

**„VICTOR BABEȘ” UNIVERSITY OF MEDICINE AND PHARMACY
FROM TIMIȘOARA
FACULTY OF DENTAL MEDICINE
DEPARTMENT III: PROSTHODONTICS**

FAUR ANDREI-BOGDAN



PHD THESIS

**IMPACT OF INTRAORAL SCANNING ACCURACY ON
DIGITAL IMPRESSIONS AND PROSTHETIC RESTORATION
OUTCOMES IN THE DIGITAL WORKFLOW**

A B S T R A C T

Scientific Coordinator:

PROF. UNIV. DR. JIVĂNESCU ANCA

Timișoara

2026

A B S T R A C T

Introduction and Current State of Knowledge in Digital Prosthodontics

The field of prosthodontics has undergone a profound transformation over recent decades, driven by the rapid integration of digital technologies into both clinical and laboratory workflows. This transition from conventional analog techniques to fully digital systems has fundamentally redefined the way prosthetic treatments are diagnosed, planned, and executed. At the core of this transformation lies the development and widespread adoption of intraoral scanning, which has emerged as the primary method for acquiring digital impressions and initiating computer-aided design and manufacturing (CAD/CAM) processes.

Traditionally, prosthetic rehabilitation relied on elastomeric impression materials, gypsum casts, and multiple manual steps, each introducing potential sources of error. Although these conventional techniques have demonstrated long-term clinical reliability, they are inherently susceptible to cumulative inaccuracies resulting from material deformation, dimensional instability, and operator variability. In contrast, digital workflows streamline the process by reducing intermediate steps and enabling the direct acquisition of three-dimensional data, which can be immediately visualized, analyzed, and integrated into a fully digital production chain.

The introduction of intraoral scanners has significantly improved patient comfort, reduced clinical time, and enhanced communication between clinicians and dental technicians. Furthermore, digital impressions allow for real-time evaluation of preparation margins, occlusal relationships, and soft tissue contours, facilitating immediate corrections and minimizing the need for retakes. These advantages have positioned digital dentistry as a cornerstone of modern prosthodontic practice.

Despite these advancements, the accuracy of intraoral scanning remains a critical factor that directly influences the fit, function, and longevity of prosthetic restorations. Accuracy, defined through the concepts of trueness and precision, is not solely dependent on the scanning device itself but is the result of a complex interaction between multiple variables. These include scanner technology, optical principles, data

acquisition methods, scanning strategies, operator experience, and intraoral conditions.

Current literature highlights that while digital systems can achieve high levels of accuracy in single-unit and short-span restorations, their performance may decrease in more complex clinical scenarios, such as full-arch rehabilitations or edentulous cases. In these situations, cumulative errors generated during data acquisition and stitching processes can compromise the final outcome. Moreover, discrepancies observed under controlled laboratory conditions may not always translate directly into clinically relevant differences, emphasizing the importance of validating experimental findings in real clinical environments.

In addition to the acquisition phase, the digital workflow extends through multiple stages, including data processing, prosthetic design, and manufacturing through subtractive or additive techniques. Errors introduced at any stage may propagate throughout the workflow, ultimately affecting the internal adaptation, marginal fit, and biomechanical behavior of the final restoration. Consequently, the evaluation of intraoral scanning accuracy must be approached within the context of the entire digital workflow rather than as an isolated parameter.

Recent developments in digital prosthodontics, including facially driven treatment planning, Digital Smile Design, and chairside CAD/CAM systems, have further expanded the clinical applications of digital technologies. These innovations enable more predictable, personalized, and minimally invasive treatments, while also increasing patient involvement in the therapeutic process. However, they also introduce new variables that may influence the overall accuracy and reproducibility of digital workflows.

Despite the growing body of research, significant gaps remain in understanding how different factors influencing scanning accuracy interact and how these interactions translate into clinical outcomes. In particular, there is a need for studies that integrate in vitro precision analysis with in vivo validation, thereby bridging the gap between experimental data and clinical reality.

Within this context, the present doctoral thesis is positioned at the intersection of technological advancement and clinical applicability. By addressing intraoral scanning accuracy not only as a technical parameter but as a determinant of the entire

prosthetic workflow, this research contributes to a more comprehensive and clinically relevant understanding of digital prosthodontics.

