

**UNIVERSITATEA DE MEDICINĂ ȘI FARMACIE
“VICTOR BABEȘ” DIN TIMISOARA
FACULTATEA DE MEDICINA DENTARĂ
DEPARTAMENTUL I**

FLORINA TITIHĂZAN



TEZĂ DE DOCTORAT

**CARACTERIZAREA UNOR MATERIALE BIOFUNCȚIONALE
GENERATE ȘI PROCESATE PRIN TEHNOLOGII MODERNE ȘI
UTILIZATE ÎN STOMATOLOGIA RESTAURATIVĂ**

- REZUMAT -

Coordonator științific
PROF. UNIV. DR. HABIL. MIHAI ROMÎNU

**T I M I Ș O A R A
2 0 2 6**

CUPRINS

INTRODUCERE	3
SCOPUL ȘI OBIECTIVELE CERCETĂRII.....	5
REZULTATE	6
1. EVALUARE COMPARATIVĂ A STABILITĂȚII CULORII ȘI A REZISTENȚEI LA FRACTURĂ A RESTAURĂRILOR PROVIZORII CAD/CAM ȘI CHAIRSIDE: STUDIU IN VITRO.....	6
2. REZISTENȚA LA FRACTURĂ A COROANELOR DIN ZIRCONIU ȘI DISILICAT DE LITIU FABRICATE CAD/CAM CU DIFERITE DESIGNURI ALE MARGINII: IMPLICAȚII PENTRU STOMATOLOGIA DIGITALĂ	7
3. INFLUENȚA LUNGIMII CORPULUI DE PUNTE ASUPRA INTEGRITĂȚII STRUCTURALE A PUNȚILOR DENTARE FIXE DIN ZIRCONIU	9
4. PERFORMANȚA ADEZIVĂ A RESTAURĂRILOR MARYLAND CU EXTENSIE DIN ZIRCONIU ȘI DISILICAT DE LITIU PE DINȚI STÂLPI PREPARAȚI ȘI NEPREPARAȚI: STUDIU COMPARATIV IN VITRO.....	10
5. METODE ALTERNATIVE DE ÎNDEPĂRTARE A ȚESUTULUI CARIOS	10
ELEMENTE DE ORIGINALITATE ȘI CONTRIBUȚII PROPRII.....	13
LIMITELE CERCETĂRII	14
CONCLUZII ȘI DIRECȚII VIITOARE	15

REZUMAT

INTRODUCERE

Stomatologia restaurativă a cunoscut, în ultimele decenii, o evoluție conceptuală și tehnologică semnificativă, marcată de tranziția clară de la abordările tradiționale invazive către filozofii terapeutice adezive, minim invazive și orientate biologic. Această schimbare de paradigmă a fost strâns corelată cu progresul continuu al materialelor restauratoare dentare și al tehnologiilor digitale de fabricație, concepute nu doar pentru a înlocui țesuturile dentare pierdute, ci și pentru a interacționa armonios cu mediul biologic al cavității orale. În acest cadru modern, apariția materialelor restauratoare biofuncționale, împreună cu fluxurile de lucru CAD/CAM și de fabricație aditivă, reprezintă un moment de referință în medicina dentară contemporană.

Interesul tot mai crescut pentru materialele biofuncționale este determinat de necesitatea clinică de a obține un echilibru optim între durabilitatea mecanică, integrarea estetică și compatibilitatea biologică. Deși materialele restauratoare convenționale au demonstrat rate ridicate de succes, persistă limitări importante, în special în ceea ce privește stabilitatea interfeței pe termen lung, comportamentul la îmbătrânire în mediul oral complex și capacitatea de a susține activ sănătatea țesuturilor. Materialele biofuncționale au fost introduse pentru a aborda aceste neajunsuri prin proprietăți precum eliberarea de ioni, potențialul de remineralizare, activitatea antibacteriană și biocompatibilitatea îmbunătățită. În paralel, tehnologiile digitale de fabricație (inclusiv frezarea substractivă CAD/CAM și tehnicile emergente de fabricație aditivă) au transformat fundamental modul de realizare și aplicare a materialelor restauratoare. În pofida adoptării lor rapide în practica clinică, sunt încă necesare dovezi robuste care să clarifice performanța mecanică, biologică și clinică a acestor materiale în condiții funcționale cât mai apropiate de scenariile reale.

Relevanța acestor teme de cercetare este consolidată de mai multe tendințe convergente din stomatologia modernă. Adoptarea pe scară largă a fluxurilor de lucru digitale a extins considerabil gama materialelor disponibile și a opțiunilor de fabricație, generând atât oportunități pentru o standardizare îmbunătățită, cât și incertitudini privind indicațiile clinice optime. În același timp, accentul tot mai pronunțat pus pe stomatologia minim invazivă impune cerințe mai stricte asupra sistemelor restauratoare, în sensul conservării structurii dentare sănătoase concomitent cu menținerea unei fiabilități funcționale pe termen lung. În ansamblu, acești factori evidențiază necesitatea unor investigații sistematice, bazate pe dovezi, care să elucideze comportamentul mecanic, performanța adezivă și răspunsul biologic al materialelor

restauratoare biofuncționale moderne.

La nivel internațional, cercetarea asupra sistemelor restauratoare biofuncționale se află într-o expansiune rapidă, la intersecția dintre știința materialelor dentare, biomimetism și stomatologia digitală. Numeroase grupuri de cercetare dezvoltă activ compozite cu eliberare de ioni, ceramici avansate și materiale hibride, optimizând simultan protocoalele CAD/CAM și de fabricație aditivă. Se acordă o importanță tot mai mare cercetării translaționale, care face legătura între rezultatele de laborator și cele clinice relevante. Prezenta teză de doctorat se poziționează în acest context științific global și se aliniază direcțiilor instituționale actuale de cercetare axate pe materiale restauratoare, fluxuri digitale și concepte terapeutice minim invazive. Prin generarea de date experimentale originale, teza contribuie la consolidarea bazei de dovezi care ghidează practica restaurativă contemporană.

Teza de doctorat cuprinde cinci studii experimentale in vitro, realizate în cadrul unor programe de cercetare ale Facultății de Medicină Dentară, Universitatea de Medicină și Farmacie „Victor Babeș” din Timișoara. Cercetarea a fost desfășurată în conformitate cu standardele etice și științifice și se concentrează asupra comportamentului mecanic, optic, adeziv și fizico-chimic al materialelor restauratoare fabricate prin tehnologii digitale moderne și metode convenționale.

Cercetarea include următoarele studii:

- *Comparative evaluation of color stability and fracture resistance of CAD/CAM and chairside provisional restorations: an in vitro study (Journal of Functional Biomaterials, 2025);*
- *Fracture Resistance of CAD/CAM-Fabricated Zirconia and Lithium Disilicate Crowns with Different Margin Designs: Implications for Digital Dentistry (Journal of Functional Biomaterials, 2025);*
- *Influence of pontic length on the structural integrity of zirconia fixed partial dentures (FPDs) (Journal of Functional Biomaterials, 2025);*
- *Adhesive Performance of Zirconia and Lithium Disilicate Maryland Cantilever Restorations on Prepared and Non-Prepared Abutment Teeth: An In Vitro Comparative Study (Biomimetics, 2025);*
- *Alternative methods of removing carious tissue (Romanian Journal of Oral Rehabilitation, 2024).*

Aceste lucrări au fost publicate în perioada 2024–2025 în reviste indexate Web of Science, predominant în jurnale cu factor de impact ridicat din quartilele Q1–Q3 și oferă, în ansamblu, o contribuție experimentală originală în domeniul stomatologiei restaurative.

SCOPUL ȘI OBIECTIVELE CERCETĂRII

Prezenta cercetare doctorală a avut ca scop realizarea unei caracterizări experimentale cuprinzătoare a unor materiale restauratoare biofuncționale selectate, obținute și prelucrate prin tehnologii moderne, cu accent pe performanța mecanică, stabilitatea optică, comportamentul adeziv și proprietățile fizico-chimice ale acestora în condiții in vitro relevante clinic. Obiectivul general a fost de a clarifica modul în care compoziția materialului, fluxul de fabricație și designul restaurator interacționează pentru a influența fiabilitatea funcțională și predictibilitatea clinică a soluțiilor restaurative contemporane.

Pentru atingerea acestui scop, cercetarea a urmărit mai multe obiective specifice. În primul rând, evaluarea comparativă a stabilității culorii și a rezistenței la fractură a materialelor restauratoare provizorii fabricate prin frezare CAD/CAM versus tehnici directe chairside, în vederea determinării influenței metodei de fabricație asupra performanței mecanice și estetice pe termen scurt. În al doilea rând, investigarea efectului designului marginii cervicale și al tipului de material ceramic (zirconiu versus disilicat de litiu) asupra rezistenței la fractură și a tiparelor de eșec ale coroanelor monolitice CAD/CAM. În al treilea rând, evaluarea influenței lungimii corpului de punte asupra integrității structurale și a comportamentului la încărcare până la fractură al punților dentare fixe din zirconiu, pentru clarificarea limitărilor biomecanice dependente de design.

