



UMF
UNIVERSITATEA DE
MEDICINĂ ȘI FARMACIE
IULIU HAȚIEGANU
CLUJ-NAPOCA

ȘCOALA DOCTORALĂ

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Rolul biomimetismului maselor ceramice actuale în redarea proprietăților optice dentare

Doctorand **Ioana-Sofia Pop**

Coordonator științific **Prof.dr. Mîndra Eugenia Badea**

Cluj-Napoca 2015

Cuprins

INTRODUCERE	15
STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII	17
1. Proprietățile optice ale dinților naturali	19
1.1. Culoarea	19
1.1.1. Sisteme de reprezentare a culorii	20
1.1.1.1. Sistemul lui Munsell	20
1.1.1.2. Sistemul de reprezentare Yxy al CIE	21
1.1.1.3. Sistemul de reprezentare L*a*b*	22
1.1.2. Luminozitatea	23
1.1.3. Saturația	24
1.1.4. Nuanța	24
1.2. Sisteme de alegere a culorii	25
1.2.1. Alegerea vizuală a culorii	25
1.2.1.1. Factorii care influențează alegerea vizuală a culorii	25
1.2.1.2. Chei de culoare	29
1.2.2. Alegerea instrumentală a culorii	32
1.2.2.1. Camera intraorală Sopro 717®	32
1.2.2.2. Colorimetre și spectrofotometre	33
1.2.2.3. Spectroradiometre	35
1.3. Translucidență și Opacitate	36
1.4. Fenomene optice prezente la nivelul structurii dentare	37
1.4.1. Opalescența	37
1.4.2. Difuzia, absorbția, transmisia și reflectivitatea luminoasă	38
2. Biomimetismul maselor ceramice	43
2.1. Biomimetism și mase ceramice	43
2.2. Apariția și evoluția sistemelor integrale ceramice	43
2.3. Ceramica actuală: structură, compoziție, proprietăți	44
2.3.1. Structura și compoziția materialelor ceramice	44
2.3.2. Proprietățile materialelor ceramice	45
2.3.2.1. Proprietăți mecanice	45
2.3.2.2. Proprietăți fizice	46
2.3.2.3. Proprietăți optice	46
2.3.2.4. Proprietăți chimice și biologice	47
2.4. Clasificarea maselor ceramice	47
2.4.1. Ceramica vitroasă	48
2.4.1.1. Ceramică feldspatică convențională	48
2.4.1.2. Ceramică feldspatică îmbogățită	48
2.4.2. Ceramica aluminoasă	49
2.4.3. Ceramica pe bază de zirconiu	49

2.5. Procedee de realizare a maselor ceramice	50
2.5.1. Ceramica sinterizată	50
2.5.2. Ceramica presată	50
2.5.3. Ceramica infiltrată și sinterizată	50
2.5.4. Ceramica uzinată prin procedee CAD/CAM	51
CONTRIBUȚIA PERSONALĂ	53
1. Obiective generale	54
2. Studiul 1. Comparație între o nouă metodă de alegere a culorii cu ajutorul unei camere intra-orale și alegerea vizuală și spectrofotometrică	55
2.1. Introducere	55
2.2. Obiective și ipoteza de cercetare	57
2.3. Material și metodă	57
2.4. Rezultate	61
2.5. Discuții	64
2.6. Concluzii	66
3. Studiul 2. Evaluarea translucidenței și culorii dentinare a incisivilor, caninilor și molarilor umani	67
3.1. Introducere	67
3.2. Obiective și ipoteza de cercetare	69
3.3. Material și metodă	69
3.4. Rezultate	73
3.5. Discuții	77
3.6. Concluzii	80
4. Studiul 3. Difuzia, absorbția, transmisia și reflectivitatea luminoasă a dentinei incisivilor, caninilor și molarilor umani	81
4.1. Introducere	81
4.2. Obiective și ipoteza de cercetare	82
4.3. Material și metodă	82
4.4. Rezultate	86
4.5. Discuții	92
4.6. Concluzii	95
5. Studiul 4. Evaluarea clinică spectrofotometrică a culorii incisivilor, caninilor și molarilor permanenți	97
5.1. Introducere	97
5.2. Obiective și ipoteza de cercetare	98
5.3. Material și metodă	99
5.4. Rezultate	101
5.5. Discuții	106
5.6. Concluzii	108
6. Studiul 5. Corespondența culorii și diferențele de translucidență și culoare între dentina umană și un sistem CAD/CAM de ceramică hibridă	109
6.1. Introducere	109
6.2. Obiective și ipoteza de cercetare	110

6.3. Material și metodă	111
6.4. Rezultate	114
6.5. Discuții	117
6.6. Concluzii	119
7. Studiul 6. Culoarea și transluciditatea materialelor ceramice comparate cu dentina umană a dinților anteriori și posteriori	121
7.1. Introducere	121
7.2. Obiective și ipoteza de cercetare	122
7.3. Material și metodă	122
7.4. Rezultate	126
7.5. Discuții	129
7.6. Concluzii	131
8. Concluzii generale	133
9. Originalitate și contribuții inovatoare ale tezei	135
REFERINȚE	137

Cuvinte cheie: culoare – transluciditate – spectrofotometru - dentină umană - ceramică hibridă.

