

Participarea Romaniei la EUROfusion WPMAG si cercetari complementare

Director de proiect : Ion Tiseanu (INFLPR, ion.tiseanu@inflpr.ro)

I. 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 contuit 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 știința 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 de caracterizare a 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 („voids”) si a traiectoriilor firelor supraconductoare pe un segment de cablu;
- Testarea performantelor benzilor HTS disponibile pe piata (dependența JC de rasucire si indoire axiala).

Etapele si activitati:

- Achizitionarea esantioanelor de conductor tip 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 tip DEMO;
- Achizitionarea benzilor supraconductoare de la *SuperPower*, *AmericanSuperconductor* si *SUNAM*. Masuratori preliminare ale $J_c(B,T)$ 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 $J_c(B,T)$. Proiectarea si realizarea echipamentului experimental pentru efectuarea testelor de torsiune si incovoiere;
- Procesarea avansata a datelor tomografice: i) pozitionarea strandurilor in sectiune; ii) calculul factorului local "void fraction"; 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:

- *Institute for Magnetic Fusion Research. IRF, CEA, Cadarache, Franta;*
- *Superconductivity Laboratory, ENEA C.R. Frascati, Italia;*
- *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 conductorilor TF fabricate în contextul WPMAG, determinarea dimensiunii geometrice și propunerea nivelelor de condiționare (îndreptarea și/sau subțierea conductei) 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 spatiala foarte inalta de ~27 microni/pixel, cu modul de operare TDI (Time Delayed Integration). Acest

detector, în prezent aflat în faza de testare, ne va permite achiziția de radiografii digitale de mare fidelitate și cu un raport semnal/zgomot îmbunătățit.

Adicional, am realizat o primă serie de măsurători XCT de energie înaltă (450 keV) pe o machetă a cablului DEMO TF. Deși rezoluția spațială a sistemului de XCT de înaltă energie este semnificativ mai mică decât a microtomografului din INFLPR, prin îmbunătățirea metodelor de post-procesare a imaginilor am obținut o rată foarte bună de detectare a firelor. Acesta este un rezultat excelent luând în considerare faptul că diametrele firelor cablului DEMO TF sunt mult mai mari decât cele ale firelor incluse în macheta măsurată.

De asemenea, obținerea de imagini tomografice de mare fidelitate a permis determinarea automată a traiectoriilor firelor pe lungimea probelor. Acest lucru reprezintă factorul cheie pentru modelarea complexă a proprietăților mecanice, electrice și magnetice ale cablurilor supraconductoare care prezintă interes pentru tehnologia de fuziune.

Recent, s-au realizat primele măsurători tomografice pe un prototip de cablu DEMO fabricat de ENEA Frascati. Metodologia de procesare de imagini a fost îmbunătățită și testată pe o machetă realizată anterior ce reprezintă un cablu JT60-SA constituit din trei secțiuni. Detectia și poziționarea firelor supraconductoare s-a realizat prin dezvoltarea și implementarea unei metode fotometrice, care constă în fitarea distribuției nivelelor de gri din imaginile tomografice utilizând funcția „profile Gaussiene 2D”. Această metodologie a fost aplicată cu succes pe tomogramele diferitelor tipuri de cabluri CICC (TFQL, JTF și DEMO) atingând o rată de detecție a firelor de peste 95%.

Principalele etape ale algoritmilor fotometrice 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 capabile să distingă o clasă de detecții non-strand, inclusiv mantaua cablului CICC sau canalele interne de racire cu He.

Deși analiza fotometrică poate fi utilizată în detectarea prezenței firelor supraconductoare și a celor de Cu (non-supraconductoare) din cablurile DEMO, se impune diminuarea zgomotului ridicat din imaginile tomografice asociate acestora. În prezent, lucrăm la îmbunătățirea ratei de detecție a coordonatelor centroiziilor prin adaptarea unor metode avansate de fitare neliniară, aplicabilă datelor cu zgomot ridicat. Teste preliminare arată că într-o formulare funcțională sau cumulativă, profilele Voight par să se potrivească mai bine decât cele Gaussiene.

Publicatii:

[1] Ion Tiseanu, Louis Zani, Catalin-Stefan Tiseanu, Teddy Craciunescu, Cosmin Dobrea, 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), UTC-N – T. Petrisor (traian.petrisor@phys.utcluj.ro)

Examinarea tomografică a prototipurilor de conductori DEMO-TF

Sistemele bazate pe magneti supraconductori utilizati în reactoarele de fuziune se bazează pe conductori de tip CICC (Cable-in Conduit Conductor). Acestia 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 si 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 (ex. conductori DEMO TF). Atât superconductorii cât și îmbinările dintre acestea au fost analizate în două configurații diferite, ținându-se cont de tipul de sursa 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 Nb₃Sn.

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 structuri componente ale conductorilor incluzând defecte microstructurale (*figura 1.1*).

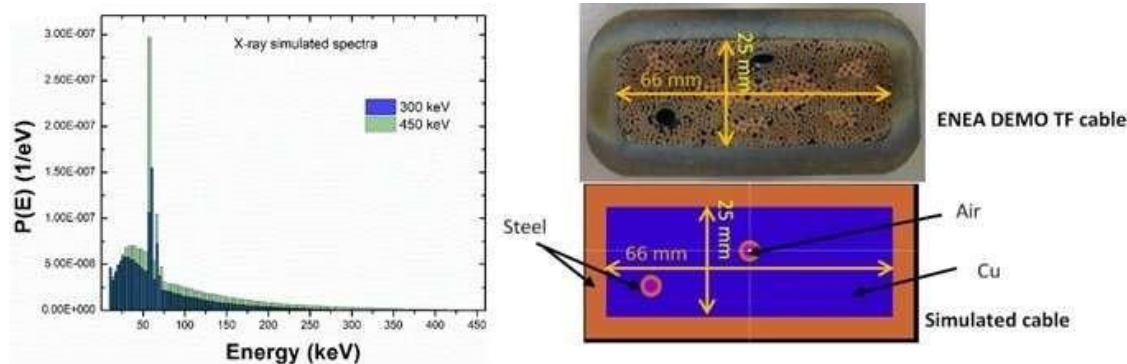


Figura 1.1 Stânga: spectrul de raze X simulat pentru un fascicul de electroni de energie 300 și 450 keV; Dreapta: Fotografia unui cablu DEMO TF (ENEA) și geometria corespunzătoare simulată.

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 (figura 1.1 stanga). Programul de simulare Monte-Carlo (*PENELOPE 2014*) poate genera liniile caracteristice ale wolframului, acest lucru fiind un aspect foarte important pentru o analiza detaliată. În a doua parte a modelării numerice, a fost simulat transportul fotonilor prin Cablu, ținând cont de configurația tomografică alcătuită dintr-o sursă de raze X cu microfocalizare al cărui spectru a fost calculat în prima parte. Configurația geometrică simulată asupra cablului DEMO TF a fost prezentată în figura 1.1 dreapta. Modelarea numerică a fost optimizată astfel încât să fie analizată zona cea mai dificilă de penetrat de către radiația X, considerând astfel că rezultatele pot aplicate și pe structuri mai puțin complicate decât îmbinările cablurilor DEMO TF.

Totuși, geometria prezentată în figura 1.1 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 ($\varnothing$ 1mm), 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 9 x 9 x 0.05 cm, iar sursa de raze X ca un fascicul conic de radiație cu apertură de 50°. 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 pe detector crește semnificativ prin reducerea la jumătate a grosimii simulate a învelișului (de la 0.5 la 0.25 cm).

Evaluarea integritatii 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 (conducta otel). În acest stadiu de fabricare, analiza cablului prin tomografie de raze X este ideală deoarece absența învelișului permite achiziția datelor printr-un raport semnal-zgomot ridicat. Prin procesarea imaginilor și analiza fotometrică (*figura 1.2*), s-a dezvoltat un algoritm de poziționare și detecție a firelor supraconductoare care se bazează pe determinarea maximelor locale și integrarea acestora printr-o distribuție Gaussiană 2D / eliptică. Algoritmul dezvoltat s-a dovedit a fi foarte eficient, având o rată de detecție foarte ridicată (*figura 1.2.c*). Realizând câteva adaptări și îmbunătățiri de tip post-procesare, care sunt momentan în curs de realizare, este posibil să se atingă o precizie de detecție și localizare a firelor de până la 100%.

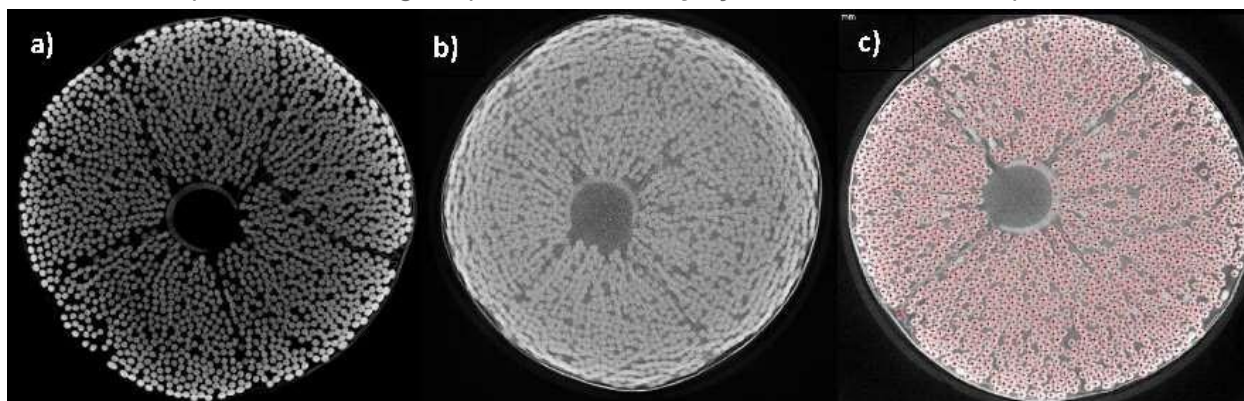


Figura 1.2. Vizualizarea în secțiune a cablului CEA DEMO prin tomografia de raze X obținută în următoarele condiții: a) cu împrăștieri scăzute a radiației de raze X, b) împrăștieri puternice a radiației de raze X, c) după aplicarea algoritmului de detecție a firelor pe o imagine obținută în cele mai dificile condiții (rata de detecție >98%);

II. Tehnici de caracterizare electrica, magnetica si de imagistica de raze X pentru modelarea 3D a firelor si cablurilor supraconductoare de interes pentru tehnologia de fuziune

Proiectul urmareste studierea potentialului materialelor supraconductoare de temperatura inalta (HTS) si MgB_2 in vederea aplicarii acestora in instalatiile avansate de fuziune (NEXT, DEMO). Scalarea sistemului de magneti de la tokamakul ITER pentru cerintele instalatiei DEMO prezinta cateva provocari legate de tehnologia actuala folosita, bazata pe supraconductori conventionali (de temperatura joasa). In ultimii ani s-a inregistrat un progres urias in fabricarea benzilor supraconductoare de temperatura inalta (HTS). Desi benzile HTS sunt disponibile pe piata, comunitatea stiintifica face mari eforturi pentru a imbunatati proprietatile de supraconductivitate ale acestora.