Un obiectiv suplimentar a fost analiza performanței adezive și a rezistenței la fractură a restaurărilor Maryland cu extensie fabricate din zirconiu și disilicat de litiu, atunci când sunt cimentate pe dinți stâlpi preparați și nepreparați, cu scopul evaluării fezabilității abordărilor protetice minim invazive. În plus, cercetarea a urmărit realizarea unei evaluări fizico-chimice și orientate clinic a unor agenți alternativi de îndepărtare chemo-mecanică a cariei, prin integrarea analizelor FTIR și termogravimetrice cu aprecierea aplicabilității clinice.

REZULTATE

Studiul s-a concentrat pe evaluarea integrată mecanică, optică, adezivă și fizico-chimică a materialelor restauratoare biofuncționale fabricate prin tehnologii moderne, având ca scop demonstrarea următoarelor aspecte:

- (1) dacă restaurările provizorii CAD/CAM prezintă o stabilitate a culorii și o rezistență la fractură superioare comparativ cu materialele chairside;
- (2) în ce măsură designul marginii cervicale și tipul de ceramică influențează rezistența la fractură a coroanelor monolitice;
- (3) în ce măsură lungimea corpului de punte afectează integritatea structurală a punților dentare fixe din zirconiu;
- (4) dacă restaurările Maryland cu extensie, minim invazive, oferă o performanță adezivă și mecanică fiabilă în funcție de material și de prepararea bontului;
- (5) dacă agenții de îndepărtare chemo-mecanică a cariei prezintă caracteristici fizico-chimice predictibile și o performanță clinică eficientă.

1. EVALUARE COMPARATIVĂ A STABILITĂȚII CULORII ȘI A REZISTENȚEI LA FRACTURĂ A RESTAURĂRILOR PROVIZORII CAD/CAM ȘI CHAIRSIDE: STUDIU IN VITRO

Acest studiu in vitro a evidențiat diferențe clare dependente de material în ceea ce privește stabilitatea optică și rezistența la fractură a restaurărilor provizorii fabricate prin tehnici CAD/CAM și chairside. După condiționare standardizată și imersie timp de 7 zile în cafea și vin roșu, s-au observat diferențe statistice semnificative ale modificării de culoare (ANOVA $F(3, 36) = 128,4$, $p < 0,001$). Compozitul Ambarino a prezentat cea mai bună stabilitate cromatică ($\Delta E = 1,1 \pm 0,2$), menținându-se sub pragul de perceptibilitate clinică. HIPC a înregistrat o modificare moderată ($\Delta E = 2,8 \pm 0,3$), în timp ce PMMA a arătat o modificare limitată ($\Delta E = 2,0 \pm 0,3$, descriptiv). Cea mai slabă performanță a fost observată pentru 3M™ Protemp™, care a prezentat o colorare vizibilă clinic ($\Delta E = 4,9 \pm 0,4$).

Testarea mecanică a evidențiat diferențe mai pronunțate (ANOVA $F(3,36) = 212,6$, $p < 0,001$). HIPC a demonstrat cea mai mare rezistență la fractură ($2068,9 \pm 104,0$ N), depășind clar toate celelalte materiale. PMMA ($1215,8 \pm 61,4$ N) și Protemp™ ($1183,4 \pm 86,4$ N) au prezentat o rezistență intermediară comparabilă (ns), în timp ce Ambarino a evidențiat o rezistență semnificativ mai scăzută ($555,4 \pm 25,4$ N). Comparările perechi au confirmat diferențe semnificative între toate grupurile, cu excepția PMMA versus Protemp™ (Figura 1).

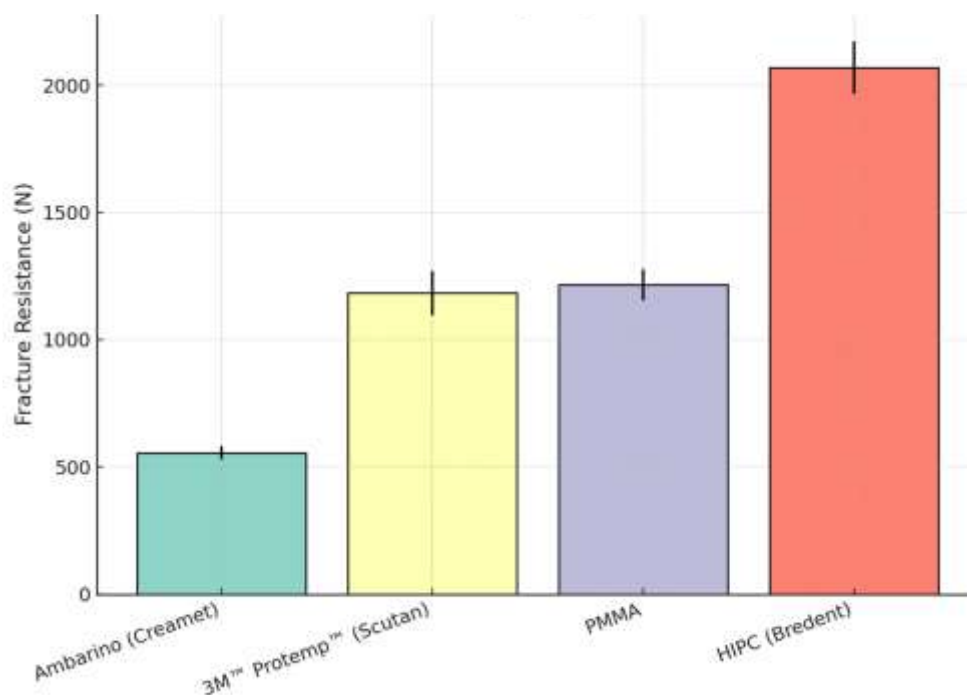


Figura 1. Rezistența medie la fractură ($F_{max} \pm SD$) a materialelor restauratoare

Analiza modului de eșec a susținut aceste rezultate: HIPC a prezentat predominant fracturi coezive (80%), PMMA și Protemp™ în principal eșecuri mixte (70% și, respectiv, 60%), în timp ce Ambarino a evidențiat în majoritate eșecuri adezive (75%), cu fragmentare extinsă.

În ansamblu, blocurile CAD/CAM HIPC au oferit o fiabilitate mecanică superioară, dar o stabilitate cromatică moderată, în timp ce Ambarino a asigurat performanțe estetice excelente în detrimentul rezistenței mecanice. Materialul chairside Protemp™ a prezentat cea mai puțin favorabilă performanță optică.

2. REZISTENȚA LA FRACTURĂ A COROANELOR DIN ZIRCONIU ȘI DISILICAT DE LITIU FABRICATE CAD/CAM CU DIFERITE DESIGNURI ALE MARGINII: IMPLICAȚII PENTRU STOMATOLOGIA DIGITALĂ

Toate coroanele monolitice testate au demonstrat valori ale rezistenței la fractură mult peste intervalul fiziologic al forțelor masticatorii posterioare ($\approx 294\text{--}784\text{ N}$), confirmând că fiecare combinație material–margine îndeplinește cerințele clinice de bază privind rezistența la încărcare. Nu au fost observate eșecuri adezive în niciun grup, ceea ce indică o adeziune fiabilă; fracturile au fost fie coezive în interiorul ceramicii, fie catastrofale, implicând complexul dinte–restaurare.

Au fost evidențiate tipare de eșec dependente de material. Coroanele din zirconiu au prezentat predominant fracturi coezive (70% coezive, 30% catastrofale), sugerând o

integritate structurală superioară și un comportament mai favorabil al propagării fisurilor. În schimb, coroanele din disilicat de litiu (LD) au înregistrat în principal eșecuri catastrofale (60% catastrofale, 40% coezive), indicând o fragilitate mai mare la încărcare compresivă.

Valorile rezistenței la fractură au variat semnificativ între grupuri. Cea mai mare sarcină medie a fost înregistrată pentru coroanele zirconiu–chanfrein (2658 ± 245 N), urmate de LD–chanfrein (2494 ± 205 N) și zirconiu–tangențial (2425 ± 240 N). Cea mai mică rezistență a fost observată pentru coroanele LD–tangențial (1862 ± 251 N). În pofida acestor diferențe, toate valorile s-au menținut mult peste forțele funcționale de masticație.

