



VNIVERSITAT
D VALÈNCIA

Facultat de Medicina i Odontologia

INFLUÈNCIA DE LA CURVATURA DEL CONDUCTE RADICULAR I DEL MOVIMENT EN LA FATIGA CÍCLICA DELS INSTRUMENTS DE SISTEMES DE LLIMA ÚNICA

TESI DOCTORAL

**Programa de doctorat
“Fisiopatologia de l’aparell estomatognàtic”**

DEPARTAMENT D’ESTOMATOLOGIA
Unitat docent de Patologia i Terapèutica Dentàries

Autora:

Lda. Na María Aránzazu Climent Gil

Direcció:

Prof. Dr. En Leopoldo Forner Navarro

Profa. Dra. Na María Carmen Llena Puy

València, Setembre de 2015.



VNIVERSITATIS VALÈNCIAE

Departament d'Estomatologia

Unitat Docent de Patologia i Terapèutica Dentàries

En Leopoldo Forner Navarro i Na M^a Carmen Llena Puy, Professor i Professora Titulars del Departament d'Estomatologia de la Facultat de Medicina i Odontologia de la Universitat de València,

fan constar que,

la tesi doctoral "Influència de la curvatura del conducte radicular i del moviment en la fatiga cíclica dels instruments de sistemes de lima única", presentada per la llicenciada Na María Aránzazu Climent Gil, ha estat realitzada sota la nostra direcció i reuneix les condicions necessàries per a la seua presentació i defensa.

La qual cosa signem als efectes oportuns,

Prof. Dr. Forner Navarro

Prof^a Dr^a Llena Puy

València, 14 de setembre de 2015

AGRAÏMENTS:

Després de varis anys treballant per a que aquesta Tesi arribara a bon port he de reconèixer l'ajuda de tots els que heu estat al meu costat, recolzant-me i animant-me dia a dia.

Vull agrair als meus directors de Tesi el Dr. Forner i la Dra. Llana, la seua feina com a docents, la seua implicació i el seu amor per la investigació. Us done les gràcies per haver-me deixat sempre obertes les portes de la Universitat i per tot l'afany, entrega i esforç que heu posat en aquest treball.

A la meua família, sou un dels pilars més importants de la meua vida. Tinc molta sort amb tots vosaltres: els meus pares, el meu germà i els meus oncles, em feu sentir molt orgullosa.

Vull valorar en especial l'ajuda de Xavier Jiménez, perquè sense ell aquest treball no s'haguera pogut realitzar. De manera desinteressada ha compartit tots els seus coneixements en Enginyeria Industrial aplicats en aquest camp de l'Endodòncia. Estic molt agraïda per totes les hores que has dedicat davant del teu ordinador.

Als meus amics, pels moments que passe amb vosaltres i pels vostres ànims.

I a Dani, gràcies per ser com eres, per la teua paciència i per ajudar-me tant, t'estime moltíssim.

*Quan surts per fer el viatge cap a Ítaca,
has de pregar que el camí sigui llarg,
ple d'aventures, ple de coneixences.*

Kavafis, 1911 (Traducció de Carles Riba).

Índex

1. INTRODUCCIÓ GENERAL	14
1.1 CONCEPTE D'ENDODÒNCIA I FONAMENTS DEL TRACTAMENT DEL CONDUCTE RADICULAR.	14
1.2 INSTRUMENTS PER A NETEJAR I CONFORMAR EL CONDUCTE RADICULAR.	16
1.2.1 TERMINOLOGIA DE LES PROPIETATS FÍSQUES DELS INSTRUMENTS.	16
1.2.2 CLASSIFICACIÓ DELS INSTRUMENTS UTILITZATS PER A NETEJAR I CONFORMAR L'ESPAI DEL CONDUCTE RADICULAR.	17
1.2.3 CARACTERÍSTIQUES GENERALS DE LES LLIMES DE NITÍ ACCIONADES PER MOTOR.	20
1.3 EVOLUCIÓ DELS TIPUS D'ALIIATGES I MÈTODES DE FABRICACIÓ. ..	25
1.3.1 PROPIETATS METAL·LÚRGIQUES DELS ALIIATGES DE NITÍ	25
1.3.2 NOUS ALIIATGES DE NITÍ.....	27
1.3.3 TRACTAMENT DE SUPERFÍCIE DE LES LLIMES DE NITÍ	31
1.4 DESENVOLUPAMENT DELS MOVIMENTS ALTERNANTS I DELS SISTEMES DE LLIMA ÚNICA.	32
1.4.1 HISTÒRIA DELS SISTEMES DE MOVIMENT ALTERNANT ACCIONATS PER MOTOR	33
1.4.2 SISTEMES DE LLIMA ÚNICA AMB MOVIMENTS ALTERNANTS.	35
1.5 LIMITACIONS DE LES LLIMES DE NITÍ ACCIONADES MECÀNICAMENT.	37
1.5.1 MECANISMES DE FRACTURA.	37
1.5.2 FACTORS QUE INFLUEIXEN EN LES FRACTURES DELS INSTRUMENTS.	39
1.6 AVALUACIÓ DE LA RESISTÈNCIA A LA FATIGA CÍCLICA DE LES LLIMES DE NITÍ UTILITZADES AMB MOVIMENTS ALTERNANTS EN DIFERENTS CURVATURES. REVISIÓ BIBLIOGRÀFICA.	49
1.7 JUSTIFICACIÓ DE L'ESTUDI.	67
1.8 OBJECTIUS	68
1.8.1 OBJECTIU GENERAL	68
1.8.2 OBJECTIUS ESPECÍFICS.....	68
2. METODOLOGIA.....	70
2.1 DE LA REVISIÓ BIBLIOGRÀFICA.	70
2.2 DE L'ESTUDI.	70
2.2.1 DESCRIPCIÓ DE LES LLIMES UTILITZADES.....	70
2.2.2 DESCRIPCIÓ DEL MOTOR D' ENDODÒNCIA	79

2.2.3 CRITERIS PER AL DISSENY DELS DISPOSITIUS: PARÀMETRES GEOMÈTRICS DE LES CURVATURES TESTADES.....	80
2.2.4 DESCRIPCIÓ DE LA TÈCNICA.....	84
2.2.5 PARÀMETRES QUE S'HAN MESURAT.....	94
2.2.6 ANÀLISI DE LES DADES.....	95
3. RESULTATS I DESENVOLUPAMENT ARGUMENTAL.....	98
3.1 RESULTATS DE L'ESTUDI.....	98
3.1.1 TESTS DE FATIGA CÍCLICA.....	98
3.1.2 ANÀLISI D'ELEMENTS FINITS.....	118
3.1.3. ESTUDI DE LES SECCIONS TRANVERSALS AMB EL MICROSCOPI ELECTRÒNIC DE RASTREIG.....	121
3.2 DISCUSSIÓ SOBRE LA METODOLOGIA.....	122
3.3 DISCUSSIÓ SOBRE ELS RESULTATS.....	136
4. CONCLUSIONS FINALS.....	158
FUTURES LÍNIES D'INVESTIGACIÓ.....	159
5. BIBLIOGRAFIA.....	162