Obiectivul general al proiectului este acela de rezolvare a unor probleme cheie ale benzilor supraconductoare de temperatura inalta (HTS) pentru fabricarea bobinelor supraconductoare aplicabile in instalatiile 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 de tip pinning in filmele epitaxiale YBCO;
- Efectul de dopare si metoda de fabricare a proprietatilor microstructurale ale MgB_2 ;
- Testarea performantelor benzilor HTS disponibile comercial si corelare rezultatelor obtinute cu cele din literatura in vederea asistarii procesului de dezvoltare in acest domeniu.

Un alt obiectiv important este reprezentat prin dezvoltarea si utilizarea sistematica a analizei prin microtomografie de raze X (μ XCT) a benzilor si firelor din MgB_2 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 $BaZrO_3$ (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 (μ XCT);
- Monitorizarea sintezei supraconductorilor de tip MgB_2 prin μ XCT ;
- Analiza microstructurala a benzilor si firelor MgB_2 prin μ XCT.

Rezultate obtinute:

Microtomografia de raze X (μ XCT) a fost aplicata pentru analiza microstructurala a probelor supraconductoare de MgB_2 in format “bulk”, banda si filme subtiri. μ XCT a fost folosita prima data pentru vizualizarea structurii unei benzi MgB_2 intr-un film subtire, precursor amorf, non-supraconductor de MgB_2 depus pe un substrat de Al_2O_3 si a unui film subtire de MgB_2 supraconductor reactat. Analiza prin microXCT a aratat ca benzile de MgB_2 au o microstructura relativ uniforma fata de esantioanele din material bulk, dar se pot observa cu usurinta si regiunile cu densitati diferite. Imaginile 3D, precum si sectiunile selectate, pot furniza informatii referitoare la forma miezului benzii sau a compozitului de tip “core–sheath”, la geometria interfetei metal-supraconductor si la incidenta microfisurilor sau a porilor de dimensiuni mari.

În acest proiect am demonstrat că tehnica μ XRT are multiple avantaje majore în caracterizarea firelor supraconductoare precum:

- a) μ XRT este utilă pentru descoperirea neinvazivă a macro-defectelor relevante ascunse și observarea formei lor tridimensionale;
- b) μ XRT permite vizualizarea 3D a integrității geometrice a componentelor firelor compozite și determinarea unor parametri geometrici într-o manieră calitativă și cantitativă;
- c) μ XRT are un bun potențial pentru caracterizarea in-situ non-distructivă a firelor în timpul procesărilor termo-mecanice sau în timpul torsadării acestora;
- d) μ 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 creșteri epitaxiale de filme nanocompozite YBCO-BaZrO₃ 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 BaZrO₃ este acompaniată de o creștere remarcabilă a parametrului c-axis lattice. Filme epitaxiale nanocompozite din YBCO-BZO (005) cu factorul ω FWHM la unghi mic de 0.1° au fost obținute pe substraturi de (100) STO, cu o grosime cuprinsă în intervalul 500-600 nm. În urma investigațiilor asupra secțiunii eficace 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 15-30 nm. 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 torsadare “twist-pitch” la un supraconductor Nb₃Sn

În această perioadă de raportare am realizat examinarea tomografică a unui fir supraconductor de Nb₃Sn utilizat la fabricarea sistemului de magneti ITER și DEMO. Principalul scop al investigației non invazive constă în determinarea factorului de torsadare a filamentelor de Nb₃Sn înglobate în matricea de cupru. Determinarea factorului de torsadare s-a realizat prin două metode: prima metodă constă în medierea factorilor de torsadare 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 Nb₃Sn (*Figura 2.1*) 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 Nb₃Sn precum si a barierei de Nb care inconjoara miezul. Fiecare filament de Nb₃Sn a fost analizat separat prin etape succesive de prelucrare a imaginii cum ar fi aliniere, filtrare și segmentare. Pe parcurs s-au putut observa si cuantifica erori de constructie atat asupra mantalei, cat si a filamentelor. Luand in considerare rezolutia obtinuta, pentru un singur experiment de determinare a factorului de torsadare s-au putut investiga doar 1.2 mm din lungimea filamentelor din cei ~15 mm de interes. De aceea pentru determinarea factorului de rasucire a filamentelor s-au efectuat 10 masuratori distribuite echidistant de-a lungul lungimii firului, iar factorul de torsadare a fost determinat prin mediere. Rezultatele obtinute au sugerat ca filamnete de Nb₃Sn realizeaza o convolutie de 360° pe o lungine de 13.75 mm.

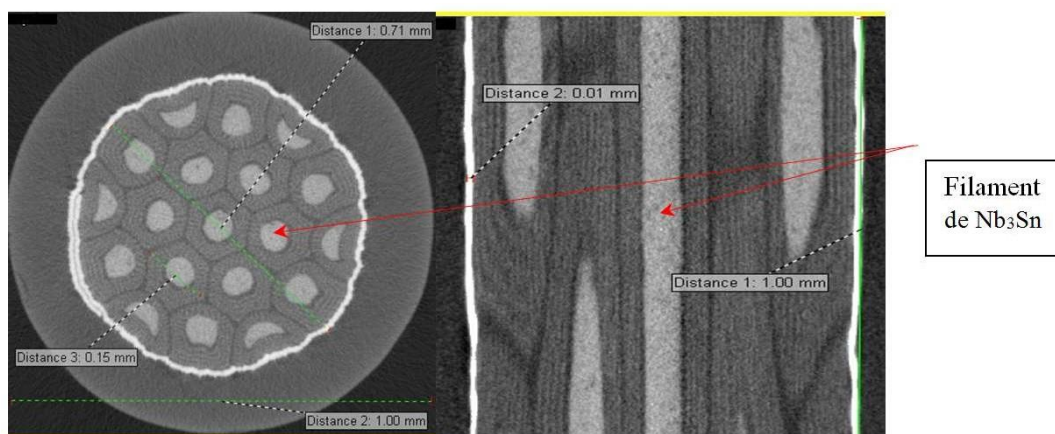


Figura 2.1 Sectiuni microtomografice ale unui fir de Nb₃Sn: sectiune transversala– stanga, sectiune axiala - dreapta. Componentele principale ale firului supraconductor: filamente, bariera Nb, matrice de cupru sunt foarte bine evidentiata in imaginile de inalta rezolutie.

A doua metoda reprezinta o metoda de verificare a rezultatelor obtinute in primul caz si consta in realizarea unui experiment neinvaziv de tomografie ce cuprinde toata lungimea firului supraconductor, insa la o rezolutie de ~10.85 μm/voxel, fiind cu peste un ordin de marime mai slaba fata de prima metoda. In acest caz filamentele nu se mai disting clar, insa pot fi identificate de-a lungul intregului fir supraconductor (~15 mm). Prin aceasta metoda s-a putut valida valoarea factorului de torsadare calculat prin prima metoda.

În următoarea etapa a acestui proiect se va utiliza o noua configuratie de tomografie ce se bazeaza pe un nou tip de detector de raze X de mare energie de tip TDI (*Time Delay Integration*).

Publicatii:

[1] P. Badica, I. Tiseanu, G. Aldica, T. Craciunescu, V. Sandu, G. Jakob, M. Rindfleisch, Qualitative comparative analysis of MgB₂ 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), UTC-N – T. Petrisor (traian.petrisor@phys.utcluj.ro)

Dezvoltarea unei metode de examinare prin tomografie computerizată de mare rezoluție pentru identificarea firelor si cablurilor 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 în sistemele de confinare magnetică prin tehnologia de fuziune. Firele supraconductoare din Nb_3Sn au fost analizate prin combinarea a doua metode și anume: radiografie digitală utilizând un detector de tip TDI (8192 x 256 de pixeli pătrați cu latura de 27 μm) pentru detectarea neomogenităților, respectiv metoda de tomografie cu raze X (detector de tip “flat-panel” cu o matrice de 1929 x 1536 pixeli cu latura de 75 μm). Combinarea acestor două metode s-a realizat în cadrul laboratorului de microtomografie de raze X din INFLPR (figura 2.2).

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

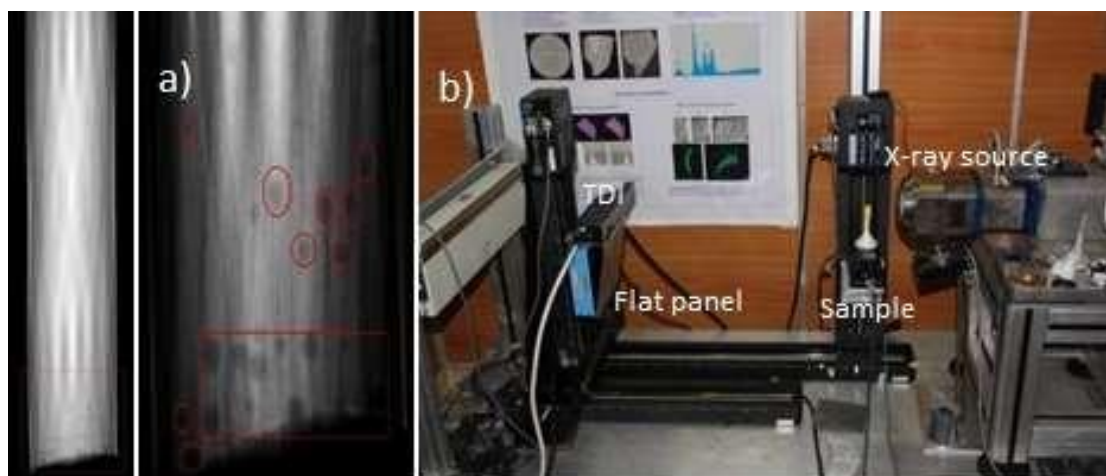


Figura 2.2. Radiografie digitală a unui fir supraconductor de Nb_3Sn (a); Dispozitivul experimental de tomografiere cu detector TDI și Flat-panel (b);

În figura 2.3 b se poate observa că rezoluția imaginii tomografice este comparabilă cu cea din imaginea obținută cu ajutorul unui SEM (figura 2.3 a). Diametrul real al unui fir este de 1mm, fiind de asemenea determinat prin măsurarea coordonatelor din imaginea tomografică reconstruită.