Din punct de vedere statistic, tipul de material a avut un efect marcant asupra rezistenței la fractură (ANOVA bidirecțională $p < 0,001$; η^2 parțial = 0,49), zirconiul depășind per ansamblu disilicatul de litiu. Designul marginii, considerat izolat, nu a fost semnificativ ($p = 0,08$), însă s-a detectat o interacțiune semnificativă ($p < 0,01$; η^2 parțial = 0,17), indicând că efectul geometriei cervicale depinde de ceramica utilizată.

În cadrul grupurilor LD, marginile de tip chanfrein au îmbunătățit semnificativ rezistența la fractură comparativ cu marginile tangențiale ($p < 0,01$). În schimb, coroanele din zirconiu nu au prezentat sensibilitate semnificativă la designul marginii ($p = 0,19$), subliniind robustețea biomecanică superioară a zirconiului policristalin. Între materiale, zirconiul a fost semnificativ mai rezistent decât LD în configurația tangențială ($p < 0,01$), în timp ce diferențele nu au fost semnificative pentru designul chanfrein (Figura 2).

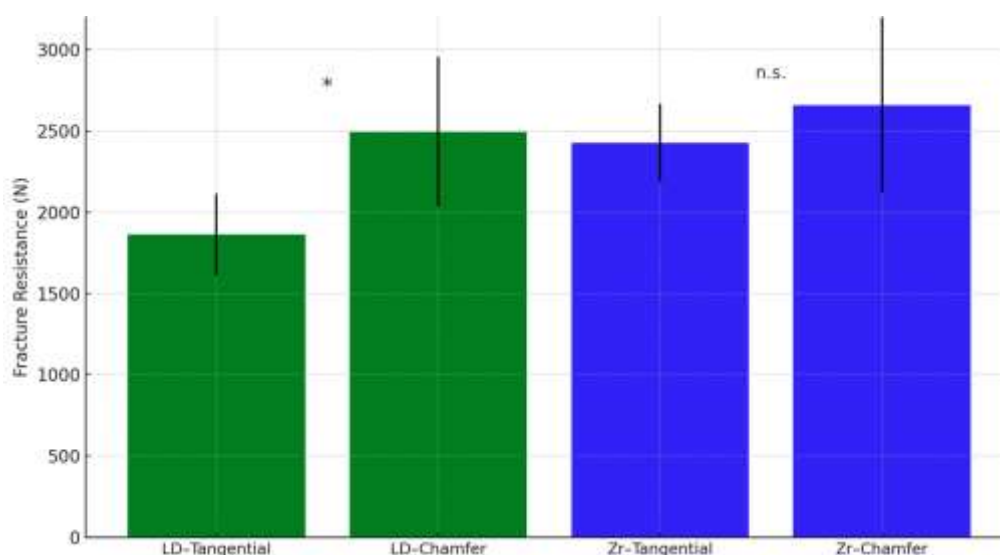


Figura 2. Rezistența la fractură a coroanelor monolitice cu diferite designuri ale marginii

În ansamblu, coroanele din zirconiu, cu margini de tip chanfrein, au oferit cea mai ridicată fiabilitate mecanică, în timp ce coroanele din disilicat de litiu s-au dovedit mai sensibile la designul marginii și mai predispuse la eșecuri catastrofale.

3. INFLUENȚA LUNGIMII CORPULUI DE PUNTE ASUPRA INTEGRITĂȚII STRUCTURALE A PUNȚILOR DENTARE FIXE DIN ZIRCONIU

Această etapă a studiului a evaluat modul în care lungimea corpului de punte influențează rezistența la fractură și comportamentul punților dentare fixe (FDP) din zirconiu. Rezultatele au demonstrat o dependență puternică și clinic relevantă a performanței mecanice de geometria restaurării.

Analiza fractografică a evidențiat tipare de eșec consecvente și reproductibile. În majoritatea specimenelor, inițierea fisurii a avut loc în regiunea gingivală a conectorilor, unde se concentrează tensiunile de tracțiune. Punțile cu trei elemente au fracturat tipic la nivelul conectorului dintre elementul de agregare distal și corpul de punte, în timp ce punțile cu patru elemente au prezentat inițierea fisurii la conectorul central dintre corpurile de punte, corespunzător celei mai lungi deschideri neîntrerupte. Aceste constatări confirmă că geometria conectorilor și lungimea breșei, mai degrabă decât defectele aleatorii, guvernează comportamentul la eșec.

Din punct de vedere cantitativ, punțile din zirconiu cu trei elemente au prezentat o rezistență substanțial mai mare. Forțele de fractură au variat între 3319 N și 3971 N, cu o medie de 3703,8 N, indicând o robustețe mecanică excelentă, mult peste forțele fiziologice masticatorii. În contrast, punțile cu patru elemente au arătat o rezistență semnificativ redusă, cu valori cuprinse între 1589 N și 1809 N și o medie de 1713,4 N, reprezentând mai puțin de jumătate din rezistența configurațiilor cu trei elemente. În pofida acestei reduceri, toate restaurările s-au menținut peste pragurile funcționale de masticație.

Testarea normalității a confirmat îndeplinirea presupunerilor parametrice (Shapiro–Wilk $p = 0,545$), permițând comparații inferențiale. Testul t pentru eșantioane independente a demonstrat o diferență foarte semnificativă între grupuri ($t(18) = 33,39$, $p < 0,001$), cu o diferență medie mare de aproximativ 1990 N (IC 95%: 1865–2116 N) în favoarea punților cu trei elemente.

Creșterea lungimii corpurilor de punte a produs o reducere dramatică și statistic semnificativă a rezistenței la fractură, deplasând concentrația critică de tensiune către conectorul central. Din punct de vedere clinic, aceste rezultate subliniază faptul că punțile din zirconiu cu mai multe elemente sunt foarte sensibile la lungimea breșei și la biomecanica conectorilor, chiar și atunci când sunt fabricate din materiale cu rezistență ridicată.

4. PERFORMANȚA ADEZIVĂ A RESTAURĂRILOR MARYLAND CU EXTENSIE DIN ZIRCONIU ȘI DISILICAT DE LITIU PE DINȚI STÂLPI PREPARAȚI ȘI NEPREPARAȚI: STUDIU COMPARATIV IN VITRO

Această etapă a evaluat rezistența la fractură și comportamentul la eșec al restaurărilor Maryland cu extensie, cu accent pe influența materialului ceramic (zirconiu vs. disilicat de litiu, LD) și a preparării dintelui stâlp. În toate grupurile, forțele de fractură au variat între 190,7 N și 447,0 N, indicând că toate restaurările au rezistat la forțe situate în intervalul fiziologic anterior sau peste acesta.

Un rezultat constant și clinic relevant a fost efectul puternic al preparării dentare. Pentru restaurările din zirconiu, speci­menele nepreparate au prezentat o rezistență la fractură semnificativ mai mare ($341,19 \pm 69,71$ N) comparativ cu dinții preparați ($226,19 \pm 22,88$ N), diferența fiind foarte semnificativă statistic (Welch $t \approx 4,96$, $p < 0,001$). Un tipar similar a fost observat pentru restaurările din LD: dinții nepreparați au atins $341,71 \pm 42,89$ N, în timp ce dinții preparați au prezentat $243,94 \pm 14,21$ N ($t \approx -6,84$, $p < 0,001$). Astfel, conservarea smalțului a îmbunătățit semnificativ performanța mecanică, indiferent de tipul ceramicii.

În comparația globală între materiale, zirconiul (media 283,69 N) și LD (media 292,83 N) nu au demonstrat diferențe statistic semnificative ($p = 0,752$), indicând o capacitate portantă comparabilă în condițiile testate.

Analiza modului de eșec a evidențiat un tipar foarte constant. Fractura dentară a fost modul de eșec predominant în aproape toate speci­menele, doar o singură restaurare din zirconiu fracturându-se. Important, nu au fost observate eșecuri adezive sau decimentări în niciun grup, confirmând fiabilitatea protocolului de adeziune și sugerând că structura dentară, nu interfața adezivă, a reprezentat veriga slabă a sistemului.

Din perspectivă biomecanică, rezultatele indică faptul că restaurările Maryland cu extensie sunt limitate în principal de integritatea bontului, mai degrabă decât de rezistența ceramicii. Abordările minim invazive care conservă smalțul cresc semnificativ rezistența, în timp ce alegerea materialului între zirconiu și LD pare mai puțin critică în condițiile de încărcare anterioară.

5. METODE ALTERNATIVE DE ÎNDEPĂRTARE A ȚESUTULUI CARIOS

Etapa finală a evaluat doi agenți de îndepărtare chemo-mecanică a cariei (BRIX3000 și Carisolv) prin caracterizare fizico-chimică și aprecierea in vitro a eficienței îndepărtării țesutului carios. În ansamblu, ambii agenți au demonstrat profile compoziționale distincte și o activitate relevantă clinic în îndepărtarea cariei.