Taules i il·lustracions

Taula 1: Classificació dels instruments per a la conformació del conducte radicular.....	17
Taula 2: Característiques generals dels principals sistemes de llimes de NiTi.....	24
Taula 3: Paràmetres de conicitat de la llima WaveOne Primary.....	71
Taula 4: Paràmetres de conicitat de la llima Reciproc R25.....	73
Taula 5: Temps fins a la fractura en 60°.....	98
Taula 6: Nombre de cicles fins a la fractura en 60°.....	99
Taula 7: Temps fins a la fractura en 45°.....	101
Taula 8: Nombre de cicles fins a la fractura en 45°.....	102
Taula 9: Temps fins a la fractura en 30°.....	105
Taula 10: Nombre de cicles fins a la fractura en 30°.....	105
Taula 11: Àrea de la secció i diàmetre dels sistemes de llima única a 5mm de la punta.....	121
Il·lustració 1: Influència del radi en la curvatura del conducte.....	41
Il·lustració 2: Llima WaveOne Primary.....	72
Il·lustració 3: Micrografia (MER) x 130. Secció de WO Primary a 5 mm de la punta.....	72
Il·lustració 4: Micrografia (MER) x1000. Detall de l'estructura cristal·logràfica de WO.....	72
Il·lustració 5: Llima Reciproc R25.....	74
Il·lustració 6: Micrografia (MER) x 130. Secció de R25 a 5 mm de la punta.....	74
Il·lustració 7: Micrografia (MER) x1000. Detall de l'estructura cristal·logràfica de R25.....	75
Il·lustració 8: Llima OneShape.....	76
Il·lustració 9: Micrografia (MER) x 130. Secció de OS a 5 mm de la punta.....	76
Il·lustració 10: Micrografia (MER) x1000. Detall de l'estructura cristal·logràfica de OS.....	77
Il·lustració 11: Llima F360#25.....	78
Il·lustració 12: Micrografia (MER) x 130. Secció de F360#25 a 5 mm de la punta.....	78

II·lustració 13: Micrografia (MER) x1000. Detall de l'estructura cristal·logràfica de F360#25 ...	79
II·lustració 14: Motor Densply-Maillefer	80
II·lustració 15: Geometria del test de 60°	81
II·lustració 16: Geometria del test de 45°	82
II·lustració 17: Geometria del test de 30°	83
II·lustració 18: Model 3D de la llima Reciproc R25	84
II·lustració 19: Models d'una mateixa llima amb diferents angles de curvatura.....	84
II·lustració 20: Dimensions del model de la llima R25 conformada a 60° i 5 mm de radi.....	85
II·lustració 21: Models de les curvatures amb 3 pivots	85
II·lustració 22: Posicionament dels pivots en un dispositiu de 60° i 5 mm de radi de curvatura ...	86
II·lustració 23: Model 3D dels dispositius.....	87
II·lustració 24: Fotografia del dispositiu per a la llima F360#25 (curvatures de 30°, 45° i 60°)	87
II·lustració 25: Imatges del dispositiu amb curvatures cap a l'esquerra i cap a la dreta	89
II·lustració 26: Banc d'assajos	90
II·lustració 27: Definició dels casos de simulació per elements finits.....	92
II·lustració 28: Programa image J. Mesura de l'àrea de la secció transversal de la llima WO	94
II·lustració 29: Calibre digital	95
II·lustració 30: LFF per a tots els grups a 60°.....	99
II·lustració 31: Mitjanes i desviació típica de TFs per a 60° amb els moviments recomanats	100
II·lustració 32: Mitjanes i desviació típica de TFs per a 60° amb els moviments contraris	101
II·lustració 33: LFF per a tots els grups a 45°.....	102
II·lustració 34: Mitjanes i desviació típica de TFs per a 45° amb els moviments recomanats	103
II·lustració 35: Mitjanes i desviació típica de TFs per a 45° amb els moviments contraris	104
II·lustració 36: LFF per a tots els grups a 30°.....	106
II·lustració 37: Mitjanes i desviació típica de TFs per a 30° amb els moviments recomanats	107
II·lustració 38: Mitjanes i desviació típica de TFs per a 30° amb els moviments contraris	107
II·lustració 39: Mitjanes i desviació típica de TFs per a 60°, comparació entre moviments	108
II·lustració 40: Mitjanes i desviació típica de TFs per a 45°, comparació entre moviments	109
II·lustració 41: Mitjanes i desviació típica de TFs per a 30°, comparació entre moviments	109
II·lustració 42: Mitjanes i desviació típica de TFs per a 60°, mateix aliatge i moviment.....	110
II·lustració 43: Mitjanes i desviació típica de TFs per a 45°, mateix aliatge i moviment.....	111
II·lustració 44: Mitjanes i desviació típica de TFs per a 30°, mateix aliatge i moviment.....	111
II·lustració 45: Mitjanes i desviació típica de TFs per al Grup 1, comparació entre curvatures ..	112
II·lustració 46: Mitjanes i desviació típica de TFs per al Grup 2, comparació entre curvatures ..	112
II·lustració 47: Mitjanes i desviació típica de TFs per al Grup 3, comparació entre curvatures ..	113
II·lustració 48: Mitjanes i desviació típica de TFs per al Grup 4, comparació entre curvatures ..	113
II·lustració 49: Mitjanes i desviació típica de TFs per al Grup 5, comparació entre curvatures ..	114
II·lustració 50: Mitjanes i desviació típica de TFs per al Grup 6, comparació entre curvatures ..	114
II·lustració 51: Mitjanes i desviació típica de TFs per al Grup 7, comparació entre curvatures ..	115
II·lustració 52: Mitjanes i desviació típica de TFs per al Grup 8, comparació entre curvatures ..	115
II·lustració 53: Resum de mitjanes i desviació típica de TFs, comparació entre curvatures.....	116
II·lustració 54: Mitjanes i desviació típica de TFs per al grup M-Wire i moviment alternant	117
II·lustració 55: Mitjanes i desviació típica de TFs per el grup NiTi conv. i rotació continua.....	117
II·lustració 56: Model de curvatura de 60° i 5 mm de radi.....	118
II·lustració 57: Model de curvatura de 30° i 5 mm de radi.....	119
II·lustració 58: Model de curvatura de 30° i 5 mm de radi.....	120
II·lustració 59: Model ideal (esquerra) i cas pijor de toleràncies del fabricant (dreta).....	125

Il·lustració 60: Model amb posicionament manual dels pivots	126
Il·lustració 61: Representació de les forces d'interacció entre la llima i un dels pivots del dispositiu	128
Il·lustració 62: Representació de les forces resultants a la flexió d'un material elàstic per tres punts	135

1. INTRODUCCIÓ GENERAL

1. INTRODUCCIÓ GENERAL

1.1 CONCEPTE D'ENDODÒNCIA I FONAMENTS DEL TRACTAMENT DEL CONDUCTE RADICULAR.

Segons l'Associació Americana d'Endodòncia, l'Endodòncia és la branca de l'Odontologia que tracta de la morfologia, fisiologia i la patologia de la polpa dental i els teixits perirradiculars humans. El seu estudi i pràctica engloba les ciències bàsiques i clíniques incloent la biologia de la polpa normal i l'etiologia, diagnòstic, prevenció i tractament de les patologies i lesions de la polpa i alteracions perirradiculars associades (AAE, 2011).

L'Associació Espanyola d'Endodòncia amplia aquesta definició: “El camp de l'Endodòncia inclou, però no es limita, al diagnòstic diferencial i tractament dels dolors orals d'origen pulpar i / o periapical; tractament de la polpa vital com el recobriment pulpar i la pulpotomia; tractament no quirúrgic del sistema del conducte radicular amb o sense patologia perirradicular d'origen pulpar i l'obturgació d'aquests sistemes de conductes radiculars; eliminació quirúrgica selectiva dels teixits patològics resultants de la patologia pulpar; reimplant intencionat i reimplant de dents avulsionades; extirpació quirúrgica d'estructura dentària com apicectomia, hemisecció i resecció radicular; implants endodòncics; emblanquiment de tincions d'esmalt i dentina; retractaments de dents prèviament endodonciades; i procediments terapèutics relacionats amb restauracions coronàries mitjançant posts i / o munyons que impliquen l'espai del conducte radicular” (AEDE, 2014)

Per tant, l'Endodòncia clínica recull varis tractaments, però potser el més important siga el tractament de la polpa i del conducte radicular (amb o sense patologia perirradicular d'origen pulpar) de manera que els pacients conserven les seues dents naturals amb una funció plena i estètica acceptable. El tractament de les lesions d'origen traumàtic i la teràpia profilàctica de la polpa vital per a conservar la vitalitat són diferents de la pulpectomia, la qual requereix la instrumentació del conducte radicular. El tractament endodòncic té principalment un objectiu o conjunt d'objectius específics: curar o prevenir la periodontitis perirradicular (Peters i Peters, 2011).

