

"IMAGISTICĂ BIOMEDICALĂ ÎN STOMATOLOGIE ȘI NDT FOLOSIND O GAMĂ DE TEHNICI DE INVESTIGARE, CU FOCUS PE TOMOGRAFIA ÎN COERENȚĂ OPTICĂ (OCT)"

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnică Timișoara

în domeniul de doctorat *INGINERIE MECANICĂ*

autor **ERDELYI RALPH-ALEXANDRU**

conducător științific Prof.univ.dr.ing. *DUMA VIRGIL-FLORIN*

OCTOMBRIE 2023

Introducere

Această teză de doctorat are ca temă principală *tomografia în coerență optică* / Optical Coherence Tomography (OCT) [1] - folosită ca metodă de imagistică medicală în stomatologie [2], dar și utilizarea altor tehnici de investigație stomatologice, tradiționale, bazate pe raze X, în principal pentru validarea rezultatelor OCT în domeniul biomedical. S-a abordat OCT și în aspecte de *control nedistructiv* / Non-Destructive Testing (NDT) pentru domeniul industrial, dar și al studiului materialelor biomedicale, direcție în care OCT a fost validat cu alte tehnici, cum ar fi *microscopia cu fascicul de electroni* / Scanning Electron Microscopy (SEM). Astfel, domeniul tezei este cel al Ingineriei Mecanice, specializarea Mecanică Fină, cu focus pe aspecte ale sistemelor de măsurare (în acest caz, fotonice și optomecatronice).

Pentru a putea aborda aceste direcții de cercetare și pentru a face un studiu asupra unor aplicații ale OCT în stomatologie și NDT (cu validarea rezultatelor cu tehnici curente existente, conform celor de mai sus), s-a făcut în prima parte a studiului trecerea în revistă a celor mai utilizate tehnici de imagistică, în primul rând medicală utilizate la ora actuală [3-5] și se abordează, pe baza experienței practice a doctorandului (fizician medical) cele mai folosite metode imagistice în stomatologie (radiografiile 2D și radiografiile 3D Cone Beam Computed Tomography - CBCT) [6-8]. S-au realizat în cea de-a doua parte a studiului investigații OCT [1,9,10] cu sistemul existent în laboratorul Conducătorului de doctorat, evidențiindu-se beneficiile aduse față de metodele uzuale, bazate pe radiații X. Investigațiile OCT prefigurate includ: evaluarea cariilor, adaptarea coroanelor dentare pe dinți, verificarea implantelor, instrumentelor, componentelor de laborator și a lucrărilor de laborator sau analiza smalțului și a dentinei dinților considerați sănătoși. În a treia parte a tezei investigațiile au continuat cu aspecte de NDT, pentru subiecte de interes la ora actuală.

OCT este o metodă de imagistică medicală care nu folosește radiații ionizante ca sursă (cum sunt razele X), ci radiație laser în domeniul infraroșu (IR), așadar nu este dăunătoare țesuturilor organismului. Aceasta este o metodă relativ nouă (introdusă în anii '90), în plină dezvoltare, ea fiind realizată inițial pentru oftalmologie. Chiar dacă se realizează alte tipuri de imagini față de cele obținute prin radiografii, imaginile realizate cu OCT fiind inclusiv de tip reconstrucție volumetrică/3D – similare celor ale tomografiei computerizate (CT) - ele pot ajuta la diagnoză la fel de bine ca metodele uzuale de imagistică. OCT, ca orice altă asemenea tehnică medicală, are plusurile și minusurile ei, dar are în mod cert aplicabilitate în stomatologie, atât în investigații *ex vivo* [2,11-13], cât și *in vivo*, direct pe pacient [14,15].

S-au obținut în capitolele 2 și 3 rezultate cu o aplicabilitate directă în domeniul medical și care sunt evidențiate atât în teză cât și în publicațiile realizate (în reviste cotate Web of Science (WoS)) pentru prima dată la nivel mondial: optimizarea aparaturii cu raze X utilizate pentru realizarea radiografiilor dentare cu ajutorul OCT [16] și demonstrarea complementarității celor două tehnici de imagistică pentru stomatologie [17]. Cu alte cuvinte, s-a reușit calibrarea și setarea aparaturii în așa fel încât radiografiile să fie de cea mai bună calitate posibilă cu o doză (cât mai) redusă de radiații. Nevoia de a găsi cele mai bune setări pentru aparatură a fost dată de faptul că pe imaginile obținute cu sistemele OCT s-au putut realiza măsurători exacte, iar pe radiografiile problemele ce trebuiau cuantificate nici măcar nu erau vizibile. După aplicarea protocolului dezvoltat în această teză de doctorat, calitatea imaginilor radiologice a permis depistarea problemelor, dar s-a realizat faptul că unele probleme nu pot să fie diagnosticate decât pe imaginile OCT. Știind deficiențele pe care le are OCT față de radiografiile și descoperind și dezavantajele radiografiilor în comparație cu OCT, am ajuns la concluzia că cele două tehnici de imagistică medicală sunt complementare.

Pe lângă aceste două rezultate din domeniul medical, am utilizat sistemele OCT pentru a face măsurători și analize metrologice pentru diferite probe în domeniul NDT, rezultate prezentate în capitolele 5-7. Astfel, am utilizat OCT și ca metodă alternativă la SEM sau micro-CT. Rezultatele obținute pentru fiecare direcție de cercetare au arătat că imaginile și măsurătorile realizate cu OCT sunt în concordanță cu rezultatele obținute cu celelalte metode imagistice.

Justificarea alegerii temei de cercetare

Pasiunea pentru știință am avut-o încă din copilărie, fiind an de an participant la olimpiadele școlare de matematică, fizică și chimie. Mi-am urmat această pasiune și la facultate, unde m-am specializat în Fizică Medicală (la UVT), după trei ani de licență și 2 ani de masterat. Încă din ultimul an de masterat am avut oportunitatea de a colabora cu domnul Prof. Dr. Virgil-Florin Duma, care m-a îndrumat spre acest doctorat, fiindu-mi conducător științific. Am ales tema aceasta din două motive. Primul motiv a fost acela al continuității. Lucrarea de dizertație a fost tot despre OCT în stomatologie - la UVT, tot sub îndrumarea Prof. Duma. Al doilea motiv pentru care am ales această temă este faptul că lucrez ca fizician medical într-o clinică dentară în Timișoara, unde pot să pun în aplicare toate lucrurile învățate sau realizate în proiectele de cercetare. Inițial mi-am propus să studiez aplicabilitatea OCT în cât mai multe cazuri dentare, având avantajul că am avut la dispoziție atât aparatura din clinică (aparatele de radiologie dentară) cât și pe cea de tip OCT din laboratorul Prof. Duma din cadrul Universității Aurel Vlaicu din Arad. Pe lângă aparatură, am avut acces și la probe, dar m-am conectat de asemenea bine cu cerințele medicilor și cu nevoile lor și ale pacienților. Astfel, s-au deschis mai multe idei de cercetare.

Aparatele radiologice nu mai sunt noutăți din punct de vedere tehnologic; astfel, folosim în teză radiologia doar ca metodă de comparație pentru sistemul Swept Source (SS)-OCT funcțional din laborator. În cadrul grupului de cercetare condus de domnul Prof. Dr.-habil Ing. Virgil-Florin Duma s-au realizat prototipuri de probe de mână pentru o aplicabilitate mai mare a sistemului, în ideea utilizării OCT și *in vivo*. Cu ajutorul sistemelor micro-electromecanice (MEMS) sau cu galvoscanerile laser se pot realiza și reconstrucții 3D/volumetrice.

În OCT s-a plecat de la tehnica inițială Time-Domain (TD) OCT unde se folosea un spectru larg de iluminat și un fotodetector obținea semnal prin scanarea lungimii brațului de referință, la Spectral Domain (SD) OCT unde nu mai este nevoie de brațe mobile dar e necesar un spectrometru pentru detectarea spectrului larg de interferență și ajungând la SS-OCT (aparatura existentă în laborator), care nu necesită brațe mobile, unde o linie spectrală îngustă este trecută printr-o gamă de lungimi de undă și semnalul este obținut de un fotodetector.

Partea teoretică, atât pentru capitolele de radiologie cât și pentru OCT, îmi oferă cunoștințe și abilități pentru partea practică a tezei de doctorat dar și idei de lucrări științifice. Aprofundând aceste subiecte am observat care sunt direcțiile de cercetare, unde este stadiul actual la nivel internațional și ce nișe au rămas neacoperite pentru cercetare.