Spectroscopia FTIR a confirmat prezența grupărilor funcționale caracteristice în fiecare formulare. BRIX3000 a prezentat benzi de absorbție proeminente la 3320, 1615, 980 și 620 cm^{-1} , în timp ce Carisolv a evidențiat benzi principale la 1628, 1456, 1395 și 3255 cm^{-1} . Spectrele suprapuse au arătat regiuni parțial comune, indicând anumite similarități compoziționale, în ciuda diferențelor de formulare. Analiza termogravimetrică a diferențiat suplimentar agenții: BRIX3000 a prezentat un profil de degradare multietapă, cu o pierdere totală de masă mai mare, în timp ce Carisolv a arătat o descompunere mai simplă, în două etape, cu o pierdere globală de masă mai redusă, reflectând o stabilitate termică distinctă.

Evaluarea orientată clinic, utilizând imagistica VistaCam, a demonstrat o îndepărtare eficientă a cariei pentru ambele produse. Carisolv a produs o reducere medie a indicelui de aproximativ 0,85 unități (Figura 3), în timp ce BRIX3000 a obținut o scădere medie mai mare, de aproximativ 1,37 unități, sugerând un efect debridant superior (Figura 4). Microscopia optică și digitală a confirmat absența țesutului carios detectabil vizibil după tratament în ambele grupuri.

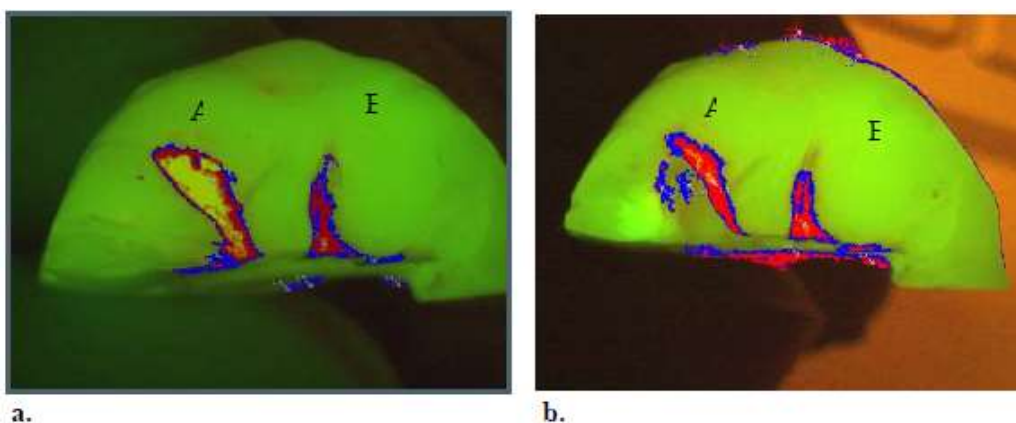


Figura 3. Imagini cu software-ul VistaCam pentru dinții tratați cu Carisolv înainte și după aplicare: (a) Dintele 1, leziunile A și B – inițial; (b) Dintele 1, leziunile A și B – după tratament

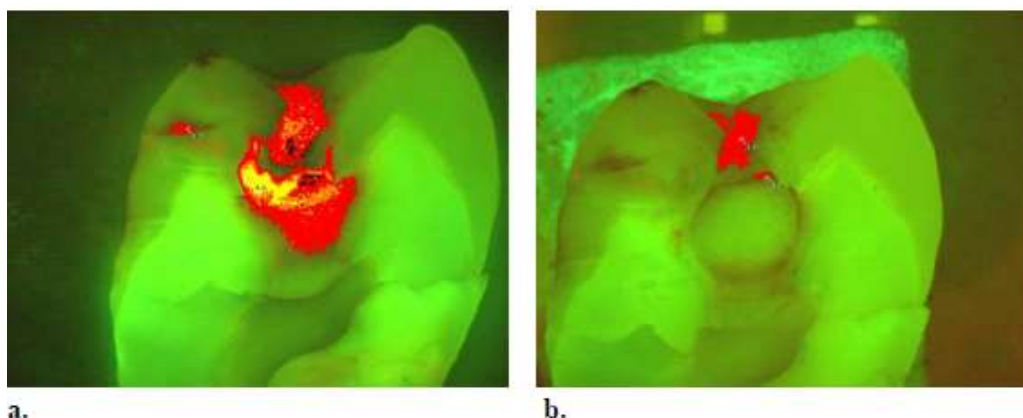


Figura 4. Imagini cu software-ul VistaCam pentru dinții tratați cu BRIX3000 înainte și după aplicare: (a) Dintele 1 – inițial; (b) Dintele 1 – după tratament

În timpul aplicării au fost observate tipare de reacție distincte: BRIX3000 a suferit o modificare de culoare de la gri deschis la verde închis, în timp ce Carisolv a produs efervescentă la nivelul suprafeței, ambele manifestări fiind consecvente la nivelul speciimenelor. Aceste observații indică profile diferite de activitate enzimatică sau chimică în timpul dizolvării țesutului carios.

Ambii agenți chemo-mecanici au demonstrat o îndepărtare eficientă a cariei fără utilizarea instrumentarului rotativ și au prezentat semnături fizico-chimice distincte. BRIX3000 a evidențiat o reducere mai mare a indicelui VistaCam și un comportament termic mai complex, în timp ce Carisolv a prezentat o pierdere de masă mai redusă și un tipar de degradare mai simplu. Aceste rezultate susțin viabilitatea clinică a abordărilor biologice orientate în managementul cariei.

ELEMENTE DE ORIGINALITATE ȘI CONTRIBUȚII PROPRII

Prezenta lucrare oferă o evaluare originală și integrativă a materialelor biofuncționale contemporane și a strategiilor restauratoare minim invazive, în cadrul unui model clinic ghidat digital. Elementul principal de noutate constă în designul experimental structurat, multietapic, care investighează sistematic restaurările provizorii, coroanele ceramice monolitice, protezele din zirconiu cu mai multe elemente, restaurările Maryland cu extensie și agenții chemo-mecanici de îndepărtare a cariei, în cadrul unei platforme de cercetare unitare și coerente.

O contribuție originală majoră o reprezintă comparația clinic realistă între restaurările provizorii frezate CAD/CAM și cele realizate chairside, utilizând coroane cu morfologie anatomică, demonstrând omogenitatea mecanică superioară a polimerilor procesați industrial și clarificând compromisurile dintre stabilitatea estetică și rezistența la fractură. Cercetarea oferă, de asemenea, una dintre puținele demonstrații experimentale validate referitoare la interdependența marginii cervicale cu materialul ceramic, evidențiind că disilicatul de litiu este sensibil la geometria marginii, în timp ce zirconiu prezintă o toleranță mai mare la preparările conservative.

Teza aduce totodată dovezi biomecanice cantitative privind impactul lungimii corpului de punte al restaurărilor din zirconiu, identificând regiunile conectorilor ca zone critice de concentrare a tensiunilor și documentând o reducere marcată a rezistenței la fractură în cazul protezelor cu patru elemente. În protetica minim invazivă, studiul contribuie cu date originale care demonstrează că conservarea smalțului îmbunătățește semnificativ performanța restaurărilor Maryland cu extensie din zirconiu și disilicat de litiu, în timp ce protocoalele adezive moderne previn eficient decimentarea.

Un element suplimentar de noutate îl constituie evaluarea combinată fizico-chimică și clinică a agenților BRIX3000 și Carisolv, corelând caracteristicile compoziționale cu eficiența îndepărtării cariei în cadrul unui concept terapeutic orientat biologic.

În ansamblu, teza avansează un model restaurator complex, bazat pe dovezi, demonstrând că succesul restaurărilor depinde de interacțiunea dintre proprietățile materialului, designul preparării și strategia adezivă. Prin integrarea fluxurilor digitale cu abordări de conservare tisulară și prin furnizarea unor praguri mecanice cu relevanță clinică, cercetarea oferă atât perspective științifice originale, cât și ghid practic pentru stomatologia restaurativă modernă.

LIMITELE CERCETĂRII

În pofida designului său cuprinzător și etapizat, prezenta cercetare prezintă mai multe limitări care trebuie luate în considerare la interpretarea rezultatelor și la transpunerea lor în practica clinică. Cea mai importantă limitare este natura in vitro a tuturor etapelor experimentale, care, deși asigură o standardizare ridicată și o bună validitate internă, limitează extrapolarea directă la mediul oral complex.

O limitare metodologică majoră, comună mai multor etape, este absența unor protocoale standardizate de îmbătrânire artificială, inclusiv termociclare, variații de pH și solicitare ciclică la oboseală. Testarea mecanică s-a bazat predominant pe încărcare statică uniaxială până la fractură, care nu reproduce forțele multidirecționale și repetitive ale masticației. În consecință, performanța intraorală pe termen lung și riscurile de eșec legate de oboseală pot fi subestimate.

