

UNIVERSITATEA DE MEDICINĂ ȘI FARMACIE
"CAROL DAVILA" BUCUREȘTI
ȘCOALA DOCTORALĂ
DOMENIUL MEDICINĂ DENTARĂ



***CONSIDERAȚII PRIVIND VARIAȚIA FORȚELOR DE FRECARÉ
STATICĂ ÎN CAZUL APARATELOR ORTODONTICE FIXE
POLIAGREGATE***

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Conducător științific:
PROF. UNIV. DR. ECATERINA IONESCU

Doctorand:
DR. ANCA-OANA DRAGOMIRESCU

2020

CUPRINS

INTRODUCERE	4
PARTEA I. STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII	8
Capitolul 1. Aparatura ortodontică fixă poliagregată: istoric și părți componente	9
1.1 Istoria și evoluția aparatului fixe poliagregate	9
1.2 Părțile componente ale aparatelor ortodontice fixe poliagregate	13
1.2.1 Bracketurile ortodontice	14
1.2.2 Arcurile ortodontice	21
Capitolul 2. Considerații asupra forțelor ortodontice	29
2.1 Rezistența fixă	30
2.2 Rezistența mobilă	31
2.3 Forțele ortodontice	32
2.3.1 Caracteristicile forțelor ortodontice	34
2.3.2 Tipuri de forțe ortodontice	38
2.3.3 Particularități biologice ale forțelor ortodontice	40
2.4 Tipuri de deplasări dentare	41
2.4.1 Mișcarea de translație	41
2.4.2 Mișcarea de basculare	42
2.4.3 Mișcarea de rotație	42
2.4.4 Mișcarea de torque	42
Capitolul 3. Forța de frecare și rolul acesteia în ortodonție	43
3.1 Scurt istoric	43
3.2 Noțiuni teoretice generale	44
3.3 Forța de frecare de alunecare	46
3.4 Rolul forței de frecare în ortodonție	52
3.4.1 Sisteme ortodontice cu și fără prezența forțelor de frecare	52
3.4.2 Forța de frecare în tehnica arcului drept	53
3.4.3 Forță de frecare de alunecare versus rezistență la alunecare	54
3.5 Factorii care influențează forța de frecare din sistemul ortodontic	57
PARTEA II. CONTRIBUȚII PERSONALE	59
Capitolul 4. Metodologia generală a cercetării științifice	60
4.1 Direcții de cercetare	60
4.2 Dispozitivul de testare	61
4.3 Lotul de cercetare	64
4.4 Protocolul de testare	67
4.5 Condiții de testare	68
4.6 Prelucrarea datelor cercetării	68
Capitolul 5. Studiu privind forța de frecare statică într-un sistem ortodontic în funcție de caracteristicile bracketurilor	70
5.1 Introducere	70
5.2 Scop și obiective	71
5.3 Material și metodă	71
5.4 Rezultate	74
5.4.1 Evaluarea forțelor de frecare statică în funcție de materialul bracketurilor	74

5.4.2 Evaluarea forțelor de frecare statică produse de bracketuri convenționale versus autoligaturante	86
5.5 Discuții	89
5.6 Concluzii	97
Capitolul 6. Studiu privind variația forței de frecare statică într-un sistem ortodontic în funcție de caracteristicile arcurilor ortodontice	99
6.1 Introducere	99
6.2 Scop Și Obiective	100
6.3 Material Și Metodă	100
6.4 Rezultate	103
6.4.1 Evaluarea forței de frecare statică în funcție de materialul arcului ortodontic	103
6.4.2 Evaluarea forței de frecare statică în funcție de tipul învelișului fizionomic al arcului ortodontic	106
6.4.3 Evaluarea forței de frecare statică în funcție de dimensiunea arcului ortodontic	109
6.5 Discuții	110
6.5.1 Forța de frecare statică din perspectiva materialului arcului ortodontic	110
6.5.2 Forța de frecare statică din perspectiva învelișului fizionomic al arcului ortodontic	114
6.5.3 Forța de frecare statică în funcție de dimensiunea arcului ortodontic	119
6.6 Concluzii	121
Capitolul 7. Studiu asupra relației dintre forța de frecare statică, angulația bracket-arc și distanța dintre bracketuri	123
7.1 Introducere	123
7.2 Scop și obiective	124
7.3 Material și metodă	124
7.4 Rezultate	126
7.4.1 Distribuția forțelor de frecare statică în funcție de angulația bracket-arc	127
7.4.2 Distribuția forțelor de frecare statică în funcție de distanța dintre bracketuri	128
7.4.3 Modelul analitic al sistemului ortodontic studiat	129
7.5 Discuții	138
7.5.1 Relația dintre variația forței de frecare și angulația bracket-arc	138
7.5.2 Relația dintre variația forței de frecare și distanța dintre bracketuri	140
7.5.3 Relevanța modelului analitic	142
7.6 Concluzii	143
Concluzii generale și contribuții personale	144
Bibliografie	149
Anexe	159

INTRODUCERE

Adresabilitatea pacienților la serviciul de ortodonție a crescut semnificativ în ultimele decenii (Proffit *et al.*, 2019), în mod particular în cazul pacienților adulți, ce doresc purtarea unui aparat ortodontic cât mai puțin vizibil și a cărui acțiune să se exercite cât mai rapid posibil. În acest sens, tendința în ceea ce privește aparatura ortodontică fixă poliagregată este de a utiliza componente cât mai fizionomice, cu sisteme speciale de prindere a arcului la bracket, ce reduc timpul petrecut de pacient în cabinet, precum și durata totală a tratamentului activ.

Printre cele mai utilizate tehnici din ortodonția cu aparatură fixă poliagregată se numără tehnica arcului drept, ce implică o mecanică ortodontică decisiv influențată de forța de frecare de la interfața sistemului ortodontic. Forța de frecare apare la nivelul ariei de contact dintre două suprafețe, traducând acțiunea de reținere de la mișcare a unui corp față de altul.

Conform Proffit *et al.* (2019) deplasarea ortodontică are loc atunci când forța ortodontică îndeplinește două obiective principale: pe de o parte inițiază remodelarea osoasă, iar pe de altă parte învinge forța de frecare existentă la interfața arc-bracket-sistem ligaturant. Cu cât forța de frecare din sistemul ortodontic este mai importantă, cu atât se pierde un procent mai mare din forța ortodontică aplicată, iar forța efectivă transmisă unității dentare este diminuată (Thorestone și Kusy, 2001). În aceste condiții, pentru a depăși forța de frecare și iniția răspunsul parodontal, medicul trebuie să mărească proporțional intensitatea forței ortodontice. Utilizarea de forțe suplimentare interferă în procesul de remodelare osoasă și poate afecta ancorajul ortodontic.

Alegerea temei de cercetare a fost motivată de importanța practică a forței de frecare în terapia ortodontică și de dorința de a contribui la completarea și actualizarea datelor din literatura de specialitate cu privire la variabilele mecanice ce influențează forța de frecare.

În contextul celor antemenționate, teza de doctorat este structurată în opt capitole, organizate în două părți distincte. Prima parte a lucrării cuprinde date din studiul literaturii de specialitate ce vizează istoria și părțile componente ale aparatului fixe poliagregate, forțele ortodontice, precum și noțiuni privind forța de frecare și rolul acesteia în ortodonție. Cea de-a doua secțiune a tezei doctorale debutează cu capitolul dedicat metodologiei cercetării științifice. În continuare se succed trei studii personale, în concordanță cu direcțiile de cercetare propuse, la care se adaugă concluziile generale ale lucrării și contribuțiile personale.

- STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII -

CAPITOLUL 1. APARATURA ORTODONTICĂ FIXĂ POLIAGREGATĂ: ISTORIC ȘI PĂRȚI COMPONENTE

În prima parte a acestui capitol este trecut în revistă un scurt istoric privind originea primelor dispozitive ortodontice, marcându-se cele mai importante etape din evoluția acestora de-a lungul timpului. În continuare sunt descrise componentele principale ale aparatului fix poliagregat, făcându-se referire cu precădere la caracteristicile bracketurilor și arcurilor ortodontice, elemente ce au suportat cele mai multe modificări și care fac subiectul cercetării mele. Astfel sunt prezentate elementele constitutive ale bracketurilor, tipurile bracketurilor și arcurilor ortodontice, precum și proprietățile materialelor acestora.

CAPITOLUL 2. CONSIDERAȚII ASUPRA FORȚELOR ORTODONTICE

Terapia ortodontică se supune legilor fundamentale ale mecanicii clasice adaptate particularităților biologice ale aparatului dento-maxilar. Legea acțiunii și a reacțiunii enunțată de Isaac Newton prezintă o aplicabilitate clinică deosebită în ortodonție.

Plecând de la acest principiu, De Nevrézé descrie *trinomul ortodontic*, ce cuprinde coordonate esențiale în conceperea unui tratament ortodontic: rezistența fixă, rezistența mobilă și forța ortodontică (Ionescu *et al.*, 2001). Dintre elementele trinomului ortodontic tratate în cel de-al doilea capitol al tezei doctorale, forța ortodontică este analizată detaliat, fiind aprofundată din perspectiva caracteristicilor sale, posibilelor tipuri precum și a particularităților biologice. Intensitatea forței ortodontice are o relevanță deosebită, deoarece supradozarea forței ortodontice generează multiple reacții adverse, ce pot compromite tratamentul ortodontic. În contextul echilibrului dintre cele trei componente ale trinomului, capitolul 2 cuprinde și o prezentare succintă a principalelor tipuri de mișcări dentare.

CAPITOLUL 3. FORȚA DE FRECARĂ ȘI ROLUL ACESTEIA ÎN ORTODONȚIE

Forța de frecare ia naștere la interfața dintre două suprafețe aflate în contact și se opune mișcării sau tendinței la mișcare a uneia față de cealaltă (Voinea *et al.*, 2009). Pentru a înțelege complexitatea acestui fenomen, în cel de-al treilea capitol al tezei de doctorat sunt prezentate noțiuni teoretice de bază ale mecanicii clasice și tribologiei. În acest sens sunt abordate cu prioritate aspectele legate de forța de frecare de alunecare, ce deține un rol determinant în tematica abordată.

Forța de frecare de alunecare ia naștere atunci când arcul este în contact cu bracketul și/sau sistemul de ligaturare, fiind prezentă în diferite etape ale tratamentului ortodontic în care se utilizează tehnica arcului drept. Totodată, sunt detaliate diferențele între forța de frecare de alunecare și rezistența la alunecare, iar ultima parte a acestui capitol are în vedere sistematizarea factorilor biologici și mecanici cu rol în variația forței de frecare din sistemul ortodontic.

- CONTRIBUȚII PERSONALE -

CAPITOLUL 4. METODOLOGIA GENERALĂ A CERCETĂRII ȘTIINȚIFICE

În cadrul tratamentului ortodontic cu aparată fixă poliagregată un rol important îl ocupă fenomenul de frecare. Așa cum am expus în prima parte a cercetării, forța de frecare poate fi clasificată în forță de frecare statică și dinamică. Literatura de specialitate ce abordează această temă subliniază importanța mai mare a forței de frecare statică în mișcarea ortodontică (Cacciafesta *et al.*, 2003; Arash *et al.*, 2015; Alsubie și Talic, 2016).

4.1 DIRECȚII DE CERCETARE

Cercetarea mea doctorală vizează evaluarea *in vitro* a variației forței de frecare statică de la interfața componentelor aparatului fix poliagregat pentru diferite asocieri bracket-arc-ligatură, în vederea aprecierii caracteristicilor dispozitivului ortodontic din perspectiva forțelor de frecare generate.

Bracketurile autoligaturante, ce promit scurtarea tratamentului ortodontic și cele realizate din materiale fizionomice, ce au avantajul vizibilității mai reduse, au înregistrat în ultima perioadă o creștere rapidă în popularitate. De aceea, în cadrul *primului studiu* al cercetării științifice doctorale, mi-am propus să investighez variația forțelor de frecare statică rezultate la interfața bracket-arc pentru bracketuri convenționale și autoligaturante realizate din diferite tipuri de materiale.

Rolul pe care bracketurile îl dețin este important însă nu exclusiv în mecanica ortodontică. Caracteristici ale arcurilor ortodontice, precum materialul din care sunt realizate, diametrul acestora și existența unui înveliș fizionimic, pot influența decisiv variația forțelor de frecare din sistemul ortodontic. Ținând cont de aceste aspecte, cel de-al *doilea studiu* are drept scop evaluarea comparativă a diferite tipuri de arcuri ortodontice prin prisma forței de frecare statică produsă la contactul cu bracketul ortodontic.

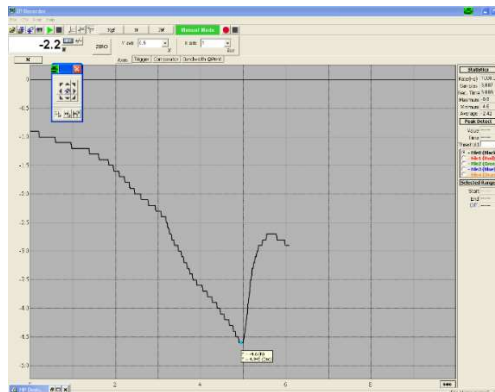
Plecând de la observația unor autori privind factorii implicați în generarea rezistenței la alunecare, *ultimul studiu* analizează relația dintre forța de frecare statică și angulația bracket-arc ortodontic respectiv distanța dintre bracketuri.

4.2 DISPOZITIVUL DE TESTARE

În vederea realizării studiilor antemenționate este necesară utilizarea unui dispozitiv de măsurare a forței de frecare de la interfața sistemului ortodontic fix. În acest sens am folosit dispozitivul de testare HV-500N-S (Schmidt Control Instruments, Hans Schmidt&Co GmbH) destinat măsurării forțelor de compresiune și tracțiune (figura 4.1a), din cadrul Facultății de Inginerie Mecanică și Mecatronică, Universitatea POLITEHNICA din București.



a



b

Figura 4.1. a. Dispozitivul de testare; b. Graficul generat de software-ul dispozitivului de testare

Conectarea sistemului de măsurare a forțelor la un computer a permis ca valorile obținute să poată fi înregistrate electronic, sub forma unui grafic generat de software-ul dispozitivului de testare (figura 4.1 b).

Pentru a obține o imagine cât mai completă asupra structurii materialelor din care sunt realizate bracketurile și cu scopul coroborării morfologiei suprafeței slotului cu forțele de frecare măsurate, înainte de a fi testat, fiecare bracket și arc ortodontic a fost supus analizei de microscopie electronică de baleiaj (SEM-" scanning electron microscopy"). Aparatul utilizat în acest sens este un microscop electronic cu baleiaj tip Quanta Inspect F (producator FEI- PHILIPS, Olanda) aflat în dotarea Universității POLITEHNICA din București.

4.3 LOTUL DE CERCETARE

Lotul de cercetare a cuprins elemente componente ale aparaturii fixe poliagregate, ce au variat în funcție de obiectivele fiecărui studiu în parte, fiind prezentate detaliat în cadrul fiecărui capitol. Bracketurile incluse în cercetare au fost bracketuri siameze, cu prescripție MBT și slot de 0.022x0.028", diferite din punct de vedere al materialelor din care sunt realizate și a tipului de ligaturare al arcului, utilizându-se atât bracketuri convenționale ligaturate (prinderea arcului la bracketul convențional s-a realizat prin ligaturi elastomerice cu diametru de 0.12") cât și bracketuri autoligaturante (sistem pasiv). Arcurile studiate s-au distins prin dimensiune și secțiune (0.016" și 0.019x0.025"), materiale (NiTi și SS) precum și prin existența/nu a unui înveliș extern fizionomic (arcuri nefizionomice, semi-fizionomice și integral fizionomice).