Aim and Objectives of the Research

The present doctoral research is centered on the in-depth examination of intraoral scanning accuracy and its direct influence on digital impressions and prosthetic restoration outcomes within the modern digital workflow. In the context of the growing adoption of digital technologies in prosthodontics, the study intends to clarify the role of accuracy not as an isolated technical parameter, but as a fundamental determinant of clinical predictability and treatment success.

The primary aim of this thesis is to investigate the multifactorial nature of intraoral scanning accuracy and to establish its clinical relevance through correlating controlled experimental findings with real-life clinical performance. This objective is pursued through a dual methodological approach, including both *in vitro* and *in vivo* investigations, in order to provide a balanced and clinically meaningful assessment of digital impression accuracy.

The research is designed to identify and examine the key variables that influence scanning accuracy, including technological-related factors related to different intraoral scanners, protocol-related factors such as scanning strategies and acquisition techniques, as well as operator-dependent and environmental conditions. By a systematic evaluation of these variables, this study strives to determine their individual and combined effects on the trueness and precision of digital impressions.

A further objective is to examine the manner in which variations in scanning accuracy translate into differences in prosthetic outcomes, particularly in terms of internal adaptation, intaglio surface trueness, and overall fit of digitally fabricated restorations. This includes the comparative evaluation of different manufacturing techniques, such as additive and subtractive processes, and their interaction with the initial digital data acquisition.

In addition, this research aims to explore the clinical relevance and capability of digital workflows through analyzing acquisition time, reproducibility, and performance across dentate, partially edentulous, and edentulous clinical scenarios.

Special attention is given to complex rehabilitations, where cumulative errors may have a greater impact on treatment outcomes.

Through the combination of experimental and clinical data, this thesis ultimately seeks to contribute to the development of structured, evidence-based protocols for intraoral scanning and digital prosthetic workflows. By doing so, it strives to improve the predictability, efficiency, and clinical reliability of digital prosthodontic treatments, while also supporting the informed adoption of digital technologies in routine clinical practice.

Materials and Methods

The present doctoral research is based on a combined experimental and clinical methodological structure intended to offer a comprehensive evaluation of intraoral scanning accuracy and its implications throughout the digital prosthodontic workflow. In order to achieve a clinically relevant and scientifically robust assessment, the study includes both in vitro and in vivo investigations, enabling the controlled analysis of specific variables as well as their validation under real clinical conditions.

The in vitro component of the research was designed to isolate and evaluate the influence of individual factors on scanning accuracy under standardized and reproducible conditions. Reference models with known geometries and dimensions were utilized to enable exact measurements of trueness and precision. Multiple scanning protocols and acquisition strategies were tested, including variations in scan paths and rescanning procedures, in order to evaluate their impact on data acquisition quality. Digital impressions obtained from different intraoral scanning systems were compared against reference datasets via specialized three-dimensional analysis software, enabling quantitative deviation analysis and detailed surface comparison.

Complementing the laboratory investigations, the in vivo component was conducted to validate the study findings within real clinical scenarios. Clinical data acquisition was performed on patients representing different prosthodontic conditions, including dentate, partially edentulous, and edentulous arches. Multiple intraoral scanners were evaluated under routine clinical conditions, taking into account factors such as intraoral environment, accessibility, soft tissue dynamics, and operator interaction. Accuracy measurements were obtained by comparing clinical digital

impressions with reference standards, while also recording acquisition time and workflow effectiveness.

The research design further included comparative examinations of different digital manufacturing techniques, focusing on the relationship between initial scan accuracy and the final prosthetic outcome. Both additive (3D printing) and subtractive (milling) manufacturing methods were investigated in the fabrication of prosthetic components, such as denture bases and provisional restorations. The trueness of intaglio surfaces and internal adaptation were assessed using digital superimposition techniques, enabling the evaluation of how discrepancies introduced during scanning are propagated through subsequent stages of the digital workflow.

In addition, a comprehensive clinical case study was incorporated to depict the practical implementation of a complete chairside digital workflow. This included intraoral scanning, digital treatment planning, CAD design, additive manufacturing of provisional restorations, and the fabrication of definitive prosthetic restorations. The case allowed for the qualitative and quantitative assessment of workflow integration, clinical efficiency, and esthetic and functional outcomes.

All measurements and analyses were performed using validated digital software tools and uniform evaluation protocols meant to ensure reproducibility and consistency. Statistical analysis was applied where appropriate to determine the significance of observed differences between systems, techniques, and clinical conditions.

By combining controlled experimental analysis with real-life clinical validation, the methodological approach of this thesis provides a thorough framework for understanding intraoral scanning accuracy not only as a measurable parameter, but as a dynamic factor influencing the entire digital prosthetic workflow.