El tractament ortògrade (no quirúrgic) dels conductes radiculars proporciona resultats predictibles tant en els casos senzills com en els complexos. Malgrat que existeixen algunes limitacions, la possibilitat d'obtenir un resultat favorable és significativa.

L'èxit del tractament endodòncic s'ha basat en els principis de la triada de desbridament, desinfecció exhaustiva i obturació, tots amb la mateixa importància. Actualment, l'èxit del tractament de conductes radiculars es basa en principis més amplis, que inclouen el diagnòstic i la planificació del tractament, el coneixement de l'anatomia i la morfologia, els conceptes tradicionals de desbridament, desinfecció exhaustiva i obturació, i la restauració coronal (Johnson WT i Kulild JC, 2011).

Les fases del tractament de conductes són, després de la realització d'una anamnesi, exploració i proves complementàries; l'anestèsia i col·locació de l'aïllament del camp operatori absolut:

- Preparació d'un accés apropiat.
- Conformació i neteja dels conductes radiculars.
- Obturació tridimensional del sistema de conductes.
- Restauració coronal

La neteja i conformació del sistema de conductes radiculars es consideren passos decisius, ja que determinen l'eficàcia dels procediments subsegüents. Aquestes feines s'intenten dur a terme dins d'un marc anatòmic complex i desgraciadament, els resultats de la preparació del conducte són afectats adversament per la gran variabilitat d'anatomies del conductes radiculars. Aquest fet és especialment cert per a instruments manuals convencionals i en menor grau per a la majoria dels instruments rotatoris (Peters i Peters, 2011).

Els objectius bàsics de la neteja i conformació segons Peters i Peters (2011) són:

- Eliminar els teixits infectats.
- Proporcionar accés a les solucions d'irrigació i desinfecció fins la zona apical.
- Crear espais per a la col·locació de medicaments i la subsegüent obturació.
- Conservar la integritat de les estructures radiculars.

1.2 INSTRUMENTS PER A NETEJAR I CONFORMAR EL CONDUCTE RADICULAR.

Històricament, la major part dels instruments dedicats a realitzar la instrumentació del conductes radiculars es dissenyaren per a utilitzar-se manualment. Però en l'actualitat els instruments rotatoris han assolit un interès considerable, i la majoria s'utilitzen en combinació amb els instruments manuals.

1.2.1 TERMINOLOGIA DE LES PROPIETATS FÍSQUES DELS INSTRUMENTS.

Quan utilitzem instrumental per a la conformació del conducte radicular l'èxit depèn de la forma en la que es relacionen el material, el seu disseny i la tècnica escollida amb la força exercida per l'instrument. Els següents termes quantifiquen les accions i reaccions d'eixes forces (Metzger i cols., 2011):

- Estrès: és la força deformant mesurada en una àrea determinada.
- Punt de concentració de l'estrès: canvi bruscat en la forma geomètrica d'una llima, com una marca, que ocasiona un nivell d'estrès més alt en eixe punt que en la resta de la superfície.
- Tensió: la quantitat de deformació que experimenta una llima.
- Límit d'elasticitat: és un valor establert que representa la màxima tensió que ha d'aplicar-se a una llima per a permetre que torne a les seves dimensions originals.
- Deformació elàstica: és la deformació reversible que no excedeix el límit d'elasticitat.
- Memòria plàstica: és una situació que es presenta quan el límit d'elasticitat és substancialment més alt, propi dels metalls convencionals. Permet que un instrument recupere la seua forma original després d'haver sofert deformació.
- Deformació plàstica: és el desplaçament permanent per desunió que apareix quan s'ha excedit el límit d'elasticitat. La llima no torna a les seues dimensions originals després de suprimir la tensió.
- Límit de plasticitat: és el punt en el que una llima plàsticament deformada es trenca.

1.2.2 CLASSIFICACIÓ DELS INSTRUMENTS UTILITZATS PER A NETEJAR I CONFORMAR L'ESPAI DEL CONDUCTE RADICULAR.

Com hem vist abans, els principals objectius de la instrumentació dels conductes radiculars són proporcionar un entorn biològic (control de la infecció) que duga a la curació i modelar el conducte amb una forma receptiva per al segellat final.

Classificarem els instruments utilitzats per a netejar i conformar l'espai del conducte radicular amb una combinació de la classificació de Madureira (2001) i Metzger i cols. (2011):

Grup I	Instruments accionats manualment, com les llimes K i H
Grup II	Instruments de baixa velocitat amb una connexió tipus pestell: fresas Gates-Glidden i els eixampladors Peeso
Grup III	Instruments per a la conformació del conducte accionats per motor
Grup IV	Llimes d'ajust tridimensional
Grup V	Instruments sònics i ultrasònics

Taula 1: Classificació dels instruments per a la conformació del conducte radicular

1.2.2.1 Grup I. Instruments d'acció manual.

Els instruments manuals s'utilitzen en clínica des de fa quasi 100 anys, i encara formen part integral dels procediments de neteja i conformació.

Tipus d'instruments manuals:

- Tiranervis i raspadors.
- Instruments tipus K: Inicialment foren fabricades en sèrie per Kerr Manufacturing Co. a principis del segle XX, amb el nom de llimes K (o K-file) i eixampladors K (K-reamer).
- Instruments tipus H.

Els primers instruments manuals es van fabricar amb acer de carboni i més endavant amb acer inoxidable, que va millorar notablement la qualitat d'aquests instruments. Posteriorment la introducció del níquel-titani (NiTi) per a la fabricació dels instruments

va significar una millora transcendental en la conformació dels conductes, gràcies a la seua major flexibilitat (Metzger i cols., 2011).

1.2.2.2 Grup II. Instruments rotatoris de baixa velocitat.

Durant el tractament endodòncic s'usen molts tipus d'instruments rotatoris. A més de les freses habituals adaptades a l'endodòncia, existeixen varis tipus d'eixempladors destinats a la preparació del conducte radicular o l'eliminació dels materials d'obturgació del conducte radicular i la posterior preparació de l'espai per a un post:

- Freses Gates-Glidden
- Instruments de Peeso

L'ús d'aquests instruments deuen limitar-se a la porció recta del conducte, ja que si s'utilitzen per a tallar lateralment el risc de perforacions és molt alt.