În funcție de dezideratele fiecărui studiu raportul bracket-arc a diferit, elementele supuse analizei fiind montate pe suporturi specifice. În cadrul primelor două studii ale cercetării mele, pentru a simula cât mai bine situația intraorală, bracketurile au fost colate pe modele standardizate de arcadă superioară. Din fiecare categorie de bracketuri am folosit 5 bracketuri, corespunzătoare hemiarcadei drepte superioare (de la incisivul central până la primul premolar). Lipirea bracketurilor pe modele a fost realizată cu rășină compozită specifică colajului ortodontic, fotopolimerizată timp de 30 de secunde pentru fiecare bracket.

Luând în considerare că malpozițiile în plan vertical, transversal și sagital influențează semnificativ forța de frecare (Kusy și Whitley, 1999; Tageldin *et al.*, 2016), bracketurile au fost colate în mod pasiv pe modele, folosind drept ghidaj un arc rectangular de 0.021x0.025" din SS, iar distanțele dintre bracketuri au fost aceleași pentru toate modelele. Extremitatea distală dreaptă a fiecărui arc a fost îndoită pentru a permite legarea arcului la dispozitivul de testare.

În cazul ultimului studiu al cercetării științifice am conceput și realizat un stand experimental care să permită testarea forțelor de frecare pentru diferite grade ale angulației bracket-arc și distanțe între bracketuri. Astfel am utilizat două plăci metalice fixate perpendicular una față de cealaltă. În vederea analizei influenței pe care distanța dintre bracketuri o exercită asupra forței de frecare am utilizat două plăci verticale, fiecare cu trei orificii coliniare, la distanțe egale una față de cealaltă, la nivelul cărora ulterior s-au aplicat suporturile bracketurilor. Bracketurile au fost cimentate pe mijlocul capului a câte unui șurub cu diametru de 5mm. Șuruburile centrale au fost cele ce au suportat modificările de ax.

4.4 PROTOCOLUL DE TESTARE

Înainte de fiecare testare, pe bracketurile convenționale de pe modele/standul experimental au fost aplicate arcul ortodontic și inelele elastomerice. Aceste ansambluri nu au fost pregătite în prealabil pentru a se evita deteriorarea forței ligaturii elastomerice și posibila deformare a arcurilor.

Modelele și standurile experimentale pregătite în prealabil au fost aplicate pe suportul dispozitivului de testare, iar extremitatea fiecărui arc ortodontic a fost recurbată astfel încât să poată fi realizată legătura dintre arc și cârligul dispozitivului de testare. După calibrarea sistemului de înregistrare a forțelor, arcului angrenat la sistemul de bracketuri i s-a aplicat o forță de tracțiune, ce a crescut progresiv până în momentul deplasării arcului din punctul inițial, moment care corespunde înregistrării forței de frecare statică. Stabilirea cu exactitate a momentului inițierii deplasării arcului s-a putut realiza datorită înregistrărilor sistemului digital de măsurare a distanțelor atașat dispozitivului de testare.

În vederea obținerii unor rezultate concludente, testele au fost repetate de șase ori pentru fiecare tip de asociere bracket-arc. În cazul fiecărui test au fost utilizate arcuri noi, iar modelele cu bracketuri colate au fost testate cu maxim șase arcuri ortodontice. S-a considerat că pentru numărul de teste realizate, uzura materialului bracketurilor poate fi considerată neglijabilă.

4.5 CONDIȚII DE TESTARE

Toate testele au fost desfășurate în mediu uscat, la o temperatură constantă de $22.5^0 \pm 5^0C$, iar manevrarea modelelor și a dispozitivului de testare a aparținut aceleiași echipe de două persoane, în vederea limitării erorilor umane.

4.6 PRELUCRAREA DATELOR CERCETĂRII

Datele colectate au fost centralizate și prelucrate statistic folosind programele Microsoft Office Excel/Word 2013 și IBM SPSS Statistics v20. Variabilele cantitative au fost exprimate sub formă de valori medii cu deviații standard și testate pentru distribuție folosind testul Shapiro-Wilk. În funcție de tipul de distribuție obținut s-au ales testele statistice potrivite analizei ulterioare a datelor (Mann-Whitney U, Kruskal Wallis H, Student T-Test, One-Way ANOVA, Games-Howell, Tukey HSD și Dunn-Bonferroni). Nivelul de semnificație statistică a fost stabilit la maximum 0.05.

CAPITOLUL 5. STUDIU PRIVIND FORȚA DE FRECARĂ STATICĂ ÎNTR-UN SISTEM ORTODONTIC ÎN FUNCȚIE DE CARACTERISTICILE BRACKETURILOR

5.1 INTRODUCERE

Materialul bracketurilor și modul în care arcul este ligaturat la bracket reprezintă două dintre variabilele mecanice ce modifică semnificativ forța de frecare și implicit eficiența tratamentului.

Interesul din ce în ce mai crescut pentru dispozitive ortodontice cât mai puțin vizibile în rândul pacienților care solicită tratament ortodontic a condus la dezvoltarea a numeroase alternative fizionomice la bracketurile metalice tradiționale. Dintre bracketurile estetice existente la ora actuală, bracketurile ceramice (din alumina mono- și policristalină) sunt printre cele mai utilizate în practica ortodontică. O alternativă la bracketurile convenționale sunt bracketurile autoligaturante, care, deși nu sunt o inovație recentă, reprezintă încă un subiect de actualitate controversat.

Cu toate că bracketurile estetice și cele cu sistem autoligurant sunt atractive din punct de vedere al avantajelor promovate este important ca aceste dispozitive să fie studiate și din perspectiva forțelor de frecare asociate, astfel încât mecanica ortodontică să poată fi condusă cu eficiență maximă, reducând pe cât posibil efectele secundare.

5.2 SCOP ȘI OBIECTIVE

În contextul celor prezentate anterior *scopul* studiului a fost acela de a evalua experimental variația forțelor de frecare statică în funcție de caracteristicile bracketurilor utilizate.

Obiectivele acestui studiu au fost de a determina dacă:

1. există diferențe între forțele de frecare statică rezultate la interfața bracket-arc în funcție de materialul bracketurilor conventionale și autoligaturante (oțel inoxidabil, alumină policristalină cu slot metalic, alumină policristalină și alumină monocristalină);
2. există diferențe între forțele de frecare statică rezultate la interfața bracket autoligaturant-arc ortodontic și bracket convențional-arc ortodontic.

5.3 MATERIAL ȘI METODĂ

Lotul de cercetare a fost constituit din bracketuri convenționale (oțel inoxidabil, alumină policristalină cu slot metalic, alumină policristalină și alumină monocristalină) și autoligaturante cu sistem pasiv (oțel inoxidabil, alumină policristalină cu slot metalic și alumină policristalină). Arcurile utilizate au fost ovoide, cu dimensiuni (0.016” și 0.019x0.025”), secțiuni (rotund și rectangular) și materiale (NiTi și SS) diferite.

Cunoscut fiind că lățimea bracketului influențează forța de frecare statică, pentru a limita posibilitii factori de eroare am măsurat dimensiunea mezio-distală a bracketurilor utilizate cu ajutorul unui șubler electronic, calibrat la 0.1mm. De asemenea înainte de a fi testate, bracketurile au fost analizate microscopic (SEM) în vederea evaluării morfologiei de suprafață.

Testele pentru măsurarea forțelor de frecare au fost realizate conform protocolului de lucru, descris în capitolul dedicat metodologiei generale a cercetării științifice. Așa cum am precizat, bracketurile corespunzătoare cadranelor I au fost colate pasiv pe modele standardizate de arcadă superioară. Pentru fiecare tip de bracket au fost construite câte patru astfel de modele (în total 28 modele). Pentru determinarea forței de frecare statică modelele au fost fixate pe dispozitivul de testare HV-500N-S conform metodologiei de lucru descrise în capitolul 3 al lucrării.

5.4 REZULTATE

În vederea sistematizării rezultatelor și pentru o bună evidențiere a influenței pe care caracteristicile bracketurilor o au asupra mecanicii ortodontice, s-a analizat separat:

1. variația forțelor de frecare statică în funcție de materialul din care sunt confecționate bracketurile (convenționale și autoligaturante);
2. diferențele între forțele de frecare statică generate de bracketurile convenționale și autoligaturante.

5.4.1 Evaluarea forțelor de frecare statică în funcție de materialul bracketurilor

5.4.1.1 Bracketuri convenționale

Valorile forțelor de frecare obținute pentru testele cu bracketuri convenționale sunt prezentate în tabelul V.1 sub formă de valori medii și deviații standard.

Tabel V.1. Compararea valorilor medii ale forțelor de frecare statică măsurate la interfața bracket convențional-arc

Bracket Arc		Oțel inoxidabil	Alumină policristalină cu slot metalic	Alumină policristalină	Alumină monocristalină	p
0.016"	NiTi	1.65 ± 0.258	4.05 ± 0.500	3.087 ± 1.054	4 ± 0.395	<0.001* (p=0.001**)
	SS	2.75 ± 0.476	4.3 ± 0.748	4.479 ± 1.178	4.26 ± 0.694	<0.001* (p=0.039**)
0.019x 0.025"	NiTi	3.9 ± 0.322	4 ± 0.228	5.412 ± 1.401	6.53 ± 0.697	<0.001***
	SS	3.85 ± 0.288	4.3 ± 0.209	8.741 ± 1.299	9.983 ± 1.687	<0.001***

*Welch ANOVA Test, **Levene Test of Homogeneity of Variances, ***Kruskal-Wallis H Test

Am constatat că, sub aspect descriptiv, *bracketurile metalice* au generat *cele mai mici valori* ale forței de frecare statică (tabel V.1). În vederea detalierii rezultatelor am folosit teste post-hoc, ce au evidențiat diferențe semnificative între bracketurile metalice și majoritatea bracketurilor studiate, pentru toate tipurile de arcuri asociate (tabel V.2).

Comparând bracketurile metalice cu cele integral ceramice am observat că bracketurile metalice s-au asociat cu forțe de frecare statică semnificativ mai mici, indiferent de arcul ortodontic utilizat (tabel V.1). Analizând forțele de frecare statică produse de bracketurile metalice și cele din alumină policristalină cu slot metalic am constatat diferențe în funcție de dimensiunea arcului ortodontic cu care au fost testate. În cazul asocierii bracketurilor cu arcuri ortodontice cu secțiune rotundă cele metalice au produs forțe de frecare statică semnificativ mai mici față de bracketurile din alumină policristalină cu slot metalic. Pentru ansamblurile bracket-arc cu secțiune rectangulară forțele de frecare au fost aproape egale în cazul bracketurilor metalice și din alumină policristalină cu slot metalic (tabel V.2).

Tabel V.2 Compararea tipurilor de bracketuri convenționale prin prisma forțelor de frecare determinate, în funcție de arcul ortodontic asociat

Perechi de bracketuri convenționale comparate		p			
		0.016" NiTi	0.016" SS	0.019 x 0.025" NiTi	0.019 x 0.025" SS
Oțel Inoxidabil	Alumină policristalină cu slot metalic	<0.001*	0.010*	1.000**	1.000**
Oțel Inoxidabil	Alumină policristalină	<0.001*	<0.001*	0.067**	0.002**
Oțel Inoxidabil	Alumină monocristalină	<0.001*	<0.001*	<0.001**	<0.001**
Alumină policristalină cu slot metalic	Alumină policristalină	0.022*	0.966*	0.112**	0.028**
Alumină policristalină cu slot metalic	Alumină monocristalină	0.996*	1.000*	<0.001**	<0.001**
Alumină policristalină	Alumină monocristalină	0.003*	0.884*	0.062**	0.284**

*Games-Howell Post-Hoc Test, **Dunn-Bonferroni Test

Bracketurile realizate din alumină policristalină cu slot metalic, asemeni celorlalte bracketuri, au produs forțe de frecare diferite în funcție de arcul ortodontic folosit. În cazul utilizării arcurilor de 0.016" NiTi, bracketurile din alumină policristalină cu slot metalic au produs forțe de frecare statică semnificativ mai mari decât bracketurile realizate integral din alumină policristalină, însă asemănătoare cu cele din alumină monocristalină (tabel V.2). În situația asocierii bracketurilor din alumină policristalină cu slot metalic cu arcuri rectangulare de 0.019x0.025" (NiTi/SS), forțele de frecare statică au fost mai reduse decât cele produse de bracketurile integral fizionomice (alumină poli- și monocristalină) în aceleași condiții de testare, diferențele fiind în general semnificative statistic (tabel V.2).

Bracketurile din alumină policristalină au produs în asociere cu majoritatea arcurilor testate (0.016" NiTi, 0.019x0.025" NiTi, 0.019x0.025" SS) forțe de frecare statică inferioare celor generate de bracketurile din alumină monocristalină, diferențele fiind semnificative însă doar în cazul complexelor cu arc ortodontic de 0.016" NiTi (tabele V.1, V.2). Pentru bracketurile din alumină policristalină testate cu arcuri de 0.016" SS s-au înregistrat valori asemănătoare cu cele determinate de bracketurile din alumină monocristalină și policristalină cu slot metalic (tabel V.2).

Bracketurile din alumina monocristalină, indiferent de arcul cu care au fost testate, au produs *cele mai mari* forțe de frecare statică (tabel V.1). Diferențele față de variantele realizate integral din alumina policristalină nu au fost semnificative statistic (cu excepția asocierii cu arcuri de 0.016” NiTi). Bracketurile din alumina monocristalină au generat forțe de frecare statică asemănătoare celor din alumina policristalină cu slot metalic în cazul utilizării arcurilor rotunde (NiTi/SS) însă semnificativ mai mari decât acestea pentru arcurile rectangulare (NiTi/SS).

În acest context a fost descrisă analiza de microscopie electronică de baleiaj, ce a evidențiat diferențe între morfologia suprafețelor bracketurilor convenționale în funcție de materialul din care sunt realizate. În cazul bracketurilor din oțel inoxidabil s-a evidențiat uniformitatea structurală a suprafeței din punct de vedere al planeității, cu linii paralele (figura 5.1 a). În ceea ce privește bracketurile din alumina policristalină se remarcă aspectul caracteristic, cu microcristale cu orientări diferite și distribuție cvasi unifomă a granulelor de alumina (figura 5.1 b). Bracketurile din alumina policristalină cu slot metalic prezintă caracteristicile suprafețelor descrise anterior, însă la trecerea dintre porțiunea din oțel inoxidabil și cea din alumina policristalină se poate observa o zonă lacunară. Bracketurile din alumina monocristalină prezintă multiple neuniformități, generate de defecte de prelucrare ale suprafeței din timpul procesului tehnologic de fabricare.

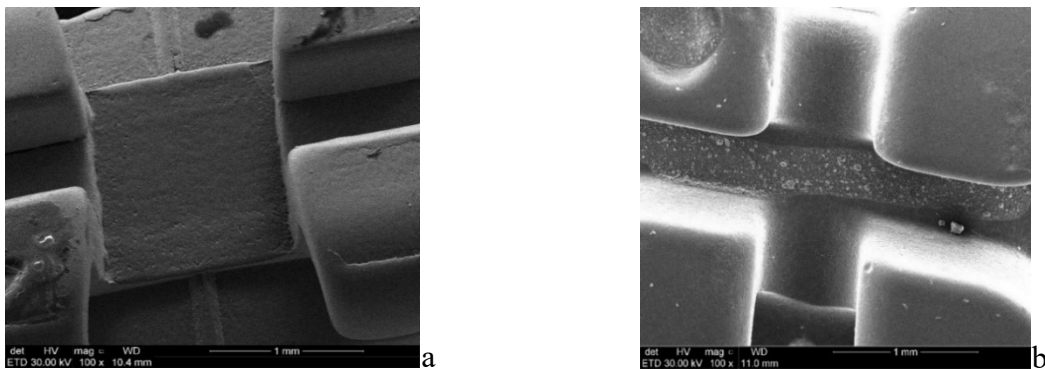


Figura 5.1 Imagini de microscopie electronică de baleiaj (mărire de 100X) ale unor bracketuri convenționale din oțel inoxidabil (a) și din alumina policristalină (b),

5.4.1.2 Bracketuri autoligaturante

Asemeni testelor realizate cu bracketuri convenționale, valorile forțelor de frecare obținute pentru testele cu bracketuri autoligaturante au fost analizate statistic și exprimate sub formă de valori medii și deviații standard (tabel V.3).