Results

The results of the present research demonstrate that intraoral scanning accuracy is a complex and variable-dependent phenomenon, affected by several interacting factors that collectively determine the quality of digital impressions and, ultimately, the outcomes of prosthetic restorations.

The in vitro investigations revealed that scanning protocols and acquisition strategies play an important role in determining both trueness and precision. Variations

in scan paths and the implementation of rescanning procedures were shown to directly influence surface reconstruction, with certain protocols producing more consistent and accurate datasets. The analysis of mesh hole rescanning demonstrated that improper or excessive rescanning may introduce localized distortions, while optimized protocols can effectively improve data continuity without impairing overall accuracy.

The comparative evaluation of different intraoral scanners highlighted measurable differences in performance between systems, both in terms of accuracy and acquisition efficiency. While all tested scanners demonstrated clinically acceptable levels of accuracy in standard conditions, variability turned more pronounced under challenging scenarios. Differences were observed between maxillary and mandibular scans, as well as between anterior and posterior regions, with posterior and less reachable areas exhibiting increased deviations. Additionally, scanning time varied significantly between systems, showing differences in data acquisition speed and workflow performance.

Clinical findings additionally emphasized the influence of intraoral conditions on scanning performance. Edentulous and partially edentulous cases presented greater challenges compared to dentate arches, mainly due to the lack of stable anatomical landmarks and the increased difficulty in preserving consistent data stitching. These conditions resulted in increased deviations and reduced reproducibility, confirming that clinical complexity directly affects scanning accuracy.

The analysis of prosthetic components demonstrated that deviations introduced during the digital impression stage propagate throughout the digital workflow and influence the final restoration. In the evaluation of denture bases, additive manufacturing techniques showed comparable, and in certain aspects improved, intaglio surface trueness when compared to conventional methods, although variability remained dependent on the accuracy of the initial digital dataset. Similarly, the comparative assessment of milled versus 3D-printed provisional restorations indicated that both manufacturing techniques can achieve clinically acceptable results, but their performance is closely linked to the quality of the input data obtained during scanning.

The application of digital workflows in a complete clinical case further confirmed the functional applicability of intraoral scanning and chairside CAD/CAM technologies. The results showed that a fully digital approach allows for efficient treatment planning, faithful execution, and predictable aesthetic as well as functional outcomes. The use of staged provisional restorations contributed to the validation of the treatment plan

and facilitated progressive adaptation of soft tissues, strengthening the contribution of digital technologies in improving clinical control and patient communication.

Across all investigations, a consistent finding was that accuracy is not an inherent property of the scanning device alone, but rather the result of a cumulative process affected by technology, protocol, and clinical conditions. While small variations identified under regulated laboratory conditions were not always clinically significant, their reproducibility and amplification in intricate contexts underline their importance in the overall success of prosthetic treatments.

Discussion, Conclusions and Original Contributions

The findings of the present doctoral research provide a comprehensive and clinically grounded understanding of intraoral scanning accuracy, confirming that it represents a dynamic and multifactorial parameter rather than a fixed characteristic of a specific device or technology. The integration of in vitro and in vivo investigations has allowed for a direct correlation between controlled experimental results and real clinical performance, thereby tackling a significant gap in the current body of literature.

One of the central conclusions of this thesis is that scanning accuracy must be interpreted within the context of the entire digital workflow. Errors introduced during the initial data acquisition phase do not remain isolated but are propagated through subsequent stages of data processing, prosthetic design, and manufacturing, eventually influencing the fit, function, and longevity of the final restoration. This systemic perspective shifts the focus from evaluating individual components toward understanding the cumulative behavior of the digital workflow as a whole.

The results show that technological improvements alone are insufficient to guarantee optimal outcomes. While modern intraoral scanners are capable of achieving high levels of accuracy, their performance is highly dependent on the correct implementation of clinical protocols. Scanning strategy, operator experience, and the management of intraoral conditions play a decisive role in determining the final quality of digital impressions. Consequently, accuracy should be regarded as the outcome of a controlled and optimized clinical process rather than an inherent property of the scanning system.

The dual methodological approach implemented in this investigation stresses the importance of validating experimental findings within clinical settings. Although *in vitro* studies enable the exact identification of subtle differences in trueness and precision, these differences do not always translate into clinically significant outcomes. However, their reproducibility *in vivo*, particularly in complex clinical scenarios, reinforces their relevance and accentuates the need for protocol standardization.