INTRODUCERE

Principiul biomimetismului în domeniul științific, se referă la reproducerea cu fidelitate a unui model de referință. Pentru medicii stomatologi acest model de referință este indiscutabil dinte natural. Un dinte intact, prin proprietățile sale coloristice, cu opacități, translucidități și fluorescențe variate, prin caracteristicile și textura de suprafață, prin morfologia coronară strâns legată de situația sa pe arcadă, reprezintă singurul ghid al clinicianului în demersul reconstrucției sale și în același timp este factorul determinant al reușitei acesteia.

Biomimetismul în sfera dentară se referă în principal la două lucruri. În primul rând la producerea de substituenți dentari, adică la fabricarea de materiale identice cu cele prezente în cavitatea bucală. În al doilea rând, se referă la imitarea sau mai precis redarea proprietăților biomecanice ale dintelui natural prin reconstrucție. Astfel, abordarea biomimetică este esențial conservatoare și biologică. Această viziune terapeutică biomimetică, atât la nivel molecular cât și la nivel macrostructural a devenit motorul unui permanent proces de dezvoltare a materialelor dentare și a tehnologiei lor de realizare. Scopul este imitarea integrității biomecanice, structurale și estetice a dinților.

Prin diversificarea procedeelelor de fabricare a materialelor estetice de reconstituire, modalitățile terapeutice s-au înmulțit, creând dificultăți în alegerea lor, atât medicilor dentiști cât și tehnicienilor. O bună cunoaștere a proprietăților optice și mecanice a dinților naturali asociată cu o alegere responsabilă a tipului de material de restaurare și a tehnologiei lui de realizare, coroborate cu dorințele și necesitățile pacientului, trebuie să reprezinte scopul stomatologiei restauratoare. Masele ceramice actuale încearcă să-și însușească în definiția lor calitatea de ”biomimetice”, printr-o îmbunătățire permanentă a proprietăților lor optice, fără alterarea proprietăților mecanice și cu respectarea indicației lor terapeutice.

Medicul dentist are obligația de a transmite tehnicianului toate detaliile legate de caracteristicile și proprietățile dinților de reconstituit prin mijloacele tehnice de care poate dispune,

respectiv prin desene și hărți de culoare, fotografii sau valori numerice codate, în funcție de spectrul de reflectanță măsurat cu spectrofotometre sau colorimetre. La rândul său, tehnicianul trebuie să reproducă cu exactitate toate cerințele venite dinspre cabinetul dentar prin alegerea adecvată a materialelor și a tehnologiei lor de realizare. Astfel, biomimetismul maselor ceramice nu mai depinde doar de structura, de compoziția sau de procedeul de fabricare, ci și de simțul artistic îmbinat cu experiența clinicianului și a tehnicianului său.

CONTRIBUȚIA PERSONALĂ

Studiul 1. Comparație între o nouă metodă de alegere a culorii cu ajutorul unei camere intra-orale și metoda de alegerea vizuală și spectrofotometrică

Obiective: Obiectivul acestui studiu a fost evaluarea unui nou concept (Sopro Shade) de alegere a culorii dentare cu ajutorul camerei intra-orale Sopro 717 (o metodă de evaluare vizuală asistată), prin compararea lui cu metoda de alegere vizuală clasică (cu cheia de culori Vita 3D Master sub lumina lămpii cu spectru corectat True Shade) și spectrofotometrică (Vita Easyshade).

Material și Metodă: Culoarea de bază a incisivilor centrali dreپți maxilari și a caninilor a 38 de subiecți a fost determinată în prima zi de trei examinatori prin metode vizuale, vizuale asistate și spectrofotometrice. Doi dintre examinatori erau clinicieni experimentați, în timp ce al treilea era un inginer al camerei intra-orale Sopro717. Toate cele trei metode de alegere a culorii au fost folosite în funcție de cheia de culori Vita 3D-Master. Alegerea și măsurarea culorii a fost repetată a doua zi de aceiași examinatori și pe aceiași subiecți respectând aceleași proceduri de determinare a culorii. Coeficientul de corelare tau-b al lui Kendall între cele două serii de evaluare a culorii dentare și testul t bilateral au fost folosiți pentru analiza statistică.

Rezultate: Indiferent de dintele examinat, o corespondență semnificativă ($p \leq 0.01$) a fost înregistrată pentru fiecare examiner, atunci când metoda vizuală de alegere a culorii a fost comparată cu alegerea realizată cu ajutorul camerei intra-orale Sopro717. Fiabilitatea măsurătorilor între examinatori a fost din punct de vedere statistic mai mare pentru canini decât pentru incisivii centrali, pentru toate cele trei metode de evaluare ($p \leq 0.01$). Atunci când cele două metode vizuale de alegere a culorii au fost comparate cu determinarea spectrofotometrică, coeficientul de corelare tau-b al lui Kendall a fost în general mai scăzut. O corelație semnificativă ($p < 0,05$) a fost obținută prin compararea celor două metode vizuale, atât pentru canini cât și pentru incisivii centrali, indiferent de observator sau de experiment.

Concluzii: În limitele studiului, conceptul Sopro Shade al camerei intra-orale Sopro 717 poate fi considerat un ajutor fiabil în alegerea vizuală a culorii atunci când cele două metode sunt comparate între ele, datorită principiului comun de analiză a culorii, care este percepția naturală a ochiului uman. Pentru canini, reproductibilitatea și fiabilitatea măsurătorilor pentru toți observatorii și toate metodele de examinare au fost în general mai mari decât cele pentru incisivi. Alte investigații sunt necesare pentru a analiza posibilul impact clinic al dezacordului observat între cele două metode de alegere vizuală (convențională și asistată) a culorii și metoda spectrofotometrică.

