxelului de 1.36  $\mu\text{m}$ ), imaginea este puțin neclară din cauza rezoluției scăzute, însă depunerea de Sn și bariera de Ta din jurul celor 19 fire este clar vizibilă. În schimb, imaginile obținute prin scanare asimetrică (rezoluția voxelului de 0,6  $\mu\text{m}$ ) sunt mai clare.

#### **Concluzii:**

În cadrul acestui raport au fost analizate prin microtomografie de raze X, fire de Nb<sub>3</sub>Sn utilizând metode de îmbunătățire a calității imaginilor (FOV). Mănunchiul de tripleți de fire simulează un caz real de bobinare utilizat în construcția magneților puternici. Obiectivul principal a fost atins prin îmbunătățirea rezoluției voxelilor, astfel încât densitatea de contact intern dintre fire a putut fi măsurată. Imaginile reconstruite demonstrează că tehnica de scanare asimetrică (FOV) prezintă un potențial ridicat în vederea îmbunătățirii contrastului și a rezoluției de imagini.

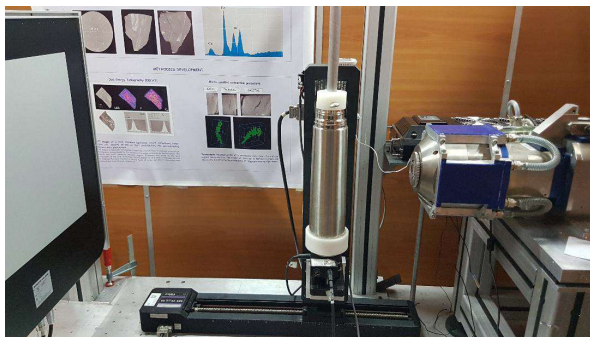
---

## **Analiza nedistructiva prin Tomografia de raze X aplicata pe prototip de cablu supraconductor de inalta temperatura**

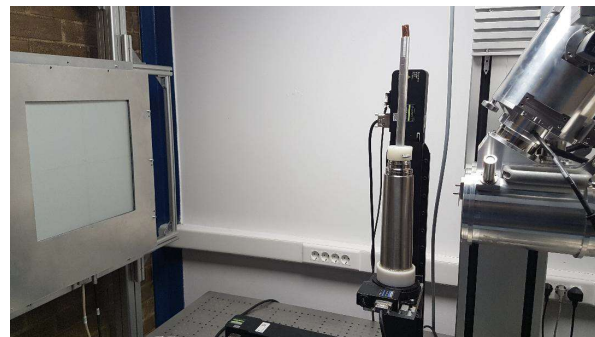
In cadrul acestui proiect au fost realizate multiple optimizări asupra sistemului de tomografie computerizată de înaltă putere și care au favorizat efectuarea la o rezoluție mare a analizelor imagistice asupra supraconductorilor de tipul „cable-in-conduit conductor” (CICC). Cu ajutorul acestui sistem au fost realizate analize nedistructive asupra prototipului de cablu supraconductor de temperatură înaltă (high temperature superconductor - HTS) propus pentru viitorul sistem magnetic al reactorului DEMO (DEMONstration Power Station). Scanările asupra cablului supraconductor au fost realizate atât la temperatura camerei, cât și în condiții de superconductivitate prin imersarea acestuia în azot lichid (77 K). Astfel, s-a urmărit evidențierea posibilelor defecte datorate stresului termic și mecanic, care la rândul lor ar putea avea un efect negativ asupra proprietăților de supraconductivitate.