Another key conclusion is that the level of clinical complexity directly influences the magnitude and impact of scanning inaccuracies. While digital workflows can achieve accuracy levels comparable to, and in certain situations exceeding, conventional techniques in single-unit and short-span restorations, full-arch rehabilitations and edentulous cases remain more susceptible to cumulative errors. These findings point out the necessity for study-based scanning strategies and stricter protocol control in complex cases.

The comparative analysis of manufacturing techniques further supports the concept that the quality of the final prosthetic outcome is fundamentally related to the accuracy of the initial digital dataset. Additive and subtractive manufacturing methods can both produce clinically acceptable restorations; however, their success is contingent upon the integrity of the input data. This reinforces the key role of the scanning phase as the foundation of the entire digital workflow.

Beyond its analytical contributions, this thesis establishes a structured and clinically applicable structure for understanding and optimizing intraoral scanning in prosthodontics. By integrating technological, methodological, and clinical perspectives, the research provides practical reference points for improving accuracy, reducing variability, and boosting treatment predictability.

The originality of this doctoral work resides in its translational and integrative approach. Rather than evaluating intraoral scanning accuracy as an isolated technical parameter, the research places it within the wider context of the digital prosthetic workflow and directly correlates experimental precision with clinical performance. This approach enables a more realistic and clinically relevant interpretation of accuracy, bridging the gap between laboratory data and everyday clinical practice.

Furthermore, the thesis contributes original data regarding the behavior of digital impressions in different clinical scenarios, including complex rehabilitations where current evidence remains limited. By combining comparative analysis with clinical validation, the investigation not only confirms existing knowledge but refines it,

challenges oversimplified assumptions, and establishes evidence-based guidelines for clinical decision-making.

In conclusion, this doctoral thesis demonstrates that intraoral scanning accuracy is a central determinant of successful digital prosthodontic treatments. Its proper understanding and optimization require a holistic approach that integrates technology, protocol, and clinical context. Through its findings, this research supports the advancement of digital dentistry toward more predictable, efficient, and patient-focused therapeutic solutions.

Anexa nr. 2 la H.S. nr. 160/17740/26.07.2023

UNIVERSITATEA DE MEDICINĂ ȘI FARMACIE

“VICTOR BABEȘ” DIN TIMISOARA

FACULTATEA DE MEDICINĂ DENTARĂ

DEPARTAMENTUL III: PROTETICĂ DENTARĂ

FAUR ANDREI-BOGDAN



TEZĂ DE DOCTORAT

**INFULENȚA ACURATEȚEI SCANĂRII INTRAORALE
ASUPRA AMPRENTELOR DIGITALE ȘI A REALIZĂRII
RESTAURĂRILOR PROTETICE ÎN FLUXUL DE LUCRU
DIGITAL**

R E Z U M A T

Conducător de doctorat:

PROF. UNIV. DR. JIVĂNESCU ANCA

Timișoara

2026

REZUMAT

Introducere și stadiul actual al cunoașterii în protetica digitală

Domeniul proteticii dentare a cunoscut o transformare profundă în ultimele decenii, determinată de integrarea accelerată a tehnologiilor digitale în fluxurile de lucru clinice și de laborator. Tranziția de la tehnicile convenționale analogice la sisteme complet digitale a redefinit fundamental modul în care tratamentele protetice sunt diagnosticate, planificate și realizate. În centrul acestei transformări se află dezvoltarea și adoptarea pe scară largă a scanării intraorale, care a devenit metoda principală de obținere a amprentelor digitale și punctul de plecare al proceselor CAD/CAM.

În mod tradițional, reabilitarea protetică se baza pe materiale de amprentă elastomerice, modele din ghips și numeroase etape manuale, fiecare dintre acestea reprezentând o potențială sursă de eroare. Deși aceste tehnici convenționale au demonstrat fiabilitate clinică pe termen lung, ele sunt inerent susceptibile la erori cumulative generate de deformarea materialelor, instabilitatea dimensională și variabilitatea operatorului. În contrast, fluxurile de lucru digitale simplifică procesul prin reducerea etapelor intermediare și permit achiziția directă de date tridimensionale, care pot fi vizualizate, analizate și integrate imediat într-un lanț digital complet.