Studiul 2. Evaluarea translucidității și culorii dentinare a incisivilor, caninilor și molarilor umani

Obiective: Pentru restaurări estetice de excepție este necesară o bună înțelegere a proprietăților optice ale dentinei umane. Foarte puține informații legate de transluciditatea și parametrii culorii dentinei umane precum și de legătura dintre aceștia și tipul de dinte și poziția sa sunt disponibile la ora actuală. Obiectivul acestui studiu in vitro a fost investigarea translucidității și a coordonatelor de culoare CIELab a dentinei umane aparținând dinților anteriori (canini și incisivi) și posteriori (molari) prin metode spectrofotometrice și spectroradiometrice.

Material și Metodă: Eșantioane de dentină din porțiunea medie coronară, de grosime uniformă (2 mm) au fost obținute de la 33 de incisivi centrali și laterali maxilari, 7 canini și 33 de molari. Coordonatele de culoare CIELab au fost măsurate cu un spectrofotometru clinic (Easyshade Compact) și cu un spectroradiometru non contact (SpectraScan PR-704). Parametrul de transluciditate TP a fost calculat. Bland-Altman plots și testul neparametric Wilcoxon pentru eșantioane perechi (Wilcoxon signed rank test) au fost utilizate pentru a determina corelația dintre cele două metode de măsurare. Diferențele de transluciditate și culoare între eșantioanele de dentină provenind de la dinții anteriori și posteriori au fost analizate prin intermediul testului "Mann-Whitney-Wilcoxon rank sum tests".

Rezultate: Diferențe semnificative statistic ale valorii TP și a coordonatelor de culoare CIELab ($P < .05$) în ambele grupe de eșantioane de dentină au fost obținute între măsurătorile spectrofotometrice și spectroradiometrice. Valorile TP ale eșantioanelor de dentină molară au fost semnificativ mai crescute în comparație cu cele ale dinților anteriori, indiferent de metoda de determinare ($P < .001$). Eșantioanele de dentină ale dinților anteriori au prezentat valori ale luminozității mai mari, dar ale a^* și b^* mai scăzute pe ambele fundaluri, alb și negru, atunci când au fost comparate cu eșantioanele de dentină molară.

Concluzii: Dentina dinților anteriori este mai luminoasă dar mai puțin translucidă și mai puțin cromatică decât cea a molarilor, indiferent de metoda de evaluare.

Studiul 3. Difuzia, absorpția, transmisia și reflectivitatea luminoasă a dentinei incisivilor, caninilor și molarilor umani

Obiective: Obiectivul acestui studiu a fost evaluarea, difuziei (S), absorpției (K), transmisiei (T) și reflectivității luminoase (RI) a dentinei incisivilor, caninilor și molarilor, folosind teoria reflectanței a lui Kubelka-Munk.

Material și Metodă: Optzeci și unu de dinți (incisivi, canini și molari) au fost utilizați în acest studiu. Coroanele tuturor dinților au fost secționare cu ajutorul unui microtom sub răcire permanentă cu apă și la viteză redusă. Eșantioanele de dentină obținute au fost finisate și lustruite până la obținerea unei grosimi de 2 mm. Spectrul radiant relativ a fost măsurat pe fundal negru și alb prin intermediul unui spectroradiometru și în interiorul unei incinte cu spectru corectat și cu iluminare de tipul D65. Ecuațiile Kubelka-Munk au fost folosite pentru calcularea coeficienților de difuzie, absorpție, transmisie și reflectivitate luminoasă. Testul Kruskal-Wallis (Kruskal-Wallis rank sum test), urmat de Kruskal-Wallis multiple comparison tests pentru comparații pare au fost utilizate pentru a compara valorile medii ale coeficienților Kubelka-Munk ai dentinei incisivilor, caninilor și molarilor.

Rezultate: Comportamentul spectral al S, T și RI a arătat tendințe similare de evoluție pentru toate cele trei tipuri de dentină. Totuși, diferențe înalt semnificative ($p < 0.001$) au fost depistate între magnitudinile celor trei tipuri de eșantioane de dentină ($p < 0.001$). Doar magnitudinile coeficientului K s-au dovedit a fi similare ($p = 0.235$) între incisivi, canini și molari. Eșantioanele de dentină aparținând caninilor au prezentat cele mai mari valori ale S și RI, în timp ce eșantioanele de dentină molară au prezentat cele mai mari valori pentru K și T.

Concluzii: Respectând limitele acestui studiu, se poate spune că proprietățile optice ale dentinei umane sunt puternic influențate de tipul de dinte. Rezultatele acestui studiu pot fi folosite ca și referință în dezvoltarea materialelor dentare de restaurare estetică.

Studiu 4. Evaluarea clinică spectrofotometrică a culorii incisivilor, caninilor și molarilor permanenți.

Obiective: Reproducerea cu acuratețe a culorii dinților naturali reprezintă stadiul final de validare a unei reconstrucții estetice anterioare sau posterioare. Obiectivul prezentului studiu a fost evaluarea culorii incisivilor, caninilor și molarilor maxilari permanenți cu ajutorul unui spectrofotometru clinic.