### **Rezultate obtinute in urma analizei comparative CT (180 kV vs 250 kV)**

Multiple imbunatatiri si optimizari au fost aduse sistemelor de imagistica de raze X din cadrul laboratorului de microtomografie. Astfel, a fost posibila calificarea si aplicarea unor analize CT la scara larga, de la fire supraconductoare pana la cabluri tip prototip DEMO CICC. Detalii asupra instrumentelor aplicate se regasesc in articolul: Tiseanu I. et al., Multi-scale 3D modelling of a DEMO prototype cable from strand to full-size conductor based on X-ray tomography and image analysis, Fusion engineering and design, vol. 146, pages 568-573, part A, special issue SI, 2019.



a)



b)

*Figura 1. Sistem de scanare CT: de inalta rezolutie (a); cu putere de penetrare inalta (b);*

Prin utilizarea ambelor instalatii s-au realizat masuratori CT pe prototipurile cablurilor supraconductoare HTS. Prin compararea rezultatelor determinate s-a putut observa o imbunatatire a contrastului in cazul reconstructiei realizate prin instalatia cu putere de penetrare inalta.

Analiza prin instalatia de inalta rezolutie

Analiza prin instalatia de inalta putere

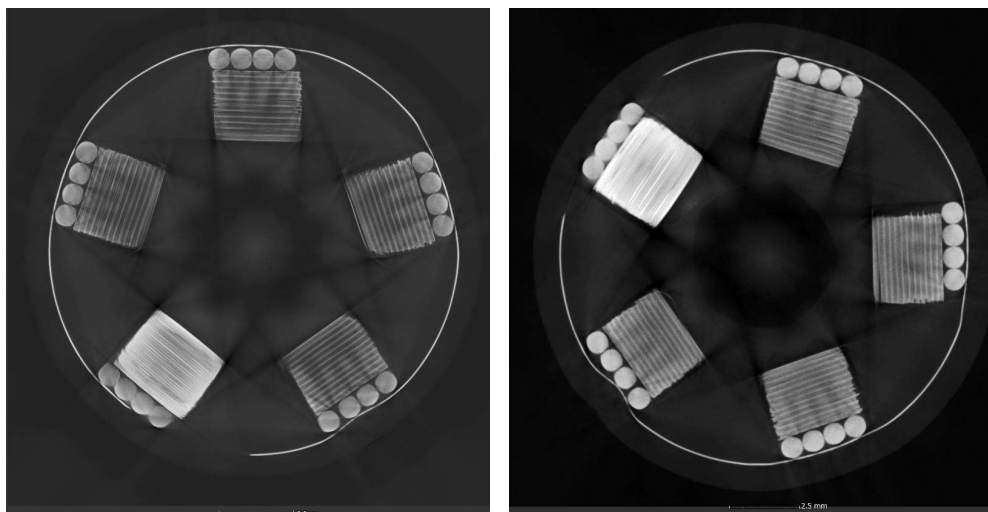


Figure 2. Reconstructiile cablurilor HTS in functie de instalatia folosita: (a) Instalatia de inalta rezolutie; (b) Instalatia cu putere mare de penetrare;

De asemenea, scanari CT pe cablurile supraconductoare au fost realizate in conditii de temperaturi diferite (temperatura camerei) si la temperatura de supraconductivitate (azot lichid). Astfel, s-a urmarit identificarea diferentelor de structura intre cele doua masuratori. S-au observat diferente exprimate prin migrarea filamentelor urmate de deformarea foliei infasuratoare (figura 3).