Introducerea scanerelor intraorale a îmbunătățit semnificativ confortul pacientului, a redus timpul clinic și a facilitat comunicarea între medic și technicianul dentar. În plus, amprente digitale permit evaluarea în timp real a marginilor de preparare, a relațiilor ocluzale și a contururilor țesuturilor moi, oferind posibilitatea corecțiilor imediate și reducând necesitatea repetării amprentelor. Aceste avantaje au poziționat stomatologia digitală ca un pilon esențial al proteticii moderne.

În ciuda progreselor tehnologice semnificative, acuratețea scanării intraorale continuă să reprezinte un factor critic insuficient înțeles în context clinic real. Majoritatea studiilor existente analizează acuratețea în condiții experimentale controlate, fără a integra în mod adecvat variabilele clinice și fără a evalua impactul cumulativ asupra întregului flux protetic digital.

Literatura actuală evidențiază faptul că, deși sistemele digitale pot atinge niveluri ridicate de acuratețe în restaurările unitare sau pe segmente scurte, performanța acestora poate scădea în situații clinice complexe, precum reabilitările pe arcade complete sau cazurile edentate. În aceste situații, erorile cumulative generate în timpul procesului de achiziție și de aliniere a imaginilor pot compromite rezultatul final. De asemenea, diferențele observate în condiții experimentale controlate nu se traduc întotdeauna în diferențe relevante clinic, subliniind necesitatea validării rezultatelor în condiții reale.

Pe lângă etapa de achiziție, fluxul digital include multiple etape ulterioare, precum procesarea datelor, proiectarea protetică și fabricația prin tehnici subtractive sau aditive. Erorile introduse în oricare dintre aceste etape pot fi propagate de-a lungul întregului flux de lucru, afectând adaptarea internă, marginală și comportamentul biomecanic al restaurării finale. Prin urmare, evaluarea acurateței scanării intraorale trebuie realizată în contextul întregului flux digital, nu ca un parametru izolat.

Dezvoltările recente în protetica digitală, inclusiv planificarea ghidată facial, Digital Smile Design și sistemele CAD/CAM chairside, au extins semnificativ aplicațiile clinice ale tehnologiilor digitale. Aceste inovații permit tratamente mai predictibile, personalizate și minim invazive, crescând totodată implicarea pacientului în procesul terapeutic. Cu toate acestea, ele introduc noi variabile care pot influența acuratețea și reproductibilitatea fluxurilor digitale.

În ciuda volumului tot mai mare de cercetări, există încă lacune importante în înțelegerea modului în care factorii care influențează acuratețea interacționează între ei și cum aceste interacțiuni se reflectă în rezultatele clinice. În mod particular, este necesară integrarea studiilor in vitro cu validări in vivo, pentru a realiza o corelare directă între datele experimentale și realitatea clinică.

În acest context, prezenta teză de doctorat se poziționează la intersecția dintre progresul tehnologic și aplicabilitatea clinică. Prin abordarea acurateței scanării intraorale nu doar ca parametru tehnic, ci ca determinant al întregului flux de lucru digital protetic, această cercetare aduce o contribuție importantă la dezvoltarea unei înțelegeri aprofundate și relevante clinic a proteticii digitale contemporane.

Scopul și obiectivele cercetării

Prezenta teză de doctorat își propune să realizeze o evaluare comprehensivă și integrativă a acurateței scanării intraorale, analizând impactul acesteia asupra amprentelor digitale și asupra performanței restaurărilor protetice în cadrul fluxurilor de lucru digitale moderne. În contextul adoptării accelerate a tehnologiilor digitale în protetică, studiul își propune să clarifice rolul acurateței nu ca un parametru tehnic izolat, ci ca un determinant fundamental al predictibilității clinice și al succesului terapeutic.

Scopul principal al acestei teze este investigarea caracterului multifactorial al acurateței scanării intraorale și stabilirea relevanței sale clinice prin corelarea rezultatelor experimentale obținute în condiții controlate cu performanța în situații clinice reale. Acest obiectiv este abordat printr-o metodologie duală, care integrează studii in vitro și in vivo, oferind astfel o evaluare echilibrată și relevantă clinic a acurateței amprentelor digitale.

Cercetarea este concepută pentru a identifica și analiza principalii factori care influențează acuratețea scanării, incluzând factori tehnologici legați de diferite tipuri de scanere intraorale, factori de protocol precum strategiile de scanare și metodele de achiziție, precum și factori dependenți de operator și de mediul clinic. Prin evaluarea sistematică a acestor variabile, studiul urmărește să determine efectele individuale și cumulative asupra fidelității (trueness) și preciziei (precision) amprentelor digitale.