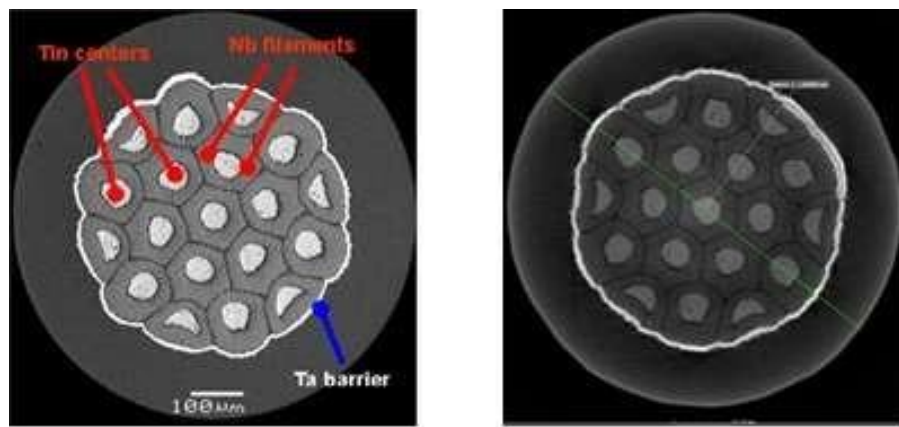


Figura 2.3 Imagine SEM a unui fir de Nb₃Sn (a); Microtomografie de inalta rezolutie comparabila cu imaginea SEM (b);

Imaginile tomografice de raze X sunt utile in detecția golurilor generate de depunerile de Sn sau a imperfecțiunilor din barierele de Ta (figura 2.4).

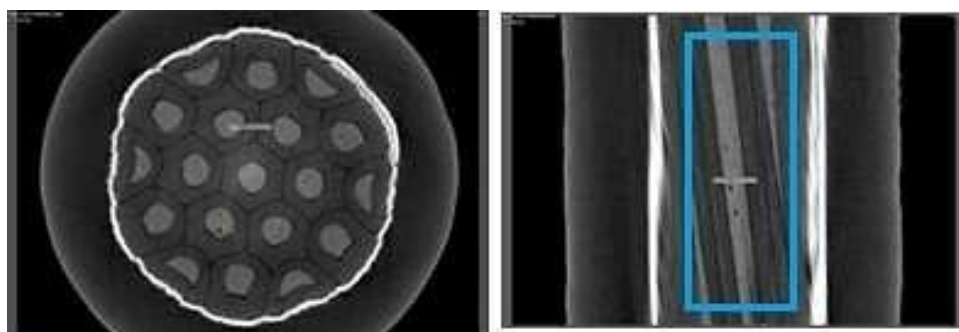


Figure 2.4 Imperfecțiuni geometrice din firele de Nb₃Sn vizualizate prin XCT;

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 incidenta 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 în această configurație este același ca în cazul unei măsurători obținute prin configurație simetrică.

În figura 2.5 este prezentată o comparație între scanările simetrice și prin FOV asupra unui singur fir și a un triplet de fire de Nb₃Sn. Proba cu triplet de fire este alcătuită din trei fire WST-19, împreunate 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 surse de raze X de putere mare, astfel încât radiația să penetreze firele răsucite.

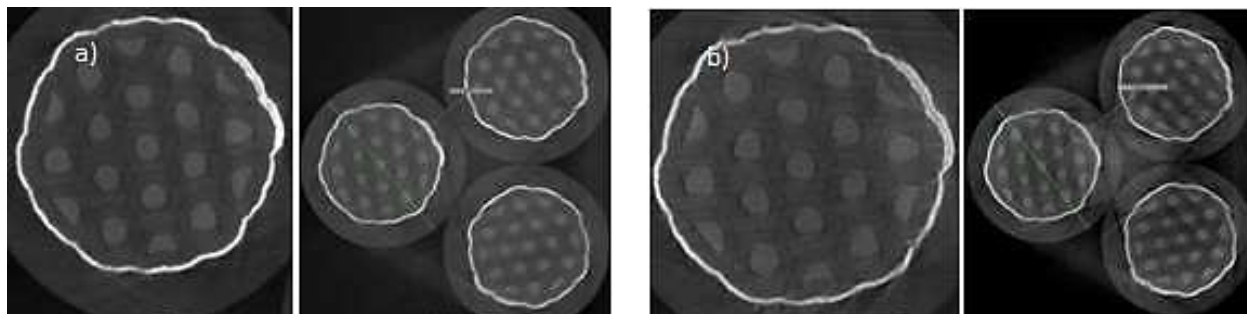


Figura 2.5 Secțiune prin reconstrucție XCT asupra firelor individuale sau triplet în configurație simetrică (a) sau asimetrică (b);

Conform figurii 2.5. a, b, în cazul scanării simetrice (rezoluția voxelului de $1.36\ \mu\text{m}$), imaginea este puțin neclara 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:

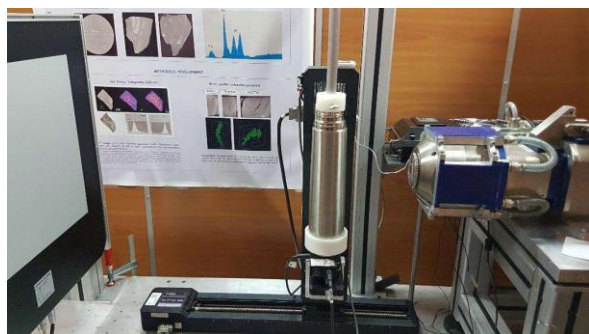
În cadrul acestui raport au fost analizate prin microtomografie de raze X, fire de Nb_3Sn utilizând metode de îmbunătățire a calității imaginilor (FOV). Mănunchiul de tripleți de fire simulează un caz real de bobinare utilizat în construcția magneților puternici. Obiectivul principal a fost atins prin 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 un prototip de cablu supraconductor de inalta temperatura

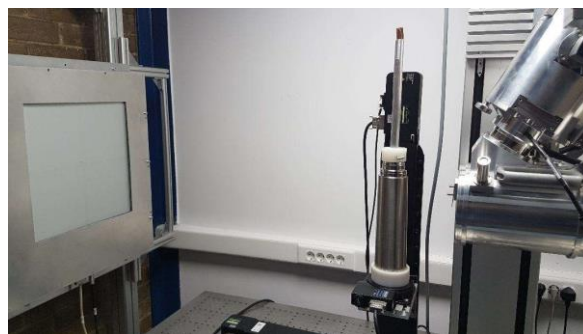
În cadrul acestui proiect au fost realizate multiple optimizări asupra sistemului de tomografie computerizată de înaltă putere și care au favorizat efectuarea la o rezoluție mare a analizelor imagistice asupra supraconductorilor de tipul „cable-in-conduit conductor” (CICC). Cu ajutorul acestui sistem 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 (*figura 2.6*) 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.*



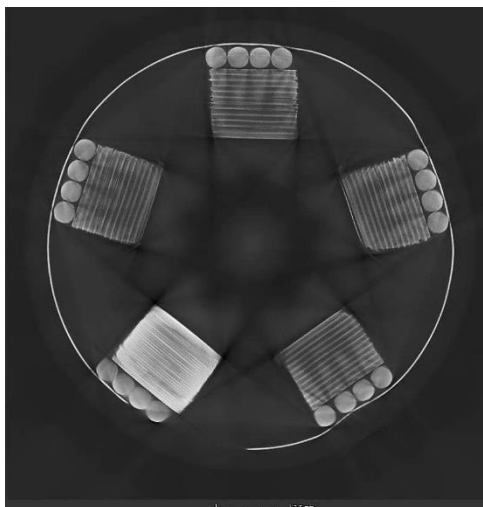
a)



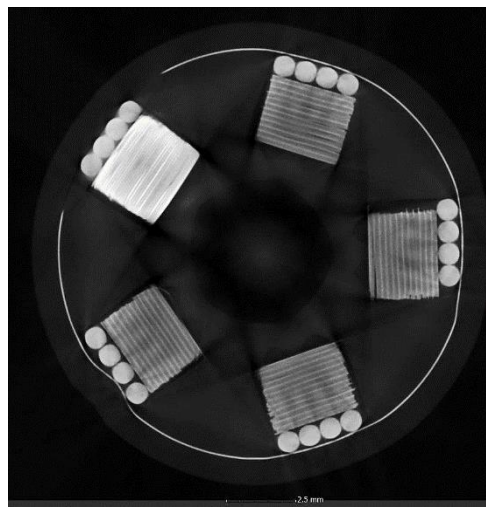
b)

Figura 2.6. Sistem de scanare CT: de inalta rezolutie (a); cu putere de penetrare inalta (b);

Prin utilizarea ambelor instalatii au fost realizate 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.



(a)



(b)

Figura 2.7 Secțiuni reconstruite pe cablurile de tip HTS în funcție de instalația folosită: (a) Instalația de înaltă rezoluție; (b) Instalația cu putere mare de penetrare;

De asemenea, scanări CT pe cablurile supraconductoare au fost realizate în condiții de temperaturi diferite (temperatura camerei) și la temperatura de supraconductivitate (azot lichid). Astfel, s-a urmărit identificarea diferențelor de structură între cele două măsurători. S-au observat diferențe exprimate prin migrarea filamentelor urmate de deformarea foliei înfășurătoare (figura 2.8).