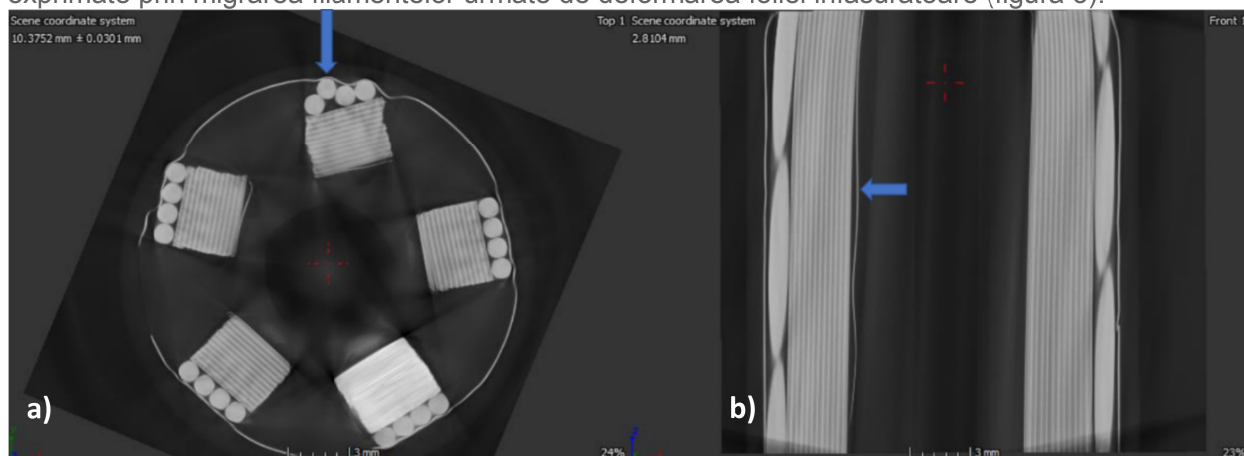


Figura 3. Identificarea defectelor structurale; Privire de sus (a); Privire laterala (b);

Au fost realizate post procesari de imaginile reconstruite pentru obtinerea informatiilor legate de gradul de torsadare asupra elementelor interne (filamente si lamele) a cablurilor HTS (figura 4).

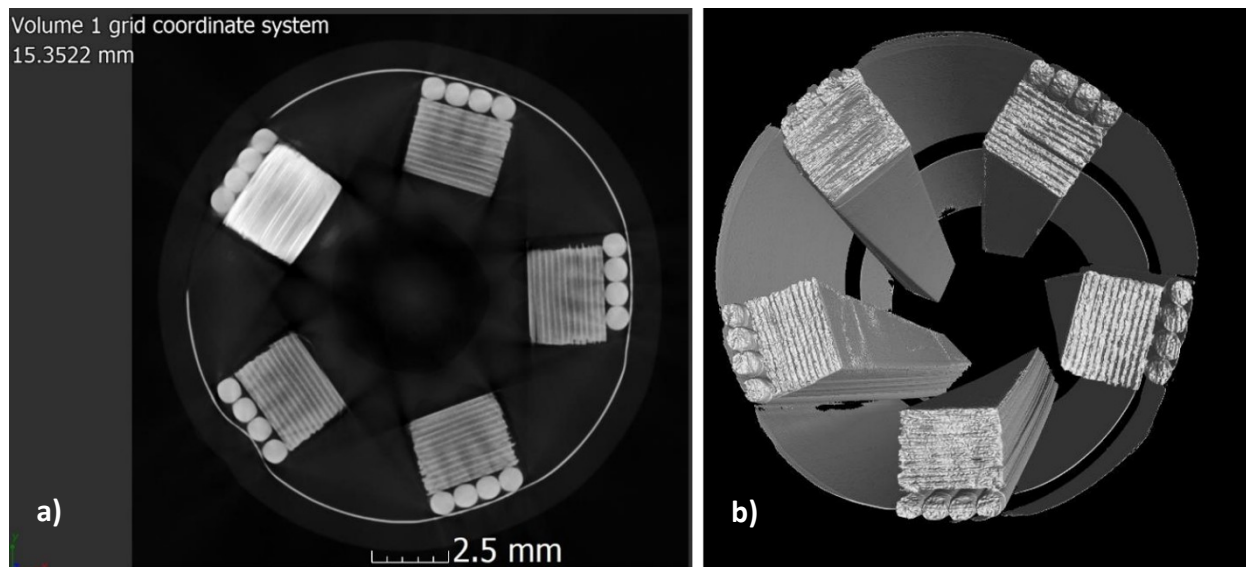


Figura 4. Determinarea gradului de torsadare a cablului HTS; Privire de sus (a); Reconstructie 3D cu evidențierea prezentei torsadării (b);