Material și Metodă: Spectrofotometrul intra-oral Vita Easyshade Advance 4.0® a fost utilizat de un singur clinician pentru a determina culoarea a 369 de incisivi, canini și molari maxilari. Cele mai bune potriviri cu cheia de culori Vitapan Classical® și 3D-Master® au fost înregistrate. Analiza varianței one-way și testul Kruskal-Wallis au fost folosite pentru a compara valorile coordonatelor de culoare L^* , a^* , b^* , c^* și h^* între cele 3 tipuri de dinți. Diferențele între valorile medii ale tuturor coordonatelor de culoare au fost evaluate prin corecțiile Bonferroni. Diferențele de culoare (ΔE^*) între incisivi, canini și molari au fost calculate din ΔL^* , Δa^* și Δb^* , iar rezultatele au fost comparate cu pragul de acceptabilitate $\Delta E^*=3.3$.

Rezultate: Exceptând pentru Δa^* și Δh^* între canini și molari, diferențe statistice semnificative între valorile medii ale diferențelor tuturor coordonatelor de culoare au fost înregistrate atunci când cele trei tipuri de dinți au fost comparate între ele pe perechi. Cele mai frecvent măsurate nuanțe au fost A1 (48.4%), respectiv 1M1 (31.5%) pentru incisivi, B3 (36.6%), respectiv 2M3 (39.8%) pentru canini și B3 (44.7%), respectiv 2M3 (52%) pentru molari. Incisivii au prezentat cele mai mari valori ale luminozității, urmași de canini și de molari. Molarii s-au dovedit a fi cei mai cromatici cu cele mai mari valori înregistrate pentru a^* și b^* .

Concluzii: Cu toate limitele acestui studiu, diferențele de culoare între incisivi, canini și molari s-au dovedit a fi statistic semnificative, deasupra pragului de acceptabilitate stabilit. În concluzie, succesul reconstituirilor estetice al dinților permanenți ai aceluiași pacient necesită o determinare și o reproducere individuală a fiecărui tip de dinte.

Studiul 5. Corespondența culorii și diferențele de transluciditate și culoare între dentina umană și un sistem CAD/CAM de ceramică hibridă

Obiective: Obiectivele acestui studiu au fost determinarea corespondenței de culoare între dentina umană și două versiuni ale unui material ceramic hibrid de tip CAD/CAM și investigarea diferențelor de culoare și transluciditate între aceste două materiale.

Material și Metodă: Douăzeci și patru de eșantioane de diferite nuanțe și opacități au fost fabricate din blocuri CAD/CAM de ceramică hibridă Vita Enamic. Eșantioane de dentină au fost obținute de la 73 de dinți maxilari extrași. Coordonatele de culoare ale tuturor eșantioanelor au fost măsurate cu spectrofotometrul clinic Vita Easyshade Advance. Parametrul de transluciditate, precum și diferențele de culoare ΔE_{ab}^* și ΔE_{00} , raportate la dentina umană a dinților anteriori și posteriori au fost calculate.

Rezultate: Vita Enamic Translucent a avut cea mai bună corespondență de culoare cu dentina dinților anteriori (>90% din cazuri), în timp ce Vita Enamic T 3M2 a fost cea mai bună opțiune în 78,8% (ΔE_{ab}^*) și 54,5% (ΔE_{00}) din cazuri pentru eșantioanele de dentină ale dinților posteriori. Cele mai mici diferențe de

translucitate (ΔTP) cu dentina dinților anteriori au fost obținute de Vita Enamic T 3M2 (92,5%), iar cu dentina dinților posteriori de Vita Enamic HT 1M2 (45,4%).

Concluzii: VITA Enamic Translucent este cea mai bună opțiune ca și corespondență de culoare atât pentru dentina dinților anteriori cât și pentru cea a dinților posteriori. În termeni de transluciditate, VITA Enamic Translucent se apropie cel mai mult de dentina dinților anteriori, în timp ce pentru dentina molară VITA Enamic HT reprezintă cea mai bună opțiune.

Studiul 6. Culoarea și transluciditatea materialelor ceramice comparate cu dentina umană a dinților anteriori și posteriori

Obiective: Obiectivele acestui studiu au fost în primul rând evaluarea coordonatelor de culoare CIELab și a parametrului de transluciditate TP a trei tipuri de mase ceramice în două opacități diferite, iar în al doilea rând compararea lor cu proprietățile optice corespunzătoare dentinei incisivilor/caninilor și molarilor umani.

Material și Metodă: Trei sisteme ceramice au fost testate: Vita Suprinity®, Vita Enamic® (Vita Zahnfabrik) and Noritake Super Porcelain EX-3® (Kuraray Noritake Dental Inc). Toate eșantioanele au fost împărțite în grupuri (n=3) în funcție de nuanța și de opacitatea lor (T sau HT). Șaptezeci și trei de eșantioane de dentină umană au fost obținute prin tăiere, sub răcire continuă cu apă și la viteză redusă, cu un microtom de mare precizie. Întregul lot de eșantioane ceramice și dentare a fost îndreptat și finisat până la o grosime finală de 2 mm. Măsurătorile de culoare au fost realizate cu ajutorul unui spectroradiometru non contact (SpectraScan PR-670) într-o incintă cu iluminare de tipul D65 și geometrie de tipul d/0°. Parametrul de transluciditate a fost calculat. Coordonatele de culoare și transluciditatea eșantioanelor au fost analizate prin intermediul testului one-way Anova și a comparațiilor multiple post-hoc.