O altă limitare importantă este utilizarea bonturilor metalice standardizate în mai multe experimente. Deși această alegere a îmbunătățit reproductibilitatea și uniformitatea încărcării, a eliminat variabilitatea biologică asociată proprietăților dentinei, comportamentului ligamentului parodontal și morfologiei dentare, putând conduce la o supraestimare a rezistenței la fractură și la modificarea distribuției tensiunilor.

Studiile au fost, de asemenea, lipsite de simularea ligamentului parodontal, de analize fractografice avansate sau SEM și, în studiul privind îndepărtarea cariei, de confirmare histologică sau microbiologică a selectivității tisulare. Aceste omisiuni limitează înțelegerea detaliată a mecanismelor de eșec și a caracterului complet biologic al îndepărtării cariei.

Limitări suplimentare includ dimensiunile relativ reduse ale eșantioanelor, evaluarea unui număr limitat de configurații de design și, în studiul punților Maryland, variabilitatea introdusă prin utilizarea unor tipuri dentare diferite, cu suprafețe de adeziune inegale. De asemenea, factorii optici, precum rugozitatea de suprafață și gradul de finisare superficială, nu au fost cuantificați în studiul materialelor provizorii.

CONCLUZII ȘI DIRECȚII VIITOARE

Prezenta cercetare doctorală oferă o evaluare structurată și orientată clinic a materialelor biofuncționale contemporane și a strategiilor restauratoare minim invazive în cadrul fluxurilor digitale moderne. De-a lungul celor cinci etape experimentale, rezultatele demonstrează constant că performanța restaurărilor este guvernată de interacțiunea dintre proprietățile materialului, designul preparării și strategia adezivă, mai degrabă decât de un singur factor izolat. Materialele provizorii frezate CAD/CAM au prezentat o fiabilitate mecanică superioară comparativ cu rășinile chairside, în timp ce sistemele ceramice au evidențiat o sensibilitate dependentă de designul marginii. Protezele dentare fixe din zirconiu s-au dovedit puternic influențate de lungimea breșei edentate, confirmând rolul critic al biomecanicii conectorilor în restaurările cu patru elemente. În protetica adezivă, conservarea smalțului a îmbunătățit semnificativ performanța restaurărilor Maryland cu extensie, iar protocoalele moderne de adeziune au prevenit eficient decimentarea. În plus, agenții chemo-mecanici (BRIX3000 și Carisolv) au demonstrat o îndepărtare eficientă și conservatoare a țesutului carios, susținând rolul lor în stomatologia orientată biologic.

În pofida acestor contribuții relevante, designul in vitro și absența solicitării termomecanice și a simulării oboselii limitează extrapolarea clinică directă pe termen lung. Prin urmare, cercetările viitoare ar trebui să prioritizeze integrarea termociclării, a solicitării ciclice la oboseală și a variațiilor de pH pentru a reproduce mai fidel condițiile intraorale. Utilizarea unor modele de bonturi mai apropiate de realitatea biologică, inclusiv simularea ligamentului parodontal și tehnici imagistice avansate, ar clarifica suplimentar distribuția tensiunilor și mecanismele de eșec. Studii clinice prospective pe termen lung sunt necesare în mod particular pentru restaurările Maryland cu extensie și pentru protocoalele de îndepărtare chemo-mecanică a cariei, în vederea validării rezultatelor de laborator în condiții funcționale reale.

Direcțiile viitoare suplimentare includ evaluarea unor sisteme adezive noi, a cimenturilor biofuncționale și a tratamentelor alternative de suprafață, precum și integrarea îndepărtării chemo-mecanice a cariei în fluxuri restauratoare complet digitale. Extinderea cercetării către outcome-uri raportate de pacienți și planificarea tratamentului individualizată, bazată pe risc, va consolida impactul translațional. Abordarea acestor direcții va fi esențială pentru consolidarea stomatologiei restaurative minim invazive, adezive și ghidate digital în protocoale clinice robuste, bazate pe dovezi.

**“VICTOR BABEȘ” UNIVERSITY OF MEDICINE
AND PHARMACY TIMIȘOARA
FACULTY OF DENTAL MEDICINE
DEPARTMENT I**

FLORINA TITIHĂZAN



DOCTORAL THESIS

**CHARACTERIZATION OF SOME BIOFUNCTIONAL
MATERIALS GENERATED AND PROCESSED THROUGH
MODERN TECHNOLOGIES AND USED IN RESTORATIVE
DENTISTRY**

- ABSTRACT-

Scientific Coordinator
UNIV. PROF. DR. HABIL. MIHAI ROMÎNU, MD, PhD

**T I M I Ș O A R A
2 0 2 6**

TABLE OF CONTENTS

ABSTRACT	3
INTRODUCTION	3
AIM AND OBJECTIVES OF THE RESEARCH	5
RESULTS.....	6
COMPARATIVE EVALUATION OF COLOR STABILITY AND FRACTURE RESISTANCE OF CAD/CAM AND CHAIRSIDE PROVISIONAL RESTORATIONS: AN IN VITRO STUDY.....	6
FRACTURE RESISTANCE OF CAD/CAM-FABRICATED ZIRCONIA AND LITHIUM DISILICATE CROWNS WITH DIFFERENT MARGIN DESIGNS: IMPLICATIONS FOR DIGITAL DENTISTRY	7
INFLUENCE OF PONTIC LENGTH ON THE STRUCTURAL INTEGRITY OF ZIRCONIA FIXED PARTIAL DENTURES (FDPS).....	8
ADHESIVE PERFORMANCE OF ZIRCONIA AND LITHIUM DISILICATE MARYLAND CANTILEVER RESTORATIONS ON PREPARED AND NON- PREPARED ABUTMENT TEETH: AN IN VITRO COMPARATIVE STUDY	9
ALTERNATIVE METHODS OF REMOVING CARIOUS TISSUE	10
ORIGINAL CONTRIBUTIONS AND ELEMENTS OF NOVELTY	12
LIMITATIONS OF THE RESEARCH	13
CONCLUSIONS AND FUTURE DIRECTIONS.....	14

ABSTRACT

INTRODUCTION

Restorative dentistry has experienced a substantial conceptual and technological evolution over recent decades, marked by a clear transition from traditional invasive approaches toward adhesive, minimally invasive, and biologically oriented treatment philosophies. This paradigm shift has been closely associated with the continuous advancement of restorative dental materials and digital manufacturing technologies designed not only to replace lost dental tissues but also to interact harmoniously with the biological environment of the oral cavity. Within this modern framework, the emergence of biofunctional restorative materials, together with CAD/CAM and additive manufacturing workflows, represents a pivotal development in contemporary dental medicine.

The growing interest in biofunctional materials is largely driven by the clinical need to achieve an optimal balance between mechanical durability, esthetic integration, and biological compatibility. Although conventional restorative materials have demonstrated high success rates, important limitations persist, particularly regarding long-term interfacial stability, aging behavior in the complex oral milieu, and the capacity to actively support tissue health. Biofunctional materials have been introduced to address these shortcomings through properties such as ion release, remineralization potential, antibacterial activity, and improved biocompatibility. In parallel, digital manufacturing technologies (including subtractive CAD/CAM milling and emerging additive manufacturing techniques) have fundamentally transformed the fabrication and application of restorative materials. Despite their rapid adoption in clinical practice, robust evidence is still required to clarify how these materials perform mechanically, biologically, and clinically under functional conditions that closely resemble real-world scenarios.

The relevance of this research topic is reinforced by several converging trends in modern dentistry. The widespread adoption of digital workflows has dramatically expanded the range of available materials and fabrication options, creating both opportunities for improved standardization and uncertainties about optimal clinical indications. At the same time, the increasing emphasis on minimally invasive dentistry imposes stricter requirements on restorative systems to preserve sound tooth structure while maintaining long-term functional reliability. Collectively, these factors highlight the need for systematic, evidence-based investigations that elucidate the mechanical behavior, adhesive performance, and biological response of modern biofunctional restorative materials.

At the international level, research on biofunctional restorative systems is rapidly expanding across the intersecting fields of dental materials science, biomimetics, and digital

dentistry. Numerous research groups are actively developing ion-releasing composites, advanced ceramics, and hybrid materials, while simultaneously optimizing CAD/CAM and additive manufacturing protocols. Increasing emphasis is being placed on translational research that bridges laboratory findings with clinically meaningful outcomes. The present doctoral work is positioned within this global scientific context and aligns with ongoing institutional research directions focused on restorative materials, digital workflows, and minimally invasive therapeutic concepts. By generating original experimental data, the thesis contributes to the broader effort to strengthen the evidence base guiding contemporary restorative practice.