Tabel V.3 Compararea valorilor medii ale forțelor de frecare statică măsurate la interfața bracket autoligaturant-arc

Arc \ Bracket		Oțel inoxidabil	Alumină policristalină cu slot metalic	Alumină policristalină	p
0.016"	NiTi	0.35±0.115	0.681±0.064	0.536±0.126	<0.001*
	SS	0.223±0.091	0.572±0.207	0.208±0.06	0.01**
0.019x0.025"	NiTi	3.135±0.477	3.770±1.123	3.017±0.387	0.3625*
	SS	3.883±0.1	4.567±0.175	5.933±0.622	<0.001**

*Welch ANOVA Test, **Kruskal-Wallis H Test

Analizând rezultatele am constatat că *bracketurile autoligaturante metalice* au produs *cele mai reduse valori* ale forței de frecare statică, în cazul tuturor arcurilor utilizate. Diferențele între forțele de frecare statică produse la utilizarea bracketurilor autoligaturante metalice și cele generate de bracketurile autoligaturante din alumină policristalină cu slot metalic au fost semnificativ statistic mai mari pentru arcurile rotunde și cele de 0.019x0.025" SS. Comparativ cu bracketurile autoligaturante realizate integral din alumină policristalină, bracketurile metalice au determinat forțe de frecare semnificativ mai mari pentru arcurile de 0.016" NiTi și 0.019x0.025" SS.

Tabel V.4 Compararea tipurilor de bracketuri autoligaturante prin prisma forțelor de frecare determinate, în funcție de arcul ortodontic asociat

Perechi de bracketuri autoligaturante comparate		p		
		0.016" NiTi	0.016" SS	0.019x0.025" SS
Oțel Inoxidabil	Alumină policristalină cu slot metalic	<0.001*	<0.001**	<0.05**
Oțel Inoxidabil	Alumină policristalină	<0.05*	0.899**	<0.001**
Alumină policristalină cu slot metalic	Alumină policristalină	0.074*	<0.001**	<0.001**

*Games-Howell Post-Hoc Test, **Dunn-Bonferroni Test

Bracketurile autoligaturante din *alumină policristalină cu slot metalic* au generat cele mai mari forțe de frecare statică în situația testării lor cu arcuri rotunde 0.016", diferențele fiind în general semnificative din punct de vedere statistic. Bracketurile autoligaturante din alumină

policristalină cu slot metalic asociate cu arcuri ortodontice 0.019X0.025" au produs forțe de frecare statică mai mari decât cele generate de restul bracketurilor studiate (tabel V.3, V.4).

În cazul testelor realizate cu bracketuri autoligaturante realizate integral din *alumină policristalină* forțele de frecare statică au fost, în marea majoritate a cazurilor, superioare celor produse de bracketurile autoligaturante din oțel inoxidabil și inferioare bracketurilor autoligaturante din alumină policristalină cu slot metalic (tabel V.3, V.4).

Așa cum am evidențiat pentru bracketurile convenționale, și în cazul bracketurilor autoligaturante analiza de microscopie electronică de baleiaj a relevat diferențe morfologice între tipurile de materiale.

5.4.2 Evaluarea forțelor de frecare statică produse de bracketuri convenționale versus autoligaturante

După evaluarea separată a forțelor de frecare asociate bracketurilor convenționale și autoligaturante din punct de vedere al materialelor din care sunt realizate, am urmărit analiza comparativă a forțelor de frecare produse de cele două tipuri de bracketuri (convenționale și autoligaturante). În vederea realizării unei analize cât mai corecte a diferențelor dintre aceste bracketuri, rezultatele au fost grupate în funcție de materialul bracketurilor. (tabele V.5-V.7).

Tabel V.5 Compararea valorilor medii ale forțelor de frecare statică măsurate la interfața bracket-arc pentru bracketuri convenționale și autoligaturante din oțel inoxidabil

Arc	Bracket	Oțel inoxidabil		p
		Conventional	Autoligaturant	
0.016"	NiTi	1.65 ± 0.258	0.35 ± 0.115	<0.001*
	SS	2.75 ± 0.476	0.223 ± 0.091	<0.05**
0.019x0.025"	NiTi	3.9 ± 0.322	3.135 ± 0.477	<0.05*
	SS	3.85±0.288	3.883±0.01	0.785*

*Student T-Test, **Mann-Whitney U Test

Bracketurile *autoligaturante* din oțel inoxidabil în asociere cu majoritatea arcurilor testate au produs forțe de frecare semnificativ *mai mici* decât bracketurile convenționale metalice testate cu aceleași arcuri. Pentru testele realizate cu arcuri de 0.019x0.025"SS însă, bracketurile

autoligaturante metalice au produs forțe de frecare aproape egale cu cele determinate de testele cu bracketurile convenționale metalice (tabel V.5).

Tabel V.6 Compararea valorilor medii ale forțelor de frecare statică măsurate la interfața bracket-arc pentru bracketuri convenționale și autoligaturante din alumina policristalină cu slot metalic

Arc \ Bracket		Alumină policristalină cu slot metalic		P*
		Conventional	Autoligaturant	
0.016" "	NiTi	4.05±1.26	0.68±0.02	<0.001
	SS	4.3± 2.8	0.572±0.207	<0.001
0.019x 0.025" "	NiTi	4 ± 0.228	3.770± 1.123	0.634
	SS	4.3±0.209	4.57±0.175	<0.05

*Student T-Test

În ceea ce privește bracketurile din alumina policristalină cu slot metalic, cele *autoligaturante* testate cu arcuri cu secțiune de 0.016" (NiTi sau SS) au generat forțe de frecare statică semnificativ *mai reduse* decât variantele convenționale, tot cu arcuri rotunde. Sub aspect descriptiv, în cazul testelor desfășurate cu arcuri rectangulare NiTi, forțele de frecare pentru bracketurile convenționale și autoligaturante au fost asemănătoare. Se remarcă însă că, în cazul testelor realizate cu arcuri de 0.019x0.025" SS, bracketurile autoligaturante din alumina policristalină cu slot metalic s-au asociat cu forțe de frecare mai mari decât bracketurile convenționale din același material (tabel V.6, V.7).

Tabel V.7 Compararea valorilor medii ale forțelor de frecare statică măsurate la interfața bracket-arc pentru bracketuri convenționale și autoligaturante din alumina policristalină

Arc \ Bracket		Alumină policristalină		P*
		Conventional	Autoligaturant	
0.016" "	NiTi	2 ± 1.18	0.54 ± 0.08	<0.001
	SS	4 ± 0.76	0.21 ± 0.02	<0.001
0.019x 0.025" "	NiTi	5.35 ± 2.76	3.02 ± 0.75	<0.001
	SS	7.95 ± 2.62	5.93 ± 1.93	<0.001

*Student T-Test

Diferențe între forțele de frecare statică produse de bracketurile convenționale și autoligaturante au existat și în cazul bracketurilor din alumina policristalină. Bracketurile din alumina policristalină *autoligaturante* au determinat forțe de frecare statică semnificativ mai

reduse decât variantele convenționale pentru toate tipurile de asociere bracket-arc (0.016"/0.019x0.025"; NiTi/SS).

5.5 DISCUȚII

Rezultatele testelor in vitro efectuate au evidențiat o variație a forțelor de frecare statică de la interfața bracket-arc în funcție de *materialul* bracketului.

Bracketurile metalice, convenționale sau autoligaturante, au generat *cea mai redusă* forță de frecare statică, indiferent de materialul sau dimensiunea arcului ortodontic cu care au fost testate. Diferențele au fost mai mult sau mai puțin semnificative statistic în funcție de tipul de asociere bracket-arc. Rezultatele pot fi explicate prin prisma caracteristicilor mecanice ale bracketurilor metalice, ce permit o finisare superioară, fără asperități a suprafeței slotului bracketului favorizând astfel mecanica ortodontică (Tselepis, Brockhurst și West, 1994; Loftus *et al.*, 1999; Sukh *et al.*, 2013). Aceste constatări sunt confirmate și de analiza de microscopie electronică de baleiaj. Rezultatele acestui studiu sunt în acord cu majoritatea studiilor de profil ce evaluează comparativ bracketurile fizionomice și metalice (Loftus *et al.*, 1999; Burrow, 2009).

Bracketurile din ceramică policristalină cu slot metalic au fost concepute cu scopul de a îmbina fizionomia bracketurilor ceramice cu avantajul forțelor de frecare reduse asociate bracketurilor metalice. În cadrul testelor din acest studiu acoperirea slotului bracketului din alumină policristalină cu un strat metalic a determinat efecte diferite în funcție de tipul de bracket studiat (convențional sau autoligaturant) și dimensiunea arcului utilizat.

Bracketurile din alumină policristalină cu slot metalic au produs în general forțe de frecare statică asemănătoare sau mai mari decât bracketurile metalice. Forțele de frecare statică în cazul celor două tipuri de bracketuri au diferit, semnificativ sau nu, în funcție de tipul sistemului de ligaturare și de arcul ortodontic cu care au fost testate.

Pe de altă parte, există situații în care forțele de frecare statică pentru utilizarea bracketurilor din alumină policristalină cu slot metalic au fost mai mari decât în cazul variantelor integral metalice. Aceste rezultate au fost observate pentru aproape toate ansamblurile bracket din alumină policristalină cu slot metalic convenționale/ autoligaturante și arcuri rotunde de diametru 0.016" din NiTi/SS. În literatura de specialitate sunt descrise studii ce au obținut rezultate similare. (Nishio *et al.*, 2004; Pliska *et al.*, 2014). Variația forțelor de frecare pentru interfețe bracket-arc asemănătoare ar putea fi explicată de prezența unui spațiu între materialul ceramic și slotul metalic,

remarcat în cadrul analizei microscopice (Nishio *et al.*, 2004).

În cadrul studiului meu, valorile forțelor de frecare statică obținute pentru asocierea bracketurilor convenționale din alumina policristalină modificate cu slot metalic cu arcuri de 0.019x0.025" au fost mai mici față de cele generate de bracketurile convenționale integral din alumina policristalină (semnificativ pentru arcurile din SS și nesemnificativ pentru cele din NiTi). Reducerea forțelor de frecare prin inserția slotului se poate datora modificării interfeței arc-bracket: de la două structuri diferite (suprafața netedă metalică a arcului și poroasă ceramică bracket) la două structuri cu morfologie similară a suprafeței, netede, cu asperități reduse. Aceste constatări sunt în concordanță și cu alte studii ale literaturii de specialitate, care susțin eficiența slotului metalic în reducerea forțelor de frecare determinate de bracketurile ceramice (Sadique *et al.*, 2006; Doshi și Bhad-Patil, 2011; Pimentel *et al.*, 2013; Williams și Khalaf, 2013). Nishio *et al.* (2004) observat că ramforsarea slotului bracketului ceramic cu metal a redus forțele de frecare față de formele integral ceramice indiferent de materialul arcului asociat. Totuși, bracketurile din alumina policristalină cu slot metalic convenționale și autoligaturante au determinat pentru unele asocieri bracket-arc și forțe de frecare mai mari decât cele realizate integral din alumina policristalină. În cazul bracketurilor autoligaturante, această variație a forței de frecare statică se poate datora sistemului de prindere al arcului la bracketul din alumina policristalină cu slot metalic, care, deși tot pasiv, este diferit față de celelalte bracketuri autoligaturante incluse în studiu.

Bracketurile integral fizionomice autoligaturante incluse în studiu au fost realizate din alumina policristalină, și, așa cum am prezentat anterior, au generat în general forțe de frecare mai reduse decât variantele cu slot metalic.

Bracketurile integral fizionomice convenționale au generat în cazul majorității testelor efectuate valori ale forței de frecare statică *superioare* celorlalte tipuri de bracketuri studiate. Această observație este în concordanță cu majoritatea studiilor din literatura de specialitate, ce explică rezultatele prin proprietățile mecanice pe care le dețin bracketurile ceramice (Ryan *et al.*, 1997; Sukh *et al.*, 2013). Astfel duritatea, rigiditatea și rugozitatea suprafeței, cu granulații și depresiuni ale materialelor ceramice sunt considerate principalii factori determinanți ai creșterii valorii forței de frecare (De Franco, Spiller și Von Fraunhofer, 1995).

În ceea ce privește tipul bracketurilor convenționale integral fizionomice am constatat că în general *nu au existat diferențe semnificative statistic* între forțele de frecare statică determinate de *bracketurile din alumina poli- și monocristalină*. Singura excepție de la această regulă a fost

identificată pentru experimentul realizat cu arcul rotund din NiTi, unde bracketul convențional din *alumină monocristalină a generat valori semnificativ mai mari* decât varianta policristalină. Sub aspect descriptiv, chiar dacă ne semnificativ statistic, forțele de frecare asociate aluminei monocristaline au fost în general ușor mai mari decât cele determinate de alumina policristalină. Rezultatele studiilor privind forțele de frecare generate de diferitele tipuri de bracketuri ceramice sunt eterogene. Având în vedere rolul important pe care rugozitatea suprafețelor materialelor îl joacă în variația forțelor de frecare, o serie de studii au raportat valori ale forței de frecare mai reduse pentru bracketurile din alumină monocristalină, acestea prezentând sub aspect microscopic o suprafață mai netedă comparativ cu varianta policristalină (Nishio *et al.*, 2004; Sukh *et al.*, 2013). Cu toate acestea, majoritatea studiilor indică valori ale forței de frecare mai mari pentru bracketurile din alumină monocristalină față de cea policristalină (Michelberger *et al.*, 2000; Williams și Khalaf, 2013; Arici, Akdeniz și Arici, 2015). Pe de altă parte există și cercetări ce nu au constatat diferențe între cele două tipuri de ceramică (Drescher, Bourauel și Schumacher, 1989; Pliska *et al.*, 2014). Saunders, Kusy și Hill (1994) au observat că, deși suprafața aluminei monocristaline este semnificativ mai netedă decât a celei policristaline, forțele de frecare determinate de cele două materiale nu au diferit semnificativ. Autorii explică aceste rezultate prin influența pe care o au și alți factori asupra forțelor de frecare.

De asemenea, în urma interpretării rezultatelor experimentelor am remarcat că forța de frecare statică de la interfața bracket-arc nu variază doar cu materialul bracketului, ci și între *tipurile de bracketuri convenționale și autoligaturante*.

În studiul meu, bracketurile autoligaturante au produs în majoritatea situațiilor forțe de frecare statică semnificativ mai reduse decât variantele convenționale. Această observație este în acord cu un număr important de cercetări realizate pe această temă (Thomas, Sherriff și Birnie, 1998; Thorstenson și Kusy, 2001; Heno și Kusy, 2004). Reducerea semnificativă a forței de frecare statică se datorează în principal eliminării ligaturilor elastomerice, responsabile de apariția forței care acționează asupra arcului. Așa cum am prezentat în prima parte a tezei, sistemul de prindere al bracketurilor autoligaturante pasive acționează ca un al patrulea perete (mobil) al bracketului, creând un lumen pasiv de menținere a arcului în slotul bracketului, fără a determina în mod activ forțe asupra arcului.