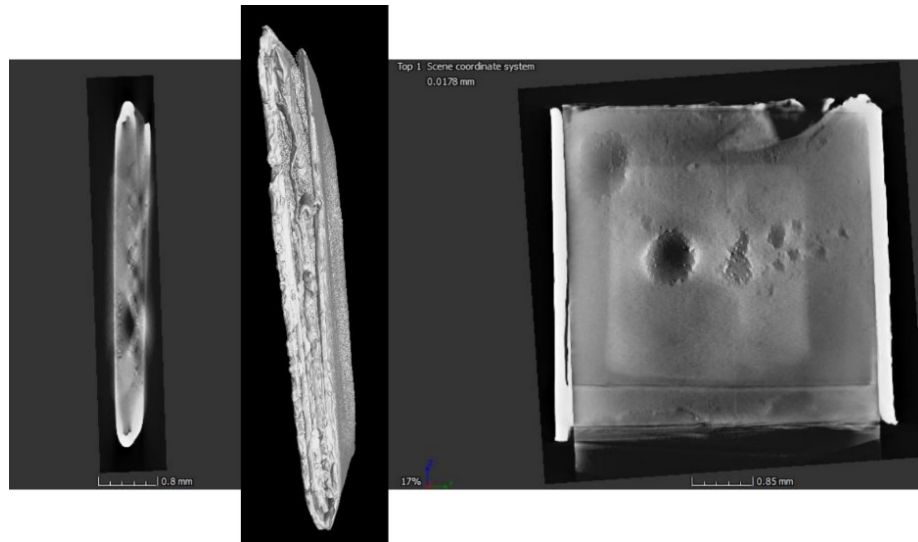
### Studiul de fezabilitate și validare a protocolului de analiză nedistructivă prin tomografia de raze X asupra prototipului de joncțiune a cablului supraconductor

Dezvoltarea unor tehnologii eficiente de joncțiuni pentru benzile supraconductoare de temperatură ridicată prezintă un mare interes pentru producția unor sisteme complexe de bobine magnetice pentru instalațiile avansate de fuziune. Îmbunătățirea sistemului de detecție a razelor X de la instalația existentă de tomografie de mare rezoluție spațială a fost realizată prin integrarea unui detector cu o matrice de pixeli de 4k x 4k. Astfel, s-au putut aborda pentru prima dată în laboratorul de tomografie de raze X, studii experimentale de analiză tomografică a joncțiunilor de benzi supraconductoare și a firelor Nb<sub>3</sub>Sn procesate prin bronz. În aceste studii s-a urmărit evidențierea unor neconformități de execuție a joncțiunilor, cât și dezvoltarea unei metode nedistructive de evaluare a ariei de contact la interfața benzii supraconductoare cu materialul de adaos.

#### Rezultate obținute:

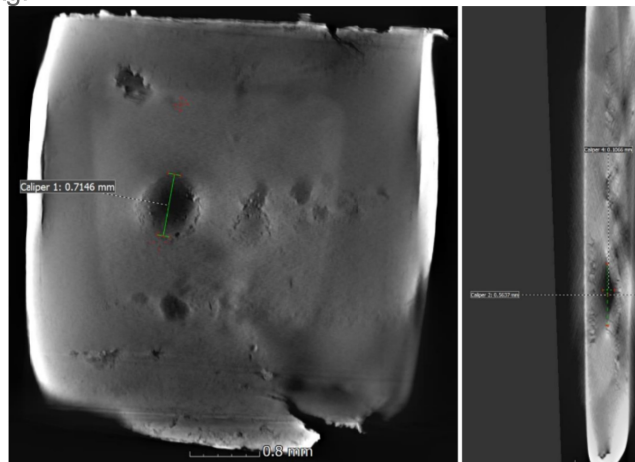
##### Analiza micro-CT pe joncțiuni de cabluri supraconductoare HTS

Cu ajutorul instalației XCT cu rezoluție submicronică, a fost evaluată calitatea joncțiunilor pe lamelele din prototipurile HTS. Joncțiunea investigată din Gd-Er-Gd prezintă o configurație de lamela-„material de interfață”-lamela, înfășurate printr-o folie de Ag.



*Figura 5. Evaluarea calitatii jonctiunilor dintre lamelele HTS;*

Scopul principal al acestei analize a constat in evaluarea rezistentei parazite care depinde de calitatea jonctiunii exprimata prin aria de contact. In urma reconstructiei s-a putut observa o regiune cu un nivel de gri ridicat evidentiind zona unde lamele de supraconductor din Er si Gd sunt infasurate prin folia de Ag.