Rezultate: Diferențele de luminozitate între dentina incisivilor și caninilor și materialele testate au fost semnificative ($p < 0.05$). În schimb, diferențe ne semnificative au fost găsite între valorile L dintre cele trei tipuri de sisteme ceramice și dentina umană a molarilor. Cea mai mare apropiere cu transluciditatea incisivilor și caninilor a fost determinată pentru Vita Suprinity T ($p = 0.997$). Vita Enamic HT a fost singura ceramică a cărei valori ale TP nu au fost semnificativ diferite ($p = 0.819$) de cele ale eșantioanelor de dentină molară.

Concluzii: Ceramica feldspatică convențională a obținut cele mai mari valori de luminozitate în comparație cu celelalte două sisteme ceramice evaluate. Din punct de vedere al culorii, dentina umană molară poate fi cu succes înlocuită de oricare dintre cele trei sisteme ceramice evaluate.

În termeni de transluciditate Vita Suprinity Translucent este cea mai potrivită pentru a înlocui dentina dinților anteriori, în timp ce Vita Enamic High Translucent este cea mai potrivită pentru a înlocui dentina umană la nivelul molarilor.

ORIGINALITATEA ȘI CONTRIBUȚIILE INOVATIVE ALE TEZEI

Originalitatea acestei teze consistă în abordarea biomimetismului în estetica dentară prin urmărirea a trei direcții majore:

- în primul rând evaluarea mai multor metode obiective și subiective de determinare a culorii nou apărute în domeniul dentar;
- în al doilea rând, caracterizarea pentru prima dată prin comparație, a parametrilor de culoare, a translucidității și a proprietăților optice ale incisivilor, caninilor și molarilor permanenți prin studii in vivo și in vitro;

- în al treilea rând, evaluarea comportamentului optic al ceramicilor contemporane prin comparație cu cel al structurilor dure dentare, respectiv dentina umană.

O contribuție inovativă la această teză a fost punerea la punct, împreună cu clinicieni și ingineri din Franța, a unui nou concept de alegere a culorii Sopro Shade concept cu ajutorul unei camere intra-orale Sopro 717. Acest concept s-a dovedit a fi un ajutor fiabil în alegerea vizuală a culorii, confirmându-i acuratețea și îmbunătățind-o.

O abordare inovativă a fost și măsurarea, prin metode instrumentale diferite, a culorii, translucidității și parametrilor fizici optici ai unui lot de eșantioane de dentină provenind de la dinți diferiți și compararea lor între tipurile de dinți.

Măsurătorile spectroradiometrice ale eșantioanelor de dentină au adus noi și relevante informații asupra proprietăților optice ale dentinei umane, ce s-au dovedit a fi puternic influențate de tipul de dinte.

Înregistrările clinice ale culorii, realizate pe un număr mare de subiecți, confirmă studiile anterioare in vitro, subliniind necesitatea determinării și reproducerii individuale a culorii pentru fiecare tip de dinte în parte.

O altă contribuție originală la teza prezentă este evaluarea unui material ceramic hibrid frezat prin tehnologie CAD/CAM, nou apărut în sfera dentară, precum și a unui sistem ceramic pe bază de silicat de litiu, îmbogățit cu oxid de zirconiu, frezat tot prin tehnologie CAD/CAM, din punct de vedere optic și prin comparație cu un lot mare de eșantioane de dentină umană provenind de la dinții anteriori și posteriori.



Abstract

DOCTORAL THESIS

The Role of Contemporary Ceramic Material Biomimetics in Rendering Dental Optical Properties

Ph.D. Student **Ioana-Sofia Pop**

Ph.D. Coordinator **Prof.dr. Mîndra Eugenia Badea**

Cluj-Napoca 2015

Table of Contents

INTRODUCTION	15
CURRENT STATE OF KNOWLEDGE	17
1. Optical Properties of Natural Teeth	19
1.1. Color	19
1.1.1. Color representation systems	20
1.1.1.1. Munsell's system	20
1.1.1.2. The Yxy Representation System of CIE (Comission Internationale de l'Eclairage)	21
1.1.1.3. The L*a*b* Representation System	22
1.1.2. Lightness (value)	23
1.1.3. Chroma	24
1.1.4. Hue	24
1.2. Shade Selection Methods	25
1.2.1. Visual Shade Selection	25
1.2.1.1. Factors Influencing Visual Shade Matching	25
1.2.1.2. Shade Guides	29
1.2.2. Instrumental Shade Selection	32
1.2.2.1. The Sopro 717® Intraoral Camera	32
1.2.2.2. Colorimeters and Spectrophotometers	33
1.2.2.3. Spectroradiometers	35
1.3. Translucency and Opacity	36
1.4. Optical Phenomena at the Level of Dental Structures	37
1.4.1. Opalescence	37
1.4.2. Scattering, Absorption, Transmittance and Light Reflectivity	38
2. The Biomimetics of Ceramic Materials	43
2.1. Biomimetics and Ceramic Materials	43
2.2. The Emergence and Evolution of All Ceramic Systems	43
2.3. Contemporary Ceramics: Structure, Composition, Properties	44
2.3.1. The Structure and Composition of Ceramic Materials	44
2.3.2. The Properties of Ceramic Materials	45
2.3.2.1. Mechanical Properties	45
2.3.2.2. Physical Properties	46
2.3.2.3. Optical Properties	46
2.3.2.4. Chemical and Biological Properties	47
2.4. Classification of Dental Ceramics	47
2.4.1. Glass Ceramics	48
2.4.1.1. Conventional Feldspar Ceramic	48
2.4.1.2. Reinforced Feldspar Ceramic	48