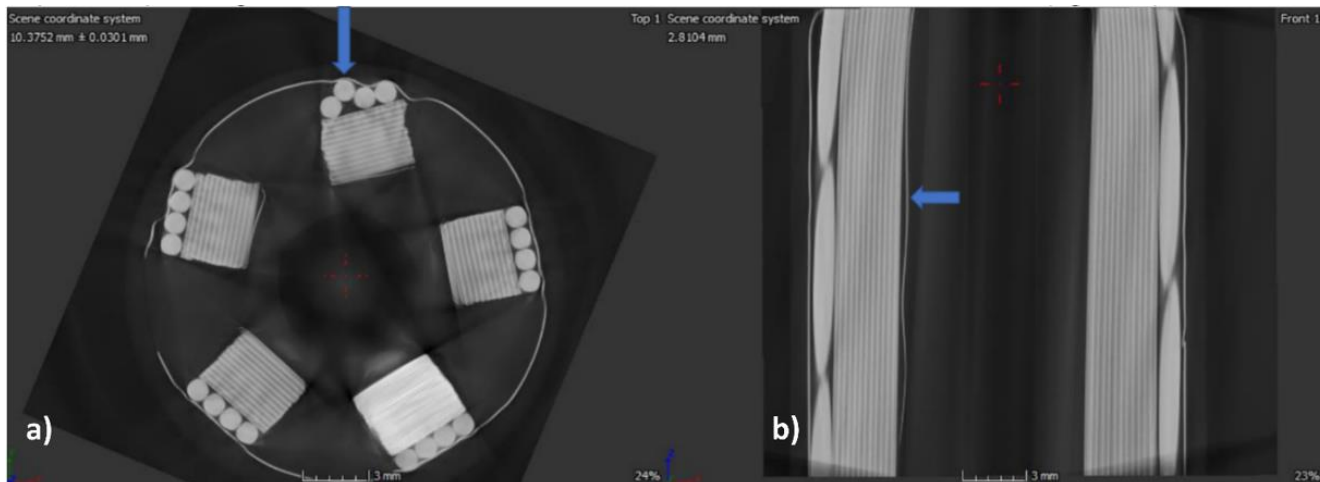


Figura 2.8. Identificarea defectelor structurale; Privire de sus (a); Privire laterală (b);

Au fost realizate post procesări de imaginile pe secțiunile reconstruite pentru obținerea informațiilor legate de gradul de torsadare asupra elementelor interne (filamente și lamele) a cablurilor HTS (figura 2.9).

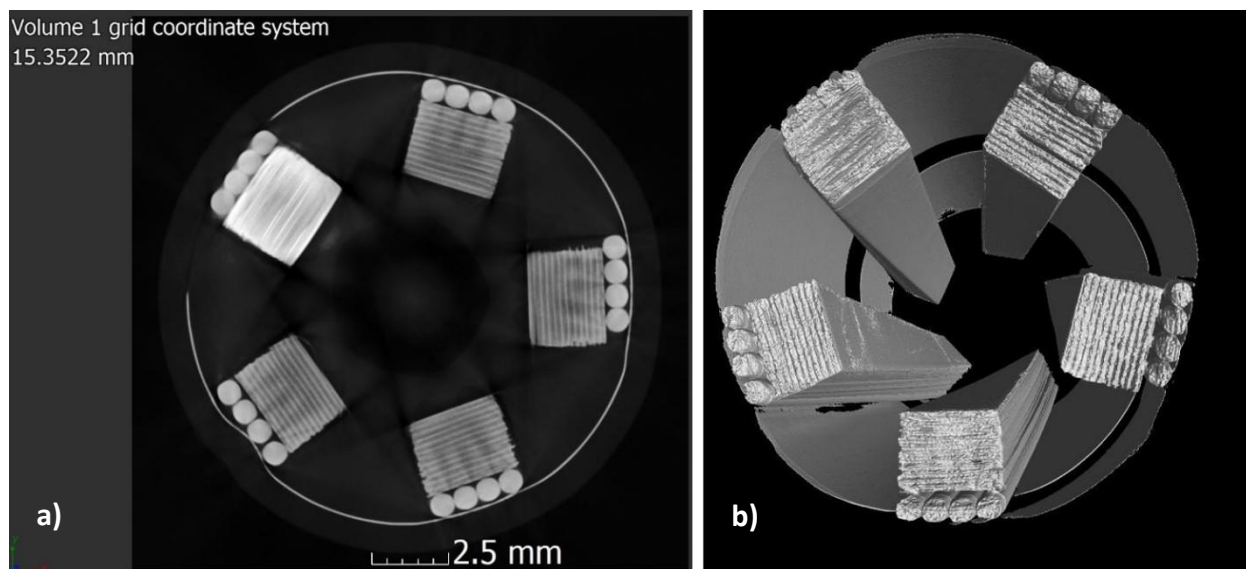


Figura 2.9. Determinarea gradului de torsadare a cablului HTS; Privire de sus (a); Reconstructie 3D cu evidentiarea prezentei torsadarii (b);

III. Studiul de fezabilitate si validare a protocolului de analiza nedistructiva prin tomografia de raze X asupra prototipului de jonctiune 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 4 k. Astfel, s-au putut aborda pentru prima dată în laboratorul de tomografie de raze X, studii experimentale de analiza tomografica a joncțiunilor de benzi supraconductoare si a firelor Nb_3Sn 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 obtinute:

Analiza micro-CT pe jonctiuni de benzi supraconductoare de temperatura inalta

Cu ajutorul instalatiei CT cu rezolutie submicronica, a fost evaluata calitatea jonctiunilor pe lamelele din prototipurile HTS (figura 3.1). Jonctiunea investigata din Gd-Er-Gd prezinta o configuratie de lamela/„material de interfata”/lamela, infasurate printr-o folie de Ag.

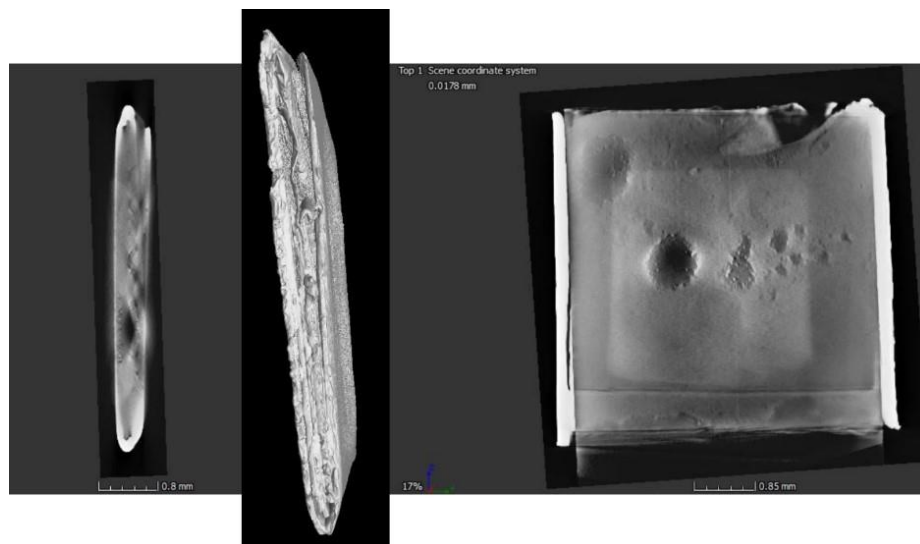


Figura 3.1. Evaluarea calitatii jonctiunilor dintre lamelele HTS;

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 lamelele de supraconductor din Er si Gd sunt infasurate prin folia de Ag.

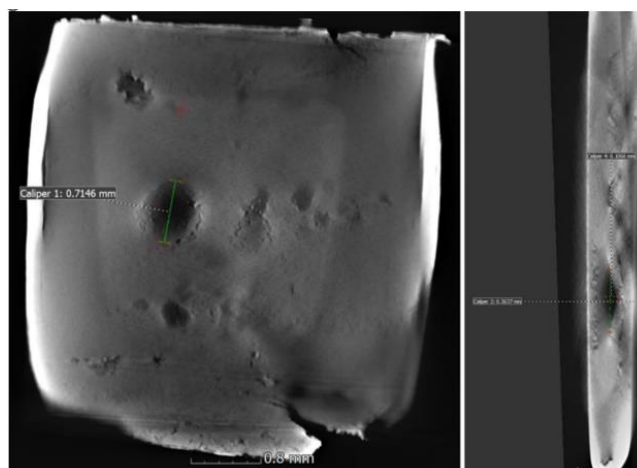


Figura 3.2. Masuratori dimensionale ale defectelor;

S-au putut identifica defecte majore sub forma de goluri de diferite dimensiuni. Masuratorile de dimensiuni ale defectelor au fost realizate prin modul dedicat metrologiei (Figura 3.2).

Caracterizarea microstructurala a firelor Nb₃Sn fabricate prin tehnologia bronzului (bronz route)

In aceasta etapa au fost investigate fire de Nb₃Sn fabricate prin tehnologia bronzului 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. Pe de alta parte, firele procesate prin tehnologia bronzului 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 Nb₃Sn procesate prin tehnologia bronzului. Aceste fire cu diametrul de 0.8mm contin cateva sute de filamente din Nb₃Sn cu diametrul de aproximativ 2 μm. In urma experimentelor anterioare s-a observat faptul ca masuratorile CT pe astfel de filamente sunt foarte dificile nefiind practic posibila obtinerea unor imagine satisfacatoare 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 din INFLPR a unui detector de raze X cu o matrice de pixeli 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 Nb₃Sn procesate prin bronz in functie de materialul folosit pentru filamente, cat si pentru interfata dintre filament si matricea de bronz. In aceasta etapa au fost disponibile pentru a fi 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: regimul de lucru si puterea sursei de raze X, timpul de integrare al detectorului, rezolutia spatiala si filtrarea fascicolului incident (50 μm de Zr) .

Au fost facute masuratori dimensionale asupra reconstructiilor CT (*figura 3.3*). Astfel, au fost determinate diametrele exterioare si interioare, respectiv latimea interfetei si a filamentelor.