The doctoral thesis comprises five experimental in vitro studies conducted within the research framework of the Faculty of Dental Medicine, “Victor Babeș” University of Medicine and Pharmacy Timișoara. The research was performed in accordance with ethical and scientific standards and focuses on the mechanical, optical, adhesive, and physicochemical behavior of restorative materials fabricated using modern digital and conventional technologies.

The research includes the following studies:

- *Comparative evaluation of color stability and fracture resistance of CAD/CAM and chairside provisional restorations: an in vitro study (Journal of Functional Biomaterials, 2025);*
- *Fracture Resistance of CAD/CAM-Fabricated Zirconia and Lithium Disilicate Crowns with Different Margin Designs: Implications for Digital Dentistry (Journal of Functional Biomaterials, 2025);*
- *Influence of pontic length on the structural integrity of zirconia fixed partial dentures (FPDs) (Journal of Functional Biomaterials, 2025);*
- *Adhesive Performance of Zirconia and Lithium Disilicate Maryland Cantilever Restorations on Prepared and Non-Prepared Abutment Teeth: An In Vitro Comparative Study (Biomimetics, 2025);*
- *Alternative methods of removing carious tissue (Romanian Journal of Oral Rehabilitation, 2024).*

These works were published between 2024 and 2025 in Web of Science–indexed journals, predominantly in high-impact Q1–Q3 venues, and collectively provide an original experimental contribution to the field of restorative dentistry.

AIM AND OBJECTIVES OF THE RESEARCH

This doctoral research aimed to provide a comprehensive experimental characterization of selected biofunctional restorative materials generated and processed through modern technologies, with emphasis on their mechanical performance, optical stability, adhesive behavior, and physicochemical properties under clinically relevant in vitro conditions. The overarching goal was to clarify how material composition, manufacturing workflow, and restorative design interact to influence the functional reliability and clinical predictability of contemporary restorative solutions.

To achieve this aim, the research pursued several specific objectives. First, to comparatively evaluate the color stability and fracture resistance of provisional restorative materials fabricated using CAD/CAM milling versus direct chairside techniques, in order to determine the influence of fabrication method on short-term mechanical and esthetic performance. Second, to investigate the effect of cervical margin design and ceramic material type (zirconia versus lithium disilicate) on the fracture resistance and failure patterns of monolithic CAD/CAM crowns. Third, to assess the influence of pontic span length on the structural integrity and load-to-failure behavior of zirconia fixed dental prostheses, thereby clarifying design-related biomechanical limitations.

A further objective was to analyze the adhesive performance and fracture resistance of cantilever Maryland restorations fabricated from zirconia and lithium disilicate when bonded to prepared and non-prepared abutment teeth, with the purpose of evaluating the feasibility of minimally invasive prosthetic approaches. In addition, the research sought to perform a physicochemical and clinically oriented assessment of alternative chemomechanical caries-removal agents, integrating FTIR and thermogravimetric analyses with clinical applicability.

RESULTS

The study focused on the integrated mechanical, optical, adhesive, and physicochemical evaluation of biofunctional restorative materials manufactured through modern technologies, aiming to demonstrate:

- (1) whether CAD/CAM provisional restorations exhibit superior color stability and fracture resistance compared with chairside materials;
- (2) how cervical margin design and ceramic type influence the fracture resistance of monolithic crowns;
- (3) to what extent pontic span length affects the structural integrity of zirconia fixed dental prostheses;
- (4) whether minimally invasive Maryland cantilever restorations provide reliable adhesive and mechanical performance depending on material and abutment preparation;
- (5) whether chemo-mechanical caries removal agents present predictable physicochemical characteristics and effective clinical performance.

COMPARATIVE EVALUATION OF COLOR STABILITY AND FRACTURE RESISTANCE OF CAD/CAM AND CHAIRSIDE PROVISIONAL RESTORATIONS: AN IN VITRO STUDY

This in vitro study demonstrated clear material-dependent differences in the optical stability and fracture resistance of provisional restorations fabricated using CAD/CAM and chairside techniques. After standardized conditioning and 7-day immersion in coffee and red wine, statistically significant differences in color change were observed (ANOVA $F(3,36) = 128.4$, $p < 0.001$). The Ambarino composite showed the best color stability ($\Delta E = 1.1 \pm 0.2$), remaining below the clinical perceptibility threshold. HIPC presented moderate discoloration ($\Delta E = 2.8 \pm 0.3$), while PMMA showed limited change ($\Delta E = 2.0 \pm 0.3$, descriptive). The poorest performance was recorded for 3M™ Protemp™, which exhibited clinically visible discoloration ($\Delta E = 4.9 \pm 0.4$).

Mechanical testing revealed even more pronounced differences (ANOVA $F(3,36) = 212.6$, $p < 0.001$). HIPC demonstrated the highest fracture resistance (2068.9 ± 104.0 N), clearly exceeding all other materials. PMMA (1215.8 ± 61.4 N) and Protemp™ (1183.4 ± 86.4 N) showed comparable intermediate strength (ns), whereas Ambarino exhibited markedly lower resistance (555.4 ± 25.4 N). Pairwise comparisons confirmed significant differences between all groups except PMMA versus Protemp™ (Figure 1).

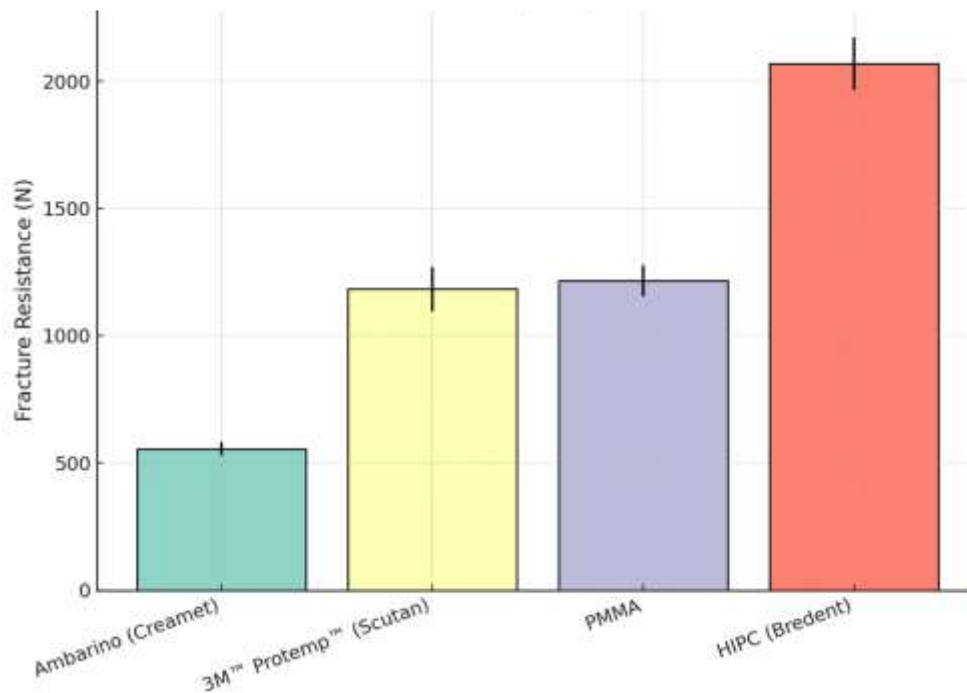


Figure 1. Mean fracture resistance ($F_{max} \pm SD$) of restorative materials

Failure analysis supported these findings: HIPC showed predominantly cohesive fractures (80%), PMMA and Protemp™ mainly mixed failures (70% and 60%), while Ambarino displayed mostly adhesive failures (75%) with extensive fragmentation.

Overall, CAD/CAM HIPC blocks offered superior mechanical reliability but moderate color stability, whereas Ambarino provided excellent esthetics at the expense of strength. Chairside Protemp™ showed the least favorable optical performance.

FRACTURE RESISTANCE OF CAD/CAM-FABRICATED ZIRCONIA AND LITHIUM DISILICATE CROWNS WITH DIFFERENT MARGIN DESIGNS: IMPLICATIONS FOR DIGITAL DENTISTRY

All tested monolithic crowns demonstrated fracture resistance values well above the physiological posterior masticatory range (≈ 294 – 784 N), confirming that every material–margin configuration met basic clinical load-bearing requirements. No adhesive failures were observed in any group, indicating reliable bonding; fractures were either cohesive within the ceramic or catastrophic involving the tooth–restoration complex.

Material-dependent failure patterns were evident. Zirconia crowns failed predominantly cohesively (70% cohesive, 30% catastrophic), suggesting higher structural integrity and more favorable crack behavior. In contrast, lithium disilicate (LD) crowns showed mainly catastrophic failures (60% catastrophic, 40% cohesive), indicating greater brittleness under compressive loading.