*Figure 6. Masuratori metrologice aplicate asupra defectelor de jonctiune;*

S-au putut identifica defecte majore sub forma de goluri de diferite dimensiuni. Masuratorile de dimensiuni ale defectelor au fost realizate prin programe dedicate metrologiei (Figura 6).

### **Caracterizarea firelor Nb<sub>3</sub>Sn procesate prin bronz**

In aceasta etapa au fost investigate fire de Nb<sub>3</sub>Sn procesate prin bronz care prezinta un nivel mai mic al curentului critic, dar si o sensibilitate crescuta la deformarile mecanice aparute in timpul stresului termic in comparatie cu firele procesate prin tehnologia staniului. De asemenea, firele procesate prin bronz sunt mai ieftin de fabricat.



Cea mai importanta etapa rezolvata in cadrul acestei faze a constat in optimizarea instrumentului CT astfel incat sa se realizeze reconstructii de calitate asupra firelor de Nb<sub>3</sub>Sn procesate prin bronz. Aceste fire cu diametrul de 0.8mm contin cateva sute de filamente din Nb<sub>3</sub>Sn cu diametrul de aproximativ 2 μm. In urma experimentelor anterioare s-a observat faptul ca masuratorile CT pe astfel de filamente nu sunt posibile prin folosirea unui detector de raze X de rezolutie mica. Drept urmare, s-a impus optimizarea raportului dintre energie si rezolutie. Acest raport a fost imbunatatit prin integrarea in instalatia CT de inalta rezolutie a unui detector de raze X cu o matrice de pixel marita (4K x 4K). Dimensiunea pixelilor detectorului nou implementat este asemanatoare cu cea a detectorului anterior (74.5 μm vs 100 μm). Prin optimizarea efectuata asupra ansamblului experimental s-a reusit realizarea unor scanari si reconstructii CT de inalta fidelitate.

Exista o multitudine de configuratii a firelor de Nb<sub>3</sub>Sn procesate prin bronz in functie de materialul folosit pentru filamente, cat si pentru interfata dintre filament si matricea de bronz. Drept urmare, in aceasta etapa au fost studiate doua tipuri de stranduri in functie de stresul termic si de materialul folosit ca interfata dintre filamente si jacheta exterioara (Ta, Nb+Ta). In vederea realizarii unei comparatii relevante, masuratorile asupra tuturor probelor investigate au fost realizate in aceleasi conditii experimentale: puterea sursei, timpul de integrare al detectorului, rezolutia voxelilor si aceeasi filtrare a fascicolului incident (50 μm de Zr).

Primele masuratori CT realizate inainte si dupa stresul termic asupra firelor cu bariera din Ta au fost evidentiate in figura 7.a, b. Codul culorilor este exprimat dupa cum urmeaza: portocaliu – Ta, rosu – Bronz si albastru – filamente.

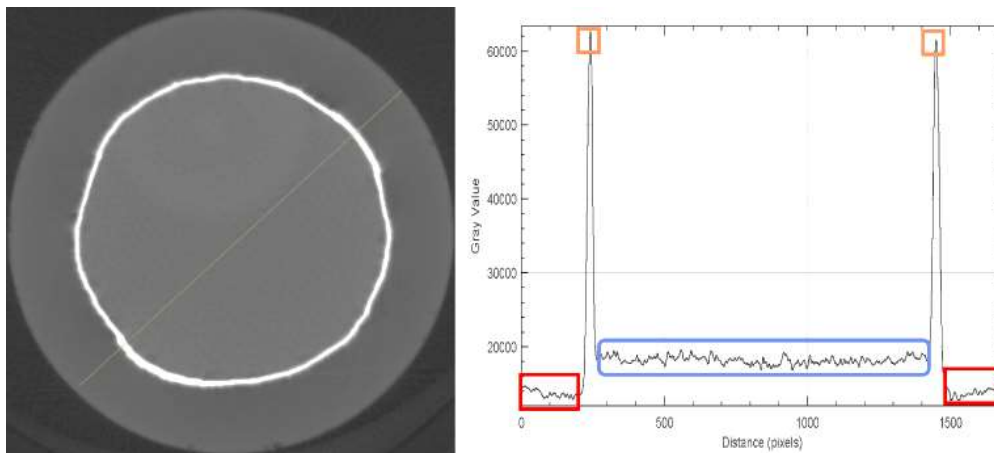


Figura 7.a Fir Nb<sub>3</sub>Sn cu bariera de Ta (inainte de tratamentul termic);