1.2.2.3 Grup III. Instruments per a la conformació del conducte accionats per motor.

Seguint la classificació de Madureira (2001), dividirem aquest grup d'instruments accionats per motor en dos subgrups:

- Instruments semblants a les freses de Gates-Glidden
- Instruments semblants a les llimes endodònciques

a. INSTRUMENTS SEMBLANTS A LES FRESES DE GATES-GLIDDEN

- Instruments LightSpeed i LightSpeed LSX.

b. INSTRUMENTS SEMBLANTS A LES LLIMES ENDODÒNCIQUES

- Instruments d'una conicitat única al llarg de l'instrument.
 - Amb moviment de rotació continua:
 - Quantec Series 2000
 - ProFile
 - Llimes GT i GTX
 - Hero 642, Hero Shaper

- K3
- FlexMaster
- RaCe, BioRace
- EndoSequence
- Twisted File
- Mtwo
- Hyflex
- Revo-S
- ProFile Vortex
- K3 XF
- OneShape
- F360

- Amb moviment alternant:
 - Endo-Eze
 - SafeSiders
 - Twisted file Adaptive

- Instruments de conicitat variable (dins de la mateixa llima).
 - Amb moviment de rotació continua:
 - ProTaper Universal
 - ProTaper Next

 - Amb moviment alternant:
 - Reciproc
 - WaveOne
 - WaveOne Gold

1.2.2.4 Grup IV. Llimes d'ajust tridimensional.

La llima autoajustable (SAF, self-adjusting file; ReDent-Nova, Raanana, Israel) és una manera diferent d'enfocar el disseny i funcionament de les llimes. Es tracta d'un dispositiu buit, dissenyat com un cilindre de paret fina, amb una retícula delicada de NiTi

i una superfície lleugerament abrasiva. La idea és que la llima comprimida s'adapte a les parets del conducte, aplicant una acció tallant uniforme. Com la llima és buida permet la irrigació contínua mentre funciona dins del conducte radicular. Inicialment es comprimeix i gradualment s'engrandeix mentre neteja i conforma el conducte. La característica d'aquesta llima és que s'adapta a la forma del conducte radicular, no sols longitudinalment, sinó també transversalment. De manera que es conserva la forma bàsica del conducte radicular (Dietrich i cols., 2012; Metzger i cols., 2010).

1.2.2.5 Grup V. Instruments sònics i ultrasònics.

L'activació de les llimes amb energia ultrasònica va introduir un mode distint d'instrumentar el conductes. Es disposen principalment de dos unitats: sòniques i ultrasòniques. Els dispositius ultrasònics operen de 25 a 30 kHz, mentre que els dispositius sònics operen de 2 a 3 kHz. Els dispositius ultrasònics utilitzen instruments normals (per exemple llimes K), mentre que els sònics usen instruments especials.

Els dispositius ultrasònics poden ser de dos tipus: magnetostrictius i piezoelèctrics. Els dispositius piezoelèctrics, encara que tinguen funcionament similar als dispositius magnetostrictius, tenen avantatges perquè generen poca calor i no és necessària la refrigeració del contraangle. En canvi, el sistema magnetostrictiu genera gran quantitat de calor i requereix d'un sistema de refrigeració especial. Els dispositius ultrasònics són decebedors com instruments per a potenciar l'eliminació de la dentina de les parets del conducte radicular, però sí que augmenten la capacitat per a netejar l'espai pulpar i les àrees difícils de desbridar. La neteja és potenciada encara més amb l'ajuda dels sistemes d'irrigació proporcionats amb alguns d'aquests dispositius, i amb les noves puntes de dispositius ultrasònics piezoelèctrics s'aconsegueix una eliminació eficaç de la dentina de la càmera pulpar i de l'orifici dels conductes (Metzger i cols., 2011).

1.2.3 CARACTERÍSTIQUES GENERALS DE LES LLIMES DE NiTi ACCIONADES PER MOTOR.

1.2.3.1 Components de les llimes

La variació del disseny de les llimes afecta a la instrumentació del conducte radicular. De manera que és important conèixer les parts que componen una llima (Metzger i cols., 2011):

- La conicitat significa la quantitat de diàmetre de la llima que augmenta cada mil·límetre al llarg de la superfície de treball, des de la punta fins el mànec. Alguns fabricants expressen la conicitat en tants per cent. Històricament, segons les normes ISO, les llimes es fabricaven a un 2% o 0,2 de conicitat, però actualment les llimes incorporen una gran varietat de longituds i conicitats en les seues superfícies de treball. El coneixement del diàmetre transversal en un punt determinat de la llima permet saber la grandària que té la llima en el punt de curvatura, i amb això la tensió relativa que exerceix sobre la llima.
- Les estries de la llima són els solcs en la superfície de treball que recullen els teixits blans i els resquills de dentina que es van eliminant de les parets del conducte. L'eficàcia de les estries depèn de la seua profunditat, amplària, configuració i acabat de la superfície.
- La vora tallant o vora guia és la superfície de major diàmetre a continuació del solc al girar. També és conegut com la fulla de la llima. La vora tallant forma i arranca resquills de les parets del conducte, al mateix temps que talla i esquinça el teixits blans. La seua eficàcia depèn de l'angle d'incidència i de l'agudesesa.
- El *land* o recolzament radial és la superfície que es projecta axialment des de l'eix central a l'extrem de la vora tallant que queda entre les estries. El *land* toca les parets dels conductes en la perifèria de la llima i redueix la tendència de la llima a enroscar-se, el transport del conducte, la propagació de microfractures en la circumferència, suporta la vora tallant i limita la profunditat del tall. La seua posició relativa a la vora tallant oponent i la seua amplària determinen l'eficàcia.
- Un alleujament és reduir part de l'àrea superficial del *land* que gira contra el conducte, amb l'objectiu de disminuir la resistència friccional.
- L'angle helicoidal és l'angle que forma la vora tallant i l'eix longitudinal de la llima.

- L'angle d'inclinació o d'atac és l'angle format per la vora tallant i el radi de la llima al seccionar una llima perpendicularment a l'eix longitudinal. Si l'angle format per la vora tallant i la superfície a tallar (la seua tangent) és obtús, es diu que l'angle d'atac és positiu o tallant. Si aquest angle és agut, es diu que és negatiu o "rasgador". Però és possible que l'angle d'atac no coincidisca amb l'angle de tall.
- L'angle de tall o angle d'atac eficaç indica més bé la capacitat de tall de la llima i es determina mesurant l'angle format per la vora tallant (guia) i el radi, en una secció del radi perpendicular a la vora tallant. Si les estries de la llima són simètriques, l'angle d'atac i el de tall seran essencialment iguals.
- El *pitch* o distància entre espirals de la llima és la distància entre el punt de la vora tallant i el punt corresponent de la vora tallant adjacent; podria ser la distància entre punts corresponents entre els quals es repeteix el mateix patró. Quant més xicotet siga el *pitch* més espirals tindrà la llima i major serà l'angle helicoïdal. La majoria de llimes tenen un *pitch* variable que canvia al llarg de la superfície de treball. Com el diàmetre augmenta des de la punta de la llima fins el mànec, l'estria es torna proporcionalment més profunda, resultant una conicitat del nucli diferent a la conicitat externa.

L'angle de tall, l'angle helicoïdal i la conicitat externa i del nucli poden variar al llarg de la superfície de treball de la llima, i les relacions d'eixes quantitats poden canviar entre instruments de la mateixa sèrie. Qualsevol d'aquestes característiques pot influir en l'efectivitat de la llima i la seua propensió a la fractura al progressar per l'interior del conducte, de manera que es pot explicar per què algunes llimes actuen de manera diferent comparades amb altres llimes de la mateixa sèrie.

1.2.3.2 Disseny dels instruments.

Des de la dècada dels 90 s'han introduït en la pràctica de l'Endodòncia varis sistemes d'instruments fabricats en NiTi. Les característiques específiques de disseny varien, com la grandària de la punta, la conicitat, la secció transversal, l'angle helicoïdal i la distància entre espirals (*pitch*). Alguns dels primers sistemes han sigut retirats del mercat o juguen

papers secundaris, i altres encara es continuen utilitzant. Contínuament apareixen dissenys nous, però és difícil preveure el grau en què els resultats clínics dependran de les característiques del disseny (Peters i Paqué, 2010). El canvis que s'introdueixen als instruments endodòncics són per a prevenir els errors del procediment, augmentar l'eficàcia i millorar la qualitat de la conformació del conductes (Metzger i cols., 2011).