Fracture resistance values varied significantly between groups. The highest mean load was recorded for zirconia–chamfer crowns (2658 ± 245 N), followed by LD–chamfer (2494 ± 205 N) and zirconia–tangential (2425 ± 240 N). The lowest resistance was observed for LD–tangential crowns (1862 ± 251 N). Despite these differences, all values remained far above functional chewing forces.

Statistically, material type had a strong effect on fracture resistance (two-way ANOVA $p < 0.001$; partial $\eta^2 = 0.49$), with zirconia outperforming LD overall. Margin design alone was not significant ($p = 0.08$), but a significant interaction was detected ($p < 0.01$; partial $\eta^2 = 0.17$), indicating that the effect of cervical geometry depended on the ceramic used.

Within LD groups, chamfer margins significantly improved fracture resistance compared with tangential margins ($p < 0.01$). In contrast, zirconia crowns showed no significant sensitivity to margin design ($p = 0.19$), highlighting the greater biomechanical robustness of polycrystalline zirconia. Between materials, zirconia was significantly stronger than LD in the tangential configuration ($p < 0.01$), while differences were not significant in the chamfer design (Figure 2).

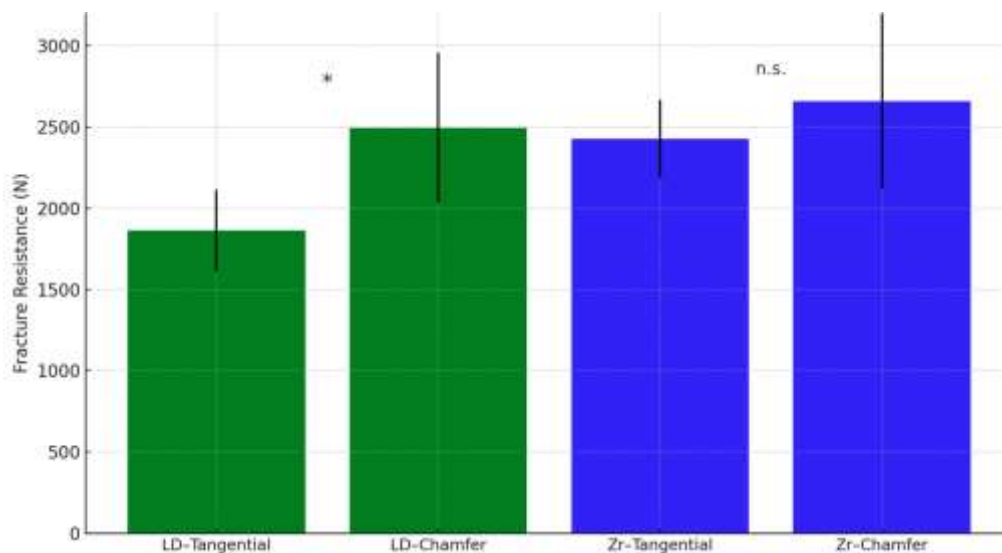


Figure 2. Fracture resistance of monolithic crowns with different margin designs (99)

Overall, zirconia crowns, with chamfer margins, provided the highest mechanical reliability, whereas LD crowns were more margin-sensitive and prone to catastrophic failure.

INFLUENCE OF PONTIC LENGTH ON THE STRUCTURAL INTEGRITY OF ZIRCONIA FIXED PARTIAL DENTURES (FDPS)

This phase of the study evaluated how pontic span length affects the fracture resistance and failure behavior of zirconia fixed dental prostheses (FDPs). The results demonstrated a strong and clinically relevant dependence of mechanical performance on restoration geometry.

Fractographic analysis revealed consistent and reproducible failure patterns. In most specimens, crack initiation occurred in the gingival region of the connectors, where tensile stress concentrations occur. Three-unit FDPs typically fractured at the distal pontic–abutment connector, whereas four-unit FDPs showed crack initiation at the central connector between pontics, corresponding to the longest unsupported span. These findings confirm that connector geometry and span length, rather than random defects, govern failure behavior.

Quantitatively, three-unit zirconia bridges exhibited substantially higher load-bearing capacity. Fracture loads ranged from 3319 N to 3971 N, with a mean of 3703.8 N, indicating excellent mechanical robustness well above physiological masticatory forces. In contrast, four-unit FDPs showed markedly reduced resistance, with values ranging from 1589 N to 1809 N and a mean of 1713.4 N, representing less than half the strength of three-unit configurations. Despite this reduction, all restorations remained above functional chewing thresholds.

Normality testing confirmed parametric assumptions (Shapiro–Wilk $p = 0.545$), allowing inferential comparison. Independent-samples t -testing demonstrated a highly significant difference between groups ($t(18) = 33.39$, $p < 0.001$), with a large mean difference of approximately 1990 N (95% CI: 1865–2116 N) favoring three-unit bridges.

Increasing pontic span length produced a dramatic, statistically significant reduction in fracture resistance, shifting the critical stress concentration to the central connector. Clinically, these findings emphasize that multi-unit zirconia FDPs are highly sensitive to span length and connector biomechanics, even when fabricated from high-strength materials

ADHESIVE PERFORMANCE OF ZIRCONIA AND LITHIUM DISILICATE MARYLAND CANTILEVER RESTORATIONS ON PREPARED AND NON-PREPARED ABUTMENT TEETH: AN IN VITRO COMPARATIVE STUDY

This phase evaluated the fracture resistance and failure behavior of cantilever Maryland restorations, focusing on the influence of ceramic material (zirconia vs. lithium disilicate, LD) and abutment preparation. Across all groups, fracture loads ranged from 190.7 N to 447.0 N, indicating that all restorations withstood forces within or above the physiological anterior range.

A consistent and clinically important finding was the strong effect of tooth preparation. For zirconia restorations, non-prepared abutments showed significantly higher fracture resistance (341.19 ± 69.71 N) compared with prepared teeth (226.19 ± 22.88 N), with a highly significant difference (Welch $t \approx 4.96$, $p < 0.001$). A similar pattern was observed for LD restorations: non-prepared teeth reached 341.71 ± 42.89 N, whereas prepared teeth showed 243.94 ± 14.21 N ($t \approx -6.84$, $p < 0.001$). Thus, preservation of enamel significantly improved mechanical performance regardless of ceramic type.

When comparing materials overall, zirconia (mean 283.69 N) and LD (mean 292.83 N) demonstrated no statistically significant difference ($p = 0.752$), indicating comparable load-bearing capacity under the tested conditions.

Failure analysis revealed a highly consistent pattern. Tooth fracture was the dominant failure mode in nearly all specimens, with only one zirconia restoration fracturing. Importantly, no adhesive failures or debonding events were observed in any group, confirming the reliability of the bonding protocol and suggesting that the tooth structure—not the adhesive interface—was the weak link in the system.

From a biomechanical perspective, the results indicate that cantilever Maryland restorations are primarily limited by abutment integrity rather than ceramic strength. Minimally invasive approaches that preserve enamel significantly enhance resistance, while the material choice between zirconia and LD appears less critical under anterior loading conditions.

ALTERNATIVE METHODS OF REMOVING CARIOUS TISSUE

The final step evaluated two chemomechanical caries-removal agents (BRIX3000 and Carisolv) through physicochemical characterization and in vitro assessment of caries-removal effectiveness. Overall, both agents demonstrated distinct compositional profiles and clinically relevant caries-removal activity.

FTIR spectroscopy confirmed the presence of characteristic functional groups in each formulation. BRIX3000 showed prominent absorption peaks at 3320, 1615, 980, and 620 cm^{-1} , while Carisolv exhibited key bands at 1628, 1456, 1395, and 3255 cm^{-1} . Superimposed spectra revealed partially overlapping regions, indicating some compositional similarities despite formulation differences. Thermogravimetric analysis further differentiated the agents: BRIX3000 displayed a multi-stage degradation profile with greater total mass loss, whereas Carisolv showed a simpler two-stage decomposition with lower overall mass loss, reflecting distinct thermal stability.

Clinically oriented evaluation using VistaCam imaging demonstrated effective caries removal with both products. Carisolv produced an average index reduction of approximately 0.85 units (Figure 3), while BRIX3000 achieved a larger mean decrease of about 1.37 units, suggesting a stronger debridement effect (Figure 4). Optical and digital microscopy confirmed the absence of visibly detectable carious tissue after treatment in both groups.