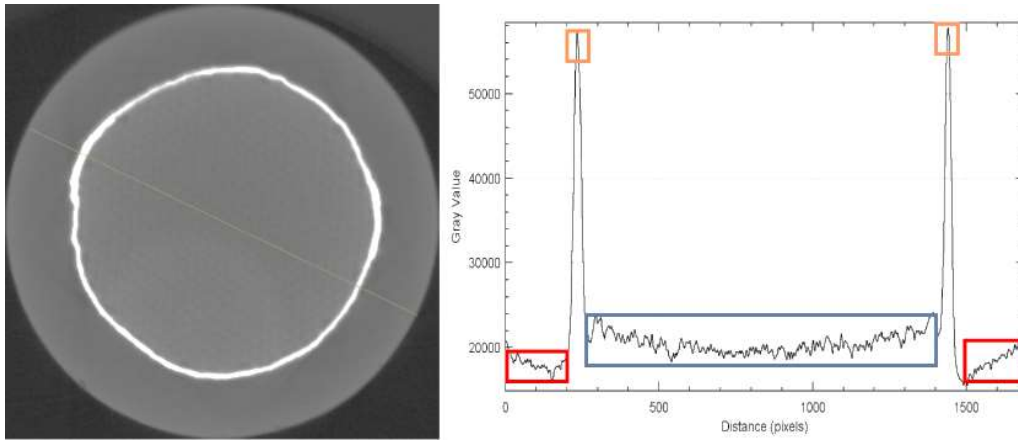


Figure 7.b Fir Nb<sub>3</sub>Sn cu bariera de Ta (dupa tratamentul termic);

In al doilea set de masuratori CT au fost realizate investigatii inainte si dupa tratamentul termic pe fire Nb<sub>3</sub>Sn cu bariera de Ta+Nb, (figurile 8.a, b). Aceeasi cod al culorilor a fost aplicat, la care a fost adaugata culoarea verde pentru Nb. Au fost observate diferente intre valorile nivelelor de gri in urma aplicarii tratamentului termic.

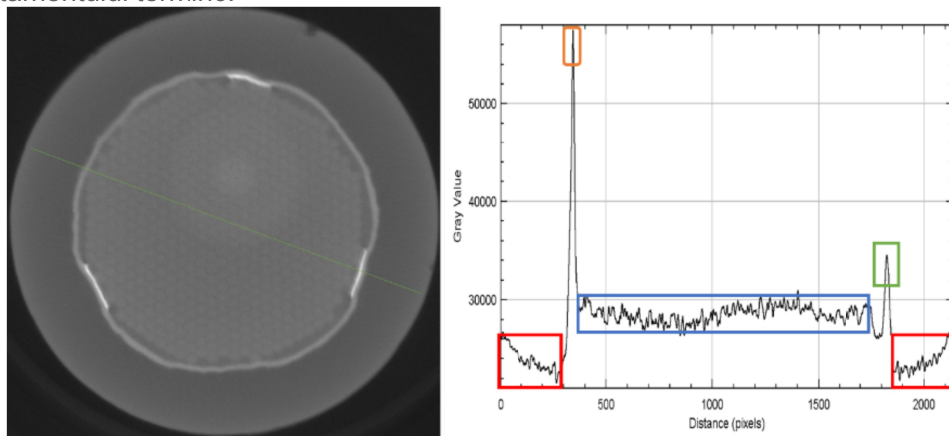


Figura 8.a Fir Nb<sub>3</sub>Sn cu bariera Ta+Nb (inaintea tratamentului termic);