En la següent taula es resumeixen les característiques generals dels principals sistemes de llimes de NiTi accionats per motor. Alguns d'ells ja pràcticament no s'utilitzen (Peters i Peters, 2011 i fullets de les cases comercials):

Nom	Fabricant	Any	Nº de llimes del joc	Secció	Aliatge
ProFile	Dentsply Tulsa i Mallefer	1994	6 conformadors d'orifici 6 ProFile 6% 9 ProFile 4% 6 ProFile 2% ProFile Serie 29	Triple "U", amb recolzaments radials i un nucli central de parets paral·leles.	NiTi convencional
GT (Greater Taper) i GTX	Dentsply-Maillefer	1994 i GTX (2009)	8 (conicitats de 6, 8, 10, 12%)	Triple "U"	NiTi conv. i GTX (M-Wire)
Quantec Series 2000, SC, LX, K3	SybronEndo	1997 i K3 (2002)	27 (2, 4 i 6% de conicitat)	Triple aspa amb tres recolzaments radials (la llima Quantec sols tenia dos)	NiTi convencional
Hero 642, Hero Shaper	MicroMega	1998	12 (conicitats 2,4 i 6%)	Similar a una llima H, sense recolzaments radials.	NiTi convencional
RaCe, BioRace	FKG	1999	15(2, 4, 6, 8 i 10% de conicitat)	Triangular o quadrada (2%) amb vores tallants alterns	NiTi convencional
FlexMaster	VDW	2001	22 (2, 4 i 6% de conicitat) i llima Intro (11%)	Forma triangular amb 3 vores tallants afilades	NiTi convencional
ProTaper i ProTaper Univ	Dentsply-Maillefer	2001 i 2006	6, més 2 d'acabat més grans i 3 de retractament	Triangular convexa i les llimes F3, F4 i F5 triangular modificada	NiTi convencional

Nom	Fabricant	Any	Nº de llimes del joc	Secció	Aliatge
Mtwo	VDW	2005	10 (4, 5, 6 i 7% de conicitat)	“S” itàlica amb dos vores tallants	NiTi convencional
EndoSequence	FKG	2006	5 (4 i 6 % de conicitat)	Triangular	NiTi convencional
Twisted File	SybronEndo	2008	9 (4, 6, 8, 10 i 12% de conicitat)	Triangular	Fase-R
Revo-S	MicroMega	2008	3 (4 i 6% de conicitat) i 3 d'acabat més grans	Triangle convex asimètric	NiTi convencional
Profile Vortex	Dentsply-Tulsa	2009	18 (4 i 6% conicitat)	Triangular convexa, sense recolzaments radials	M-Wire
Hyflex	Coltène Waledent	2011	15 (4, 6 i 8% de conicitat)	Triangular i quadrada (20 i 25 de conicitat al 4%)	CM-Wire
Reciproc	VDW	2011	3 (5, 6 i 8% de conicitat)	“S” itàlica amb dos vores tallants	M-Wire
WaveOne	Dentsply-Maillefer	2011	3 (6 i 8% de conicitat)	Triangular modificat (a la punta) i triangular convex (de la ½ fins el final)	M-Wire
K3 XF	SybronEndo	2011	32 (4,6 i 8% de conicitat)	Triple aspa amb tres recolzaments radials	Fase-R
OneShape	MicroMega	2012	1 (6% de conicitat)	Variable (de 3 vores tallants canvia a 2)	NiTi convencional
ProTaper Next	Dentsply-Maillefer	2013	5 (4, 6 i 7% de conicitat)	Rectangular	M-Wire
F360	Komet-Brasseler	2013	4 (4% de conicitat)	“S” itàlica amb dos vores tallants	NiTi convencional
TF Adaptive	SybroEndo	2013	6 (4, 6 i 8 % de conicitat)	Triangular	Fase-R
WaveOne Gold	Dentsply-Maillefer	2015	4 (5, 6 i 7% de conicitat)	Paralel·logram (1 o 2 vores tallants)	Gold

Taula 2: Característiques generals dels principals sistemes de llimes de NiTi

1.3 EVOLUCIÓ DELS TIPUS D'ALIATGES I MÈTODES DE FABRICACIÓ.

Els primers aliatges que s'utilitzaren per a fabricar instruments manuals eren d'acer de carboni. Posteriorment s'utilitzà l'acer inoxidable, que va millorar notablement la qualitat d'aquests instruments. Però la introducció dels aliatges de NiTi, a principis de la dècada dels noranta, per a la fabricació de les limes endodònciques va revolucionar la instrumentació del conducte radicular. Van ser Walia i cols. en 1988 els primers que introduïren aquestes limes de NiTi. Utilitzaren fil d'aram ortodòncic de Nitinol-55 per fabricar limes manuals del nº15, les quals van mostrar dos o tres vegades major flexibilitat elàstica i una resistència superior a la fractura torsional comparades amb les d'acer inoxidable (Walia i cols., 1988).

Per tant, el descobriment del Nitinol, una aliatge equiatòmica composta convencionalment d'un 56% de níquel i un 44% de titani, va suposar un avanç considerable en la fabricació d'aquests instruments. Aquesta aliatge, que forma part dels anomenats aliatges amb memòria de forma, va solucionar la rigidesa de l'acer inoxidable i d'aquesta manera va millorar la instrumentació del conductes corbats (Gutmann i Gao, 2012).

1.3.1 PROPIETATS METAL·LÚRGIQUES DELS ALIATGES DE NITIT

En essència, dues propietats de l'aliatge de NiTi tenen un interès particular en l'Endodòncia: la superelasticitat i l'alta resistència a la fatiga cíclica. I aquestes propietats han permès usar les limes en rotació continua als conductes radiculars corbats (Peters i Peters, 2011).

El níquel-titani no segueix les regles normals de la metal·lúrgia. El seu comportament mecànic està determinat per la proporció i les característiques de les seues fases microestructurals, de manera que té un comportament no lineal. Com es tracta d'un metall superelàstic, a l'aplicar-li estrès no apareix la mateixa tensió proporcional que amb altres metalls com l'acer inoxidable. En l'aplicació inicial de l'estrès al níquel-titani, la tensió és proporcional; però, segueix sent la mateixa quan l'aplicació d'estrès addicional arriba a un nivell específic, apareixent el que s'anomena l'altiplà de càrrega. Si després es supera

l'altiplà de càrrega aplicant més estrès, aquest ocasionarà més tensió que va augmentant fins que la llima es trenca (Metzger i cols., 2011). Aquesta propietat poc usual és conseqüència d'una transformació de la fase cristal·lina molecular. De manera que apareixen tres fases (Shen i cols., 2013):

- Fase cristal·lina estable (austenítica): comportament lineal
- Fase R o premartensítica, que es la fase de transició: comportament lineal però quasi pla, és a dir, sense canvis.
- Fase martensítica: extremadament no lineal

En l'última part apareixen les característiques típiques de la gràfica de tensió-estrès per a un metall, en la qual existeix una zona elàstica, un límit d'elasticitat i un punt de fractura. Però és la transició de la fase austenítica a martensítica la que ens proporciona les característiques d'aquest material: la superelasticitat i la memòria de forma, que és la capacitat de tornar a la seua forma original després d'haver sigut deformat. I aquesta fase de transició és dependent de l'estrès i la temperatura (Thomson, 2000; Berutti i cols., 2003; Zinellis i cols., 2010).

L'estrès extern transforma l'estructura cristal·lina austenítica del níquel-titani en una estructura cristal·lina martensítica que pot admetre més estrès sense augmentar la tensió (Shen i cols., 2013).