Totuși, este de remarcat că, în cazul testelor din studiul meu realizate cu arcuri rectangulare, diferențele între forțele de frecare pentru bracketurile convenționale și autoligaturante au fost mai

reduse, iar uneori bracketurile autoligaturante s-au asociat cu forțe de frecare chiar mai ridicate comparativ cu cele convenționale. Această observație este în concordanță și cu alte studii din literatura de specialitate (Henaou și Kusy, 2004). Aceștia au constatat că bracketurile autoligaturante au produs forțe de frecare mai reduse decât cele convenționale în cazul asocierii cu arcuri de 0.014", pe când pentru utilizarea arcurilor de 0.016x0.022" și 0.019x0.025" valorile forțelor de frecare nu au diferit semnificativ. Astfel, se poate afirma că eficiența sistemului autoligaturat este prezentă în mare parte doar pentru asocierea cu arcuri de dimensiuni reduse.

5.6 CONCLUZII

Rezultatele studiului au indicat că există diferențe între forțele de frecare statică rezultate la interfața bracket-arc în funcție de materialul bracketurilor și între forțele de frecare statică asociate bracketurilor convenționale și autoligaturante.

Bracketurile *metalice* din oțel inoxidabil, convenționale/autoligaturante au produs cele mai reduse forțe de frecare statică dintre toate bracketurile testate. Deci, din perspectiva unui sistem ortodontic cu forțe de frecare reduse, bracketurile metalice sunt de preferat celor fizionomice.

Totuși, dacă se dorește utilizarea unui aparat ortodontic fix poliagregat cu bracketuri fizionomice, cele convenționale din *alumină policristalină cu slot metalic* determină în general forțe de frecare mai reduse decât variantele integral ceramice, mai ales în fazele avansate ale tratamentului, ce implică utilizarea unor arcuri rectangulare. Situația este diferită în cazul bracketurilor autoligaturante, unde forțele de frecare au fost mai mari pentru variantele din alumină policristalină cu slot metalic față de cele integral din alumină policristalină.

Bracketurile *integral ceramice* autoligaturante au produs forțe de frecare mai reduse decât cele modificate cu slot metalic. Pe de altă parte, bracketurile convenționale integral ceramice au generat în cazul tuturor testelor efectuate valori ale forței de frecare statică superioare variantelor modificate cu slot metalic. În ceea ce privește diferitele tipuri de bracketuri convenționale integral ceramice, în general nu există diferențe semnificative între forțele de frecare statică generate de alumina policristalină și monocristalină.

Bracketurile *autoligaturante* au produs în general forțe de frecare statică mai reduse decât bracketurile convenționale. Reducerea forțelor de frecare este semnificativă însă doar când se utilizează arcuri ortodontice cu dimensiuni reduse. Pentru utilizarea arcurilor rectangulare, de dimensiuni mai mari, diferențele între forțele de frecare produse de bracketurile convenționale și

autoligaturante se reduc, fiind posibil ca bracketurile autoligaturante să determine uneori forțe de frecare chiar mai mari decât variantele convenționale.

Având în vedere rezultatele obținute, consider că este important ca alegerea componentelor aparatului fixe poliagregate să se realizeze judicios, luând în considerare toate caracteristicile acestora. Modificarea materialelor bracketurilor nu are impact numai asupra esteticii aparatului ci și asupra eficienței tratamentului ortodontic. Trebuie de asemenea ținut cont că, în cazul tratamentului ortodontic cu bracketuri autoligaturante, forțele de frecare statică se reduc semnificativ doar în primele etape de tratament.

CAPITOLUL 6. STUDIU PRIVIND VARIAȚIA FORȚEI DE FRECARÉ STATICĂ ÎNTR-UN SISTEM ORTODONTIC ÎN FUNCȚIE DE CARACTERISTICILE ARCURILOR ORTODONTICE

6.1 INTRODUCERE

Forța de frecare produsă într-un sistem ortodontic, așa cum am precizat și anterior, diferă în funcție de proprietățile elementelor componente. Dacă în primul studiu al părții personale am abordat acest subiect din perspectiva particularităților bracketului ortodontic, în acest capitol am dorit să investighez variația forțelor de frecare în funcție de caracteristicile arcurilor ortodontice.

Arcurile ortodontice utilizate în practică diferă în funcție de obiectivele specifice fiecărei etape de tratament prin dimensiuni, secțiuni și materialele din care sunt realizate. Totuși, odată cu înmulțirea solicitărilor pentru aparate ortodontice fixe cât mai estetice, un alt parametru al arcului ortodontic trebuie luat în considerare, și anume aspectul estetic. În prezent, un număr important de firme produc arcuri ortodontice fizionomice, ce diferă din punct de vedere al materialelor utilizate. Acestea pot fi încadrate în două categorii principale: arcuri metalice cu un înveliș de culoare albă și arcuri nemetalice, din materiale compozite, recent dezvoltate. Chiar dacă arcurile fizionomice nemetalice reprezintă un subiect din ce în ce mai investigat, din cauza dezavantajelor încă prezente, majoritatea arcurilor fizionomice utilizate în practică rămân arcurile metalice cu înveliș fizionomic realizat din diferite tipuri de materiale (Muguruma *et al.*, 2011).

6.2 SCOP ȘI OBIECTIVE

Scopul studiului îl reprezintă evaluarea comparativă a forțelor de frecare statică de la interfața sistemului ortodontic pentru diferite tipuri de arcuri ortodontice.

Urmărind o serie de variabile de interes, *obiectivele* studiului au constat în a stabili dacă există diferențe între forțele de frecare statică rezultate la interfața bracket-arc în funcție de:

1. materialul arcului ortodontic (NiTi și SS);
2. prezența unui înveliș fizionomic de-a lungul arcului ortodontic;
3. suprafața de acoperire și tipul învelișului fizionomic al arcului ortodontic;
4. dimensiunea și secțiunea arcului ortodontic (0.016" și 0.019x0.025").

6.3 MATERIAL ȘI METODĂ

Lotul de studiu a fost alcătuit din arcuri ortodontice ovoide, de diametre (0.016" și 0.019x0.025"), secțiuni (rotund și rectangular) și materiale (NiTi și SS) diferite, cu și fără înveliș fizionomic. Referitor la materialul și gradul de acoperire al învelișului fizionomic, au fost studiate trei tipuri de arcuri cu înveliș fizionomic și un arc nefizionomic. Din grupul de arcuri fizionomice două tipuri sunt integral acoperite de înveliș fizionomic: înveliș din (bio)polimer și un strat subțire de argint și înveliș din rășină epoxidică. Cel de-al treilea tip de arc fizionomic prezintă un înveliș de culoarea dintelui doar pe suprafața sa vestibulară, fiind denumit de aceea arc semi-fizionomic. Astfel, în acest studiu au fost testate 16 tipuri diferite de arcuri. Bracketurile utilizate în studiu prezintă prescripție MBT, slot de 0.022 x0.028" și sunt realizate din alumină monocristalină

Câte un eșantion din fiecare tip de arc a fost selectat și supus analizei de microscopie electronică de baleiaj. Această investigație a permis aprecierea unor elemente de morfologie de suprafață a materialelor din care sunt realizate arcurile ortodontice. Pentru desfășurarea testelor în parametrii optimi am realizat patru astfel de modele. Protocolul de testare a respectat aceiași pași ca în cazul studiului anterior, descris în detaliu în capitolul 4 al cercetării.

6.4 REZULTATE

Parametrul principal (forța de frecare statică) a făcut obiectul unor analize multiple, prin prisma particularităților arcului ortodontic (materialul, învelișul fizionomic și dimensiunea).

6.4.1 Evaluarea forței de frecare statică în funcție de materialul arcului ortodontic

Într-o primă etapă, rezultatele testelor au fost analizate statistic prin prisma *materialului* din care sunt realizate arcurile (NiTi/SS). Am observat că *arcurile din NiTi* au produs în cazul majorității testelor realizate forțe de frecare statică *mai mici* decât variantele din SS (tabel VI.1). Singura excepție este reprezentată de testele realizate cu arcuri fizionomice cu înveliș polimeric, cu secțiune 0.016”, situație în care arcurile din SS au generat forțe de frecare statică mai reduse, diferențele fiind însă ne semnificative statistic (tabel VI.1).

Tabel VI.1 Compararea valorilor medii ale forțelor de frecare statică de la interfața bracket-arc în funcție de materialul arcului ortodontic

Arc	0.016” NiTi	0.016” SS	p
ANF (p<0.001)*	4 ± 0.395	4.572 ± 1.214	0.126***
ASF (p=0.376)*	4.616 ± 0.559	5.85 ± 0.577	<0.001** <0.001, R=0.745*****
AF1 (p=0.370)*	7.116 ± 1.157	6.683 ± 0.745	0.191**
AF2 (p=0.358)*	6.033 ± 1.301	6.11 ± 1.695	0.878**
	0.019x0.025” NiTi	0.019x0.025” SS	
ANF (p=0.002)*	6.533 ± 0.697	9.983 ± 1.687	<0.001*** <0.001, R=0.848*****
ASF (p=0.428)*	8.833 ± 1.055	10.661 ± 1.002	<0.001** <0.001, R= -0.736*****
AF1 (p=0.002)*	7.95 ± 1.472	12.05 ± 5.945	0.031*** 0.031, R=0.361*****
AF2 (p=0.015)*	6.433 ± 1.451	11.433 ± 2.38	<0.001*** <0.001, R=0.869*****

*Shapiro-Wilk Test, **Student T-Test, ***Mann-Whitney U Test, ****Pearson Correlation Coefficient, *****Spearman’s rho Correlation Coefficient

Investigația microscopică (figura 6.1) a relevat deosebiri între aspectul suprafețelor celor două materiale investigate. Arcul din SS se remarcă printr-o suprafață predominant fără denivelări, aspect ce corespunde în general unei suprafețe netede. Pe de altă parte, la nivelul arcului din NiTi se pot observa zone neuniforme, majoritatea denivelărilor fiind sub formă de șanțuri.

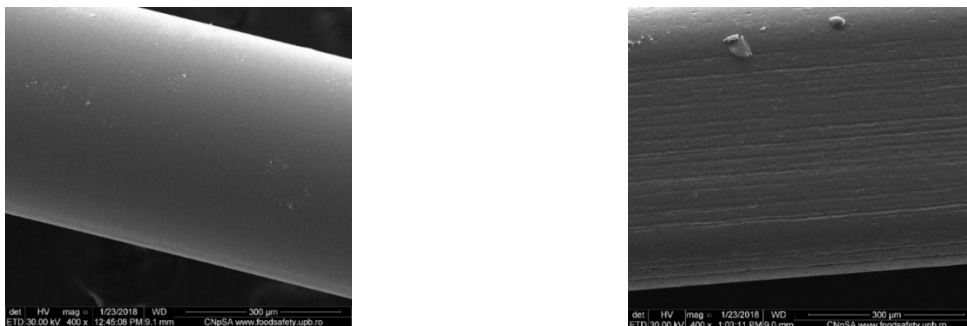


Figura 6.1 Imagini de microscopie electronică de baleiaj a două arcuri ortodontice: SS (stânga) și NiTi (dreapta); mărire a imaginii de 400X

6.4.2 Evaluarea forței de frecare statică în funcție de tipul învelișului fizionomic al arcului ortodontic

Testele desfășurate au relevat valori ale forțelor de frecare diferite pentru bracketurile nefizionomice și fizionomice (tabel VI.2).

Tabel VI.2 Compararea valorilor medii ale forțelor de frecare statică de la interfața bracket-arc în funcție de tipul învelișului fizionomic

		ANF	ASF	AF1	AF2	p
0.016"	NiTi (p<0.001)*	4 ± 0.395	4.616 ± 0.559	7.116 ± 1.157	6.033 ± 1.301	<0.001***
	SS (p=0.489)*	4.572 ± 1.214	5.85 ± 0.577	6.683 ± 0.745	6.11 ± 1.695	0.001** (p<0.001****)
0.019x 0.025"	NiTi (p=0.017)*	6.533 ± 0.697	8.833 ± 1.055	7.95 ± 1.472	6.433 ± 1.451	<0.001***
	SS (p<0.001)*	9.98 ± 1.687	10.661 ± 1.002	12.05 ± 5.945	11.433 ± 2.38	0.73***

*Shapiro-Wilk Test , **Welch ANOVA Test , ***Kruskal-Wallis H Test; ****Levene Test of Homogeneity of Variances

Arcurile nefizionomice au generat cele mai *reduse* valori ale forței de frecare statică, indiferent de secțiune (0.016"/0.019x0.025") sau material (NiTi/SS). În cazul arcurilor nefizionomice de 0.016" NiTi forțele de frecare statică au diferit semnificativ față de cele produse de arcurile integral fizionomice, însă ne semnificativ față de arcurile semi-fizionomice. Forțele de frecare produse de arcurile nefizionomice de 0.016" SS au fost semnificativ mai mici față de cele determinate de arcurile 0.016" SS fizionomice și semi-fizionomice. Arcurile nefizionomice de 0.019x0.025" NiTi au diferit semnificativ din punct de vedere al forțelor de frecare statică față de cele semi-fizionomice și fizionomice cu înveliș polimeric, însă au fost

asemănătoare cu cele cu înveliș din rășină epoxidică. În cazul arcurilor nefizionomice de 0.019x0.025" SS forțele de frecare nu au fost semnificativ mai mici decât forțele de frecare produse de arcurile fizionomice și semi-fizionomice de 0.019x0.025" SS (tabel VI.2).

Arcurile semi-fizionomice au produs forțe de frecare mai mari decât arcurile nefizionomice în cazul tuturor testelor realizate, cu diferențe semnificative statistic pentru arcurile 0.016" SS și 0.019x0.025" NiTi. Comparativ cu arcurile integral fizionomice, cele semi-fizionomice au produs forțe de frecare mai reduse, semnificativ în cazul secțiunilor rotunde 0.016" NiTi/SS și nesemnificativ pentru 0.019x0.025" SS. Doar arcurile semi-fizionomice de 0.019x0.025" NiTi au generat forțe de frecare mai mari decât cele integral fizionomice, semnificativ doar față de cele cu înveliș din rășină epoxidică (tabel VI.2).

Arcurile acoperite integral cu înveliș fizionomic au produs în general forțe de frecare mai mari decât cele nefizionomice și semi-fizionomice. Dintre acestea, arcurile fizionomice cu înveliș polimeric s-au asociat cu forțe de frecare mai mari decât cele cu înveliș din rășină epoxidică, cu toate că diferențele au fost în majoritatea cazurilor nesemnificative statistic (diferențe semnificative statistic s-au înregistrat în cazul testelor realizate cu arcuri de 0.019x 0.025" NiTi).

Analiza de microscopie electronică de baleiaj a permis evidențierea diferențelor existente între morfologia suprafețelor arcurilor, în funcție de tipul învelișului fizionomic.

6.4.3 Evaluarea forței de frecare statică în funcție de dimensiunea arcului ortodontic

Analizând comparativ valorile forțelor de frecare statică generate de arcurile 0.016" și 0.019x0.025" realizate din același material am constatat că în cazul tuturor testelor arcurile de 0.016" s-au asociat cu forțe de frecare mai mici decât cele de 0.019x0.025" (tabel VI.3).