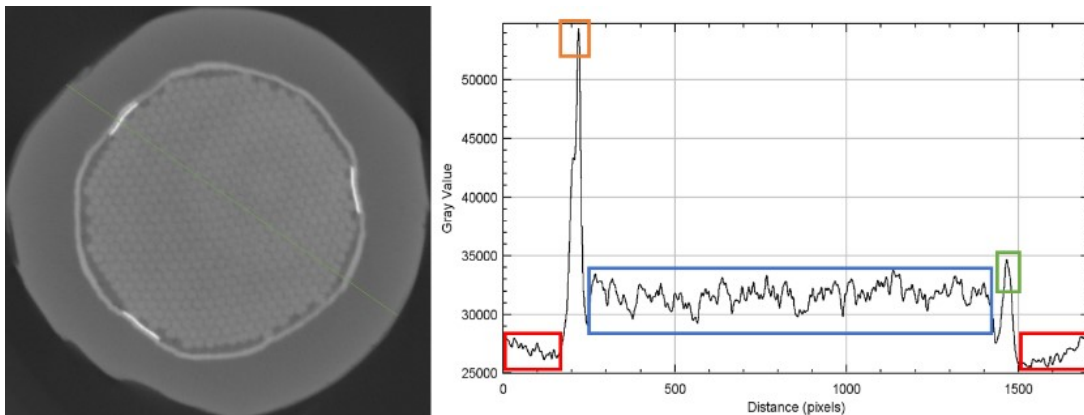


Figura 8.b Fir Nb<sub>3</sub>Sn cu bariera Ta+Nb (dupa tratamentul termic);

Au fost realizate post procesari metrologice asupra reconstrucțiilor CT (figura 9). Astfel, au fost determinate diametrele exterioare și interioare, respectiv lățimea interfeței și a filamentelor.

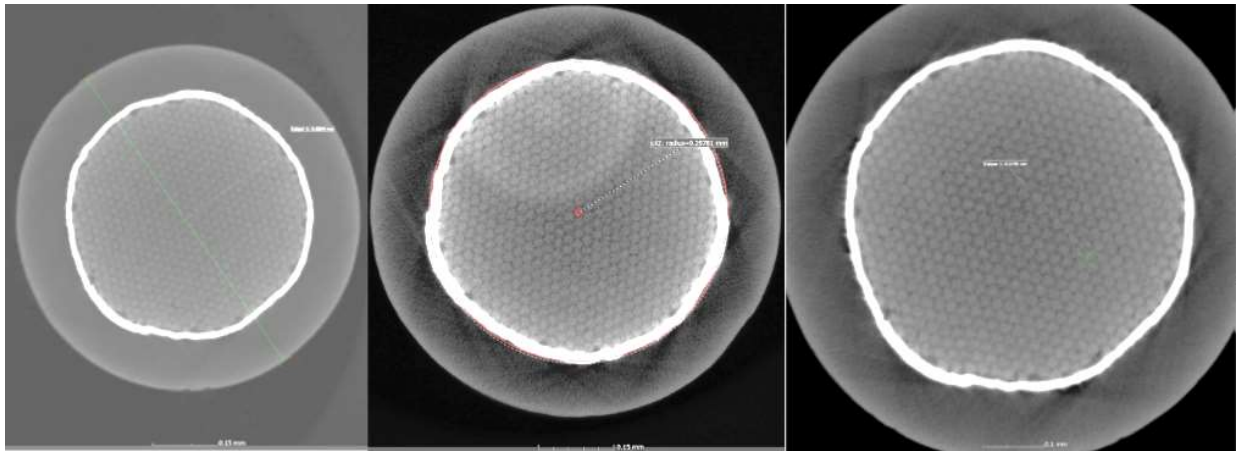


Figure 9. Masuratori metrologice asupra firelor Nb<sub>3</sub>Sn procesate prin bronz;

Determinarea valorii de torsadare al filamentelor a fost realizat prin selectarea unor secțiuni în lungul filamentului și măsurarea deplasării poziției unui filament ales aleatoriu. Prin aplicarea acestui protocol (figura 10), au fost obținute informații despre gradul de torsadare.