Structura tezei de doctorat

Această teză de doctorat este structurată în 8 capitole, primul capitol fiind introductiv pentru tema imagisticii medicale; am descris tehnicile uzuale și aparatura utilizată, cu accent pe OCT. Capitolele 2-7 sunt realizate pe baza lucrărilor de revistă publicate sau în curs de publicare. Aceste capitole sunt partea esențială a cercetării deoarece reprezintă contribuția personală în domeniu. Capitolul 8 este capitolul care încheie teza și este dedicat concluziilor finale ale tezei de doctorat și direcțiilor de lucru deschise de aceasta.

Capitolul 1 - Tehnici de imagistică medicală

În **capitolul 1 al tezei** de doctorat s-a efectuat o prezentare a diferitelor tehnici de imagistică medicală, inclusiv o descriere a fiecărei metode, o analiză a clasificării acestora și o discuție a avantajelor și limitărilor fiecărei tehnici. Am explicat cum funcționează radiografia cu raze X, CT, ultrasonografia, imagistica prin rezonanță magnetică (RMN), tomografia cu emisie de pozitroni (PET) și OCT. Am realizat, de asemenea, o clasificare a acestor tehnici în funcție de sursa lor de generare a imaginilor. Această clasificare este esențială pentru înțelegerea modului în care fiecare metodă se încadrează într-un anumit context.

În ceea ce privește avantajele și limitările, am subliniat că fiecare tehnică de imagistică medicală are punctele sale forte și limitările ei. De exemplu, radiografia cu raze X este utilizată pe scară largă, dar implică expunerea la radiații ionizante, în timp ce RMN-ul oferă imagini detaliate ale țesuturilor moi, dar poate fi costisitor. Am discutat și despre unele aplicații practice ale fiecărei tehnici în domeniul medical.

Tot în acest capitol am scris despre bazele teoretice ale OCT-ului, despre sisteme și modalități de scanare laser – Fig.1, tipuri de OCT, aplicații ale OCT în medicină și în NDT.

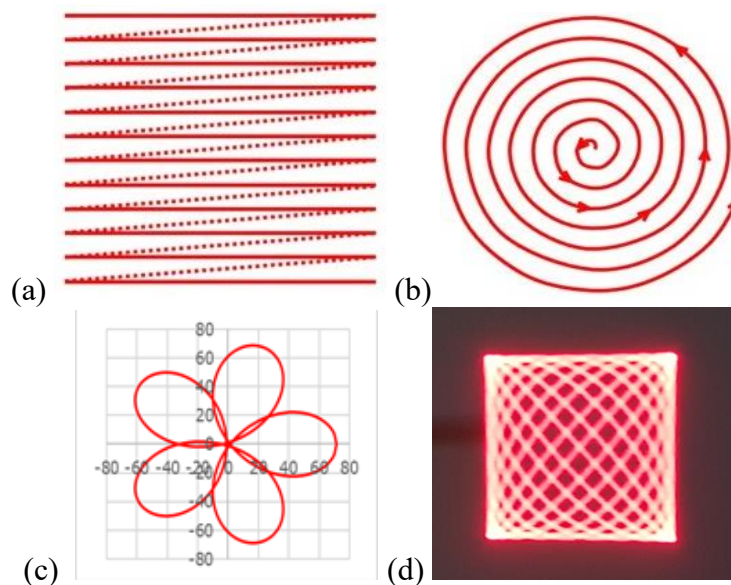


Figura 1. Modalități de scanare laser optomecatronică: (a) raster – utilizată în sistemul OCT din această teză, (b) spirală, (c) cu prisme Risley, (d) Lissajous.

Capitolul 2 – Metode imagistice în stomatologie

În **capitolul 2 al tezei** am descris aparatura utilizată în radiologia dentară, cu focus pe cea pe care am utilizat-o în activitatea de cercetare avută pentru realizarea acestei teze de doctorat. Este subliniat faptul că noile tehnologii digitale înlocuiesc metoda tradițională a utilizării filmelor în domeniul stomatologiei și că experiența este esențială pentru utilizarea eficientă a acestor echipamente. Un exemplu specific este Planmeca ProMax 3D, care folosește detectoare digitale pentru capturarea imaginilor radiografice. Pentru a obține imagini de înaltă calitate, aceste detectoare digitale trebuie să fie sensibile, iar dimensiunea pixelilor și reducerea zgomotului de fundal sunt factori critici. Procesul de obținere a radiografiilor dentare implică expunerea pacientului la radiații X, colectarea datelor și apoi procesarea acestora pentru a crea imagini. Componentele și etapele acestui proces sunt detaliate în teză.

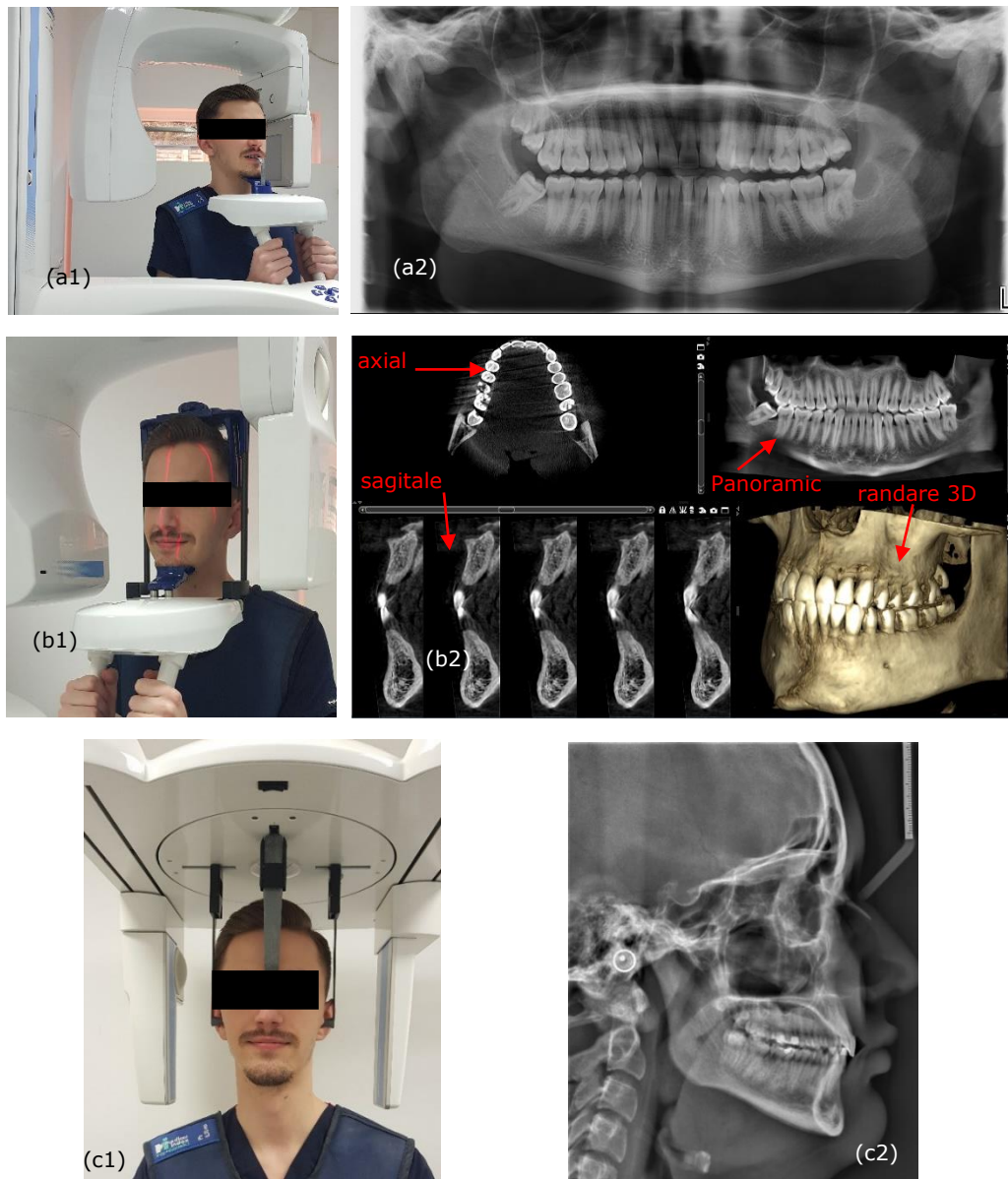


Figura 2. Exemplu de configurare a sistemului Planmeca pentru investigații (a1) panoramice, (b1) CBCT 3D și (c1) cefalometrice (ale unui membru sănătos al personalului). Imagini obținute: (a2) panoramică; (b2) Imagini CBCT 3D, cu vederi axiale, sagitale și panoramice, precum și o reconstrucție 3D; (c2) cefalometric.