Tabel VI.3 Compararea valorilor medii ale forțelor de frecare statică de la interfața bracket-arc în funcție de dimensiunea arcului ortodontic

Arc	0.016" NiTi	0.019x0.025" NiTi	p
ANF (p=0.007)*	4 ± 0.395	6.533 ± 0.697	<0.001*** <0.001, R=0.868*****
ASF (p=0.001)*	4.616 ± 0.559	8.833 ± 1.055	<0.001*** <0.001, R=0.867*****
AF1 (p=0.303)*	7.116 ± 1.157	7.95 ± 1.472	0.068**
AF2 (p=0.033)*	6.033 ± 1.301	6.433 ± 1.451	0.791***

Arc	0.016” SS	0.019x0.025” SS	p
ANF (p=0.003)*	4.572 ± 1.214	9.983 ± 1.687	<0.001*** <0.001, R=0.862*****
ASF (p=0.034)*	5.85 ± 0.577	10.661 ± 1.002	<0.001*** 0.017, R=0.397*****
AF1 (p<0.001)*	6.683 ± 0.745	12.05 ± 5.945	0.010*** 0.009, R=0.431*****
AF2 (p=0.561)*	6.11 ± 1.695	11.43 ± 2.38	<0.001** <0.001, R=0.798*****

* Shapiro-Wilk Test, **Student T-Test, *** Mann-Whitney U Test, ****Pearson Correlation Coefficient, *****Spearman’s rho Correlation Coefficient

Diferențele dintre forțele de frecare determinate de arcurile cu dimensiuni diferite au fost în general semnificative statistic (excepție fac arcurile integral fizionomice din NiTi, pentru care forțele de frecare statică nu au diferit semnificativ între cele două dimensiuni de arcuri).

6.5 DISCUȚII

Arcul ortodontic este o componentă esențială a aparatului ortodontic fix poliagregat iar caracteristicile acestuia din perspectiva forțelor de frecare de la interfața cu slotul bracketului și sistemul de ligaturare necesită un studiu aprofundat.

6.5.1 Forța de frecare statică din perspectiva materialului arcului ortodontic (NiTi/SS)

Rezultatele studiului meu au relevat că materialul arcului ortodontic influențează forța de frecare statică de la interfața arc-bracket din alumina monocristalină, în sensul unor valori mai reduse pentru arcurile din NiTi comparativ cu cele din SS.

Studiile din literatura de specialitate ce abordează această temă prezintă însă rezultate contradictorii. Unele cercetări au raportat, asemeni studiului meu, forțe de frecare *mai mari* în cazul *arcurilor din SS comparativ cu cele din NiTi* (Angolkar *et al.*,1990; Kusy *et al.*,1991; Tselepis *et al.*,1994 citați de Cacciafesta *et al.*, 2003).

Pe de altă parte există studii în care *nu au fost observate diferențe* semnificative între forțele de frecare statică produse de arcurile de NiTi și SS (Articolo și Kusy (1999), Cacciafesta *et al.*(2003)), însă majoritatea studiilor indică însă *forțe de frecare mai mari pentru arcurile din NiTi* față de cele din SS (Thomas, Sherriff și Birnie, 1998; Nishio *et al.*, 2004; Tecco *et al.*, 2007; Krishnan, Kalathil și Abraham, 2009).

Analizând studiile ce tratează acest subiect este posibil ca deosebirile între rezultatele raportate să se datoreze diferențelor între metodologia de lucru a acestora (materiale de producători diferiți, numărul și dispunerea diferită a bracketurilor, metode diferite de măsurare a forțelor de frecare etc.).

Nishio *et al.* (2004) au studiat prin intermediul microscopiei electronice (SEM) diferite tipuri de arcuri și au observat că rugozitatea acestora a variat în sens crescător de la SS, NiTi la β -Ti. Cum și forța de frecare a crescut în același sens aceștia au stabilit o corelație directă între forța de frecare și rugozitatea suprafețelor aflate în contact. Totuși, Kusy și Whitley (1990) indică în studiul lor faptul că arcurile din NiTi au prezentat o rugozitate mai accentuată decât cele din TMA, însă au produs forțe de frecare mai reduse decât acestea, ceea ce a demonstrat că rugozitatea nu este singura variabilă ce influențează forța de frecare.

Există însă și cercetări ce au infirmat existența unei legături clare între morfologia suprafeței și forța de frecare. După ce au măsurat rugozitatea suprafețelor unor arcuri ortodontice prin intermediul profilometriei și au evaluat forța de frecare de la interfața bracket-arc, Rudge, Sherriff și Bister (2015) au observat că deși arcurile cu înveliș fizionomic prezintă o rugozitate de suprafață ridicată, forțele de frecare au fost mai reduse decât pentru alte arcuri.

6.5.2 Forța de frecare statică din perspectiva învelișului fizionomic al arcului ortodontic

Compoziția materialului tecii fizionomice variază de la un producător la altul, cele mai frecvent utilizate materiale fiind rășinile epoxidice, diverse tipuri de polimeri sau teflonul. Fiecare înveliș prezintă caracteristici proprii, având efecte diferite asupra forței de frecare.

În cadrul studiului meu, *arcurile nefizionomice* au înregistrat pentru majoritatea testelor desfășurate (atât în cazul arcurilor rotunde 0.016" NiTi cât și a celor rectangulare 0.019x0.025" NiTi) *cele mai reduse* valori ale forței de frecare statică. În ceea ce privește testele unde aceste arcuri nu au înregistrat cele mai mici valori, diferențele față de arcurile ce au generat valorile minime au fost nesemnificative statistic. Cu toate că metodologia de lucru nu este identică, și alte studii de specialitate atribuie arcurilor nefizionomice cele mai reduse valori ale forței de frecare (Dickson, Jones și Davies, 1994; Sadique *et al.*, 2006; Bandeira *et al.*, 2011; Al-ghroosh *et al.*, 2018). Pe de altă parte, unele studii relevă forțe de frecare mai mari în cazul arcurilor nefizionomice comparativ cu cele cu înveliș fizionomic, rezultate datorate conform autorilor fenomenelor chimice de la suprafața diferitelor cupluri bracket-arc fizionomic (Matias *et al.*, 2018).

Arcurile semi-fizionomice prezintă învelișul fizionomic doar pe suprafața vestibulară a arcului. Acestea au determinat forțe de frecare statică superioare celor nefizionomice (diferențe semnificative statistic pentru arcurile 0.016" SS și 0.019x0.025" NiTi). Având în vedere că interfața bracket-arc se realizează predominant între suprafețe metalice lipsite de înveliș (contact cu pereții laterali), ar fi fost de așteptat ca forțele de frecare în cazul celor două tipuri de arcuri să fie asemănătoare, așa cum este situația în studiul realizat de Matias *et al.* (2018). În cadrul studiului meu arcurile semi-fizionomice au produs în general cele mai reduse valori ale forței de frecare dintre arcurile fizionomice. Aceste rezultate pot fi explicate prin acoperirea parțială cu înveliș fizionomic a arcului semi-fizionomic, astfel interfața bracket-arc realizându-se în parte la nivelul zonelor nefizionomice.

Totuși, în cazul experimentelor cu arcuri rectangulare 0.019x0.025"NiTi, arcurile semi-fizionomice au generat forțe de frecare statică mai ridicate decât cele integral fizionomice, semnificativ față de cele cu înveliș din rășină epoxidică. Rezultatele acestea pot fi determinate de diferențele dimensionale ale arcului semi-fizionomic față de cele integral fizionomice. Silva *et al.* (2013) au evaluat o serie de proprietăți mecanice ale arcurilor ortodontice cu înveliș fizionomic. Aceștia au observat că în cazul arcurilor acoperite integral de stratul fizionomic, "miezul" metalic a fost subdimensionat pentru a compensa grosimea materialului de înveliș. Astfel, având un diametru mai redus, arcurile integral fizionomice au prezentat o flexibilitate mai mare și, așa cum am discutat anterior, implicit forțe de frecare mai mici. Reducerea dimensiunii arcului metalic propriu-zis nu a fost înregistrată și în cazul arcurilor semi-fizionomice, acestea prezentând caracteristici mecanice similare celor nefizionomice.

Arcurile acoperite integral cu înveliș fizionomic s-au asociat cu *cele mai ridicate* valori ale forței de frecare statică. Dintre acestea, arcurile fizionomice cu înveliș polimeric de Ag au determinat valori mai ridicate decât arcurile fizionomice cu înveliș din rășină epoxidică, cu toate că diferențele nu au fost în toate situațiile semnificative statistic. Și alte studii din literatura de specialitate indică valori ale forței de frecare statice mai ridicate pentru arcurile cu înveliș fizionomic față de cele nefizionomice. Aceste rezultate pot fi explicate prin forțele de adeziune dintre suprafața bracketului și învelișul fizionomic (Sadique *et al.*, 2006) sau de predispoziția acestor arcuri la zgârieturi și exfoliere a învelișului estetic în timpul mecanicii ortodontice de alunecare (Dickson, Jones și Davies, 1994; Sadique *et al.*, 2006).

Unele studii însă contrazic observațiile anterioare și susțin că arcurile fizionomice generează forțe de frecare mai reduse decât cele nefizionomice (Bandeira *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2014). Sadique *et al.* (2006) au realizat un studiu in vitro privind caracteristicile forței de frecare pentru diferite asocieri bracket-arc. Aceștia au observat că arcurile din SS ce aveau suprafața acoperită cu un înveliș au generat forțe de frecare mai mari decât cele fără înveliș, pentru toate cuplurile de bracketuri și arcuri studiate. Aceștia au atribuit diferența între forțele de frecare durității celor două arcuri.

6.5.3 Forța de frecare statică în funcție de dimensiunea arcului ortodontic

Pe parcursul avansării tratamentului, arcurile ortodontice se succed nu doar din punct de vedere al materialelor, ci și a diametrului (de la o dimensiune mai mică la una mai mare).

În ceea ce privește influența dimensiunii arcului ortodontic asupra forței de frecare statică, rezultatele studiului prezentat în acest capitol evidențiază că arcurile cu dimensiune de 0.019x0.025" generează forțe mai mari decât cele de 0.016", indiferent de aliajul și tipul învelișului fizionomic al arcului. Diferențele înregistrate între valorile forțelor de frecare au fost semnificative statistic în cazul tuturor arcurilor din SS, iar pentru cele din NiTi doar cuplurile bracket-arc nefizionomic și semi-fizionomic au prezentat forțe de frecare semnificativ diferite.

Rezultate asemănătoare au fost obținute și de alți autori (Frank și Nikolai, 1980; Angolkar *et al.*, 1990; Bednar, Gruendeman și Sandrik, 1991; Kusy și Whitley, 1997; Cacciafesta *et al.*, 2003; Tecco *et al.*, 2007; Yeh *et al.*, 2007; Singh *et al.*, 2014) ce au remarcat că o creștere dimensională a arcurilor conduce la valori semnificativ mai ridicate ale forțelor de frecare.

La o primă observație această constatare contrazice unul din principiile mecanicii clasice, prin care este enunțat că forța de frecare este independentă de mărimea suprafeței de contact a corpurilor. Totuși, trebuie avut în vedere că sistemul ortodontic este unul multifactorial, cu o configurație complexă, a cărei analiză presupune nu doar cunoștințe de mecanică newtoniană ci și noțiuni de tribologie, știință ce include mai multe variabile privind fenomenul de frecare.

S-a constatat că, forțele de frecare mai mici în cazul arcurilor de dimensiune mai redusă se datorează spațiului liber existent între arc și pereții slotului bracketului, ce permite un "joc" al arcului în slot. Cu cât gradul de interesare a slotului bracketului este mai ridicat cu atât crește și valoarea forței de frecare. Atunci când discutăm de arcuri cu secțiune rectangulară, forța de frecare depinde mai ales de dimensiunea verticală a arcului (Drescher, Bourauel și Schumacher, 1989; Henao și Kusy, 2004).

De asemenea, există diferențe între forțele de frecare generate de arcuri de dimensiuni diferite și pentru că arcurile mai mici dețin o flexibilitate mai mare decât arcurile realizate din același tip de material dar cu dimensiune mai mare (Frank și Nikolai, 1980; Kusy, 1997). Forțele de frecare diferite în funcție de dimensiunea arcurilor se pot datora și forțelor exercitate de sistemul de ligaturare al arcului la bracket. Atunci când se utilizează arcuri de dimensiuni mai mari, ligaturile elastomerice sunt mai întinse ceea ce determină creșterea forței pe care acestea o exercită asupra arcului și deci și a forței de frecare (Angolkar *et al.*, 1990).

Trebuie menționat că, atât în studiul acesta cât și în majoritatea celor din literatura de specialitate, în cadrul analizei comparative, arcurile nu au diferit doar prin dimensiune ci și prin secțiune. Analiza dimensiunii arcului ortodontic nu poate fi tratată independent, fără să luăm în considerare și secțiunea arcului ortodontic. Majoritatea autorilor conchid că, în condițiile unor arcuri cu dimensiuni ce ocupă (aproape) în întregime slotul bracketului, secțiunile rectangulare produc forțe de frecare mai mari decât cele rotunde (Proffit, Fields și Sarver, 2013; Lee și Hwang, 2015). Acest lucru poate fi explicat tot prin prisma spațiului liber rezidual mic între arc și pereții slotului bracketului în cazul arcurilor rectangulare, ceea ce determină creșterea forțelor de frecare.

Din cauza faptului că arcurile ortodontice studiate (0.016" și 0.019x0.025") nu au diferit doar prin dimensiune sau secțiune, ci prin ambele variabile, nu se poate emite o concluzie clară cu privire la influența izolată a diametrului sau a secțiunii arcului ortodontic asupra forței de frecare..

6.6 CONCLUZII

Rezultatele experimentelor au indicat variația forțelor de frecare statică de la interfața arc-bracket din alumina monocristalină în funcție de tipul arcului ortodontic utilizat.

- arcurile din NiTi au generat forțe de frecare statică mai reduse decât cele din SS;
- în condițiile metodologiei de lucru aplicate, flexibilitatea arcului a influențat valorile forței de frecare statică mai mult decât morfologia suprafeței;
- există diferențe între forțele de frecare statică generate de arcuri cu și fără înveliș fizionomic;
- arcurile nefizionomice au generat cele mai reduse forțe de frecare statică;
- arcurile semi-fizionomice au determinat valori ale forței de frecare statică inferioare celor integral fizionomice;
- arcurile integral fizionomice au determinat cele mai mari forțe de frecare statică;

- nu s-au remarcat însă diferențe semnificative între forțele de frecare statică produse de arcurile fizionomice cu înveliș polimeric cu argint și din rășină epoxidică;
- arcurile cu secțiune rectangulară de dimensiune 0.019x0.025" au generat forțe de frecare statică mai ridicate decât cele cu secțiune rotundă de dimensiune 0.016".

În concluzie, atunci când medicul ortodont alege arcul potrivit pentru o anumită etapă de tratament trebuie luate în considerare toate particularitățile sale, de la dimensiune, secțiune, tipul materialului (cu caracteristicile sale specifice) la prezența unui înveliș fizionomic, distribuția acestuia pe toată suprafața arcului sau doar vestibular și tipul materialului de înveliș.

CAPITOLUL 7. STUDIU ASUPRA RELAȚIEI DINTRE FORȚA DE FRECARĂ STATICĂ, ANGULAȚIA BRACKET-ARC ȘI DISTANȚA DINTRE BRACKETURI

7.1 INTRODUCERE

Pe lângă caracteristicile individuale ale bracketurilor și arcurilor, analizate în capitolele anterioare, și interacțiunea dintre aceste elemente ocupă un rol important în mecanica ortodontică.