Un obiectiv esențial al cercetării constă în analiza modului în care variațiile acurateței scanării se reflectă în rezultatele protetice, în special în ceea ce privește adaptarea internă, fidelitatea suprafeței de sprijin (intaglio) și adaptarea generală a restaurărilor fabricate digital. Aceasta include evaluarea comparativă a diferitelor tehnici de fabricație, precum procesele aditive și subtractive, și interacțiunea acestora cu datele digitale inițiale.

De asemenea, cercetarea își propune să investigheze aplicabilitatea clinică și eficiența fluxurilor digitale, prin analiza timpului de achiziție, reproductibilității și performanței în diferite scenarii clinice, incluzând cazuri de arcade dentate, parțial edentate și edentate total. O atenție deosebită este acordată reabilitărilor complexe, în care erorile cumulative pot avea un impact semnificativ asupra rezultatului final.

Prin integrarea datelor experimentale și clinice, această teză urmărește să contribuie la dezvoltarea unor protocoale standardizate, bazate pe dovezi, pentru scanarea intraorală și fluxurile protetice digitale. Astfel, se dorește creșterea predictibilității, eficienței și fiabilității tratamentelor protetice digitale, precum și susținerea implementării corecte a tehnologiilor digitale în practica clinică curentă.

Materiale și metode

Prezenta cercetare doctorală este fundamentată pe un design metodologic integrativ, care combină investigații experimentale și clinice, cu scopul de a evalua în mod comprehensiv acuratețea scanării intraorale și impactul acesteia asupra fluxului de lucru protetic digital. Această abordare permite atât analiza controlată a variabilelor implicate, cât și validarea rezultatelor în condiții clinice reale, asigurând relevanța practică a concluziilor.

Componenta in vitro a fost concepută pentru a permite izolarea și evaluarea sistematică a factorilor individuali care influențează acuratețea scanării. Au fost utilizate modele de referință cu geometrie și dimensiuni cunoscute, facilitând determinarea precisă a fidelității (trueness) și preciziei (precision). Au fost investigate multiple protocoale de scanare și strategii de achiziție, incluzând variații ale traseului de scanare și proceduri de re-scanare, în vederea analizării impactului acestora asupra calității datelor digitale. Amprentele digitale obținute cu diferite sisteme de scanare intraorală au fost comparate cu seturi de date de referință, utilizând software-uri dedicate de analiză tridimensională, care au permis cuantificarea deviațiilor și evaluarea detaliată a suprafețelor.

Componenta in vivo a avut ca obiectiv validarea rezultatelor experimentale în condiții clinice reale. Achiziția datelor a fost realizată pe pacienți cu diferite situații protetice, incluzând arcade dentate, parțial edentate și edentate total. Evaluarea mai multor sisteme de scanare intraorală a fost efectuată în condiții clinice uzuale, luând în considerare variabile precum mediul intraoral, accesibilitatea, dinamica țesuturilor moi și interacțiunea operatorului. Acuratețea amprentelor digitale a fost determinată prin compararea acestora cu modele de referință, fiind înregistrate suplimentar timpul de achiziție și parametrii de eficiență ai fluxului de lucru.

Designul cercetării a inclus, de asemenea, analiza relației dintre acuratețea scanării inițiale și rezultatul protetic final. Au fost evaluate comparativ tehnici de fabricație digitală aditivă (printare 3D) și substractivă (frezare), utilizate pentru realizarea componentelor protetice, precum bazele de proteză și restaurările provizorii. Fidelitatea suprafeței de sprijin (intaglio) și adaptarea internă au fost analizate prin tehnici de suprapunere digitală, permițând evaluarea modului în care erorile generate în etapa de scanare sunt propagate în etapele ulterioare ale fluxului digital.

În cadrul cercetării a fost inclus și un studiu clinic complex, destinat ilustrării aplicabilității unui flux de lucru digital de cabinet complet (chairside). Acesta a integrat scanarea intraorală, planificarea digitală a tratamentului, designul CAD, fabricația aditivă a restaurărilor provizorii și realizarea restaurărilor definitive. Studiul de caz a permis evaluarea integrării fluxului digital, a eficienței clinice și a rezultatelor estetice și funcționale.

Toate măsurătorile au fost realizate utilizând software-uri validate și protocoale standardizate de analiză, pentru a asigura reproductibilitatea și consistența datelor. Analiza statistică a fost aplicată acolo unde a fost necesar, în vederea determinării semnificației diferențelor observate între sisteme, protocoale și condiții clinice.