2.4.2. Aluminous Ceramics	49
2.4.3. Zirconia Based Ceramics	49
2.5. Manufacturing Techniques	50
2.5.1. Sintered Ceramics	50
2.5.2. Pressed Ceramics	50
2.5.3. Slip-cast Ceramics	50
2.5.4. Machinable Ceramics	51
PERSONAL CONTRIBUTION	53
1. General Objectives	54
2. Study 1. A comparison between a new method of color matching by intraoral camera and conventional visual and spectrophotometric methods	55
2.1. Introduction	55
2.2. Objectives and Research Hypotheses	57
2.3. Materials and Methods	57
2.4. Results	61
2.5. Discussion	64
2.6. Conclusions	66
3. Study 2. Dentin translucency and color evaluation in human incisors, canines and molars	67
3.1. Introduction	67
3.2. Objectives and Research Hypotheses	69
3.3. Materials and Methods	69
3.4. Results	73
3.5. Discussion	77
3.6. Conclusions	80
4. Study 3. Dentine scattering, absorption, transmittance and light reflectivity in human incisors, canines and molars	81
4.1. Introduction	81
4.2. Objectives and Research Hypotheses	82
4.3. Materials and Methods	82
4.4. Results	86
4.5. Discussion	92
4.6. Conclusions	95
5. Study 4. Spectrophotometric color evaluation of permanent incisors, canines and molars. A cross-sectional clinical study	97
5.1. Introduction	97
5.2. Objectives and Research Hypotheses	98
5.3. Materials and Methods	99
5.4. Results	101
5.5. Discussion	106
5.6. Conclusions	108
6. Study 5. Shade correspondence, color and translucency differences between human dentine and a CAD/CAM hybrid ceramic system	109

6.1. Introduction	109
6.2. Objectives and Research Hypotheses	110
6.3. Materials and Methods	111
6.4. Results	114
6.5. Discussion	117
6.6. Conclusions	119
7. Study 6. Color and translucency of ceramic materials compared to human dentine of anterior and posterior teeth	121
7.1. Introduction	121
7.2. Objectives and Research Hypotheses	122
7.3. Materials and Methods	122
7.4. Results	126
7.5. Discussion	129
7.6. Conclusions	131
8. General Conclusions	133
9. Originality and Innovative Contributions of the Thesis	135
REFERENCES	137

Key words: color, translucency, spectrophotometer, human dentine, hybrid ceramic.

INTRODUCTION

The principle of biomimetics in the scientific field refers to the exact reproduction of a reference model. For dentists, the reference model is undoubtedly the natural tooth. An intact tooth, through its optical characteristics, with various degrees of opaqueness, translucency and fluorescence, through its surface characteristics and textures, through the crown morphology which is closely correlated with the maxillary status is the only clinician's guide in the process of reconstruction.

Biomimetics in dentistry mainly refers to two things. Firstly, it involves the manufacturing of dental substitutes, materials that have to mimic the dental structures. Secondly, it refers to the imitation of biomechanical and optical properties of the original tooth by means of reconstruction. Thus, the biomimetic approach is essentially characterized by preservation and biology. This biomimetic therapeutic vision, both at the molecular level and at the macrostructural level has become the driving force of a continuous process of development of dental materials and of the manufacturing technology thereof. The aim was to mimic structural and esthetic integrity of teeth.

Thanks to the diversification of manufacturing procedures of esthetic restorative materials, the number of therapeutically methods has increased, making the selection process rather difficult, both for the clinician and for the dental technician. The purpose of restorative dentistry should always be a good knowledge of the optical and mechanical properties of natural teeth in correlation with a responsible selection of the type of restoration material and technology used, combined with the preferences and necessities of the patient. Current ceramic materials tend to be inherently "biomimetic", due to a permanent improvement of their optical properties, without altering mechanical properties and by respecting their therapeutic indication.

The dental clinician should inform the technician on all details concerning the characteristics and properties of the teeth aimed for restoration by employing all the technical means s/he can use, i.e. drawings and colour maps, pictures or numerical codings, depending on the reflectance spectrum measured with spectrophotometers and colorimeters. Similarly, the technician must reproduce exactly all the requirements of the dental clinician by choosing the right materials and implementation technologies. Thus, the biomimetics of ceramic materials depend not only on the structure, composition and manufacturing procedure, but also on the artistic sense combined with the experience of the dental clinician and technician.

PERSONAL CONTRIBUTION

Study 1. A Comparison Between a New Method of Color Matching by Intraoral Camera and Conventional Visual and Spectrophotometric Methods

Objectives: The objective of this study was to evaluate the new color matching Sopro Shade concept of Sopro 717 intra-oral camera (an assisted visual method of evaluation), by comparing it with conventional visual (Vita 3D Master shade guide under the True Shade lamp) and spectrophotometric (Vita Easyshade) methods.

Materials and Methods: The basic color of the maxillary right central incisors and canines of 38 subjects was determined on the first day by three examiners using a visual, a visually assisted and a spectrophotometric method. Two of them were experienced clinicians and the third one was a Sopro intra-oral camera engineer. All three methods of color matching were used according to the Vita 3D-Master shade guide. Color assessment was repeated the second day by the same examiners and on the same subjects in accordance with the same color assessment procedures. Kendall's tau-b correlation coefficient between the different series of tooth-color evaluation and two-tailed t-tests for paired samples were applied.