Așa cum am expus în prima parte a acestei cercetări, literatura de specialitate arată că, în funcție de raportul dintre arc și bracket, putem discuta despre două tipuri diferite de configurații. Atunci când între arc și slotul bracketului există un grad de libertate se poate discuta despre o configurație pasivă, forța de frecare fiind influențată doar de forța generată de sistemul de ligaturare și coeficientul de frecare. În momentul în care bascularea mezio-distală a dintelui determină apariția unei angulații între bracket și arc care anulează jocul arcului în bracket, se discută despre o configurație activă, situație în care forța de frecare crește. Atunci când unghiul dintre arc și slotul bracketului se mărește substanțial și proprietățile elastice ale materialelor aflate în contact sunt depășite, mișcarea ortodontică este întreruptă (Articolo și Kusy, 1999).

O altă variabilă ce poate influența forța de frecare dintr-un ansamblu ortodontic este reprezentată de distanța dintre bracketuri. Distanța dintre bracketuri, asemeni angulației bracket-arc, variază cu tipul și severitatea malpozițiilor. (Whitley și Kusy, 2007).

7.2 SCOP ȘI OBIECTIVE

Scopul studiului îl reprezintă evaluarea influenței pe care angulația bracket-arc și distanța dintre bracketuri o exercită asupra forțelor de frecare statică de la interfața sistemului ortodontic.

În acest sens, *obiectivele* studiului au vizat:

1. compararea forțelor de frecare statică pentru diferite angulații bracket-arc;
2. evaluarea modului în care distanța dintre bracketuri influențează forțele de frecare;
3. elaborarea unui model analitic de calculare a forțelor de frecare pentru sistemul ortodontic studiat;
4. compararea forțelor de frecare determinate analitic și măsurate in vitro, în vederea validării modelului analitic considerat.

7.3 MATERIAL ȘI METODĂ

În vederea atingerii obiectivelor stabilite am realizat un stand de testare (figura 7.1) cu trei bracketuri dispuse rectiliniu pe un suport vertical, angulația bracketului central față de arcul ortodontic fiind ajustabilă. Pentru a studia și influența distanței dintre bracketuri (D) asupra forței de frecare statică am creat două plăci verticale cu caracteristici identice, cu excepția spațierii dintre bracketuri ce a diferit ($D_1=40$ mm și $D_2=80$ mm). Detaliile standului experimental sunt prezentate în capitolul 3 al lucrării.



Figura 7.1 Stand de testare cu arcul ortodontic atașat de cele trei bracketuri și pregătit pentru aplicarea forțelor de tracțiune

Lotul de cercetare a inclus bracketuri de incisivi inferiori realizate din oțel inoxidabil, cu lățime de 2.54 mm, prescripție MBT și slot de 0.022x0.028". M-am oprit asupra acestui tip de bracketuri deoarece informația din slot nu include angulație mezio-distală (tip=0°) iar torque-ul de

-6° nu influențează rezultatele deoarece și bracketurile de ghidaj ale arcului au prezentat aceeași informație. Am ales utilizarea unor segmente drepte de arcuri rectangulare, de dimensiune 0.019x0.025" din SS, acest tip de arc fiind utilizat de rutină în tratamentul ortodontic iar, conform autorilor Whitley și Kusy (2007), efectele angulației bracket-arc sunt cel mai bine evidențiate cu cât arcul ocupă mai mult din slotul bracketului.

Am ales valorile angulației bracket-arc ($\theta = 0^\circ, 3.5^\circ$ și 5°) astfel încât să poată fi analizate configurații atât pasive cât și active ale sistemului ortodontic propus. Dacă configurația pasivă este considerată pentru unghiul $\theta = 0^\circ$, Kusy și Whitley (1999) stabilesc configurația activă atunci când θ depășește unghiul critic (θ_c). Așa cum am arătat în capitolul 3 al lucrării, autorii au propus o

relație pentru determinarea acestuia:
$$\theta_c = \frac{57.32 \cdot (1 - h/H)}{B/H},$$

în care h este dimensiunea verticală a arcului, H este înălțimea slotului, iar B este lățimea bracketului. Utilizând această formulă, am calculat pentru cazul studiat o valoare a unghiului θ_c de 1.715° . Astfel, unghiurile 3.5° și 5° au fost reprezentative pentru configurații active bracket - arc. Manevrarea dispozitivului de testare și înregistrarea datelor a urmărit protocolul prezentat în capitolul dedicat "Metodologiei generale a cercetării științifice".

În cea de-a doua parte a studiului am elaborat un model analitic pentru calcularea forțelor de frecare, adaptat sistemului ortodontic descris în studiul experimental. Calculul analitic se bazează pe teoria frecării din mecanica clasică precum și a mediului elastic din rezistența materialelor. Modelul prezentat pornește de la și dezvoltă analiza efectuată în studiul realizat de Zufall și Kusy (2000). În vederea verificării rezultatelor modelului, am înlocuit coeficienții ecuației determinate analitic cu valorile dimensionale și caracteristicile mecanice ale elementelor utilizate în cadrul testelor, comparând la final cele două valori. În acest sens calculele au fost realizate cu ajutorul pachetului de programe MATLAB (versiunea 6.3).

7.4 REZULTATE

În tabelul VII.1 sunt prezentate valorile medii și deviațiile standard ale forțelor de frecare statică măsurate, în funcție de angulația bracket-arc și distanța dintre bracketuri. Pentru o reliefare mai bună a influenței fiecărui parametru în parte, rezultatele sunt evidențiate separat, în funcție de fiecare variabilă în parte.

Tabel VII.1 Valorile forțelor de frecare statică în funcție de unghiul θ și distanța dintre bracketuri

θ D	0°		3.5°		5°		p
	Valoare medie	Deviație standard	Valoare medie	Deviație standard	Valoare medie	Deviație standard	
D1	5.18	0.389	5.663	0.292	10.299	0.389	<0.001** (p<0.001)*
D2	2.483	0.302	2.959	0.266	5.05	0.227	<0.001** (p=0.003)*
p	<0.05*** (p=0.03)*		<0.001*** (p=0.005)*		<0.05*** (p=0.002)*		

* Shapiro-Wilk Test, ** Kruskal-Wallis H Test *** Mann-Whitney U Test

7.4.1. Distribuția forțelor de frecare statică în funcție de angulația bracket-arc

Conform rezultatelor atât în cazul valorilor înregistrate pentru distanța D1 între bracketuri și cât și pentru D2, forțele de frecare statică au fost mai reduse în cazul configurației pasive ($\theta = 0^\circ$) comparativ cu cea activă ($\theta = 3.5^\circ$ și 5°). Utilizând testele post-hoc (tabel VII.2) am constatat că diferențele între forțele de frecare generate în cazul configurației pasive și cele produse în condițiile unui unghi θ de 3.5° sunt semnificative doar în cazul distanței mai mari între bracketuri.

Tabel VII.2 Perechi de angulații bracket-arc comparate prin teste post-hoc

θ°		D1	D2
0°	3.5°	p>0.05*	p<0.05*
0°	5°	p<0.01*	p<0.01*
3.5°	5°	p<0.01*	p<0.01*

*Dunn-Bonferroni Test

Forțele de frecare statică obținute pentru unghiul bracket-arc de 5° au fost semnificativ mai mari față de cele generate pentru unghiului θ de 0° , în cazul ambelor distanțe dintre bracketuri studiate. Diferențe semnificative între forțele de frecare statică s-au remarcat și între cele două configurații active studiate, în sensul unor valori mai ridicate în cazul angulației bracket-arc mai mare (5°). Rezultatele evidențiază astfel o tendință ascendentă a forțelor de frecare statică de la interfața sistemului ortodontic odată cu creșterea valorii angulației bracket-arc.

7.4.2 Distribuția forțelor de frecare statică în funcție de distanța dintre bracketuri

În cazul tuturor testelor, între valorile obținute pentru cele două distanțe dintre bracketuri diferențele au fost semnificative statistic. Datele din tabelul VII.1 evidențiază că, indiferent de

angulația bracket-arc folosită, forțele de frecare statică au fost mai mari pentru distanța D1. Diferențele între valorile obținute pentru D1 și D2 au variat între 2.697 N și 5.249 N, cea mai mare diferență observându-se în cazul unghiului θ de 5° , ceea ce indică o corelație între forța de frecare, angulația bracket-arc și distanța dintre bracketuri.

7.4.3 Modelul analitic al sistemului ortodontic studiat

Sistemul ortodontic analizat în acest capitol constituit din trei bracketuri, două cu poziție fixă și unul central, ce suportă basculare mezială/distală. Luând în considerare cazurile din mecanica clasică prezentate în partea generală a lucrării (capitolul 3) și sistemul ortodontic propus în acest studiu, se analizează o porțiune de arc, în cazul în care bracketul este înclinat cu unghiul θ față de orizontală, iar unghiul de încovoiere al arcului este θ_c (figura 7.2). În vederea evidențierii variabilelor de interes (angulație bracket-arc și distanța dintre bracketuri) nu a fost luată în considerare forța generată de contactul dintre ligatura elastomerică și arc ortodontic.

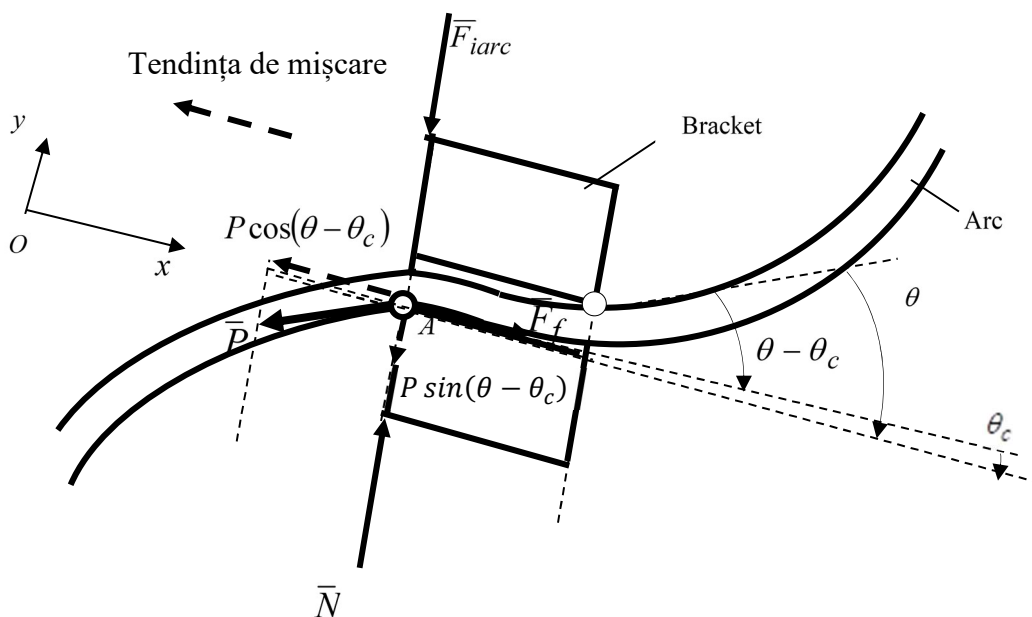


Figura 7.2 Reprezentare schematică a forțelor care acționează asupra sistemului ortodontic (după Zufall și Kusy, 2000)

În această situație, forțele care acționează în punctul de contact A dintre bracket și arc (figura 7.2) sunt: forța de tracțiune P , care se descompune în componentele $P \cos(\theta - \theta_c)$ și

$P \sin(\theta - \theta_c)$, forța de frecare \bar{F}_f , forța de încovoiere a arcului $\bar{F}_{i \text{ arc}}$ și reacțiunea normală \bar{N} . Este de menționat că greutatea $M \cdot \bar{g}$ este mult mai mică în comparație cu forța de încovoiere a arcului $\bar{F}_{i \text{ arc}}$, astfel încât poate să nu fie luată în considerare.

Pentru echilibru trebuie îndeplinită ecuația vectorială (Voinea *et al.*, 2009):

$$\bar{P} + \bar{F}_f + \bar{F}_{i \text{ arc}} + \bar{N} = 0,$$

care conduce, cu ajutorul ecuațiilor scalare echivalente la condiția de echilibru static pe care trebuie să o îndeplinească forța de tracțiune, adică:

$$P \leq \frac{\mu_0 F_{i \text{ arc}}}{\cos(\theta - \theta_c) - \mu_0 \sin(\theta - \theta_c)}. \quad (1)$$

În relația (1) trebuie determinată forța de încovoiere a arcului $\bar{F}_{i \text{ arc}}$, ceea ce implică scrierea ecuației diferențiale a liniei elastice pentru un element prismatic de lungime diferențial mică dx , obținându-se:

$$w'' = -\frac{M(x)}{EI}. \quad (2)$$

În relația (2) E este modulul de elasticitate, $I = I_y = \frac{bh^3}{12}$ este momentul de inerție geometric corespunzător axei y , b corespunde lățimii arcului ortodontic, h corespunde înălțimii arcului ortodontic, w este deformația, iar $M(x)$ este momentul de încovoiere, ca funcție de abscisa x .

Pentru determinarea momentului de încovoiere $M_O = F_{i \text{ arc}} \cdot d$ produs de bracket și normal pe arc, se consideră brațul forței determinat astfel încât punctul de aplicație al acesteia se află la extremitatea mezială și distală a slotului bracketului, adică:

$$d \cong \frac{B}{\cos(\theta - \theta_c)}, \quad (3)$$

Modelul de studiu, care ia în considerare toate mărimile determinate, constă dintr-o bară de lungime $L = 2 \cdot D/2 - B$ ($D/2$ - distanța interbracket, B - lățimea bracketului), la mijlocul căreia acționează M_O . Înlocuind legăturile fizice din capetele A și B cu reacțiunile corespunzătoare, se obține un sistem static nedeterminat.

În continuare, se secționează elementul de arc considerat, în două puncte arbitrare C și D astfel încât o secțiune să nu conțină momentul M_O , iar alta să îl conțină. În punctele C și D se introduc forțele tăietoare T și momentele de încovoiere corespunzătoare $M_1(x)$ și $M_2(x)$. Se scriu

ecuațiile de momente în raport cu punctele C și D , iar după dezvoltarea calculelor corespunzătoare se obțin:

$$M_O = F_{i \text{ arc}} \cdot d; w'|_{x=L/2} = \text{tg}(\theta - \theta_c) \quad (4)$$

ceea ce permite determinarea forței de încovoiere a arcului:

$$F_{i \text{ arc}} = \frac{16EI}{B \cdot (2D - B)} \cdot \sin(\theta - \theta_c), \quad (5)$$

și implicit a forței de tracțiune:

$$P \leq \frac{16\mu_0 EI}{B \cdot (2D - B)} \cdot \frac{1}{\text{ctg}(\theta - \theta_c) - \mu_0}. \quad (6)$$

Ecuția (6) reprezintă expresia forței de frecare în cazul echilibrului static determinată analitic. Aceasta exprimă relația dintre forța de frecare statică și parametrii geometrici și fizici ai sistemului ortodontic.

În vederea verificării modelului analitic realizat, am introdus caracteristicile elementelor constructive și de material folosite în cadrul testării în expresia (6) și am efectuat calculele cu ajutorul software-ului prezentat în metodologia de lucru. Forțele de frecare statică obținute astfel au variat direct proporțional cu angulația bracket-arc și invers proporțional cu distanța dintre bracketuri (figura 7.3).