Capitolul 3 – Sinergia dintre OCT și radiografii

Capitolul 3 se concentrează pe sinergia dintre Tomografia în Coerență Optică (OCT) și radiografiile în domeniul stomatologiei. Stomatologia a evoluat semnificativ datorită progreselor tehnologice în diagnostic și tratament. Radiografiile intraorale, panoramice, precum și Tomografie Computerizată cu Fascicul Conic (CBCT) sunt tehnicile standard de imagistică în stomatologie, dar prezintă dezavantajul expunerii pacienților la radiații ionizante. Astfel, pentru a reduce cât mai mult expunerea pacienților la radiație, se pot utiliza tehnici alternative de imagistică. Tehnicile cu raze X sunt limitate în rezoluție: în jur de 127 μm pentru radiografia panoramică, 144 μm pentru radiografiile intraorale și 75 μm pentru CBCT. SS-OCT, având o rezoluție axială de $\sim 15 \mu\text{m}$, oferă imagini pe care se poate diagnostica o problemă dentară în stadiu incipient sau una care pe radiografiile uzuale nu este vizibilă deloc. Astfel, în acest studiu am folosit diferite probe pe care le-am investigat cu ambele metode (raze X și OCT) și în funcție de informațiile care pot fi obținute din imagini, am împărțit cazurile în 3 categorii (care pot fi investigate doar OCT, doar cu radiografii și cele în care se pot utiliza în mod complementar ambele metode). Investigațiile OCT au fost efectuate în principal folosind un sistem OCT dezvoltat în cadrul Laboratorului de Optomecatronică și Fonică Biomedicală al Universității „Aurel Vlaicu” din Arad (diagrama schematică este prezentată în Figura 3). Radiografiile au fost realizate în clinica dentară Dental Experts din Timișoara cu același aparat Planmeca ProMax 3D Classic.

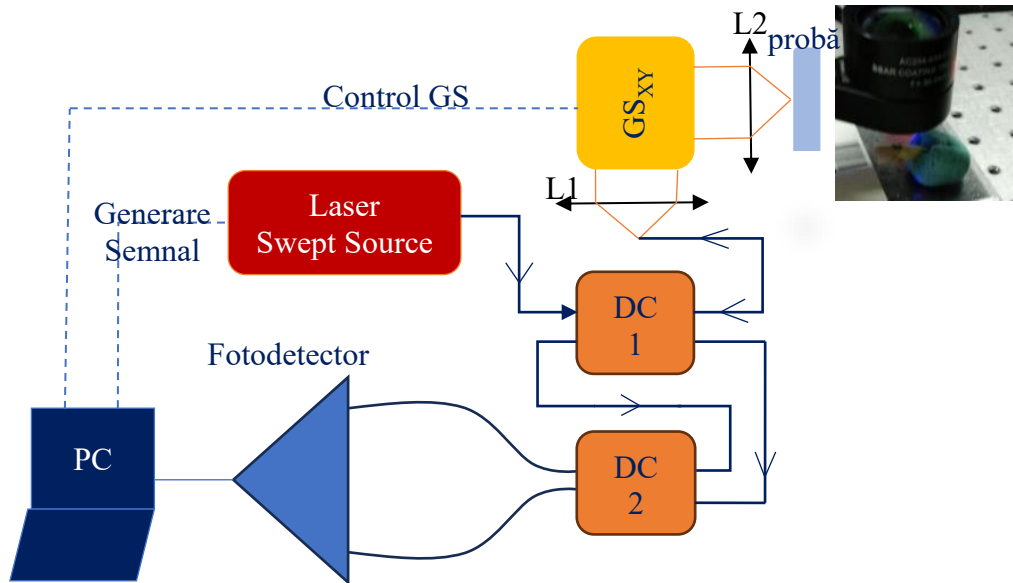


Figura 3. Sistem SS-OCT dezvoltat intern în 3OM Optomechatronics Group, utilizând un interferometru laser. Componente: Sursă cu emisie lineară; DC1,2, cuploare direcționale cu fibră optică monomod (20/80 și 50/50, respectiv); GSXY, scanner galvanometric bidimensional cu două axe; L1,2, lentile acromatice; BPD, fotodetector echilibrat; PC, calculator personal.

Cele prezentate în acest capitol au fost diseminate în (și sunt reproduse după) lucrarea [R.-A. Erdelyi, V.-F. Duma*, C. Sinescu, G. Dobre, A. Bradu, A. Podoleanu, Dental Diagnosis and Treatment Assessments: Between X-rays Radiography and Optical Coherence Tomography, Materials 13(21), 4825 (2020); <https://doi.org/10.3390/ma13214825>; **IF 3.623; Q1**].[17]

Rezultatele ne-au arătat faptul că se pot delimita clar cazuri dentare care pot să fie diagnosticate cu OCT, cu radiografiile și cazuri în care se pot utiliza în mod complementar și OCT și radiografiile.

Tabelul 2. Tehnica imagistică medicală potrivită pentru anumite probleme dentare.

Problemă dentară	Radiografie	OCT
Cavități	Cavitățile mai mici de $0,5 \times 0,5$ mm sunt greu de diagnosticat pe orice tip de radiografie	Evaluarea cantitativă corectă a (dimensiunilor) cavitațiilor mici
Coroane dentare (metal ceramice sau integral ceramice)	Pot apărea artefacte, prin urmare imaginile obținute nu pot fi utilizate	Imagini precise de suprafață pentru piese metalice; imagini de înaltă rezoluție sub suprafața probei pentru coroane nemetalice (ceramice sau polimerice)
Ortodonție	Potrivit pentru a măsura/observa mișcarea dinților	Imagini precise pentru analiza dentară (de exemplu, pentru smalț și dentina)
Evaluarea problemelor osoase	Investigații precise ale densității osoase și evaluării cantității osului pe imagini CBCT 3D	Putere de penetrare redusă prin os - de 1 până la max. 2 mm
Parodontita	Boala poate fi monitorizată în timpul tratamentului	Sunt posibile măsurători exacte (doar) ale pierderii/câștigului de os
Adaptare coroana/plombă	Imagini de înaltă calitate pentru materiale care nu absorb radiațiile de raze X în exces	Imagini de înaltă calitate pentru majoritatea tipurilor de materiale utilizate în stomatologie
Smalț / probleme cu dentina	Nu se pot investiga pe niciun tip de radiografie	Se pot obține imagini calitative, dar și evaluări cantitative - chiar și sub suprafața dinților
Țesut moale	Nu se poate investiga pe niciun tip de radiografie	Se pot obține imagini calitative. Limitarea adâncimii de penetrare până la max. 2 mm

Capitolul 4 – Optimizarea radiografiilor dentare utilizând OCT

În cadrul capitolului 4, am realizat o modalitate inovatoare de optimizare a unităților de raze X utilizate pe scară largă în medicina dentară. Pentru aceasta s-a implementat tehnologia de rezoluție mult mai mare, OCT. Rezultatele prezentate în acest capitol au fost diseminate în (și sunt reproduse după) lucrarea [R.-A. Erdelyi, V.-F. Duma*, C. Sinescu, G. Dobre, A. Bradu, A. Podoleanu, Optimization of X-ray Investigations in Dentistry using Optical Coherence Tomography, Sensors 21(13), 4554 (2021); <https://doi.org/10.3390/s21134554>; **IF 3.874; Q2**].

Calibrarea aparatelor cu raze X (cu precădere a parametrilor lor kV și mA) este esențială pentru obținerea imaginilor de cea mai înaltă calitate. Tensiunea aplicată influențează contrastul radiografiei, iar curentul (mA) reglează intensitatea curentului electric pentru generarea fasciculului de raze X. Procesul de achiziție de date este similar pentru toți producătorii de echipamente de acest tip, iar algoritmi speciali sunt utilizați pentru reconstrucția imaginilor 2D sau 3D. Radiografiile panoramice, intraorale și CBCT sunt tehnici comune de imagistică utilizate în stomatologie pentru diagnosticarea și evaluarea afecțiunilor dentare și maxilo-faciale. Aceste tehnici au caracteristici distinctive în ceea ce privește rezoluția, contrastul, artefactele și reproducerea culorilor, care pot influența interpretarea și utilizarea lor în practică.

Cercetarea realizată în acest capitol a demonstrat că OCT poate să fie utilizat în optimizarea sistemelor de radiologie dentară. Protocolul de optimizare implică investigarea

unei afecțiuni dentare cu ambele tehnici (OCT și radiografie). Se face diagnosticarea exactă pe imaginile OCT (cu o rezoluție axială de 15 μm , pe când imaginile cu raze X panoramice și 3D CBCT au o rezoluție de 150 până la 200 μm) iar mai apoi se caută setările optime ale kV și mA pentru fiecare tip de radiografie, până când afecțiunea dentară investigată cu OCT poate să fie corect diagnosticată și cu radiografiilor.