La temperatura també produeix la transformació entre les diferents fases, de manera que podem definir l'estructura martensítica com la fase de baixa temperatura i l'estructura austenítica com la fase mare o d'alta temperatura. Per tant, l'estructura cristal·lina del NiTi a altes temperatures (100° C) és estable, en forma d'una xarxa cúbica centrada. Però el Nitinol té la particular característica de que quan és refredat per davall d'un rang temperatures de transformació (TTR) crític, el metall presenta canvis en les propietats físiques, sobretot al seu mòdul d'elasticitat, i es produeix la transformació martensítica. Durant aquesta transformació la forma macroscòpica de la martensita pràcticament no canvia fins que no se li aplica una força externa. En aquest moment la forma hexagonal de la martensita serà fàcilment deformatada mitjançant un procés conegut com *detwined martensite* o martensita reordenada, obtenint-se així la transformació total de la martensita. El NiTi és més dúctil a la fase martensítica que a la fase austenítica. A més la deformació pot revertir quan l'aliatge és calfada per damunt del TTR (rang de

temperatures de transformació) i torna a l'estructura estable de la fase austenítica, recuperant la forma prèvia. Aquest fenomen dóna lloc a la característica de la memòria de forma. Per tant la superelasticitat i la memòria de forma dependran d'aquest rang de temperatures de transformació (TTR), que a la seua vegada dependrà de la composició exacta de cada aliatge de NiTi, com també del procés de fabricació: treball en fred o tractament tèrmic (Thomson, 2000).

1.3.2 NOUS ALIATGES DE NiTi

Així que, com hem vist, de forma similar a les transformacions de fase del NiTi induïdes per tensió, la calor i el refredament també produeixen aquestes transformacions. Es poden provocar canvis conformacionals utilitzant diferents condicions tèrmiques durant la producció de fil d'aram brut. L'objectiu d'aquests canvis és modificar les propietats de l'aliatge de NiTi, sobretot la seua flexibilitat (Shen i cols., 2013).

La millora de les propietats mecàniques dels aliatges de NiTi es duu a terme amb modificacions sotils en la proporció d'aquests dos elements i/o mitjançant tractaments tèrmics. De manera que s'ha creat una segona generació d'aliatges de NiTi i per tant d'instruments:

- M-Wire:

L'any 2007 es va introduir l'aliatge M-Wire (Dentply Tulsa Dental Specialities, Tulsa, OK, USA), que és una variant de l'aliatge Nitinol 508 (la forma més pura de Nitinol comercialitzada) sotmesa a un procés termomecànic patentat, el qual comprén l'elaboració d'un fil d'aram en brut baix una tensió específica i uns tractaments tèrmics a diferents temperatures, donant com a resultat un material que inclou una part tant en fase martensítica com en fase-R premartensítica, mantenint el seu estat pseudoelàstic (Johnson i cols., 2008; Alapati i cols. 2009).

Segons autors com Johnson i cols. (2008) M-Wire és un aliatge de NiTi que incrementa la resistència a la fatiga cíclica quasi 4 vegades comparant instruments amb un mateix disseny, però produïts amb un aliatge de NiTi convencional. Altres autors també han trobat una major resistència a la fatiga cíclica amb M-Wire comparat amb el NiTi convencional (Larsen i cols., 2009; Al-Hadlaq i cols., 2010;

Gao i cols., 2010; Pereira i cols., 2012; Montalvão i cols., 2014). En canvi autors com Gambarini i cols. (2008) i Kramkowski i Bahcall (2009) no trobaren diferències entre els instruments produïts amb M-Wire i Ni-Ti convencional o fins i tot a l'estudi de Kramkowski algunes de les llimes ProFile GTX (20/06, 30/04 i 30706) al conducte de 60° obtingueren pitjors resultats que les llimes GT (NiTi convencional) del mateix diàmetre. I Arias i cols. (2014) observaren millor resultats per a GTX comparant-la amb GT, però al testar-les després d'un ús clínic van trobar millors resultats amb la llima GT.

Elnaghy i Elsaka (2015) compararen la flexibilitat i la resistència a la torsió de les llimes WaveOne (M-Wire) i OneShape (NiTi-55 austenític) i els resultats foren més favorables per a la llima fabricada amb M-wire. En canvi, Çapar i cols. (2015a) no trobaren diferències entre OneShape i ProTaper Next (M-Wire).

– Fase-R:

Aquest procediment tèrmic va ser utilitzat cap a l'any 2008 en les llimes Twisted File (SybronEndo, Orange, CA, USA). Aquestes llimes es creen mitjançant una transformació d'estructura d'un fil d'aram de NiTi pur en fase austenita a fase R (estructura intermèdia entre austenita i martensita, de forma romboïdal). Es realitza un procés tèrmic de calfament i refredament, dins d'un rang de temperatura molt estret. En fase R el NiTi no pot ser fresat, però si enrotllat o trenat (*twisted*), pel que es sotmet a aquest procés junt a una sèrie de cicles repetits de calfament i refredament per a mantenir la seua nova forma (R-fase *twisted*) i tornar una altra vegada a l'estructura austenítica. Aquest procés respecta millor l'estructura del gra del material i no introdueix marques de fresat ni irregularitats de superfície (Peters i Peters, 2011).

En fase R l'aliatge mostra les seues característiques de superelasticitat i memòria de forma. D'aquesta manera les llimes fabricades amb aquest aliatge haurien de ser més flexibles que les llimes amb NiTi convencional. Alguns estudis han mostrat una milloria de les propietats físiques i mecàniques comparades amb les dels instruments manufacturats amb l'aliatge de NiTi tradicional. (Gambarini i cols., 2008; Larsen i cols., 2009; Oh i cols., 2010; Rodrigues i cols., 2011; Bhagabati i cols., 2012; Lopes i cols., 2013a). Gambarini i cols. en un altre estudi

realitzat l'any 2013 van observar millors resultats respecte a fatiga cíclica amb la llima K3XF(Fase-R) que amb la llima ProFile Vortex (M-Wire).

– CM-Wire:

A l'any 2010 es va desenvolupar l'aliatge CM-Wire (DS Dental, Johnson City, TN, USA). La llima, Hyflex (Coltene-Whaledent, Cuyahoga Falls, OH, USA) està fabricada amb aquest aliatge i s'ha creat mitjançant un procés termomecànic que controla la memòria del material, fent que siguin llimes extremadament flexibles, ja que no tenen la memòria de forma que tenen altres llimes de NiTi. Així, aquest tractament tèrmic de l'aliatge ha mostrat una millora de les propietats mecàniques (Rubini i cols., 2013). S'ha observat que els instruments CM-Wire eren 300% - 800% més resistents a la fatiga cíclica que els instruments de NiTi convencional amb el mateix disseny (Shen i cols., 2012). I en l'estudi de Çapar i cols. (2015a) la llima Hyflex va obtenir els millors resultats de fatiga cíclica, comparant-la amb ProTaper Next, OneShape i Revo-S.

Segons Braga i cols. (2014) els aliatges M-Wire i CM-Wire augmentaven la resistència a la fatiga cíclica de les llimes. Tots els instruments que testaren exhibien una composició similar de NiTi (51%Ni i 49% Ti), però observaren que les llimes fabricades amb els nous aliatges tenien unes temperatures de transformació més altes (Braga i cols., 2014). Els tractaments tèrmics contribueixen a augmentar les temperatures de transformació de l'austenita, com és el cas de l'aliatge CM-Wire, on es produeixen canvis en el percentatge de les fases de l'estructura cristal·lina, el que duu a millorar les propietats mecàniques o a mostrar més deformació plàstica abans de fracturar-se. De tal manera que aquesta millora es pot deure a l'augment de l'estructura martensítica (Plotino i cols., 2012). Les llimes en aquesta fase martensítica poden ser fàcilment deformades i recuperaran la seua forma original quan siguin calfades més enllà del rang de temperatures de transformació (TTR), el que seria la base metal·lúrgica per a la recuperació de la forma durant l'esterilització (Peters i cols., 2012).