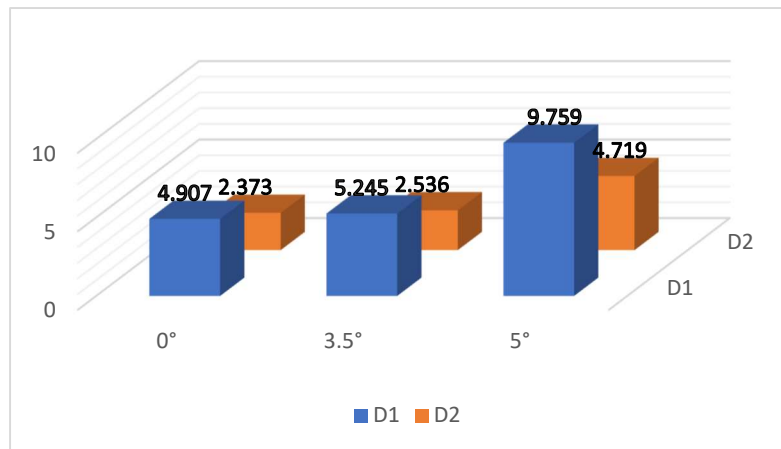


Figura 7.3 Distribuția forțelor de frecare determinate analitic (pe ordonată) pentru diferitele angulații bracket-arc și distanțele D1 și D2 dintre bracketuri

În continuare, forțele de frecare statică obținute analitic au fost comparate cu cele măsurate în cadrul testelor din laborator (tabel VII.3, VII.4).

Tabel VII.3 Diferențele dintre rezultatele calcului analitic și cele experimentale pentru distanța dintre bracketuri de 40 mm

D1	Model Analitic	Test in vitro (valoare medie)	Diferență	
			[N]	%
0°	4.907	5.18	-0.273	5.27
3.5°	5.245	5.663	-0.418	7.38
5°	9.759	10.299	-0.54	5.24

Tabel VII.4 Diferențele dintre rezultatele calcului analitic și cele experimentale pentru distanța dintre bracketuri de 80 mm

D2	Model Analitic	Test in vitro (valoare medie)	Diferență	
			[N]	%
0°	2.373	2.483	-0.11	4.43
3.5°	2.536	2.959	-0.423	14.29
5°	4.719	5.05	-0.331	6.554

Din tabelele VII.3 și VII.4 se poate constata că, asemeni variației din cadrul testelor in vitro, forțele de frecare obținute prin calculul analitic au evidențiat o evoluție ascendentă odată cu creșterea unghiului bracket-arc și cu scăderea distanței dintre bracketuri. Diferențele între cele două tipuri de valori au variat între 0.11 și 0.54 N, iar sub aspect procentual între 4.43 și 14.29%.

7.5 DISCUȚII

Cunoașterea modului în care angulația bracket-arc și distanța dintre bracketuri modifică forța de frecare din sistemul ortodontic influențează eficiența și predictibilitatea tratamentului ortodontic.

7.5.1 Relația dintre variația forței de frecare și angulația bracket-arc

În literatura de specialitate a existat și există un interes constant în ceea ce privește relația dintre variația forței de frecare și angulația bracket-arc. Plecând de la cercetarea lui Kusy și Whitley (1997), care au arătat că în funcție de caracteristicile bracketului și arcului există o angulație specifică dincolo de care fenomenul de încovoiere ocupă rolul dominant în producerea forței de frecare, un număr important de autori au realizat studii asupra relației dintre angulația bracket-arc și forța de frecare, fiecare adoptând o metodologie proprie. Diferențele între metodologii au vizat multiple variabile: de la valoarea unghiului de contact bracket-arc, dimensiunea și aliajul arcului ortodontic, lățimea bracketurilor la dispozitivul de testare folosit.

În ciuda tuturor acestor deosebiri, majoritatea cercetărilor de profil (Articolo și Kusy, 1999; Loftus și Årtun, 2001; Pliska, Beyer și Larson, 2011) au prezentat rezultate similare cu cele din studiul meu, confirmând influența semnificativă a angulației bracket-arc asupra forței de frecare. Și aceștia au observat că valoarea forței de frecare statică crește odată cu angulația bracket-arc. Moore, Harrington și Rock (2004) au studiat efectul pe care înclinarea mezio-distală și vestibulo-orală a bracketurilor o are asupra forței de frecare statică și dinamică și au observat că, chiar și creșteri minime ale înclinației bracketului determină o sporire semnificativă a forței de frecare.

Analiza statistică a valorilor obținute în studiul meu a evidențiat că majorarea forțelor de frecare cu angulația bracket-arc nu urmărește o traiectorie liniară, diferențele dintre forțele de frecare mărindu-se considerabil odată cu creșterea unghiului de contact. Acest rezultat se datorează în mare parte relației dintre angulația bracket-arc și fenomenul de încovoiere. Articolo și Kusy (1999) explică că, atunci când angulația bracket-arc crește, componenta de încovoiere se adaugă componentei de frecare clasică, urmărind principiul suprapunerii. Astfel încovoierea devine principala sursă a forței de frecare totale. Acest fenomen este întâlnit în practica de zi cu zi în diverse etape ale tratamentului ortodontic, cum ar fi deplasarea unui dinte de-a lungul arcadei. În primele etape ale mișcării dentare coroana se înclină, arcul intrând în contact cu colțurile diagonal opuse ale bracketurilor iar forțele de frecare clasice i se asociază și încovoierea determinată de unghiul bracket-arc. Accentuarea acestui unghi peste capacitatea materialelor bracketului și arcului (modul de elasticitate, rigiditate, finisare suprafață) limitează până la sistare mișcarea ortodontică.

Și cercetarea realizată de Nishio *et al.* (2004) indică o creștere a intensității forței de rezistență la deplasare a arcului în bracketuri proporțională cu creșterea unghiului dintre arc și bracket.

7.5.2 Relația dintre variația forței de frecare și distanța dintre bracketuri

Rezultatele studiului meu au indicat o relație invers proporțională între forța de frecare statică și distanța dintre bracketuri. Majoritatea studiilor prezente în literatura de specialitate ce tratează acest subiect au obținut rezultate similare cu cele din acest studiu (Whitley și Kusy, 2007; Yeh *et al.*, 2007; Lombardo *et al.*, 2013; Nucera *et al.*, 2013).

O parte din aceste studii corelează distanța dintre bracketuri cu dimensiunea mezio-distală a bracketurilor din sistemul ortodontic. În acest context, este în general considerat că există o legătură direct proporțională între lățimea bracketului și forța de frecare (Frank și Nikolai, 1980;

Lombardo *et al.*, 2013). Unii autori au arătat că bracketuri mai înguste au fost asociate cu forțe de frecare mai reduse (Kapila *et al.*, 1990).

Din cele prezentate în literatura de specialitate se pare că cea mai plauzibilă explicație pentru rezultatele obținute în acest studiu este determinată de influența pe care distanța dintre bracketuri o are asupra rigidității arcului. Așa cum Frank și Nikolai (1980) subliniază, rigiditatea unei bare este dependentă de caracteristicile materialului (modulul de elasticitate), de forma și dimensiunea, dar și de lungimea segmentului analizat, care în cazul arcului ortodontic studiat este dată de distanța dintre bracketuri.

Există însă și rezultate discordante privind variația forței de frecare statică cu distanța dintre bracketuri. Unele dintre studiile ce prezintă păreri contradictorii argumentează că bracketurile mai late (asociate cu distanțe mai reduse între bracketuri) produc forță de frecare mai mici decât variantele mai înguste, pentru că permit un grad mai redus de îndoire a arcului (Drescher, Bourauel și Schumacher, 1989; Tidy și Orth, 1989).

7.5.3 Relevanța modelului analitic

Stabilirea cu exactitate a forței necesare realizării unei mișcări ortodontice reprezintă un deziderat al specialității ortodontice. Este posibil ca forțele ortodontice prea mici să nu determine mișcarea dentară dorită, în timp ce forțe ortodontice supradimensionate să genereze reacții adverse severe (resorbții radiculare, afectarea vitalității dentare etc.).

Ceea ce face dificilă determinarea cu certitudine a mărimii forței ortodontice este dependența acesteia într-o mare proporție de parametrii biologici, proprii fiecărui pacient în parte. Totuși, este cunoscut faptul că o mare parte din forța ortodontică se pierde sub formă de forță de frecare. Astfel, realizarea unui model analitic de calcul a forței de frecare pentru o anumită configurație ortodontică poate reprezenta un instrument util în aproximarea mai precisă a forței ortodontice în funcție de parametrii aparatului ortodontic utilizat. Altfel spus, estimarea forței de frecare specifică pentru un anumit tip de asociere bracket-arc-ligatură, cu angulație și distanță inter-bracket cunoscute, ar putea reprezenta un adjuvant extrem de util medicului specialist în practica clinică.

Modelul analitic a generat valori ale forței de frecare ce, asemănător rezultatelor experimentale, au variat cu angulația bracket-arc și distanța dintre bracketuri, ceea ce reprezintă un indicator al validării modelului teoretic.

Totuși, analiza cazului printr-o abordare analitică nu a determinat valori identice cu cele obținute experimental. Între rezultatele obținute prin modelul analitic și cele prin testările in vitro au existat diferențe în medie de 0.349 N. Prezența unor diferențe a fost însă preconizată deoarece, așa cum am precizat anterior, modelul matematic nu a luat în considerare forța determinată de ligatura elastomerică asupra arcului. Importanța forțelor generate de prezența ligaturilor elastomerice a fost vast discutată în literatura de specialitate, însă din cauza complexității și variabilității acestei interacțiuni nu există un acord privind o valoare fixă a acestei forțe. Deși modulul de elasticitate și coeficientul de frecare pentru anumite materiale/cupluri de materiale sunt cunoscute, compoziția exactă a acestora, caracteristicile de suprafață și gradul de finisare pot diferi de la un producător la altul. De asemenea, diferențele între valorile măsurate și cele calculate pot fi determinate și de posibilele erori de măsurare din timpul testărilor din laborator.

7.6 CONCLUZII

În contextul configurației sistemului ortodontic discutat în acest studiu am concluzionat că:

- Forța de frecare statică generată într-o configurație bracket-arc pasivă este mai redusă decât cea dintr-o configurație activă. În cazul configurației active, cu cât unghiul de contact dintre arc și bracket depășește mai mult unghiul critic cu atât forțele de frecare sunt mai mari. Din aceste constatări se desprinde importanța practică de a nu accelera tratamentul ortodontic și iniția etapa de distalizare/retrudare înainte de a finaliza pe deplin faza de aliniere și nivelare și a putea introduce pasiv arcul ortodontic pentru etapa următoare.
- Există o relație invers proporțională între forța de frecare statică și distanța dintre bracketuri. În acest sens, în condițiile aceluiași tip de aparat ortodontic, forțele de frecare vor diferi semnificativ între situația unei incongruențe dento-alveolare cu spațiere și cu înghesuire.
- Modelul analitic propus nu poate reda în întregime realitatea clinică, însă poate orienta asupra variației forței de frecare în funcție de caracteristicile sistemului ortodontic analizat. Între valorile măsurate experimental și cele calculate prin ecuația determinată există diferențe, produse cel mai probabil de forța generată de ligatura elastomerică.

CONCLUZII GENERALE ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

CONCLUZII GENERALE

Forța de frecare caracterizează un fenomen plurifactorial cu impact asupra mecanicii ortodontice și implicit asupra eficienței terapeutice. Variabilele mecanice pot influența semnificativ variația forțelor de frecare în ortodonție. În contextul metodologiei de cercetare din cadrul studiului meu doctoral se detașează următoarele concluzii:

I. Forțele de frecare statică de la interfața sistemului ortodontic au variat în funcție de **materialul bracketurilor**.

- **Bracketurile din oțel inoxidabil** au generat forțe de frecare statică mai reduse decât variantele ceramice testate.
- În lotul de **bracketuri ceramice** au existat diferențe în ceea ce privește forța de frecare statică:
 - bracketurile *integral ceramice (alumina poli- și monocristalină)* nu au prezentat diferențe semnificative sub aspectul forțelor studiate;
 - grupul de bracketuri din *alumină policristalină cu slot metalic convențional* a determinat în general forțe de frecare mai reduse decât cel cu bracketuri integral ceramice. Paradoxal însă, bracketurile din *alumină policristalină cu slot metalic autoligaturante* au produs per ansamblu forțe de frecare statică mai mari decât bracketurile realizate doar din alumină policristalină.
- Sub aspect clinic constatările enumerate sugerează că, din perspectiva unui sistem ortodontic cu forțe de frecare reduse, bracketurile metalice din oțel inoxidabil sunt de preferat celor ceramice. Dacă totuși sunt solicitate bracketuri fizionomice, cele convenționale din ceramică modificate cu slot metalic pot reprezenta o alternativă terapeutică mai bună comparativ cu bracketurile convenționale integral fizionomice, îmbinând estetica bracketurilor ceramice cu valori ale forței de frecare statică mai reduse.

II. Forța de frecare statică de la interfața sistemului ortodontic diferă semnificativ în cazul **bracketurilor convenționale și autoligaturante**. Bracketurile *autoligaturante* au produs în general forțe de frecare statică mai reduse decât bracketurile *convenționale*, totuși reducerea forțelor de frecare este semnificativă doar în primele etape ale tratamentului. În fazele finale, în care se utilizează arcuri rectangulare de dimensiuni mari, diferențele între forțele de frecare

produse de bracketurile convenționale și autoligaturante se reduc, fiind posibil ca bracketurile autoligaturante să determine uneori forțe de frecare chiar mai mari decât variantele convenționale.

III. Rezultatele cercetării au indicat variația forțelor de frecare statică în funcție de **caracteristicile arcului ortodontic** (material, înveliș fizionomic, dimensiune și configurație pe secțiune).

- **Materialul** arcului a influențat forțele de frecare static pentru toate tipurile de cupluri bracket-arc studiate, arcurile din nichel-titan generând valori mai reduse decât cele din oțel inoxidabil.
- **Învelișul fizionomic** ce acoperă arcul a determinat diferențe în ceea ce privește forțele de frecare statică. Astfel, *arcurile nefizionomice* au produs cele mai reduse forțe de frecare statică iar la polul diametral opus s-au poziționat arcurile *integral fizionomice*, cu cele mai mari valori ale acestor forțe. Totuși, intermediar între cele două tipuri de arcuri anterior menționate s-au situat arcurile *semi-fizionomice*. Între valorile forțelor de frecare statică produse de cele două tipuri de arcuri fizionomice (cu înveliș polimeric cu argint și respectiv din rășină epoxidică) nu s-au remarcat diferențe semnificative.
- **Dimensiunea și configurația pe secțiune** ale arcurilor au reprezentat factori de influență pentru forța de frecare statică măsurată la interfața bracket-arc. În acest sens arcurile de 0.019x0.025" au generat forțe de frecare statică semnificativ mai mari comparativ cu arcurile de 0.016".

IV. Modificări ale valorilor forțelor de frecare statică de la interfața sistemului ortodontic au fost înregistrate atât în cazul variației **angulației bracket-arc** cât și a **distanței dintre bracketuri**.

- În situația unei **configurații bracket-arc pasive** forța de frecare statică a avut valori mai reduse decât într-o configurație activă.
- În ceea ce privește **configurația activă**, forțele de frecare statică au crescut cu cât **unghiul de contact** dintre arc și bracket a depășit mai mult unghiul critic.
- A existat o evoluție ascendentă a forțelor de frecare statică odată cu scăderea **distanței dintre bracketuri**.
- Datele obținute prezintă aplicabilitate practică în sensul adaptării componentelor aparatului ortodontic fix poliagregat și etapizării tratamentului în funcție de tipul și gradul malpozițiilor dentare. Astfel, în cazul unei incongruențe dento-alveolare cu înghesuire, cu malpoziții severe,

angulația bracket-arc se accentuează iar distanța dintre bracketuri scade. De asemenea este important ca etapa de aliniere dentară și nivelare a planului de ocluzie să fie complet finalizată înaintea introducerii unui arc de dimensiune și rigiditate mai crescute, pentru a evita mărirea valorilor forțelor de frecare.