Prin corelarea rezultatelor obținute în condiții experimentale controlate cu cele din practica clinică, această abordare metodologică permite o evaluare realistă și relevantă clinic a acurateții scanării intraorale, evidențiind rolul acesteia ca factor determinant în cadrul întregului flux protetic digital.

Rezultate

Rezultatele prezentei cercetări demonstrează că acuratețea scanării intraorale reprezintă un fenomen complex, dependent de multiple variabile care interacționează și care, în mod cumulativ, determină calitatea amprentelor digitale și, implicit, rezultatele restaurărilor protetice.

Investigațiile in vitro au evidențiat faptul că protocoalele de scanare și strategiile de achiziție au un rol semnificativ în determinarea fidelității și preciziei. Variațiile traseului de scanare și utilizarea procedurilor de rescanning influențează direct reconstrucția suprafețelor, anumite protocoale generând seturi de date mai consistente și mai exacte. Analiza rescanning-ului zonelor cu defecte de tip „mesh holes” a arătat că aplicarea necorespunzătoare sau excesivă a acestuia poate introduce distorsiuni locale, în timp ce protocoalele optimizate pot îmbunătăți continuitatea datelor fără a compromite acuratețea globală.

Evaluarea comparativă a diferitelor scanere intraorale a evidențiat diferențe măsurabile între sisteme, atât în ceea ce privește acuratețea, cât și eficiența achiziției. Deși toate scanerle testate au demonstrat niveluri de acuratețe acceptabile clinic în condiții standard, variabilitatea a devenit mai pronunțată în scenarii dificile. Analiza a evidențiat diferențe sistematice între scanările maxilare și mandibulare, precum și între regiunile anterioare și posterioare, zonele posterioare prezentând deviații semnificativ mai mari. De asemenea, timpul de scanare a variat semnificativ între sisteme, reflectând diferențe în viteza de achiziție și eficiența fluxului de lucru.

Rezultatele clinice au subliniat influența condițiilor intraorale asupra performanței scanării. Cazurile edentate și parțial edentate au prezentat dificultăți mai mari comparativ cu arcadele dentate, în principal din cauza lipsei reperelor anatomice stabile și a dificultății în realizarea unei alinieri consistente a datelor. Aceste condiții au condus la creșterea deviațiilor și la reducerea reproductibilității, confirmând faptul că complexitatea clinică influențează direct acuratețea scanării.

Analiza componentelor protetice a demonstrat că deviațiile introduse în etapa de amprentare digitală se propagă de-a lungul întregului flux de lucru digital și influențează restaurarea finală. În evaluarea bazelor de proteză, tehnicile de fabricație aditivă au demonstrat o fidelitate a suprafeței de sprijin comparabilă și, în anumite situații, superioară metodelor convenționale, însă variabilitatea a rămas dependentă de acuratețea setului inițial de date digitale. În mod similar, evaluarea comparativă a restaurărilor provizorii realizate prin frezare versus printare 3D a arătat că ambele tehnici pot genera restaurări cu adaptare clinic acceptabilă, însă performanța acestora este direct dependentă de calitatea datelor inițiale de scanare.

Integrarea fluxurilor digitale într-un caz clinic complet a confirmat aplicabilitatea practică a scanării intraorale și a tehnologiilor CAD/CAM chairside. Rezultatele au demonstrat că o abordare complet digitală permite planificare eficientă, execuție precisă și rezultate estetice și funcționale predictibile. Utilizarea restaurărilor provizorii etapizate a contribuit la validarea planului de tratament și la adaptarea progresivă a țesuturilor moi, consolidând rolul tehnologiilor digitale în creșterea controlului clinic și îmbunătățirea comunicării cu pacientul.

În ansamblul tuturor investigațiilor, un rezultat constant a fost faptul că acuratețea nu reprezintă o proprietate intrinsecă exclusivă a dispozitivului de scanare, ci rezultatul unui proces cumulativ influențat de tehnologie, protocol și condițiile clinice. Deși diferențele mici identificate în condiții experimentale controlate nu sunt întotdeauna relevante clinic, reproducibilitatea și amplificarea acestora în scenarii complexe subliniază importanța lor în succesul tratamentelor protetice.