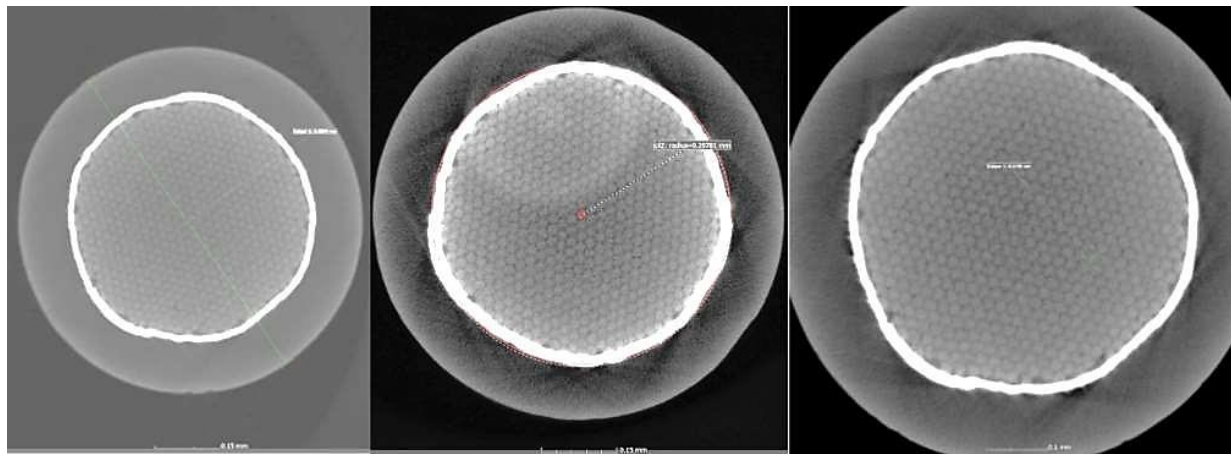


Figure 3.3. Masuratori dimensionale asupra firelor Nb₃Sn

Determinarea valorii de torsadare al filamentelor a fost realizata prin selectarea unor sectiuni in lungul filamentului si masurarea deplasarii pozitiei unui filament ales aleatoriu. Prin aplicarea acestui protocol (figura 3.4), au fost obtinute informatii dspre gradul de torsadare.

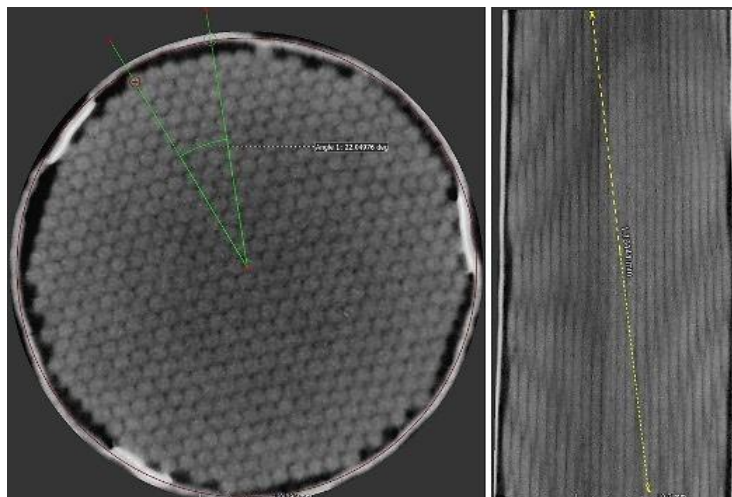


Figura 3.4. Determinarea gradului de torsadare;

Concluzii:

În cadrul acestui raport au fost realizate scanari CT pe conductori CICC si jonctiunile relevante viitorului sistem magnetic propus pentru reactorul DEMO. Aplicarea instalatiei nou implementate de inalta penetrare a facilitat realizarea unor scanari CT de inalta calitate asupra firelor HTS-CICC (producator *ENEA-Frascati*). Au fost obtinute date preliminare asupra rezistentei reziduale pentru jonctiunile lamelor HTS. Prin aplicarea programelor software dedicate post procesarii metrologice, au fost determinate defectele sub forma de goluri in interiorul jonctiunilor.

Masuratori prin instrumentul CT cu rezolutie spatiala ridicata au fost aplicate pe firele Nb₃Sn procesate prin tehnologia bronzului, avand ca materiale de interfata: Ta si Nb+Ta. A fost investigat impactul stresului termic prin compararea imaginilor tomografice pe probe inainte si dupa tratamentul termic. In final s-a realizat caracterizarea dimensionala si a gradului de torsadare a filamentelor componente ale firelor.

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*, *Fusionengineering 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, EUCAS2019 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).

Tomografie de raze X pe esantioane relevante de conductori prototip CICC

Conceptul cable-in-conduit conductors (CICC) a apărut în urmă cu câteva decenii pentru a permite transportul curenților de intensitate ridicată în cablurile supraconductoare, asigurând în același timp o bună stabilitate. Structural, CICC sunt realizate dintr-un număr mare de fire supraconductoare răsucite împreună care sunt introduse în interiorul unui înveliș metalic, răcit prin circulație internă cu He lichid.

O astfel de morfologie complexă poate fi capturată prin tomografie de raze X completă 3D.

Obiectivele principale ale activitatii din 2019-2020 au fost:

- i) pentru prototipurile ENEA DEMO CICC: analizarea unei probe de tip low-field deja testata în SULTAN; compararea morfologiei cablului cu proba high-field deja scanata;
- ii) pentru modelele de cablu CEA DEMO: examinarea înfășurărilor supra / sub-compactate pentru a avea o perspectivă mai bună asupra consecințelor compactării pe maparea contactelor.

Echipamentul de microtomografie de raze X folosit:

Pentru modelarea 3D a prototipurilor de supraconductori DEMO s-a folosit instalatia de microtomografie de mare putere de penetrare (> 300 kVp) recent dezvoltata, prevazuta cu o sursa de raze X microfocuse cu energia maxima a fasciculului de raze X de 320 keV si un detector de raze X matricial (2k x 2k pixeli cu dimensiunea de 200 μm) (*figura 3.5*). Reconstructiile obtinute pe structuri dense (Cu, Nb₃Sn, inox) si masive (pana la dimensiuni caracteristice de cca. 1 m) au o rezolutie mai buna de 20 μm /voxel.

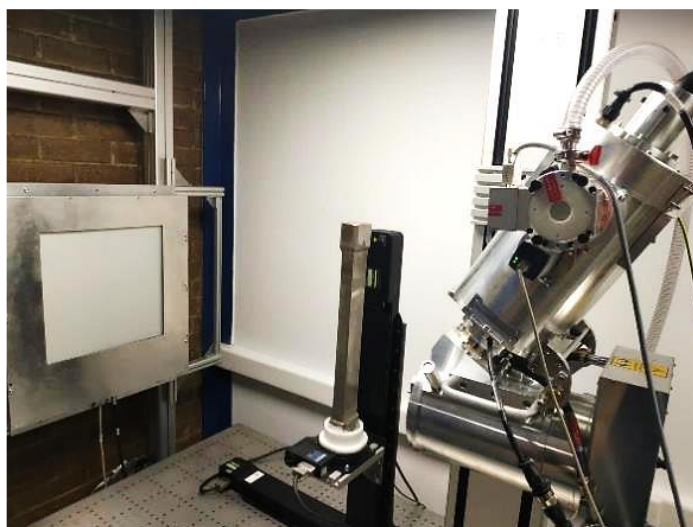


Figura 3.5. Instalatia de microtomografie de mare putere de penetrare folosita in scanarea unui conductor rectangular ENEA W&R;

Validarea instalatiei tomografice de mare putere de penetrare

Instalatia tomografica a fost validata intr-o analiza completa a unui esantion de conductor din Solenoidul Central al instalatiei tokamak ITER cu specificatii tehnice bine descrise in literatura, avand compozitie si geometrie similare cu ambele prototipuri DEMO CICC. Rezolutia spatiala de sub $20\ \mu\text{m}/\text{voxel}$ a permis detectarea automata a firelor supraconductoare si a pozitiilor lor prin folosirea unui algoritm dezvoltat in cadrul grupului de cercetare. Ordinea operatiunilor este prezentata in imaginea de mai jos.

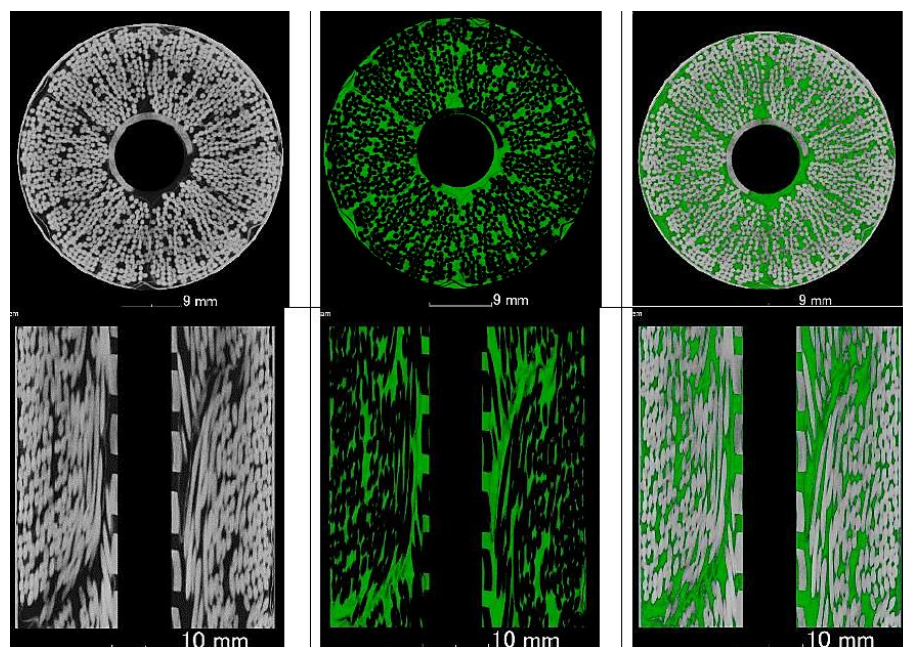


Figura 3.6. Sectiune tomografica trasversala (stanga); Selectie regiuni goluri (mijloc); Suprapunere regiuni de goluri (voids) si de material (dreapta). Pe randul doi sunt aceleasi tipuri de reprezentatii pentru sectiuni axiale.

Pentru esantionul studiat s-a determinat un factor mediu de goluri (void) de $32.8 \pm 0.35\%$, in acord foarte bun cu specificatiile nominale ale producatorului.

Analiza tomografica pe un esantion ENEA DEMO "Low-Field" (LF) cu trei spirale de racire

Calitatea buna a imaginilor obtinute a permis identificarea cu acuratete a diametrelor firelor de Cu (dimensiuni cuprinse intre 0.8 si 1.5 mm) si chiar evidentierea firelor de Nb₃Sn – reprezentate prin culoarea rosie in *figura. 3.7 extrema dreapta*. Din modelul 3D s-a constatat ca spiralele de racire sunt deformatе, una dintre ele fiind complet aplatizata.