V. **Modelul analitic** al sistemului ortodontic studiat a confirmat dependența forțelor de frecare statică de interrelația dintre componentele aparatului fixe poliagregate.

- Rezultatele calculelor analitice au variat în același sens cu cele ale testelor de laborator (direct proporțional cu angulația bracket-arc și invers proporțional cu distanța dintre bracketuri), ceea ce reprezintă un indicator al **validării modelului analitic**.
- Cu toate acestea, între valorile obținute analitic și cele măsurate in vitro s-au evidențiat **diferențe**, determinate probabil de forța generată de ligatura elastomerică.
- Modelul analitic propus nu poate fi extrapolat ca atare în realitatea clinică, deoarece nu poate reda complexitatea interacțiunilor dintre variabilele mecanice și biologice ce au loc intraoral. Totuși, modelul poate oferi medicului specialist informații cu privire la forțele de frecare ce vor lua naștere la interfața sistemului ortodontic în funcție de caracteristicile elementelor constitutive ale aparatului fixe alese (materialul bracketului și arcului, dimensiunea slotului, lățimea bracketului, dimensiunea arcului) și de particularitățile anomaliei (ce influențează distanța dintre bracketuri și angulația bracket-arc).

Rezultatele cercetării trebuie privite însă critic, prin perspectiva **limitărilor** asociate studiilor in vitro. Cu toate că literatura de specialitate cuprinde multiple studii referitoare la forța de frecare în sistemul ortodontic, lipsa de omogenitate a metodologiei de lucru impune anumite rezerve în ceea ce privește analiza comparativă a rezultatelor.

CONTRIBUȚII PROPRII

Cercetarea mea aduce o contribuție prin abordarea pluri- și interdisciplinară a tematicii studiate, deoarece tratarea acestui subiect a presupus coroborarea unor noțiuni ce aparțin de diferite ramuri științifice (ortodonție, tehnologia materialelor dentare, chimie, rezistența materialelor și mecanică), de la prima parte a tezei până la aplicarea lor practică în cadrul secțiunii originale a acesteia. Mi-am propus ca prin *abordarea integrată* a mai multor variabile, spre deosebire de alte studii unde parametrii au fost analizați izolat, să conturez o *image de ansamblu* asupra factorilor

mecanici ce intervin în variația forței de frecare statică într-un sistem ortodontic și respectiv asupra interdependenței acestora.

Autenticitatea lucrării reiese și din completarea studiului de laborator cu un *model analitic*, care să permită aprecierea comparativă a forțelor de frecare statică în funcție de caracteristicile sistemului ortodontic. Chiar dacă modelul analitic descris se adresează unui anumit tip de configurație a sistemului ortodontic și nu poate fi extrapolat momentan la toate tipurile de ansambluri bracket-arc-ligatură posibile, acesta poate servi drept bază pentru elaborarea unui protocol fundamentat teoretic de alegere a bracketurilor și arcurilor, din perspectiva forțelor de frecare apărute într-un sistem ortodontic fix. Aproximând forța de frecare din sistemul ortodontic se poate aprecia mai ușor ce procent din forța ortodontică aplicată de către medic este într-adevar transmisă unităților dentare și astfel crește predictibilitatea tratamentului ortodontic.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

Al-ghroosh, D. H. *et al.* (2018) „Assessment of Static Friction Generated from Different Aesthetic Archwires (In-Vitro Study)”, *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 10(12), pp. 3310-3312.

Alsubie, M. și Talic, N. (2016) „Variables affecting the frictional resistance to sliding in orthodontic brackets”, *Dental, Oral and Craniofacial Research*, 2(3), pp. 271-275. doi: 10.15761/DOCR.1000160.

Angolkar, P. *et al.* (1990) „Evaluation of friction between ceramic brackets and orthodontic wires of four alloys”, *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 98(6), pp. 499-506.

Arash, V. *et al.* (2015) „Evaluation of Static Friction of Polycrystalline Ceramic Brackets after Conditioning with Different Powers of Er : YAG Laser”, *International Journal of Dentistry*, 2015. Valabil la: <https://www.hindawi.com/journals/ijod/2015/749616/>.

Arici, N., Akdeniz, B. S. și Arici, S. (2015) „Comparison of the frictional characteristics of aesthetic orthodontic brackets measured using a modified in vitro technique”, *Korean Journal of Orthodontics*, 45(1), pp. 29-37. doi: 10.4041/kjod.2015.45.1.29.

Articolo, L. C. și Kusy, R. P. (1999) „Influence of angulation on the resistance to sliding in fixed appliances.”, *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics*, 115(1), pp. 39-51. doi: 10.1016/S0889-5406(99)70314-8.

Bandeira, A. M. *et al.* (2011) „Influence of thermal or chemical degradation on the frictional force of an experimental coated NiTi wire”, *Angle Orthodontist*, 81(3), pp. 484-489. doi: 10.2319/042810-232.1.

Burrow, S. J. (2009) „Friction and resistance to sliding in orthodontics: A critical review”,

American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics. American Association of Orthodontists, 135(4), pp. 442-447. doi: 10.1016/j.ajodo.2008.09.023.

Cacciafesta, V. *et al.* (2003) „Evaluation of friction of conventional and metal-insert ceramic brackets in various bracket-archwire combinations”, *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 124(4), pp. 403-409. doi: 10.1016/S0889-5406(03)00501-8.

Dickson, J. A., Jones, S. P. și Davies, E. H. (1994) „A comparison of the frictional characteristics of five initial alignment wires and stainless steel brackets at three bracket to wire angulations--an in vitro study.”, *British journal of orthodontics*, 21(1), pp. 15-22. doi: 10.1179/bjo.21.1.15.

Doshi, U. H. și Bhad-Patil, W. A. (2011) „Static frictional force and surface roughness of various bracket and wire combinations”, *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. American Association of Orthodontists, 139(1), pp. 74-79. doi: 10.1016/ j.ajodo.2009.02.031.

Drescher, D., Bourauel, C. și Schumacher, H. (1989) „Frictional forces between bracket and archwire”, *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 96(5), pp. 397-404.

de Franco, D., Spiller, R. și Von Fraunhofer, J. A. (1995) „Frictional resistances using Teflon-coated ligatures with various bracket-archwire combinations”, *The Angle orthodontist*, 65(1), pp. 63-74.

Frank, C. A. și Nikolai, R. J. (1980) „A comparative study of frictional resistances between orthodontic bracket and arch wire”, *American Journal of Orthodontics*, 78(6), pp. 593-609. doi: 10.1016/0002-9416(80)90199-2.

Henao, S. P. și Kusy, R. P. (2004) „Evaluation of the frictional resistance of conventional and self-ligating bracket designs using standardized archwires and dental typodonts”, *Angle Orthodontist*, 74(2), pp. 202-211. doi: 10.1043/0003-3219(2004)074<0202:EOTFRO>2.0.CO;2.

Ionescu, E. *et al.* (2001) *Ortodonție și Ortopedie Dento-Faciala - ghid clinic și terapeutic*. București: Editura Cerma.

Kapila, S. *et al.* (1990) „Evaluation of friction between edgewise stainless steel brackets and orthodontic wires of four alloys”, *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 98(2), pp. 117-126. doi: 10.1016/0889-5406(90)70005-W.

Kim, Y. *et al.* (2014) „Comparison of frictional forces between aesthetic orthodontic coated wires and self-ligation brackets”, *Korean Journal of Orthodontics*, 44(4), pp. 157-167. doi: 10.4041/kjod.2014.44.4.157.

Krishnan, M., Kalathil, S. și Abraham, K. M. (2009) „Comparative evaluation of frictional forces in active and passive self-ligating brackets with various archwire alloys”, *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*. American Association of Orthodontists, 136(5), pp. 675-682. doi: 10.1016/j.ajodo.2007.11.034.

Krishnan, V. și Kumar, K. J. (2004) „Mechanical properties and surface characteristics of three archwire alloys”, *Angle Orthodontist*, 74(6), pp. 825-831. doi: 10.1043/0003-3219(2004)074<0825:MPASCO>2.0.CO;2.

Kusy, R. P. (1997) „A review of contemporary archwires: Their properties and characteristics”,

Angle Orthodontist, pp. 197-208. doi: 10.1043/0003-3219(1997)067<0197:AROCAT>2.3.CO;2.

Kusy, R. P. și Whitley, J. Q. (1990) „Effects of surface roughness on the coefficients of friction in model orthodontic systems”, *Journal of Biomechanics*, 23(9), pp. 913-925. doi: 10.1016/0021-9290(90)90356-8.

Kusy, R. P. și Whitley, J. Q. (1999) „Influence of archwire and bracket dimensions on sliding mechanics: Derivations and determinations of the critical contact angles for binding”, *European Journal of Orthodontics*, 21(2), pp. 199-208. doi: 10.1093/ejo/21.2.199.

Lee, S. M. și Hwang, C. J. (2015) „A comparative study of frictional force in self-ligating brackets according to the bracket-archwire angulation, bracket material, and wire type”, *Korean Journal of Orthodontics*, 45(1), pp. 13-19. doi: 10.4041/kjod.2015.45.1.13.

Loftus, B. P. *et al.* (1999) „Evaluation of friction during sliding tooth movement in various bracket-arch wire combinations”, *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, (116), pp. 336-345.

Loftus, B. P. și Årtun, J. (2001) „A model for evaluating friction during orthodontic tooth movement”, *The European Journal of Orthodontics*, 23(3), pp. 253-261. doi: 10.1093/ejo/23.3.253.

Lombardo, L. *et al.* (2013) „The effect of temperature on the mechanical behavior of nickel-Titanium orthodontic initial archwires”, *Angle Orthodontist*, 83(2), pp. 298-305. doi: 10.2319/040612-287.1.

Matias, M. *et al.* (2018) „Comparison of deflection forces of esthetic archwires combined with ceramic brackets”, *Journal of applied oral science*, 8, pp. 1-9. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-7757-2017-0220>.

Michelberger, D. J. *et al.* (2000) „The friction and wear patterns of orthodontic brackets and archwires in the dry state”, *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 118(6), pp. 662-674. doi: 10.1067/mod.2000.105529.

Moore, M. M., Harrington, E. și Rock, W. P. (2004) „Factors affecting friction in the pre-adjusted appliance”, *European Journal of Orthodontics*, 26(6), pp. 579-583. doi: 10.1093/ejo/26.6.579.

Muguruma, T. *et al.* (2017) „Characterization of the coatings covering esthetic orthodontic archwires and their influence on the bending and frictional properties”, *Angle Orthodontist*, 87(4), pp. 610-617. doi: 10.2319/022416-161.1.

Nishio, C. *et al.* (2004) „In vitro evaluation of frictional forces between archwires and ceramic brackets”, *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 125(1), pp. 56-64. doi: 10.1016/j.ajodo.2003.01.005.

Nucera, R. *et al.* (2013) „Analysis of the characteristics of slot design affecting resistance to sliding during active archwire configurations”, *Progress in Orthodontics*, 14(1). doi: 10.1186/2196-1042-14-35.

Pimentel, R. F. *et al.* (2013) „Evaluation of the friction force generated by monocristalyne and policristalyne ceramic brackets in sliding mechanics”, *Dental Press Journal of Orthodontics*, 18(1), pp. 121-127. doi: 10.1590/S2176-94512013000100023.

Pliska, B. T. *et al.* (2014) „Effect of applied moment on resistance to sliding among esthetic self-ligating brackets”, *Angle Orthodontist*, 84(1), pp. 134-139. doi: 10.2319/040113-250.1.

Pliska, B. T., Beyer, J. P. și Larson, B. E. (2011) „A comparison of resistance to sliding of self-ligating brackets under an increasing applied moment”, *Angle Orthodontist*, 81(5), pp. 794-799. doi: 10.2319/111510-666.1.

Proffit, W. *et al.* (2019) *Contemporary orthodontics 6th edition*. VI. Philadelphia: Elsevier.

Rudge, P., Sherriff, M. și Bister, D. (2015) „A comparison of roughness parameters and friction coefficients of aesthetic archwires”, *European Journal of Orthodontics*, 37(1), pp. 49-55. doi: 10.1093/ejo/cju004.

Ryan, R. *et al.* (1997) „The effects of ion implantation on rate of tooth movement: an in vitro model”, *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics*, 112(1), pp. 64-68.

Sadique, S. E. *et al.* (2006) „In vitro frictional behavior and wear patterns between contemporary and aesthetic composite orthodontic brackets and archwires”, *Wear*, 261(10), pp. 1121-1139. doi: 10.1016/j.wear.2006.03.035.

Silva, D. L. Da *et al.* (2013) „Cross-section dimensions and mechanical properties of esthetic orthodontic coated archwires”, *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 143(4 SUPPL), pp. 85-91. doi: 10.1016/j.ajodo.2012.09.009.

Singh, V. *et al.* (2014) „Comparative evaluation of frictional forces between different archwire-bracket combinations”, *Orthodontic Journal of Nepal*, 4(1), pp. 22-28.

Sukh, R. *et al.* (2013) „A comparative study of frictional resistance during simulated canine retraction on typodont model”, *Journal of Orthodontic Science*, 2(2), p. 61. doi: 10.4103/2278-0203.115091.

Tageldin, H. *et al.* (2016) „Resistance to Sliding in Orthodontics: A Systematic Review”, *Jacobs Journal of Dentistry and Research*, 3(2), pp. 1-32. Valabil la: <http://www.sciencedomain.org/abstract/15531>.

Tecco, S. *et al.* (2007) „An in vitro investigation of the influence of self-ligating brackets, low friction ligatures, and archwire on frictional resistance”, *European Journal of Orthodontics*, 29(4), pp. 390-397. doi: 10.1093/ejo/cjm007.

Thomas, S., Sherriff, M. și Birnie, D. (1998) „A comparative in vitro study of the frictional characteristics of two types of self-ligating brackets and two types of pre-adjusted edgewise brackets tied with elastomeric ligatures”, *European Journal of Orthodontics*, 20(5), pp. 589-596. doi: 10.1093/ejo/20.5.589.

Thorstenson, G. A. și Kusy, R. P. (2001) „Resistance to sliding of self-ligating brackets versus conventional stainless steel twin brackets with second-order angulation in the dry and wet (saliva) states”, *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 120(4), pp. 361-370. doi: 10.1067/mod.2001.116090.

Tidy, D. C. și Orth, D. (1989) „Frictional forces in fixed appliances”, *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 96(3), pp. 249-254. doi: 10.1016/0889-5406(89)90462-9.

Tselepis, M., Brockhurst, P. și West, V. C. (1994) „The dynamnic frictional resistance between

orthodontic brackets and arch wires”, *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 106(2), pp. 131-138. doi: 10.1016/S0889-5406(94)70030-3.

Voinea, R., Deciu, E. și Dragomirescu, C. (2009) *Technische Mechanik*. Editura ALMA Crai

Whitley, J. Q. și Kusy, R. P. (2007) „Influence of interbracket distances on the resistance to sliding of orthodontic appliances”, *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 132(3), pp. 360-372. doi: 10.1016/j.ajodo.2006.04.032.

Williams, C. L. și Khalaf, K. (2013) „Frictional Resistance of Three Types of Ceramic Brackets”, *Journal of Oral and Maxillofacial Research*, 4(4), pp. 1-7. doi: 10.5037/jomr.2013.4403.

Yeh, C. L. *et al.* (2007) „In-vitro evaluation of frictional resistance between brackets with passive-ligation designs”, *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics*, 131(6), pp. 11-22. doi: 10.1016/j.ajodo.2006.09.041.

Zufall, S. W. și Kusy, R. P. (2000) „Sliding Mechanics of Coated Composite Wires and the Development of an Engineering Model for Binding”, *Angle Orthodontist*, 70(1), pp. 34-47.