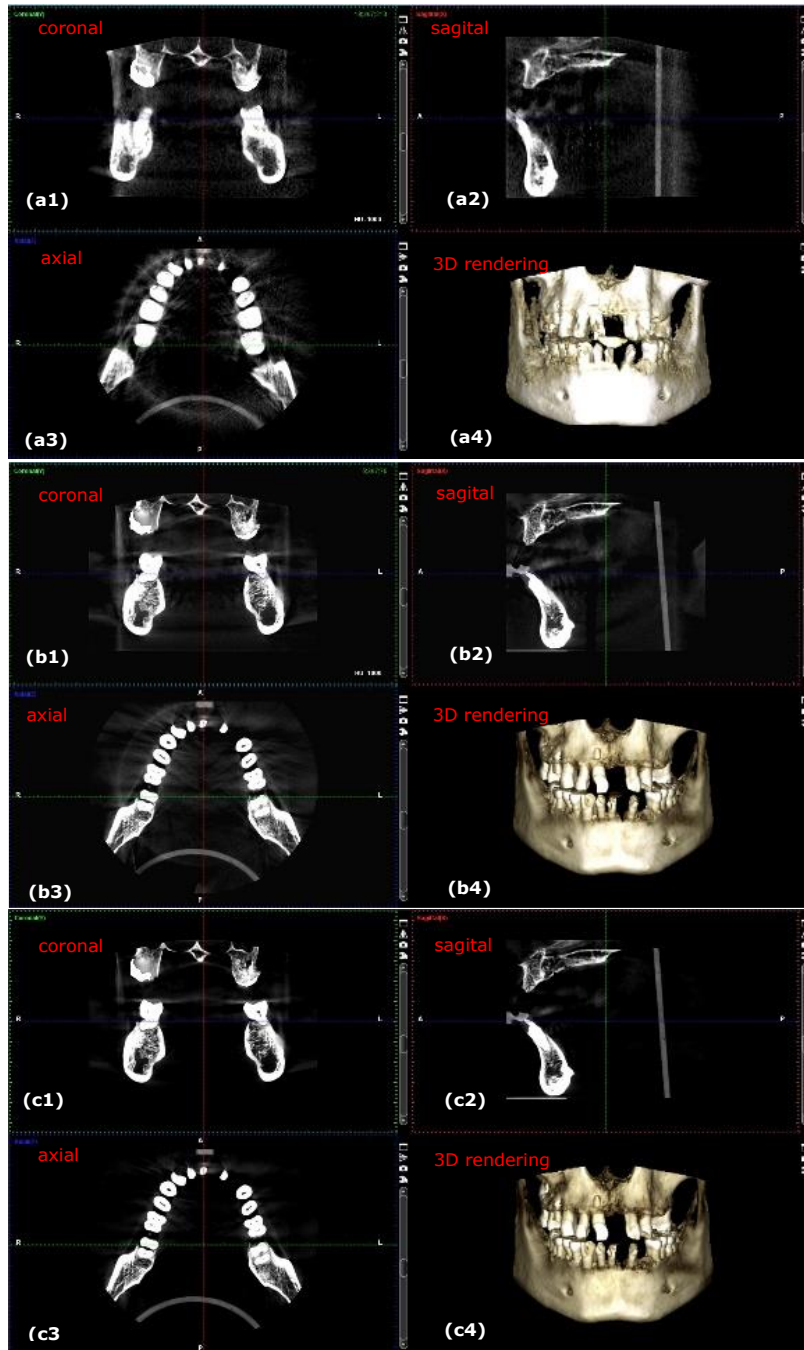


Figura 4. Imagini 3D CBCT obținute prin procesul de optimizare. Pașii acestui proces includ: (a) primele imagini CBCT 3D cu cele mai mici valori de tensiune și curent (b) un CBCT 3D intermediar; (c) CBCT 3D de cea mai înaltă calitate obținută. Cele patru imagini corespunzătoare din fiecare panou reprezintă: (1) vedere coronală; (2) vedere sagitală; (3) vedere axială; (4) redare 3D.

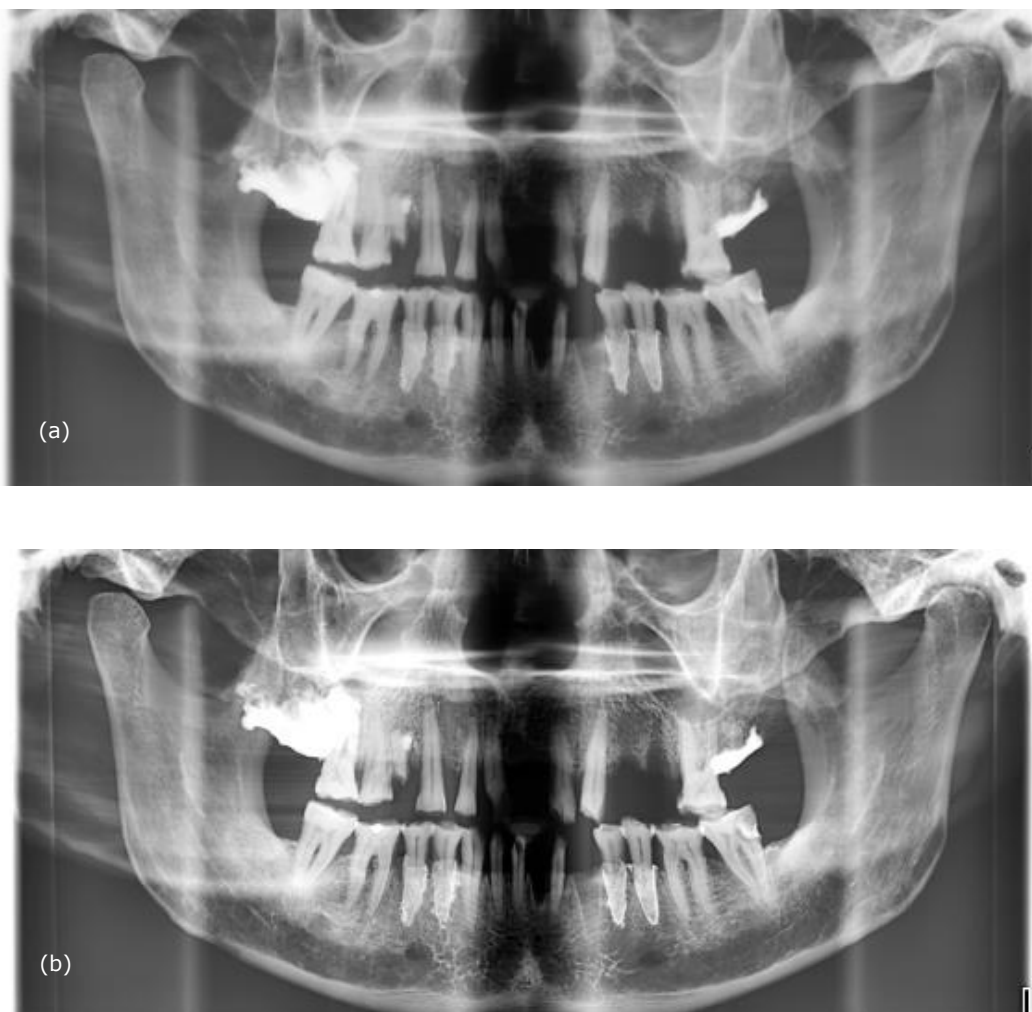


Figura 5. Radiografiile panoramice obținute în timpul procesului de optimizare (a – neoptimizat, b – optimizat).

După optimizarea aparatului cu raze X, s-au aplicat setările pentru realizarea radiografiilor pe pacienți [16]. S-a observat o îmbunătățire a calității radiografiilor dar și reducerea dozei de radiație.

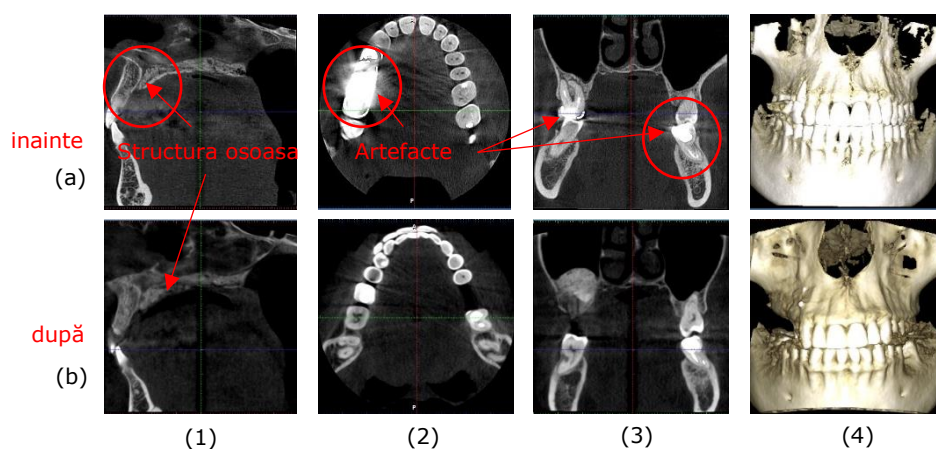


Figura 6. CBCT 3D efectuat pe același pacient (FC, bărbat, 29 ani): imagini (a) înainte și (b) după optimizare. Notății: (1) axial, (2) sagital, (3) coronal și (4) redare 3D.