– Gold:

Aquest es l'últim aliatge que ha sortit al mercat. S'ha introduït amb la nova llima WaveOne Gold (Dentsply-Maillefer, Ballaigues, Suïssa), de recent comercialització. Aquest aliatge de NiTi, que ja es va utilitzar prèviament per a la nova versió de les ProTaper (ProTaper Gold, no comercialitzada al nostre país), es produeix mitjançant un tractament tèrmic posterior a la fabricació, que segons la casa comercial combina la flexibilitat amb la resistència a la fatiga cíclica i torsional. També redueix la memòria de forma, que disminueix el transport del conducte radicular a la fase d'instrumentació, mentre que és el suficientment rígida per a optimitzar l'eficàcia de tall. Segons els estudis d'Arangunen (2015) per a la casa comercial, comparant la nova llima WaveOne Primary Gold amb la seua predecessora WaveOne Primary, la nova llima obté millors resultats pel que fa a la resistència a la fatiga cíclica, flexibilitat, memòria de forma i resistència a la torsió. En un estudi de Hieawy i cols. (2015) observaren que la llima ProTaper Gold era més flexible i va tindre una major resistència a la fatiga cíclica que la llima ProTaper Universal amb les mateixes característiques, però fabricada amb un aliatge de NiTi convencional.

Les temperatures de transició o rang de temperatures de transformació (TTR) són un dels factors determinants de la resistència a la fatiga cíclica dels nous aliatges, perquè marquen la temperatura on hi ha un canvi de fase de martensita a austenita o viceversa (Testarelli i cols., 2011). Amb els nous aliatges M-Wire i CM-Wire, les temperatures de transició han augmentant fins els 50°C- 55°C respectivament. D'aquesta manera les llimes fabricades amb aquests aliatges estaran en estructura martensítica a temperatura ambient (més dúctil, flexible i elàstica) i per tant, durant el seu ús clínic. En canvi, les llimes amb NiTi convencional, on les temperatures de transició estan al voltant 25° segons l'estudi de Brantley i cols.(2002) o d'uns 34° segons Alexandrou i cols. (2006), tindran una estructura austenítica a temperatura ambient (Shen i cols.,2011; Ye i Gao, 2012). Amb l'aliatge Gold també es produeixen canvis a les temperatures de transició, de manera que la temperatura final austenítica per las instruments ProTaper Gold augmenta a uns 50°C, mentre que per a les llimes ProTaper Universal és d'uns 21°C (Hieawy i cols., 2015).

1.3.3 TRACTAMENT DE SUPERFÍCIE DE LES LLIMES DE NiTi

La majoria dels instruments de NiTi de rotació continua s'han fabricat mitjançant un procés de fresat (*grinding*), encara que alguns es fabriquen mitjançant gravat làser i actualment també mitjançant procediments termomecànics, com hem vist amb la introducció dels nous aliatges.

La precisió de la qualitat superficial del procés de fresat o *grinding* no és realment d'alt nivell, es troben defectes superficials tals com imperfeccions i bonys al metall en instruments nous, mentre que les toleràncies sí que ho són. Però segons diferents autors la qualitat de la superfície també és un detall important, perquè les fissures creades a partir d'aquests defectes superficials poden jugar un paper en la fractura de l'instrument (Tripi i cols., 2006, Alexandrou i cols., 2006; Anderson i cols. 2007).

Per a millorar aquesta qualitat de la superfície, es van introduir els tractaments de superfície com l'electropolit. Aquest procediment que s'ha gastat amb les llimes RaCe i Endosequence, consisteix en introduir el metall en una solució iònica i fer-li passar un corrent elèctric, en la que es produeix una remoció electroquímica controlada de la superfície del metall. El resultat és una superfície brillant, que segons algun estudis, millora les propietats del material, especialment la resistència a la fatiga cíclica (Tripi i cols., 2006; Anderson i cols. 2007).

Però, altres autors no trobaren diferències entre els instruments electropolits o no (Cheung i cols., 2007b; Oh i cols., 2010); concretament en l'estudi d'Oh i cols. (2010), observaren millors resultats amb les llimes TF comparades amb les Race. Tot i que aquestes últimes tenien una superfície lliure de defectes, el procés de fabricació termomecànic de les llimes TF les confereix unes molt bones propietats del material. Altres estudis com el de Bui i cols. (2008) van trobar una disminució de la resistència a la fatiga cíclica de les llimes ProFile 25/06 electropolides comparades amb les que no tenien el tractament de superfície, però la resistència a la torsió no s'afectava.

També s'han realitzats recobriments de la superfície (cobertura de nitrur de titani), que en alguns estudis van trobar una millora de les propietats del material, com la resistència a la fatiga, la corrosió i inclús pareixia tenir un efecte beneficiós sobre l'eficàcia de tall (Rapisarda i cols., 2000; Schäfer, 2002); en canvi l'estudi de Wolle i cols. (2009) va

obtenir millors resultats amb els recobriments d'Argó i al grup control (sense cap recobriment de superfície) que als instruments amb recobriment de nitrur de titani.

1.4 DESENVOLUPAMENT DELS MOVIMENTS ALTERNANTS I DELS SISTEMES DE LLIMA ÚNICA.

La recerca constant en la millora de la preparació del conducte radicular va afavorir la transició de la instrumentació manual cap a l'automatitzada, amb el propòsit d'una preparació ràpida i eficient (Sydney i Batista, 2005) i en l'actualitat les llimes accionades per motor es poden utilitzar amb diferents moviments (Çapar i cols., 2015b):

- Rotació continua:

Després de que Walia i cols. (1988) introduïren els instruments manuals de NiTi s'han llançat al mercat nombrosos sistemes rotatoris de NiTi.

Recentment, ha aparegut una nova rotació continua, que han anomenat rotació continua asimètrica (Diemer i cols., 2013). Es produeix quan les llimes amb disseny de la secció transversal asimètrica es posen en moviment, de manera que s'observen unes ones que recorren tota la part activa (Revo-S, ProTaper Next i la nova generació de OneShape), però aquest moviment no depèn del motor endodòncic.

- Moviment alternant:

Els instruments alternants accionats per motor són aquell grup d'instruments en els que el moviment que realitza la llima durant la conformació dels conductes radicular no és una rotació continua, sinó que és un moviment alternant en sentit de les agulles del rellotge i al contrari, que pot ser simètric o asimètric (Metzger i cols., 2011).

- Moviment alternant més moviment vertical:

Varis fabricants han introduït contraangles que poden produir aquest tipus de moviment, de dalt a baix i quart de rotació alternant: Canal Finder System (Société Endo Technic) i Endolift (SybronEndo). Tot i que aquests motors han estat fabricats per a ser utilitzats amb llimes d'acer inoxidable, s'han

comercialitzat també llimes de NiTi amb el Sistema EndoPulse (Société Endo Technic), que és la nova versió del Canal Finder (Çapar i cols., 2015b).

– Moviment vertical:

Aquest moviment és el que realitza la llima SAF (Self- Adjusting File System, ReDent-Nova), que va ser introduïda l'any 2010. Aquesta llima treballa amb una vibració mitjançant un moviment d'entrada i d'eixida que remou la dentina i a la vegada va realitzant una irrigació continua (Metzger i cols., 2010).