Results: No matter the tooth examined, significant intraexaminer correspondence ($p \leq 0.01$) was shown between the visual and the assisted visual methods. Interexaminer reliability was statistically higher for canines than for central incisors for all three methods ($p \leq 0.01$). When the two visual assessments were compared to the spectrophotometric one, Kendall's tau-b correlation coefficient was generally lower. When comparing the 2 visual methods, significant agreement ($p < 0,05$) was found, for either canines or central incisors, no matter the observer or the experiment.

Conclusion: Within the limitations of this study, compared to the conventional visual method, the Sopro Shade concept of the intra-oral camera Sopro717 may be considered a reliable assistance to visual color assessment, because of their common principle of analysis, which is the natural perception of human eye. For canines, the reproducibility and the reliability of measurements for all examiners and methods were generally higher than those for central incisors. Further investigations are needed to analyse the possible clinical impact of the noticed disagreement between the two visual color methods (conventional and assisted) compared to the spectrophotometric one.

Study 2. Dentin translucency and color evaluation in human incisors, canines and molars

Objectives: For restorations with excellent esthetics, an understanding of the optical properties of human dentin is needed. Little information is available on the translucency and color parameters of dentin and its relationship to tooth type and position.

Purpose: The purpose of this in vitro study was to investigate the translucency and CIELab color coordinates of human dentin in both anterior (incisors and canines) and posterior teeth (molars) with spectrophotometric and spectroradiometric assessment methods.

Materials and Methods: Uniformly thick specimens (2 mm) of midcoronal human dentin were taken from 33 central and lateral incisors, 7 canines, and 33 molars (all maxillary teeth). The CIELab color coordinates were measured with a clinical spectrophotometer (Easyshade Compact) and a noncontact spectroradiometer (SpectraScan PR-704). The translucency parameter (TP) was calculated. Bland-Altman plots and Wilcoxon signed rank tests for paired samples were used to assess the agreement of the 2 measurement techniques. The differences between anterior and posterior dentin specimens regarding color coordinates and the translucency parameter were analyzed using Mann-Whitney-Wilcoxon rank sum tests.

Results: Statistically significant differences between spectrophotometric and spectroradiometric measurements of the TP and CIELab color coordinates were found in both groups of dentin specimens ($P < .05$). The TP values of molar dentin specimens were significantly higher compared with those of the anterior ones, regardless of the assessment method ($P < .001$). The dentin specimens of the anterior teeth exhibited higher L^* values but lower a^* and b^* values on both black and white backgrounds when compared with molar dentin specimens.

Conclusions: The dentin of anterior teeth was found to be lighter but less translucent and less chromatic than in molars, irrespective of the assessment method used.

Study 3. Dentine scattering, absorption, transmittance and light reflectivity in human incisors, canines and molars

Objectives: To evaluate, using Kubelka-Munk reflectance theory, the scattering (S), absorption (K), transmittance (T) and light reflectivity (RI) of incisors, canines and molars human dentine.

Materials and Methods: Eighty-one human teeth (incisors, canines and molars) were used in this study. All teeth crowns were sectioned using a water-cooled diamond saw at low speed. The obtained dentine samples were polished to a final thickness of 2 mm. The relative spectral radiance was measured against black and white backgrounds, using a spectroradiometer in a viewing cabinet with D65 illuminant. Kubelka-Munk equations were used to calculate the scattering and absorption coefficients, transmittance and light reflectivity. Kruskal-Wallis rank sum test was performed to compare the mean values of Kubelka-Munk coefficients of human incisors, canines and molars dentine samples followed by Kruskal-Wallis multiple comparison tests for pairwise comparisons.

Results: The spectral behavior of S, T and RI exhibited similar trends for all three types of dentine samples. However, highly significant differences ($p < 0.001$) were found between their magnitudes in the three types of dentine samples ($p < 0.001$). Only the magnitudes of the K coefficients were found to be similar ($p = 0.235$) between incisors, canines and molars. Canine's dentine samples showed highest S and RI values, while human molars dentine samples exhibited highest K and T values.

Conclusions: Within the limitations of this study, the optical properties of human dentine are strongly influenced by the type of tooth. The results of the present study can be used as reference in the development of aesthetic dental restorative materials.

Study 4. Spectrophotometric color evaluation of permanent incisors, canines and molars. A cross-sectional clinical study.

Objectives: An accurate color reproduction represents the final validation level of an esthetic anterior or posterior restoration. The aim of this study was to evaluate the color of permanent maxillary incisors, canines and molar, using a clinical spectrophotometer.

Materials and Methods: The Vita Easyshade Advance 4.0® intraoral spectrophotometer was used by one clinician to determine the color of 369 permanent maxillary incisors, canines and molars. The best matches to Vitapan Classical® and 3D-Master® shade guides were recorded. A one-way analysis of variance and Kruskal-Wallis test were used to compare L*, a*, b*, c* and h* color coordinates among the 3 types of teeth. Differences between the mean values of all color coordinates were evaluated by use of Bonferroni corrections. Color difference (ΔE^*) between incisors, canines and molars was calculated from ΔL^* , Δa^* and Δb^* data and the results were compared to $\Delta E^*=3.3$ acceptability threshold.