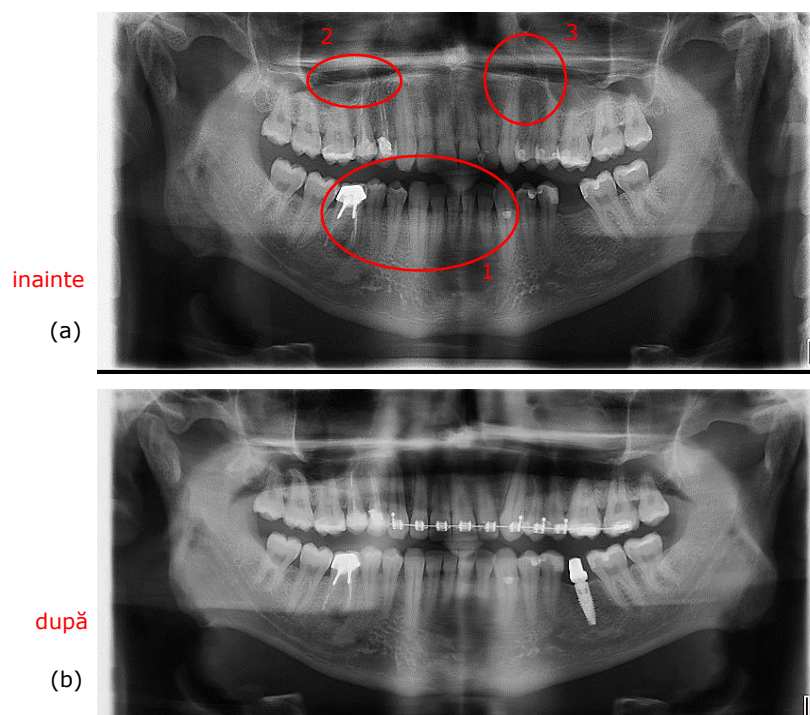


Figura 7. Radiografiile panoramice efectuate la același pacient (FC, bărbat, 29 ani) (a) înainte și (b) după optimizare.

Capitolul 5 – Efectul unui proces de fermentare anaerobă asupra materialelor PLA imprimate 3D ale unui reactor generator de biogaz

Capitolul 5, centrat pe OCT pentru NDT, se referă la testarea reactoarelor pe bază de acid polilactic (PLA) imprimate 3D pentru producerea de biogaz folosind digestia anaerobă. Este investigat impactul temperaturii, pH-ului și fazei apoase asupra reactorului testat, împreună cu efectul fazei gazoase / biogazul produs. Au fost considerate două loturi separate de materiale utilizate unul după altul în interiorul reactorului, într-o situație realistă. Doi parametri esențiali în interiorul reactorului (pH și temperatură) au fost monitorizați continuu pe o perioadă de 25-30 de zile pentru fiecare dintre cele două procese de generare a biogazului. Cele prezentate în acest capitol au fost diseminate în (și sunt reproduse după) lucrarea [A. Cioabla, V.-F. Duma*, C. Mnerie, R.-A. Erdelyi, G.M. Dobre, A. Bradu, A. Podoleanu, Effect of an Anaerobic Fermentation Process on 3D-printed PLA Materials of a Biogas-generating Reactor, Materials 15(23), 8571 (2022); <https://doi.org/10.3390/ma15238571>; **IF 3.4; Q2**].

Imagistica OCT a fost realizată cu același sistem ca în studiile precedente, din laboratorul din cadrul UAV Arad. Pentru analizele SEM (Microscopie Electronică cu Scanare), s-a folosit un sistem FEI Quanta 250. Procedura de investigare a implicat montarea eșantioanelor pe suporturi conductive de cupru cu plăchete de carbon și expunerea acestora la fasciculul de electroni de scanare. Pentru a obține imagini de înaltă calitate, toate probele de PLA investigate au fost acoperite cu aur înainte de analiza SEM [18].

Studiul a indicat că materialele polimerice, cum este PLA, sunt adecvate pentru dezvoltarea componentelor și bioreactoarelor la scară mică pentru cercetarea procesului de digestie anaerobă în scopul producerii de biogaz. Rezultatele experimentelor arată că plăcile de testare utilizate în studiu sunt afectate parțial de reacțiile chimice și biologice din interiorul reactorului. Cu toate acestea, structura dezvoltată permite efectuarea de teste multiple și indică faptul că materialele imprimate 3D bazate pe PLA reprezintă o soluție viabilă pentru fabricarea componentelor în astfel de aplicații.

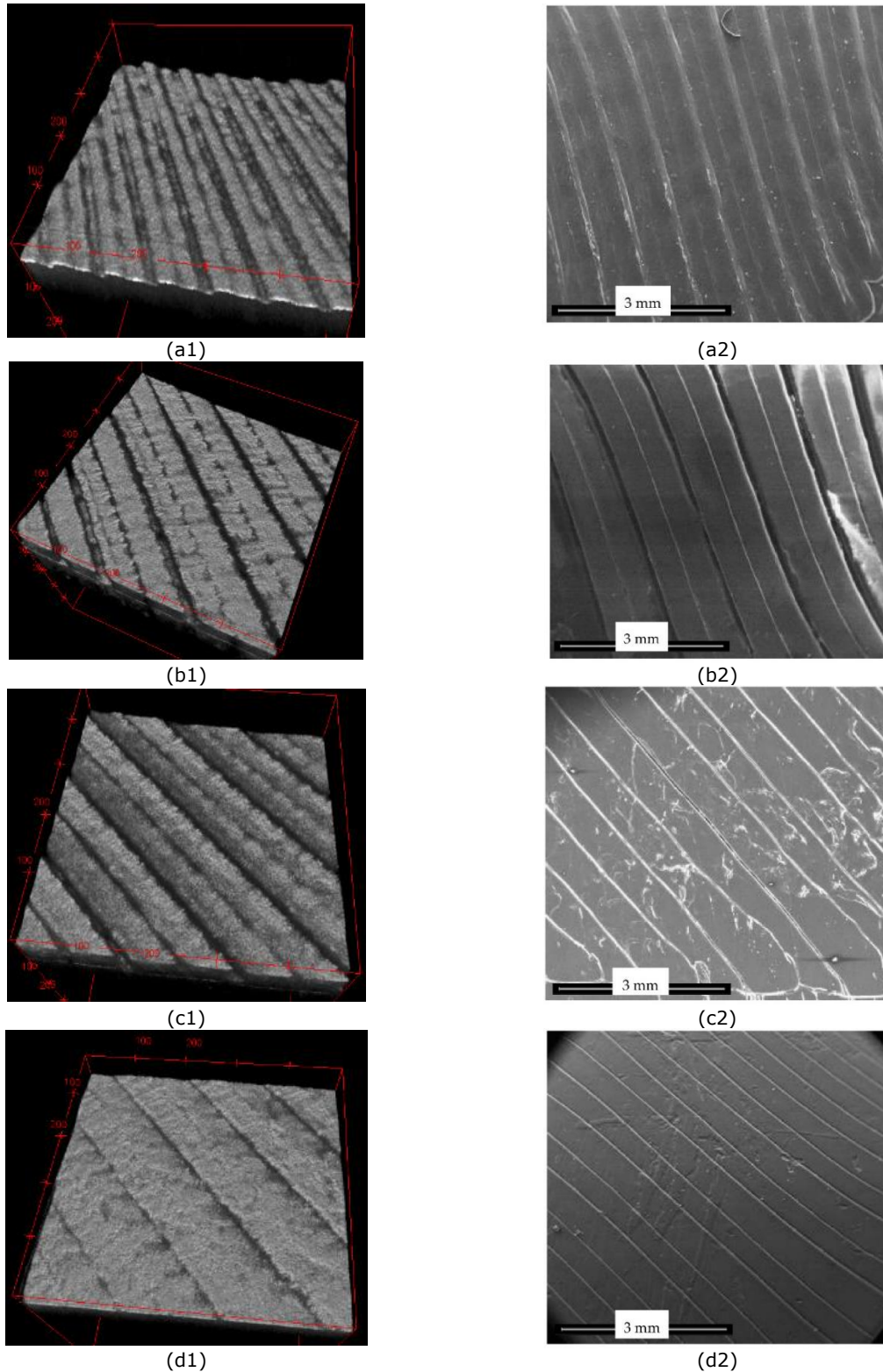


Figura 8. Imaginea plăcilor de probă la diferite niveluri în reactorul de biogaz: (a1,a2) placă de control; (b1,b2) placa superioară (situată în partea superioară a bioreactorului); (c1,c2) placa de mijloc (situată în partea centrală a bioreactorului); (d1,d2) placa inferioară (situată în partea cea mai densă a substratului din bioreactor). Imaginile din coloana (a1–d1) din stânga reprezintă reconstrucții 3D OCT cu o suprafață de $3,5 \times 3,5 \text{ mm}^2$, în timp ce coloana (a2–d2) din dreapta reprezintă imagini SEM ale plăcii corespunzătoare din stânga (acoperită cu aur).