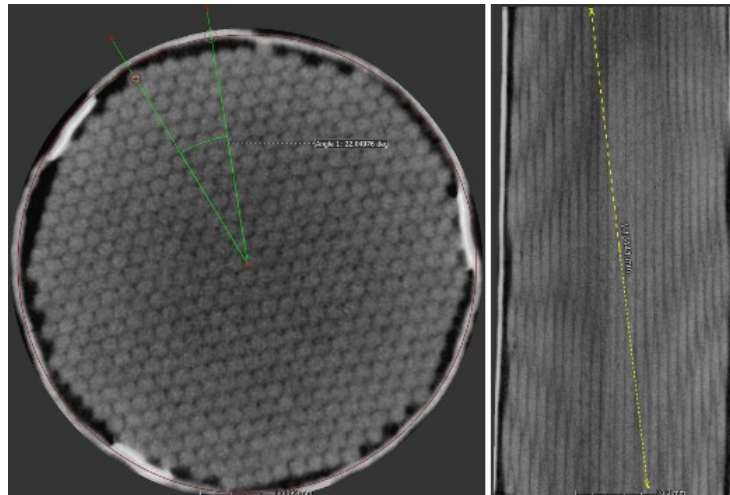


Figure 10. Determinarea gradului de torsadare;

### Concluzii:

În cadrul acestui raport au fost realizate scanări CT pe conductori CICC și jonctiunile relevante viitorului sistem magnetic propus pentru reactorul DEMO. Aplicarea instalației nou implementate de înaltă penetrare a facilitat realizarea unor scanări CT de înaltă calitate asupra firelor HTS-CICC (producător ENEA-Frascati). Au fost obținute date preliminare asupra rezistenței reziduale pentru jonctiunile lamelelor HTS. Prin aplicarea programelor software dedicate post procesării metrologice, au fost determinate defectele sub formă de goluri în interiorul jonctiunilor.

Masuratori prin instrumentul CT cu rezolutie spatiala ridicata au fost aplicate pe firele Nb3Sn procesate prin bronz, avand diferite materiale de interfata (Ta si Nb+Ta); prin urmare, a fost investigat impactul stresului termic prin compararea scanarilor pe probe inainte si dupa tratamentul termic. Post procesari avansate au fost realizate pe reconstruciile CT in vederea determinarii diametrelor filamentelor si a valorii gradului de torsadare.

**Publicatii:**

- Tiseanu I. et al., Multi-scale 3D modelling of a DEMO prototype cable from strand to full-size conductor based on X-ray tomography and image analysis, Fusion engineering and design, vol. 146, pages 568-573, part A, special issue SI, 2019;

**Conferinte:**

- WPMAG team, Overview of the Magnet System of the European DEMO, EUCAS 2019 in Glasgow;

**Intalniri:**

- Ion Tiseanu, WPMAG final meeting: 12-14 February 2019, Garching, Germany;
- Ion Tiseanu, EU-CN collaboration meeting 16th and 17th April, Villigen, Swiss;
- Ion Tiseanu, DEMO Magnets Progress Meeting on 2019, 2 October; Frascati, Italy;

**Propunere bursa post-doc:**

- EUROfusion Research Grant , M. Lungu;

**Teze doctorat:**

- Cosmin Dobrea, „Contribuții la dezvoltarea sistemelor multifuncționale compacte de imagistică de raze X” , Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, IOSUD-UTCN (in curs);
- Adrian Sima , „Imagistica de raze X aplicata la analiza nedistructiva de inalta rezolutie spatiala a materialelor si structurilor supraconductoare conventionale si de temperatura inalta”, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, IOSUD-UTCN (in curs);
- Ioana Porosnicu, „Imagistica de raze X pe sisteme nano / micro / bulk”, Universitatea din Bucuresti, Facultatea de Fizica (in curs);

**Persoane de contact:**

INFLPR – I. Tiseanu ([ion.tiseanu@gmail.com](mailto:ion.tiseanu@gmail.com)).