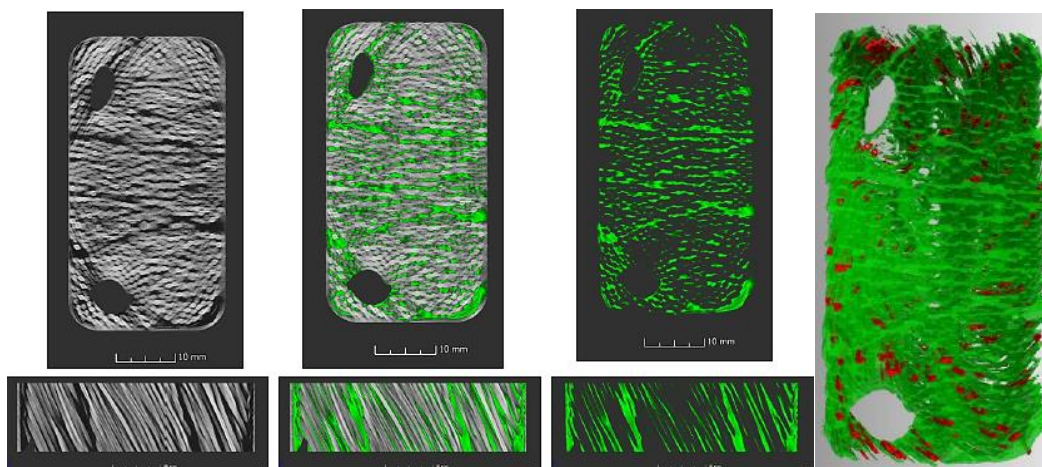


Figura 3.7 Etapele de evaluare a distribuției golurilor (de la stânga la dreapta): secțiunile transversale (sus) și axiale (jos) ca niveluri de gri, detectarea materialului și golurilor, goluri izolate; Reprezentare 3D a firelor Nb₃Sn (colorate cu rosu);

După post-procesarea imagistica ilustrată în *figura. 3.8*, s-a putut determina fractia de goluri (void fraction) de $25.25 \pm 1\%$. Volumul spiralelor de răcire a fost exclus din calculul fractiei de goluri. Analiza tomografica a unui prototip de conductor ENEA DEMO „low-field” cu trei spirale de racire pline cu fire de inox. Parametrii masuratorii au fost: 290 kV, 0.5 mA si marime nominala voxel ~25 μm.

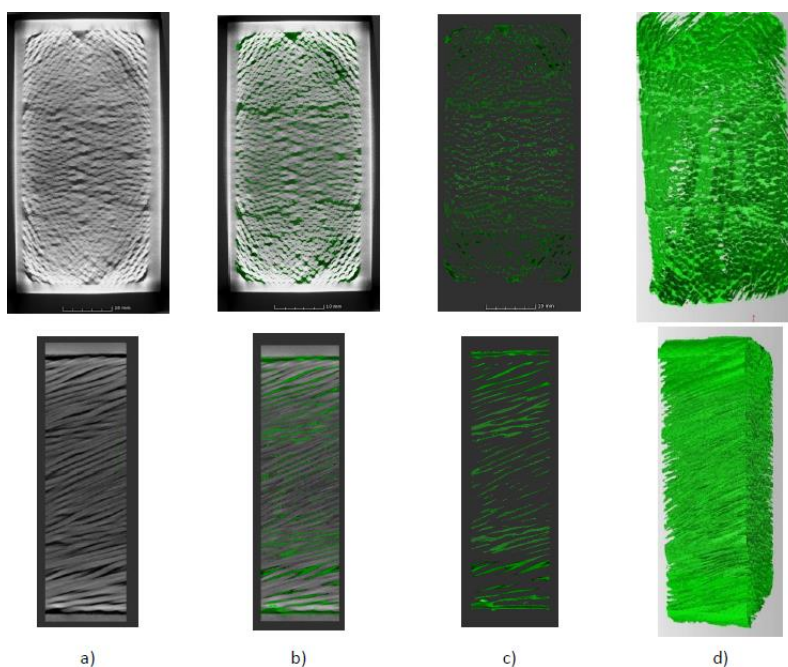


Figura 3.8. Reprezentarea etapelor de post-procesare a distribuției golurilor: (a) secțiuni tomografice transversale (sus), axiale (jos); (b) material și goluri; (c) izolarea golurilor; (d) distribuția golurilor în 3D.

Calitatea imaginilor a permis inspectia tuturor elementelor cablului. Cele șase petale, trei structurate în jurul spiralelor de răcire și trei în jurul mănunchiului de fire de cupru, firele de diferite diametre (1 mm și 1,5 mm) și folia de infasurare din oțel de 0,1 mm grosime. Cantitativ, am detectat distribuția volumetrică a golurilor, urmând câțiva pași de post-procesare a imaginii, așa cum este ilustrat în figurile de mai jos. Se poate evalua o fracție medie de goluri de $24,15 \pm 1\%$.

Analiza XCT pe conductorii CICC CEA DEMO supra si sub-compactati

Folosind metodele descrise mai sus s-au analizat doua tipuri de conductori supra si sub-compactati (figura 3.9 si figura. 3.10).

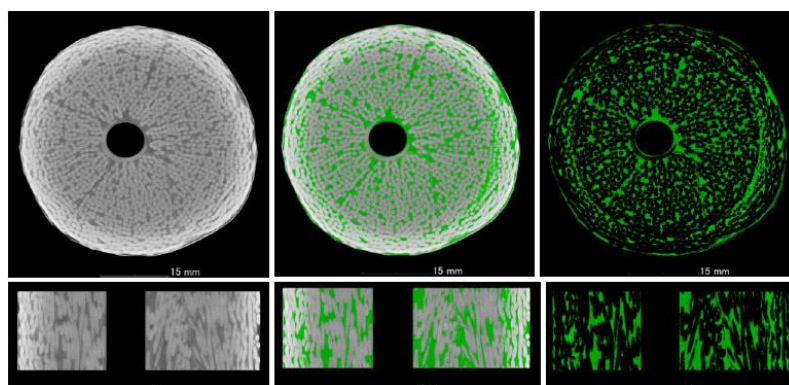


Figura 3.9. Secțiuni transversale axiale și laterale pentru conductorul CEA CICC supra-compactat cu analiza distribuției golurilor.

Fractia medie de goluri obtinuta pentru acest tip de conductor a fost $25 \pm 1\%$.

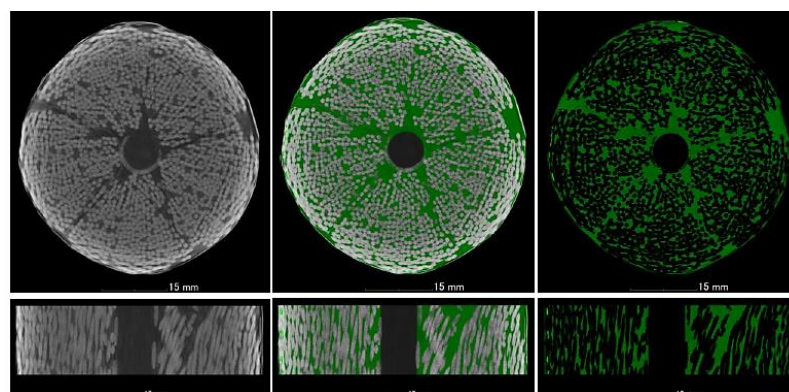


Figura 3.10. Secțiuni transversale axiale și laterale pentru conductorul CEA CICC sub-compactat cu analiza distribuției golurilor.

Fractia medie de goluri obtinuta pentru acest tip de conductor a fost $33.5 \pm 1\%$.

Concluzii

Noi concepte de conductori DEMO CICC dezvoltate recent au fost analizate nedistructiv folosind instalatia de microtomografie de mare putere de penetrare din cadrul INFLPR. Datorita energiei mari

de pana la 320 keV, a suprafetei mari a detectorului matricial si a rezolutiei de sub 20 μm au putut fi obtinute imagini tomografice de buna calitate pentru detectarea cu acuratete a firelor si pozitiilor acestora in conductori. Au fost implementate protocoale pentru determinarea distributiei golurilor și calculul fracției medii de goluri, in acord foarte bun cu specificațiile nominale.

Articole:

- „Extensive Analyses of Superconducting Cables 3D Geometry With Advanced Tomographic Examinations”, has just been published on IEEE Xplore, Journal: IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Volume: 31, Issue: 5, On Page(s): 1-5, Print ISSN: 1051-8223, Online ISSN: 1558-2515, DOI: 10.1109/TASC.2021.3059600, Publication Date: AUGUST 2021;
- K Sedlak, V A Anvar, N Bagrets, M E Biancolini, R Bonifetto, F Bonne, D Boso, A Brighenti, P Bruzzone, G Celentano, A Chiappa, V D'Auria, M Dan, P Decool, A della Corte, A Dembkowska, O Dicuonzo, I Duran, M Eisterer, A Ferro, C Fiamozzi Zignani, W H Fietz, C Frittitta, E Gaio, L Giannini, F Giorgetti, F Gömöry, X Granados, R Guarino, R Heller, C Hoa, I Ivashov, G Jiolat, M Jirsa, B Jose, R Kembleton, M Kumar, B Lacroix, Q Le Coz, M Lewandowska, A Maistrello, N Misiara, L Moric8, L Muzzi, S Nicollet, A Nijhuis, F Nunio, C Portafaix, G Romanelli, X Sarasola, L Savoldi, B Stepanov, I Tiseanu, G Tomassetti, A Torre, S Turtù, D Uglietti, R Vallcorba, L Viererb, M Vojenciak, C Vorpahl, K-P Weiss, R Wesche, M J Wolf, L Zani, R Zanino, A Zappatore and V Corato, Advance in the conceptual design of the European DEMO magnet system, Supercond. Sci. Technol. 33 044013, 2020
- Tiseanu Ion, Muzzi Luigi, Sima Adrian, Dumitru Daniel, Dobrea Cosmin, Craciunescu Teddy, Lungu Mihail, Porosnicu Ioana, Corato Valentina, della Corte Antonio, 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, Volume 146, Part A, September 2019, Pages 568-573;

Conferinte:

- L. Zani, M. Chiletto, D. Dumitru, M. Lungu, I. Tiseanu, F. Topin, “Extensive Analyses of Superconducting Cables 3D Geometry with Advanced Tomographic Examinations”, ASC 2020 Virtual Conference October 24 – November 7, 2020;
- WPMAG team, Overview of the Magnet System of the European DEMO, EUCAS
- 2019 in Glasgow;

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);
- Maxime Chilet, CEA, IRFM, Cadarache, Pertes par couplages dans les câbles en conduit supraconducteurs des réacteurs à fusion thermonucléaire: Modélisation théorique et investigations expérimentales, teza sustinuta pe 9 decembrie 2020.