Discuții, concluzii și contribuții originale

Rezultatele prezentei cercetări doctorale oferă o înțelegere comprehensivă și fundamentată clinic a acurateței scanării intraorale, confirmând faptul că aceasta reprezintă un parametru dinamic și multifactorial, și nu o caracteristică fixă a unui dispozitiv sau a unei tehnologii specifice. Integrarea investigațiilor in vitro și in vivo a permis corelarea directă între observațiile experimentale controlate și performanța clinică reală, abordând astfel o lacună importantă existentă în literatura de specialitate.

Una dintre concluziile centrale ale acestei teze este că acuratețea scanării trebuie interpretată în contextul întregului flux de lucru digital. Erorile introduse în etapa inițială de achiziție a datelor nu rămân izolate, ci sunt propagate în etapele ulterioare de procesare, design și fabricație, influențând adaptarea, funcția și longevitatea restaurării finale. Această perspectivă sistemică deplasează accentul de la evaluarea componentelor individuale către înțelegerea comportamentului cumulativ al fluxului digital.

Rezultatele demonstrează că progresul tehnologic, în sine, nu este suficient pentru a garanta rezultate optime. Deși scanerile intraorale moderne pot atinge

niveluri ridicate de acuratețe, performanța acestora depinde în mod semnificativ de implementarea corectă a protocoalelor clinice. Strategia de scanare, experiența operatorului și gestionarea condițiilor intraorale au un rol decisiv în determinarea calității finale a amprentelor digitale. Astfel, acuratețea trebuie privită ca rezultatul unui proces clinic controlat și optimizat, și nu ca o proprietate intrinsecă a sistemului utilizat.

Abordarea metodologică duală evidențiază importanța validării rezultatelor experimentale în condiții clinice reale. Deși studiile in vitro permit identificarea precisă a diferențelor subtile de fidelitate și precizie, aceste diferențe nu sunt întotdeauna relevante clinic. Cu toate acestea, reproducibilitatea lor în condiții in vivo, în special în scenarii clinice complexe, confirmă importanța lor și subliniază necesitatea standardizării protocoalelor.

O altă concluzie importantă este că nivelul de complexitate clinică influențează direct magnitudinea și impactul erorilor de scanare. În timp ce fluxurile digitale pot atinge niveluri de acuratețe comparabile sau chiar superioare tehnicilor convenționale în restaurările unitare sau pe segmente scurte, reabilitările pe arcade complete și cazurile edentate rămân mai sensibile la erori cumulative. Aceste rezultate evidențiază necesitatea unor strategii de scanare adaptate și a unui control mai riguros al protocolului în cazurile complexe.

Analiza comparativă a tehnicilor de fabricație susține, de asemenea, ideea că rezultatul protetic final este strâns legat de acuratețea setului inițial de date digitale. Metodele de fabricație aditivă și subtractivă pot produce restaurări acceptabile clinic, însă succesul acestora depinde de integritatea datelor obținute în etapa de scanare. Acest fapt consolidează rolul critic al fazei de amprentare digitală ca fundament al întregului flux de lucru.

Dincolo de contribuțiile analitice, această teză stabilește un cadru structurat și aplicabil clinic pentru înțelegerea și optimizarea scanării intraorale în protetică. Prin integrarea perspectivelor tehnologice, metodologice și clinice, cercetarea oferă repere practice pentru creșterea acurateței, reducerea variabilității și îmbunătățirea predictibilității tratamentelor.

Originalitatea acestei lucrări constă în abordarea sa integrativă și translatională, care corelează în mod direct acuratețea măsurată experimental cu performanța clinică reală, depășind limitările studiilor care analizează aceste

dimensiuni în mod separat. Această abordare permite o interpretare mai realistă și mai relevantă clinic a acurateței, reducând decalajul dintre datele de laborator și practica clinică curentă.

În plus, teza aduce contribuții originale privind comportamentul amprentelor digitale în diferite scenarii clinice, inclusiv în reabilitări complexe, unde dovezile existente sunt limitate. Prin combinarea analizei comparative cu validarea clinică, cercetarea nu doar confirmă cunoștințele existente, ci le rafinează, contestă simplificările excesive și stabilește repere bazate pe dovezi pentru luarea deciziilor clinice.

În concluzie, această teză demonstrează că acuratețea scanării intraorale nu reprezintă doar un parametru tehnic, ci un determinant esențial al succesului tratamentelor protetice digitale, a cărei optimizare necesită o abordare integrată, bazată pe tehnologie, protocol și context clinic. Prin rezultatele obținute, această cercetare susține evoluția stomatologiei digitale către soluții terapeutice mai predictibile, eficiente și orientate către pacient.