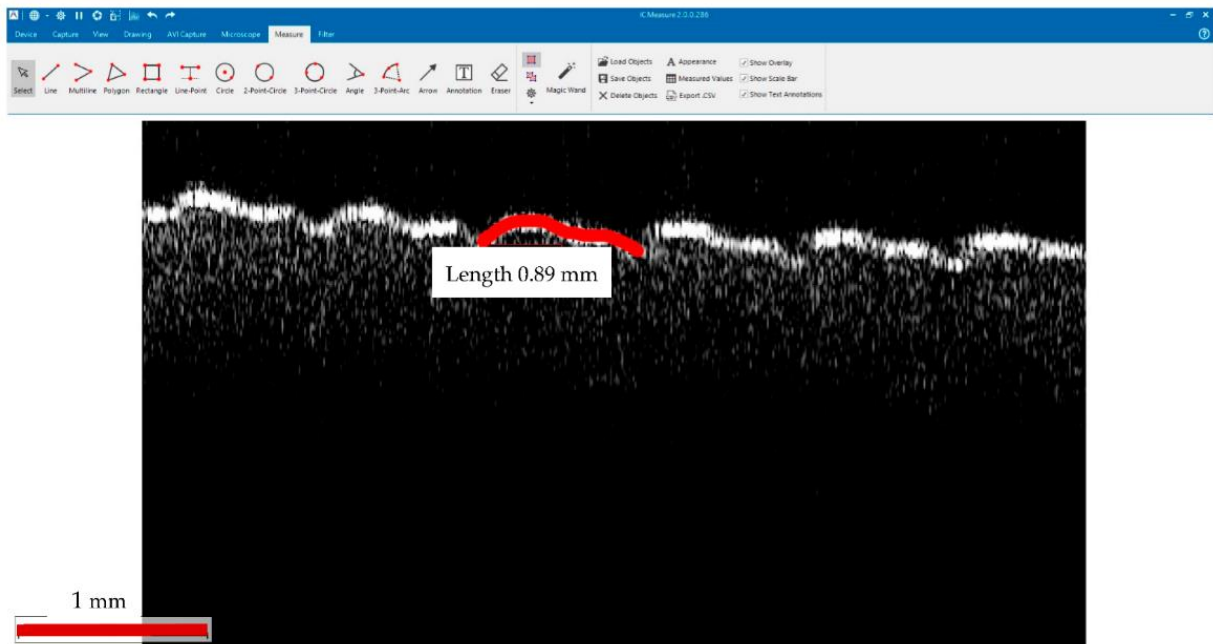


Figura 9. B-scan procesat folosind programul IC Measure (The Imaging Source Europe GmbH, Bremen, Germania) pentru a evalua lungimile porțiunilor superioare ale fiecărui B-scan considerat. Dimensiunile imaginii sunt 3,5 (lateral) \times 1,96 (vertical, de-a lungul adâncimii măsurate în aer) mm².

Deși sunt necesare cercetări suplimentare privind parametrii, compoziția chimică și diferitele tipuri de substraturi utilizate în teste, concluziile studiului sunt promițătoare pentru utilizarea acestor materiale în cercetarea din domeniu.

În Figura 9 și 10 sunt evidențiate zonele măsurate pentru fiecare probă în parte, pentru fiecare grup în parte. Rezultatele măsurătorilor sunt în Tabelul 3.

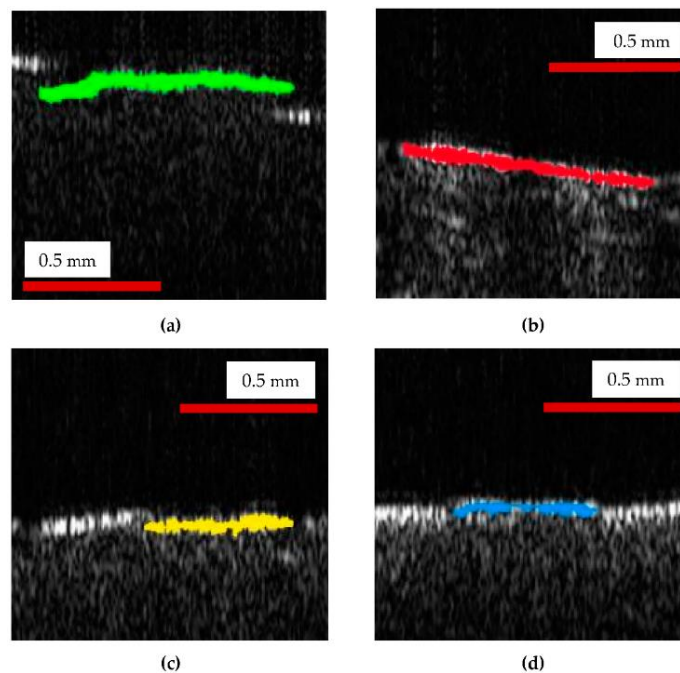
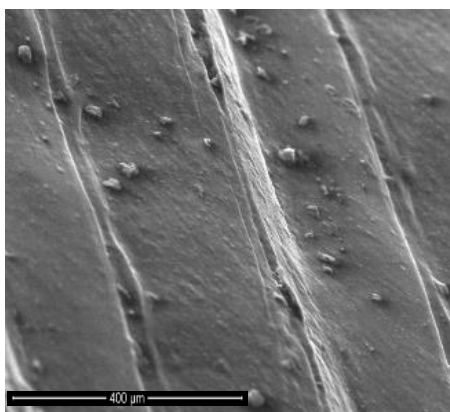


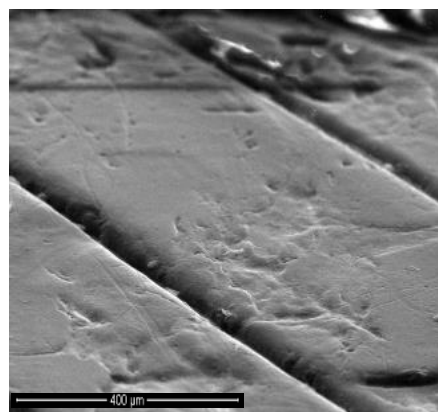
Figura 10. Detalii despre scanările OCT B de la fiecare dintre plăcile de probă de la: (a) grupul de control; (b) placa superioară; (c) placa de mijloc; (d) placa de jos. Dimensiunile fiecărei imagini sunt 0,92 (lateral) \times 0,95 (vertical, de-a lungul adâncimii măsurate în aer) mm²

Tabelul 3. Valorile lungimilor porțiunilor superioare ale profilurilor de suprafață a douăzeci de scanări B, prezentate ca exemple marcate cu culori diferite în Figura 10. Evaluările folosind programul sunt prezentate pe un exemplu în Figura 9.

Probă	Referință (mm)	Sus (mm)	Mijloc (mm)	Inferioare (mm)
Valorile măsurate ale conturilor colorate marcate în Figura 10	0,91	0,82	0,59	0,56
	1	0,7	0,64	0,6
	0,81	0,65	0,56	0,61
	0,84	0,69	0,53	0,49
	0,88	0,86	0,61	0,62
	0,98	0,84	0,63	0,59
	0,91	0,8	0,57	0,52
	0,83	0,84	0,63	0,54
	0,9	0,83	0,68	0,58
	0,89	0,78	0,59	0,57
	0,86	0,81	0,55	0,61
	0,92	0,69	0,59	0,5
	0,84	0,85	0,65	0,62
	0,81	0,76	0,61	0,58
	0,95	0,74	0,57	0,61
	0,87	0,81	0,6	0,53
	0,98	0,73	0,59	0,57
	1	0,8	0,62	0,55
	0,93	0,79	0,58	0,59
	0,89	0,76	0,61	0,6
Medie (mm) $\bar{\varepsilon} = \frac{\sum_{j=1}^N \varepsilon_j}{N}$	0,9	0,78	0,6	0,57
Abaterea medie absolută (mm) $MAD = \frac{\sum x_i - \bar{x} }{N}$	0,048	0,05	0,028	0,031
Abaterea standard (mm) $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (\varepsilon_j - \bar{\varepsilon})^2}{N - 1}}$	0,059	0,059	0,036	0,038
Eroare standard a mediei (mm) $SEM = \sigma/\sqrt{n}$	0,0130	0,0131	0,0078	0,0085



(a)



(b)

Figura 11. Imagine SEM pentru (a) o probă de control (care nu a fost în contact cu biogazul) față de (b) o probă de mijloc - pentru a se evidenția nivelul de degradare datorat expunerii la biogaz.