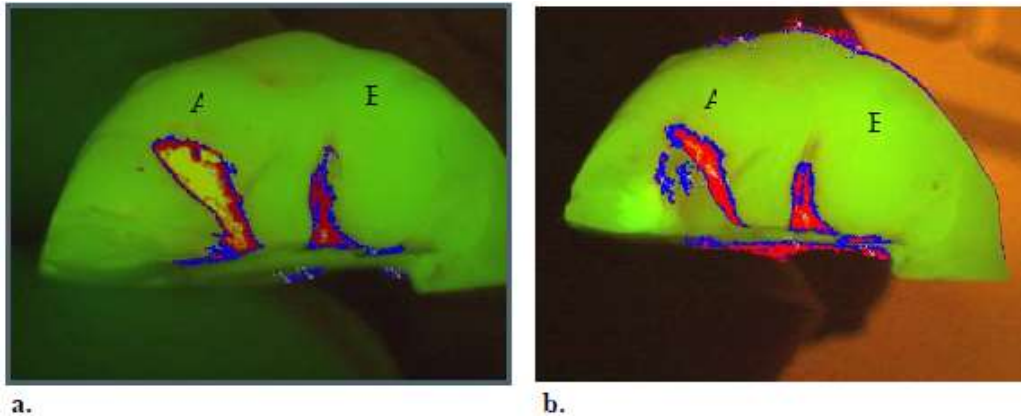


Figure 3. Images with VistaCam software for teeth treated with Carisolv before and after its application:
(a)Tooth 1 Lesion A and B -initial; (b) Tooth 1 Lesion A and B-after treatment

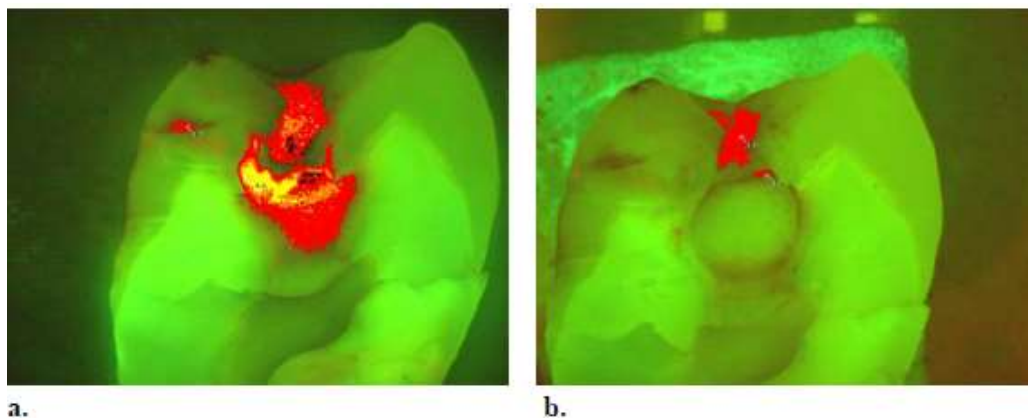


Figure 4. Images with VistaCam software of teeth treated with BRIX3000 before and after its application:
(a) Tooth 1 -initial; (b) Tooth 1 -after treatment

Distinct reaction patterns were observed during application: BRIX3000 underwent a color change from light gray to dark green, whereas Carisolv produced surface bubbling, both of which were consistent across specimens. These findings indicate different enzymatic or chemical activity profiles during caries dissolution.

Both chemo-mechanical agents demonstrated effective non-rotary caries removal and distinct physicochemical signatures. BRIX3000 showed greater VistaCam index reduction and more complex thermal behavior, while Carisolv exhibited lower mass loss and a simpler degradation pattern. These results support the clinical viability of biologically oriented caries management approaches.

ORIGINAL CONTRIBUTIONS AND ELEMENTS OF NOVELTY

The present doctoral research provides an original, integrative evaluation of contemporary biofunctional materials and minimally invasive restorative strategies within a digitally driven clinical framework. The main element of novelty lies in the structured, multi-stage experimental design that systematically investigates provisional restorations, monolithic ceramic crowns, multi-unit zirconia prostheses, cantilever Maryland restorations, and chemomechanical caries-removal agents within a single coherent research platform.

A key original contribution is the clinically realistic comparison between CAD/CAM-milled and chairside provisional restorations using anatomically shaped crowns, demonstrating the superior mechanical homogeneity of industrially processed polymers and clarifying the trade-off between esthetic stability and fracture resistance. The research further provides one of the few experimentally validated demonstrations that the effect of cervical margin design is material-dependent, showing that lithium disilicate is sensitive to margin geometry, whereas zirconia exhibits greater tolerance to conservative preparations.

The thesis also provides quantitative biomechanical evidence demonstrating the impact of pontic span length on zirconia FDPs, identifying connector regions as critical stress concentrators, and documenting a marked reduction in fracture resistance in longer-span prostheses. In minimally invasive prosthodontics, the study contributes original data demonstrating that enamel preservation significantly enhances the performance of zirconia and lithium disilicate cantilever Maryland restorations, while modern adhesive protocols effectively prevent debonding.

An additional element of novelty is the combined physicochemical and clinical evaluation of BRIX3000 and Carisolv, linking compositional features with caries-removal effectiveness within a biologically oriented treatment concept.

Collectively, the thesis advances a biomimetic, evidence-based restorative paradigm by showing that restorative success depends on the interaction between material properties, preparation design, and adhesive strategy. By integrating digital workflows with tissue-preserving approaches and providing clinically interpretable mechanical thresholds, the research offers both original scientific insight and practical guidance for modern minimally invasive restorative dentistry.

LIMITATIONS OF THE RESEARCH

Despite its comprehensive and staged design, the present research is subject to several limitations that should be considered when interpreting the findings and translating them into clinical practice. The most important constraint is the *in vitro* nature of all experimental stages, which, while ensuring high standardization and internal validity, limits direct extrapolation to the complex oral environment.

A major methodological limitation across multiple stages is the lack of standardized artificial-aging protocols, including thermocycling, pH cycling, and cyclic fatigue loading. Mechanical testing relied predominantly on static uniaxial load-to-failure testing, which does not reproduce the multidirectional, repetitive forces of mastication. Consequently, long-term intraoral performance and fatigue-related failure risks may be underestimated.

Another important limitation is the use of standardized metallic abutments in several experiments. Although this choice improved reproducibility and load uniformity, it eliminated biological variability in dentin properties, periodontal ligament behavior, and tooth morphology, potentially leading to an overestimation of fracture resistance and altering stress distribution.

The studies also lacked simulation of the periodontal ligament, advanced fractographic or SEM analysis, and, in the caries removal study, histological or microbiological confirmation of tissue selectivity. These omissions restrict detailed understanding of failure mechanisms and the biological completeness of caries removal.

Additional constraints include relatively small sample sizes, evaluation of limited design configurations, and, in the Maryland bridge study, variability introduced by using different tooth types with unequal bonding surfaces. Moreover, optical factors such as surface roughness and gloss were not quantified in the provisional materials study.

CONCLUSIONS AND FUTURE DIRECTIONS

The present doctoral research provides a structured and clinically oriented evaluation of contemporary biofunctional materials and minimally invasive restorative strategies within modern digital workflows. Across the five experimental stages, the findings consistently demonstrate that restorative performance is governed by the interaction between material properties, preparation design, and adhesive strategy rather than by any single factor in isolation. CAD/CAM-milled provisional materials showed superior mechanical reliability compared with chairside resins, whereas ceramic systems exhibited margin-dependent sensitivity. Zirconia fixed dental prostheses proved highly influenced by pontic span length, confirming the critical role of connector biomechanics in long-span restorations. In adhesive prosthodontics, enamel preservation significantly improved the performance of cantilever Maryland restorations, and modern bonding protocols effectively prevented debonding. Additionally, chemo-mechanical agents (BRIX3000 and Carisolv) demonstrated effective, tissue-conservative caries removal, supporting their role within biologically oriented dentistry.

Despite these relevant contributions, the *in vitro* design and absence of thermomechanical aging and fatigue simulation limit direct long-term clinical extrapolation. Therefore, future research should prioritize incorporating thermocycling, cyclic fatigue loading, and pH cycling to better reproduce intraoral conditions. The use of more biologically realistic abutment models, including periodontal ligament simulation, finite element analysis, and advanced imaging techniques (e.g., micro-CT or OCT), would further clarify stress distribution and failure mechanisms. Long-term clinical and prospective studies are particularly needed for cantilever Maryland restorations and chemo-mechanical caries removal protocols to validate laboratory findings under real functional conditions.

Additional future directions include evaluating novel adhesive systems, biofunctional cements, and alternative surface treatments, as well as integrating chemo-mechanical caries removal into fully digital restorative workflows. Expanding research toward patient-reported outcomes and individualized risk-based treatment planning will further strengthen the translational impact. Addressing these directions will be essential for consolidating minimally invasive, adhesive, and digitally guided restorative dentistry into robust evidence-based clinical protocols.