Proiecte castigate:

- Multi-physic and multi-scale investigations on key physics driving the CICC superconducting magnets operation risks/ WPTRA (WPEDU) / Nr. 1EU-12 - 01.07.2016/ EUROfusion/ 01.04.2020-31.03.2022;

IV. Analiza microtomografica a interfetelor si a materialului de lipire a jonctiunilor realizate din benzi supraconductoare (Microtomography analysis of the contact interfaces inside joints of REBCO superconducting tapes)

Îmbunătățirile recente a densității de curent critic (J_c) a supraconductorilor de temperatură înaltă (HTS) au împins valorile de camp magnetic mai aproape de limitele teoretice. Câmpul critic superior ridicat și temperatura critică a acestor materiale, au încurajat dezvoltarea magneților HTS de câmp ridicat folosite în cazul reactoarelor de fuziune. Deoarece nu există încă supraconductori ductili de câmp înalt care să poată produce câmpuri magnetice peste aproximativ ~ 10 T, magneții cu câmp toroidal (TF) din viitorul tokamak vor trebui să includă în continuare astfel de supraconductori HTS. Problemele mecanice pot limita durata de viață a unui magnet. Prin urmare, ciclul de viață al unei mașini comerciale de fuziune trebuie să ia în considerare opțiunile economice pentru înlocuirea bobinelor.

În acest raport, investigăm dacă proprietățile materialelor HTS pot contribui la reducerea costurilor de înlocuire a bobinelor TF, permițând îmbinările demontabile. Îmbinările demontabile vor: (i) - elimina eșecul punctului unic al unei structuri monolitice a bobinei TF; (ii) - permite construirea modulară a magneților supraconductori complecși foarte mari; (iii) - îmbunătățirea întreținerii reactorului prin favorizarea accesului; (iv) - crește disponibilitatea unui reactor de fuziune; (v) - permite testarea simplificată a componentelor materialelor; (vi) - și permite optimizarea configurației reactoarelor de fuziune.

Am investigat jonctiunile si imbinarile lamelelor supraconductoare cu ajutorul tomografiei de raze X. Configuratia lamelelor consta intr-un strat subțire de material de lipire inserat între două, patru respectiv șase lamele (benzi) de tip HTS de tip $Ba_2Cu_3O_7$ (REBCO), de a doua generație (2G) HTS CC. În esență, pentru HTS sunt raportate două tipuri de îmbinări (*figura 4.1*), un tip de îmbinare prin suprapunere care permite maximizarea ariei de contact pentru a realiza o rezistență redusă și un altul de îmbinare în punte în care prioritară este minimizarea separării supraconductorilor. Îmbinările prin suprapunerea benzilor HTS sunt mai de succes, deoarece interfețele demontabile sunt metalice în timp ce îmbinările cap la cap sunt susceptibile la deteriorări mecanice.

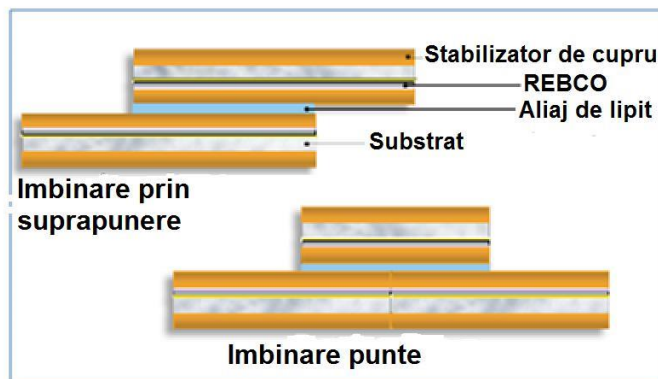


Figura 4.1. Tipuri de îmbinări: suprapunere și punte;

Pentru îmbinări s-au folosit benzi HTS produse de SuperPower Inc. IBADMOCVD 2G REBCO CC. Materialul utilizat pentru lipirea benzilor a fost în acest caz Pb38Sn62. Toate îmbinările au fost fabricate folosind aceleași tip de benzi HTS. Specificațiile benzilor sunt specificate în Tabelul 1 și o diagramă schematică a structurii sale multistrat este prezentată în figura 4.2.

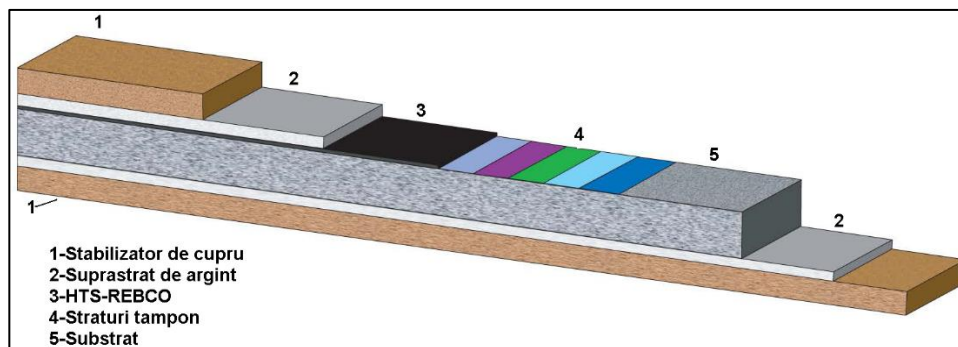


Figura 4.2. Structura multistrat a benzii supraconductoare SuperPower IBAD-MOCVD REBCO CC;

În studiile noastre tomografice am investigat stratul de lipire a trei tipuri de esantioane având următoarele configurații: banda / banda (esantion 1), 2x benzi / 2x benzi (esantion 2) și 3x benzi / 3x benzi (esantion 3).

Tabelul 1. Specificațiile modelului de bandă folosită

Numar model	SCS4050
Valoarea medie I_c la 77 K in camp magnetic	98 A
Valoarea medie a factorului n la 77 K	30
Latime	3.99 mm
Grosimea totala	0.095 mm

Configurația etanșonului 1 constă într-o bandă (SCS4050) lipită peste altă bandă (figura 4.3.a). În imaginea din figura 4.3.a cu roșu sunt benzile HTS (stabilizator de cupru), iar cu alb este stratul de lipitură (Pb38Sn62) care înfășoară practic benzile. Calitatea imaginilor permite observarea defectelor

de tip pori, fisuri sau delaminari aparute în stratul de lipitură. În *figurile de mai jos* se pot observa masuratori metrologice asupra secțiunilor reconstruite pentru esantionul 1.

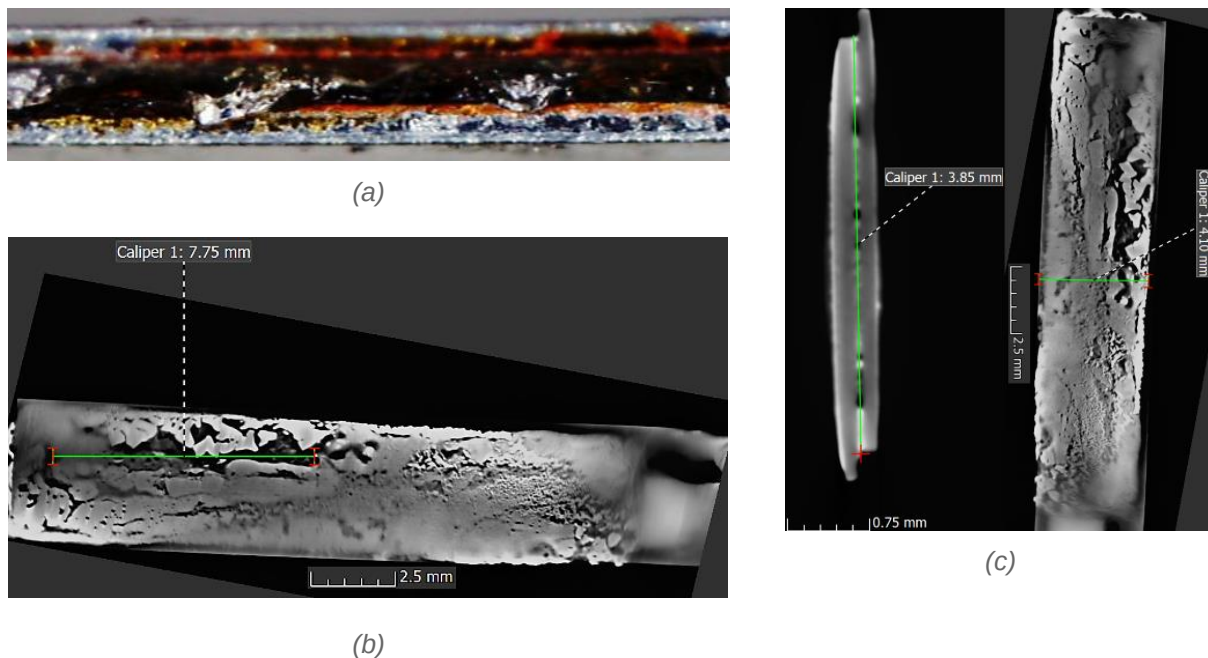


Figura 4.3 Bandă lipită peste altă bandă (primul caz de investigație tomografică) (a); Măsurarea celei mai mari fisuri ce a apărut în stratul de lipituri (b); Măsurători dimensionale în secțiuni laterale, rezoluția la care a fost tomografiat esantionul a fost de $10\ \mu\text{m}/\text{voxel}$ (c);

Esantionul 2 are configurația de stivă de două benzi lipite peste alte două benzi (figura 4.4).



Figura 4.4. Stivă de două benzi lipite peste alte două benzi (al doilea caz de investigație);

Pentru acest esantion s-a urmărit studiul a 3 plane. Ca și în cazul precedent rezoluția tomografică a fost de $10\ \mu\text{m}/\text{voxel}$. În figura 4.5 este prezentată o vedere de ansamblu a esantionului scanat (vedere frontală, sagitală și 5 vederi de deasupra: 3 straturi de lipitură internă + 2 straturi de lipitură la interfața cu exteriorul).