De asemenea, studiul evidențiază capacitatea tehnologiei OCT de a evalua materialele utilizate pentru pereții bioreactorului, în special în cazul loturilor utilizate pentru producția de

biogaz. SEM poate fi utilă pentru validarea rezultatelor OCT, dar nu este strict necesară. Prin urmare, acest studiu subliniază faptul că doar OCT poate oferi atât evaluări calitative, cât și cantitative, în timp ce SEM poate furniza informații suplimentare despre detalii privind degradarea pereților bioreactorului (Figura 11). De asemenea, s-au evidențiat diferențele între impactul vaporilor (în partea superioară a reactorului) și al substratului (în partea mijlocie și inferioară) asupra pereților bioreactorului.

Capitolul 6 – Studiu comparativ privind decontaminarea suprafețelor de titan și zirconiu: evaluări imagistice ale afectării suprafețelor

Acest capitol al studiului se concentrează pe evaluarea eficacității terapiei cu laser în decontaminarea suprafețelor probelor de titan și zirconiu (Figura 12) care au fost contaminate cu bacterii *S. Aureus* ATCC 25923.

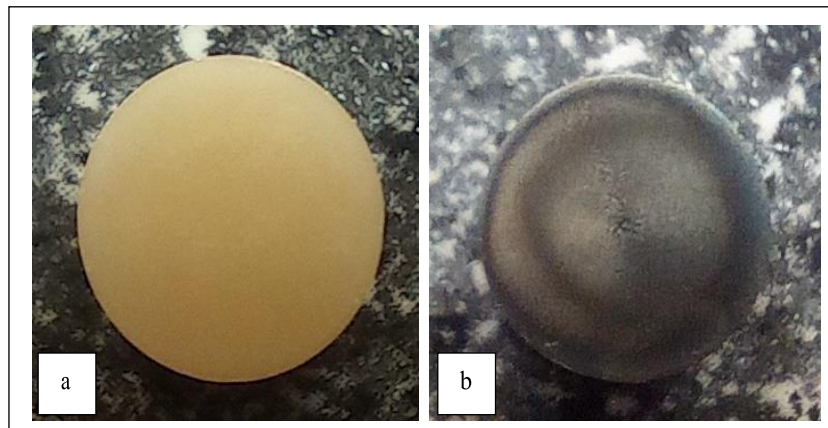


Figura 12. Probe de zirconiu (a) și titan (b) gata pentru investigațiile SEM și OCT.

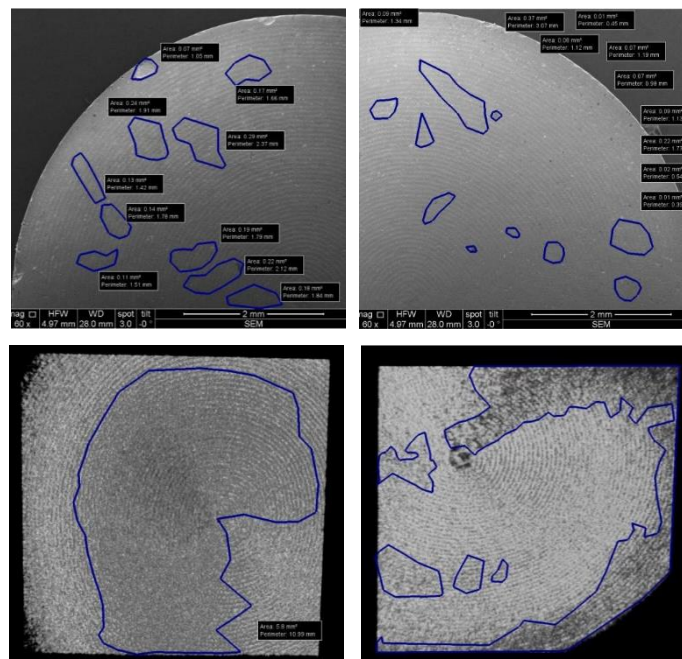


Figura 13. Măsurători realizate pe una din probe.

Au fost analizate 20 de probe, 5 grupuri a câte 4 probe fiecare. Imaginile au fost obținute cu ajutorul SEM și OCT. SEM a fost utilizată pentru a evalua afectarea suprafețelor probelor în

urma procedurii de sterilizare, în timp ce OCT a demonstrat capacitatea sa de a investiga aceste probe. Imaginile au fost utilizate pentru măsurători, iar software-ul IC Measure a fost folosit pentru calcularea ariei întregii suprafețe a sondelor (Figura 13).

Din statistică reies următoarele concluzii:

- nu există nicio diferență semnificativă între măsurătorile SEM sau OCT.
- Titanul este puțin mai afectat decât Zirconiu, însă diferențele nu sunt mari, de la 9,3 pentru Titan la 6,5 pentru Zirconiu
- Suprafața afectată de oricare dintre metodele alese este mică, însă este o diferențiere între ele (Convențional 3,55; Er:YAG 4,25 și Er:YAG + PDT 5,31).

Studiul din care face parte această cercetare este încă în curs, în colaborare cu UMF Timișoara, și urmează a fi publicat după finalizarea aspectelor biomedicale.

Capitolul 7 – Comparație între rezultatele obținute cu micro-CT și OCT pentru verificarea adaptării fațetelor convenționale versus crenelate

Capitol 7 se concentrează pe comparația între rezultatele obținute cu ajutorul tehnicilor de imagistică micro-CT și OCT pentru a verifica adaptarea fațetelor dentare convenționale (CO) versus cele crenelate (CR), care constituie un brevet al UMF Timisoara [19] – Figura 14.

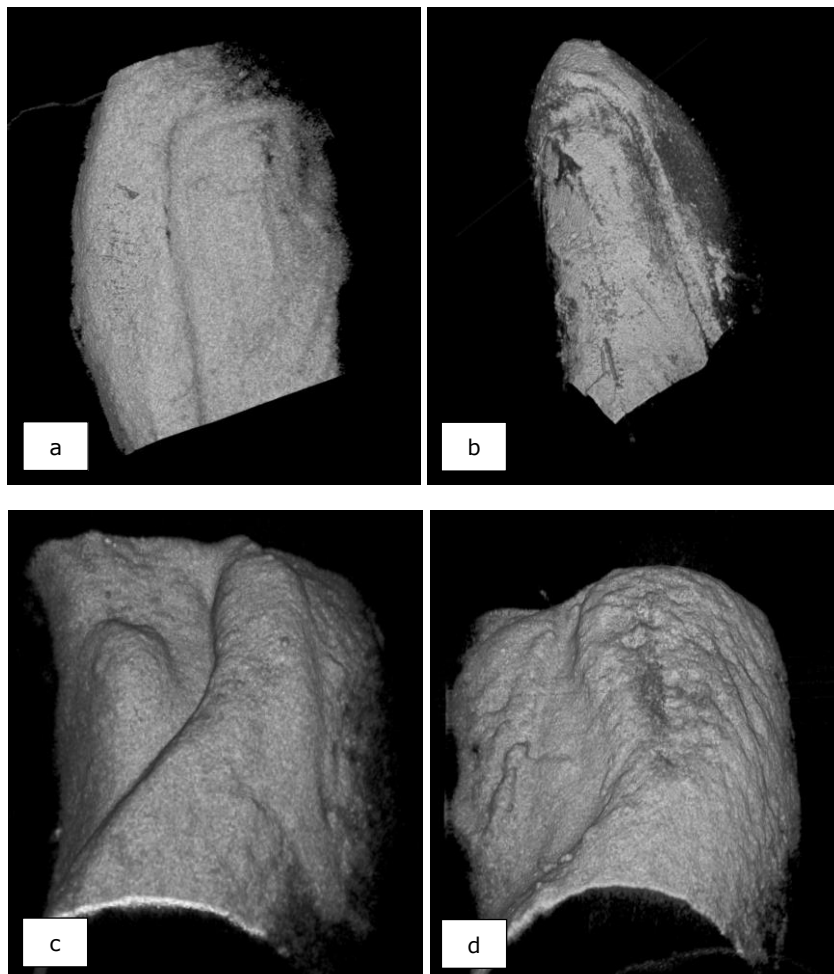


Figura 14. Imaginile (a) și (b) sunt reconstrucții 3D pentru cazul fațetelor convenționale, iar imaginile (c) și (d) sunt reconstrucții 3D pentru cazul fațetelor crenelate. Regiunile regăsite în imagini au fost luate în calcul pentru evaluare.