Results: Except for Δa^* and Δh^* between canines and molars, statistically significant differences among the mean differences of all color coordinates were found when the 3 types of teeth were compared by pairs. The most frequently measured shades were A1 (48.4%), respectively 1M1 (31.5%) for incisors, B3 (36.6%), respectively 2M3 (39.8%) for canines and B3 (44.7%), respectively 2M3 (52%) for molars. Incisors had the highest lightness values, followed by canines and molars. Molars were the most chromatic with the highest a* and b* values.

Conclusions: Despite the limitations of this study, color differences among incisors, canines and molars were found to be statistically significant, above the clinical acceptability threshold established. In conclusion, successful esthetic restorations of permanent teeth of the same patient need an individual color assessment and reproduction of every type of tooth.

Study 5. Shade correspondence, color and translucency differences between human dentine and a CAD/CAM hybrid ceramic system

Objective: To determine the shade correspondence between human dentine and two versions of a CAD/CAM hybrid ceramic system and to investigate color and translucency differences between these materials.

Materials and Methods: Twenty-four samples of different shades and opacities were fabricated from Vita Enamic CAD/CAM ceramic blocks. Human dentine samples were obtained from 73 extracted maxillary teeth. Color coordinates of all samples were measured using VitaEasyshade spectrophotometer. The TP and ΔE_{ab}^* and ΔE_{00} color differences, with respect to human dentine of anterior and posterior teeth, were calculated.

Results: Vita Enamic Translucent was the best match for anterior teeth (>90% of cases) while Vita Enamic T 3M2 was the best option for the dentine samples of posterior teeth in 78,8% (ΔE_{ab}^*) and 54,5% (ΔE_{00}) of the cases. The smallest differences in translucency (ΔTP) with the dentine samples of anterior teeth were obtained for Vita Enamic T 3M2 (92,5%) and with those of posterior teeth for Vita Enamic HT 1M2 (45,4%).

Conclusions: VITA Enamic Translucent is the best option as color match for both anterior and posterior teeth dentine. In terms of translucency, VITA Enamic Translucent closely matched anterior teeth dentine while for posterior teeth, VITA Enamic HT was the best option.

Study 6. Color and translucency of ceramic materials compared to human dentine of anterior and posterior teeth

Objective: To evaluate the CIELab color coordinates and the translucency parameter of three types of ceramic materials in 2 different opacities and to compare them with corresponding optical properties of both incisors/canines and molars human dentine.

Materials and Methods: Three ceramic systems were tested: Vita Suprinity®, Vita Enamic® (Vita Zahnfabrik) and Noritake Super Porcelain EX-3® (Kuraray Noritake Dental Inc). All the specimens were divided into groups (n=3) according to their shade and opacity (T or HT). Seventy-three dentine specimens were obtained by cutting with a precision saw machine water cooled at low speed. All ceramic and dentine samples were flattened and polished to a final thickness of 2 mm. Color measurements were performed with a non-contact spectroradiometer (SpectraScan PR-670) in a viewing booth with D65 illuminant and d/0° geometry. The translucency parameter was calculated. Color coordinates and translucency were analyzed using one-way Anova and post-hoc multiple comparisons tests.

Results: Lightness differences were significant between incisors and canines human dentine and the materials tested ($p < 0.05$). No significant differences were found for L values among the three types of ceramics and molar dentine samples. The greatest approach with incisors and canines translucency was for Vita Suprinity T ($p = 0.997$). VEHT was the only ceramic that showed no statistically significant differences in TP when compared to molar dentine ($p = 0.819$).

Conclusions: Conventional feldspathic ceramic showed the highest lightness values, when compared to the other 2 ceramic systems. Molar human dentine can be successfully replaced by any of the three ceramic systems evaluated.

In terms of translucency, Vita Suprinity Translucent is the most appropriate porcelain system capable of replacing incisors and canines human dentine, while Vita Enamic High Translucent best suited molars human dentine.

ORIGINALITY AND INNOVATIVE CONTRIBUTIONS OF THE THESIS

The originality of the present thesis consists in the approach of biomimetics in esthetic dentistry by pursuing three major strands:

- first, the evaluation of several subjective and objective methods of color assessment newly appeared in the dental field;
- secondly, the characterization for the first time by comparison, of the color parameters, translucency and optical properties of incisors, canines and molars by in vitro and in vivo studies.
- third, the evaluation of the optical behavior of contemporary ceramic materials by comparison with that of hard dental structures, human dentine respectively.

An innovative contribution to the thesis was the development together with clinicians and engineers from France, of the new color-matching Sopro Shade concept of the Sopro 717 intraoral camera which proved to be a reliable assistance to visual color selection, by confirming and improving it.

A novative approach was to measure, by using different instrumental methods, samples of human dentine from different types of teeth and to compare the results of color and translucency parameters.

The spectroradiometric measurements of dentine samples brought new and relevant information on the optical properties of human dentine, which were proved to be strongly influenced by the type of tooth.

Clinical color recordings, performed on a large group of individuals, confirmed the above in vitro findings, underlying the need of an individual color assessment and reproduction of every type of tooth.

Another original contribution to the present thesis is the evaluation of very new CAD/CAM hybrid ceramic and zirconia reinforced lithium silicate ceramic materials from an optical point of view and by comparison with a large sample of human dentine from anterior and posterior teeth.