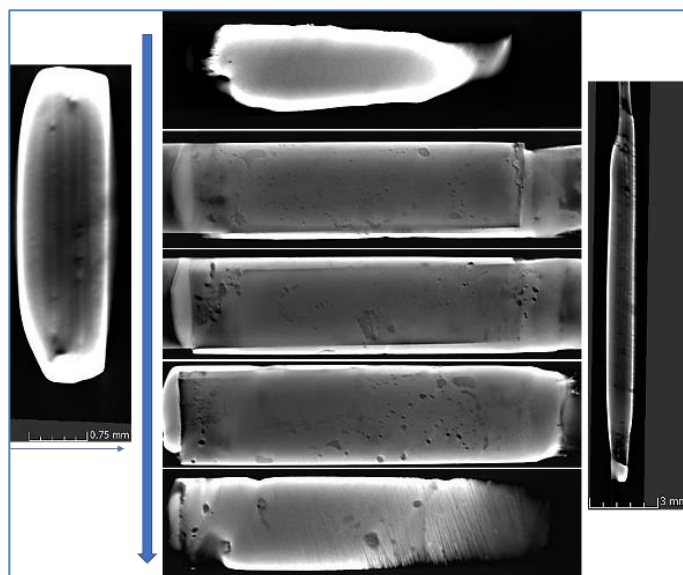


Figura 4.5. Multiple secțiuni tomografice din esantionul 2: vedere frontală (stanga), sigitală (dreapta) și 5 zone de interfata (centru); Marcare orientare secțiuni in proba;

În figurile de mai jos sunt prezentate primul, al doilea și al treilea plan de lipitură (vedere de sus) având imagini în care sunt evidențiați și măsurați macro / micro porii.

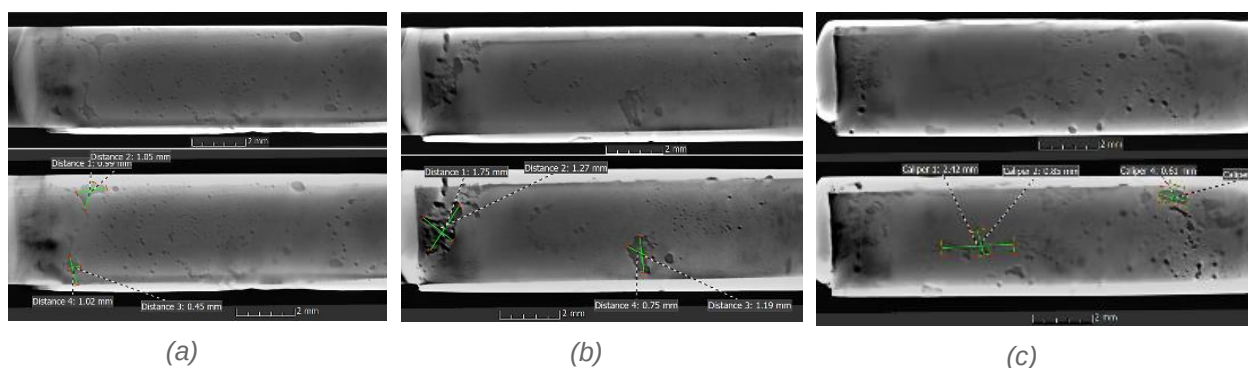


Figura 4.6. Prezentarea primului strat de lipitură împreună cu porii identificați (a); Prezentarea celui de-al doilea strat de lipitură împreună cu micro și macro porii (b); Prezentarea celui de-al treilea strat de lipitură împreună cu micro și macro porii (c);

Esantionul 3 a constat dintr-o stivă de șase benzi lipite între ele prin cinci straturi de material de lipire (figura 4.7).

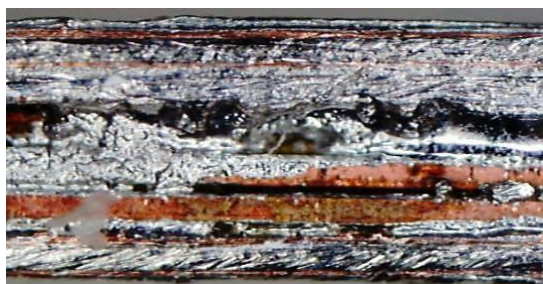


Figura 4.7. Stivă de 3 x 3 benzi;

În acest caz au fost studiate 5 interfețe. În figura 4.8 avem o prezentare generală a acestei reconstrucții. În această imagine apar 2 imagini cu vedere frontală și sagitală a obiectului plus 7 imagini cu vedere de sus ce reprezintă planele de lipitură interne plus cele două planuri de lipitură exterioară care se afla la interfața cu exteriorul. Și în acest caz rezoluția reconstrucției tomografice a fost de 10 μm .

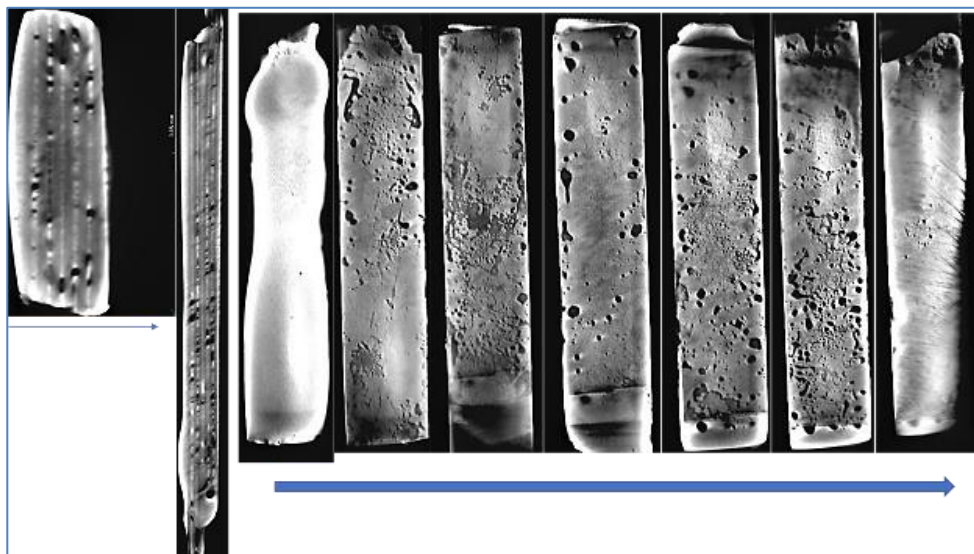


Figura 4.8. Prezentare generală a esantionului nr. 3 scanat: vedere frontală, sigitală și 7 vederi superioare;

Astfel, au fost observați macro pori și multiple crăpături care se regăsesc în primul, al doilea și al treilea strat de lipitură și micro porii din straturile patru și cinci (figura 4.9).

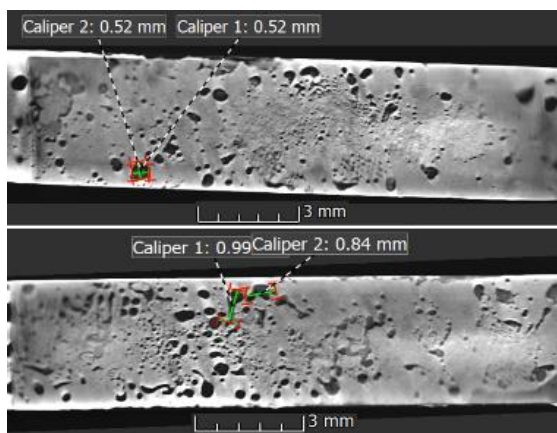
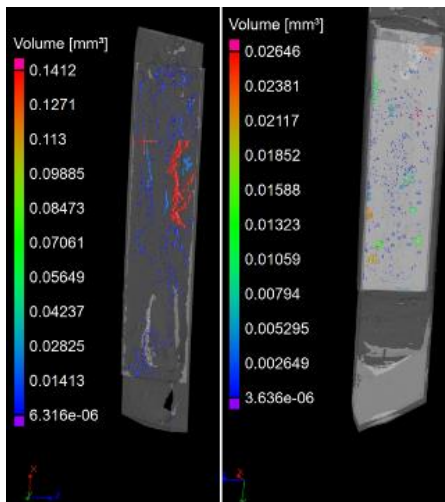


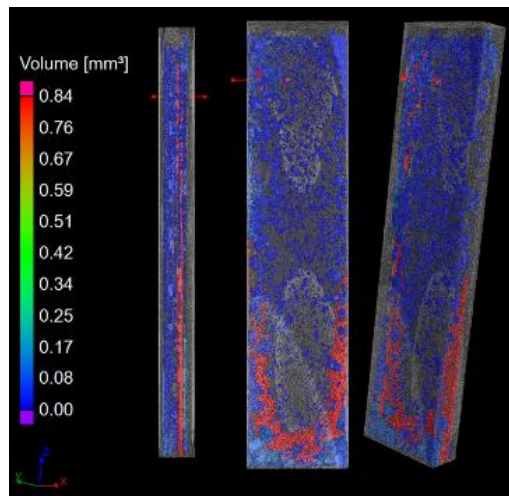
Figura 4.9. Prezentarea dimensiunilor microporilor determinați în al patrulea și al cincilea strat de lipitură;

Cu ajutorul modulului de porozitate din programul de reconstrucție și vizualizare s-a reușit realizarea analizei de porozitate a esantioanelor investigate prin tomografie, determinându-se astfel volumul pentru fiecare micro și macro por în parte ce există în straturile de lipitură.

S-a aplicat și o analiză a porilor prin aplicarea modulului de porozitate integrat în programul de analiză. Drept urmare, în figura 4.10 se poate observa analiza de porozitate aplicată pe toate cele 3 esantioane.



(a)



(b)

Figura 4.10. Prezentarea analizei de porozitate pentru primul (stanga) și al doilea (dreapta) esantion (a); Prezentarea analizei de porozitate pentru al treilea esantion (b);

Concluzii

Cu ajutorul tehnicii de tomografie computerizată, putem examina ne-invaziv calitatea lipirii utilizate pentru a uni două sau mai multe benzi HTS în scopul realizării unui supraconductor HTS cu lungimile și proprietățile dorite. Cantitativ a fost posibil să se determine la micro scală distribuția volumetrică a porilor și a altor defecte și clasificarea lor după formă, volum și conectivitate.

Intalniri:

- Ion Tiseanu, WPMAG final meeting: 10-14 Februarie 2020, Frascati, Italia;

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)

UTCN – Prof. Traian Petrisor, (traian.petrisor@utcn.ro).