Scopul studiului a fost de a evalua influența designului marginal sinusoidal al fațetelor dentare crenelate asupra adaptării marginale și interne în comparație cu fațetele convenționale. Metoda de lucru a implicat folosirea a 10 dinți cu fațete dentare, împărțiți în două grupuri: unul cu fațete convenționale și altul cu fațete crenelate. Imagini OCT au fost realizate pe fiecare latură a dinților în zona de joncțiune dintre fațete și dinți. Analiza a arătat că fațetele crenelate au prezentat rezultate mai bune în comparație cu cele convenționale, în special în ceea ce privește adaptarea internă. Aceste concluzii susțin ipoteza inițială că fațetele crenelate pot oferi o adaptare mai bună și o omogenitate a cimentului dentar superioară față de fațetele convenționale. O concluzie importantă a acestui capitol este faptul că OCT poate să substituie micro-CT în astfel de analize, datorită faptului că rezultatele studiului sunt confirmate de studiul realizat cu metoda micro-CT. Studiul (în curs) îl continuă pe cel din [19].

Capitolul 8 – CONCLUZII

Cercetarea prezentată în această teză de doctorat s-a concentrat pe aplicabilitatea OCT ca metodă de imagistică, atât biomedicală în stomatologie, cât și în NDT. Astfel, pentru fiecare dintre cele două direcții de cercetare, s-au realizat următoarele rezultate:

I. OCT în stomatologie

- OCT în Stomatologie: Cercetarea a evidențiat importanța OCT în domeniul stomatologiei datorită capacității sale de a oferi imagini de înaltă rezoluție a țesuturilor orale. Utilizarea combinată a OCT și a radiografiilor a dovedit sinergia dintre aceste două tehnologii, contribuind la diagnosticarea și tratamentul mai eficiente al problemelor dentare [17].
- Optimizarea aparaturii cu raze X utilizând OCT: Cercetarea a dezvoltat o procedură de optimizare a unităților de imagistică cu raze X pentru obținerea de imagini cu rezoluție cât mai înaltă (și cu iradiere cât mai redusă) a detaliilor dentare. Acest proces a îmbunătățit evaluarea detaliilor dentare și a parametrilor unităților de raze X, facilitând diagnosticul și tratamentul pacienților [16].

II. OCT în NDT

- Utilizarea materialelor polimerice în bioreactoare: Cercetarea a explorat utilizarea materialelor pe bază de PLA în dezvoltarea bioreactoarelor pentru producerea biogazului prin digestie anaerobă. OCT a fost utilizat pentru evaluarea degradării materialelor [18].
- Compararea OCT cu SEM în studiul materialelor metalice: Studiul a comparat capabilitățile OCT cu cele ale microscopiei electronice cu scanare (SEM) pentru imagistica și măsurătorile pe materiale metalice. Datele au arătat că nu există diferențe semnificative între rezultatele obținute cu cele două tehnici.
- Validarea rezultatelor cu Micro-CT: Cercetarea a arătat că OCT poate valida rezultatele obținute cu ajutorul micro-CT, specific în ceea ce privește studiul marginilor fațetelor dentare (crenelate versus convenționale).

În ansamblu, teza de doctorat a demonstrat potențialul OCT în diferite domenii, inclusiv stomatologie și investigații nedistructive [20] și a contribuit la dezvoltarea și optimizarea unor metode și tehnologii relevante în aceste domenii.

Direcții de cercetare viitoare

1. Realizarea unei lucrări ample de review pe baza capitolului 1 al acestei teze de doctorat și clasificarea metodelor imagistice în funcție de parametrii imaginilor pe care acestea le oferă.
2. Realizarea unor (noi) probe de mână (pentru stomatologie) cu scanare laser cu galvoscaner 2D / scanner poligonal / MEMS pentru sistemul OCT utilizat în această teză de doctorat.

3. Dezvoltarea de noi sisteme OCT pentru analiza specifică a probelor din diferite domenii, (ex: Universitatea de Medicină și Farmacie "Victor Babeș" Timișoara pentru probele biologice).

Bibliografie selectivă

1. A.F. Fercher, W. Drexler, C.K. Hitzenberger, T. Lasser, *Optical Coherence Tomography - Principles and Applications*, Reports on Progress in Physics, vol. 66, 2003, pag. 239-303
2. R. Oancea, A. Bradu, C. Sinescu, R. M. Negru, M. L. Negrutiu, I. Antoniac, V-F. Duma, A.G. Podoleanu (2015), *Assessment of the sealant/tooth interface using optical coherence tomography*, Journal of Adhesion Science and Technology, vol. 29:1, 2015, pag. 45-58
3. Suetens, P., *Fundamentals of medical imaging*, Cambridge university press, 2017
4. Carver, E., & Carver, B., *Medical Imaging-E-Book*, Elsevier Health Sciences, 2012
5. Lisle, D. A., Hacking, C., Lisle, D., *Imaging for students*, CRC Press, 2023
6. Hagi, F. S., *The History of Dental Radiology: A Review*, History, 141(03), 2023
7. Bird, L., *Dental radiology*, John Wiley & Sons, pag. 87-104, 2013
8. Scarfe, W. C., Angelopoulos, C., *Maxillofacial cone beam computed tomography: principles, techniques and clinical applications*, Springer, 2018
9. Podoleanu, A.G., Rosen, R.B., *Combinations of techniques in imaging the retina with high resolution*, Progress in Retinal and Eye Research, vol. 27, pag. 464-499, 2008
10. Cogliati, C. et al, *MEMS-based handheld scanning probe with pre-shaped input signals for distortion-free images in Gabor-domain optical coherence microscopy*, Optics Express, vol. 24, nr. 12, 2016
11. Luca, R. E., Todea, C., Duma, V-F., Bradu, A., Podoleanu, A. Gh., *Quantitative assessment of rat bone regeneration using complex master-slave optical coherence tomography*, Quantitative Imaging in Medicine and Surgery, vol. 9, No. 5, pag. 782-798, 2019
12. Canjau, S., Todea, C., Negrutiu, M. L., Sinescu, C., Topala, F.I., Marcauteanu, C., Manescu, A., Duma, V.-F., Bradu, A., Podoleanu, A. Gh., *Optical Coherence Tomography for Non-Invasive ex vivo*, Investigations in Dental Medicine – a Joint Group Experience, Modern Technologies in Medicine, vol. 7, pag. 97-115, 2015
13. Duma, V.-F., Sinescu, C., Bradu, A., Podoleanu, A. Gh., *Optical Coherence Tomography Investigations and Modeling of the Sintering of Ceramic Crowns*, Materials, vol. 12, 2019
14. Schneider, H., et al., *Is Optical Coherence Tomography a Potential Tool to Evaluate Marginal Adaptation of Class III/IV Composite Restoration In Vivo?*, Operative Dentistry, vol. 44, no. 3, pag 242-253, 2019
15. Schneider, H., Ziebolz, D., Krause, F., Haefer, M., Rueger, C., Haak, R., *Optical Coherence Tomography – Future-Oriented Technology in Dentistry?*, ZWR – Das Deutsche Zahnärzteblatt 127(10), 2018
16. Erdelyi, R. A., Duma, V. F., Sinescu, C., Dobre, G. M., Bradu, A., & Podoleanu, A. (). Optimization of X-ray investigations in dentistry using optical coherence tomography. *Sensors*, 21(13), 4554, 2021
17. Erdelyi, R. A., Duma, V. F., Sinescu, C., Dobre, G. M., Bradu, A., & Podoleanu, A.. Dental diagnosis and treatment assessments: Between X-rays radiography and optical coherence tomography. *Materials*, 13(21), 4825, 2020
18. Cioabla, A., Duma, V. F., Mnerie, C., Erdelyi, R. A., Dobre, G. M., Bradu, A., & Podoleanu, A., Effect of an Anaerobic Fermentation Process on 3D-Printed PLA Materials of a Biogas-Generating Reactor. *Materials*, 15(23), 8571, 2022
19. Măroiu, A. C., Sinescu, C., Duma, V. F., Topală, F., Jivănescu, A., Popovici, P. M., Romînu, M., Micro-CT and microscopy study of internal and marginal gap to tooth surface of crenelated versus conventional dental indirect veneers. *Medicina*, 57(8), 772, 2021