– Moviment adaptatiu (rotació continua més moviment alternant):

Aquest moviment és el que realitza el motor Elements Adaptive Motion (SybronEndo). Va ser introduït l'any 2013 amb l'objectiu de combinar els avantatges de la rotació continua i del moviment alternant. Quan l'instrument no presenta cap tensió, el moviment que descriu és una rotació continua de 600° en el sentit horari, que para i torna a començar en el mateix sentit. Però quan l'instrument s'enganxa a la dentina, el moviment canvia i es converteix en alternant. Els angles del moviment alternant no són constants i el motor modifica els angles horaris (CW) / antihoraris (CCW) de 600°/0 a 370°/50°, depenent de l'estrès que es produeix al conducte radicular (Çapar i cols., 2015b).

1.4.1 HISTÒRIA DELS SISTEMES DE MOVIMENT ALTERNANT ACCIONATS PER MOTOR

Va ser cap als anys 60 quan va emergir l'interès per automatitzar la preparació del conducte radicular. El primer contraangle que va sorgir va ser el Giromatic de la MicroMega, que es va utilitzar des de l'any 1964 i que generava 3000 quarts de gir alternant per minut. Estava basat en la cinemàtica d'eixamplament cap a dreta i esquerra. Aquest contraangle s'encaixava al micromotor de l'equip i utilitzava uns instruments en forma d'eixampladors o tiranervis, encara que també es podia usar amb llimes K i H (Metzger i cols., 2011). Posteriorment aparegué el Dynatrack (W&H), Endo-Angle (Union Broach) i Endolift (Kerr), amb moviments d'entrada i eixida i un xicotet moviment rotacional alternant. Però el més difós va ser el Giromatic, que per a la correcta utilització del qual, els instruments devien treballar lliurement a l'interior del conducte radicular, a baixa velocitat, amb amplitud entre 2 i 4 mm, moviments suaus i utilització de

lubricant. I s'usaven llimes manuals o altres instruments per a finalitzar la preparació. A partir d'això moment es realitzaren estudis comparatius amb la preparació manual i es va observar que aquests aparells no removien completament el teixit pulpar ni els detritus, ni tampoc milloraven el temps de treball. De manera que la tècnica manual amb preparació coronal era més eficient que qualsevol aparell mecànic (Sydney i Batista, 2005; Çapar i cols., 2015b).

Posteriorment hi hagueren canvis al disseny i metal·lúrgia dels instruments, com també la millora de la comprensió de l'anatomia dels conductes radiculars i la introducció de maniobres que facilitaren la instrumentació. Fins 1985 es tenia un coneixement ampli de quin era el moviment ideal en la utilització de les llimes endodòniques, però Roane va canviar la perspectiva que es tenia fins aquell moment quan va reintroduir els moviments basats en l'acció d'eixamplament i va proposar els moviments rotacionals de força balancejada (Roane i cols., 1985).

Posteriorment, cap a l'any 1992, De Deus va preconitzar una tècnica similar anomenant-la de moviments oscil·latoris, amb resultats que van indicar una baixa incidència de desviacions i una millor centralització del conducte radicular. Aquests tipus de moviments estaven indicats per a instruments manuals i van promoure l'automatització basada en aquests principis. Aquestes tècniques són un conjunt de moviments alternants de dreta a esquerra amb la finalitat d'aconseguir una acció més efectiva de l'instrument al llarg de les parets dels conductes radiculars, per deixar-lo més centralitzat i disminuir les alteracions de la trajectòria original del conducte radicular (Sydney i Batista, 2005).

La reintroducció dels moviments alternants amb el concepte de força balancejada (Roane i cols., 1985) i el coneixement de la nocivitat de la punta dels instruments que relataven Miserendino i cols. durant el mateix any, van ser uns fets crucials per a que els contraangles de rotació alternant tornaren al mercat, classificant-se com sistemes alternants o de rotació alternant, recíproca o oscil·latoris (Sydney i Batista, 2005).

Els contraangles amb rotació alternant lateral simètrica (30° o 45°) que anaren sorgint al mercat van ser:

- M-4 (Kerr)
- Tep 10R (NSK)
- Endo-Gripper (Moyco-Union Broach)

- Contraangle Kavo Intra-Endo3 LD
- Tep Super 16
- Endo-Eze (Ultradent)
- Contraangle Endo-Express 4:1 (Essential Dental Systems)

El sistema Endo-Eze file System (Ultradent) va sorgir com a complement introduït per als contraangles Giromatic o per al contraangle que duu el mateix nom que les llimes. Aquestes llimes formaven part d'una tècnica que s'anomenava AET (Tecnologia Endodòncia Anatòmica). Es tractava de quatre instruments d'acer inoxidable dissenyats per a la neteja del terç mitjà del conducte, amb diferents grandàries i conicitats: 0,10, conicitat 0,025; 0,13, conicitat 0,35; 0,13, conicitat 0,45 i 0,13, conicitat 0,06. Per a la preparació de la regió apical s'utilitzaven les llimes Apical files, que són unes llimes d'ús manual d'acer inoxidable (de 0,08 mm fins 0,20mm) i de NiTi (de 0,25 fins 0,50). Donat que la majoria de defectes ocorren al terç apical, l'ús de llimes manuals després de preparar el cos del conducte radicular permetia controlar millor l'instrument i crear un millor modelatge (Riitano, 2005).

Altres llimes que s'han utilitzat específicament amb aquest tipus de motors, on els moviments alternants són simètrics, concretament per al motor Endo-Express, són les llimes SafeSiders (EDS). Es tracta d'un sistema de tres llimes de NiTi del 30/0,04, 25/0,06 i 25/0,08 i 8 llimes d'acer inoxidable amb conicitat 0,02 (del 8 al 40). La seua secció transversal és quadrada amb una superfície plana i segons Wan i cols. (2010) millora l'eficàcia de tall d'aquestes llimes comparant-les amb les llimes i eixampladors tipus K, perquè té una bona evacuació dels detritus i una fulla de tall addicional.

1.4.2 SISTEMES DE LLIMA ÚNICA AMB MOVIMENTS ALTERNANTS.

L'evolució de l'endodòncia automatitzada va ser molt gran, i la utilització de les llimes de NiTi accionades per motor en la pràctica diària és una realitat. Però sempre ha hagut l'afany d'obtenir un sistema de treball que augmente la producció, mantinga o millore la qualitat del resultats, disminuisca el temps i l'esforç físic. Per tant, el temps, s'imposa cada vegada més i influeix en l'elecció dels materials, instruments i tècniques que seran utilitzades durant la preparació del conducte radicular (Sydney i Batista, 2005).

Abans de la introducció dels últims sistemes alternants de llima única Recipro i WaveOne, un estudi de Yared i cols. (2008) basant-se en la tècnica de les forces balancejades, donava un nou enfocament realitzant la conformació del conducte radicular amb una única llima ProTaper F2, utilitzada amb moviments alternants. Aquests autors presentaren una nova perspectiva per a les llimes de NiTi amb la utilització dels moviments alternants asimètrics (144° CW i 72° CCW) en lloc del moviment de rotació continua, i es va suggerir com un avantatge per a la preparació del conductes corbats amb l'ús d'una única llima de NiTi.

El concepte d'emprar una única llima de NiTi per a preparar tot el conducte radicular és molt interessant, perquè la corba d'aprenentatge es considera reduïda com a resultat d'una tècnica simplificada. D'altra banda, l'ús d'una única llima de NiTi té probablement una millor rendibilitat que els convencionals sistemes rotatoris multillimes de NiTi (Yared i cols., 2008). A més el temps de treball es redueix, realitzant-se la conformació del conducte radicular aproximadament 4 vegades més ràpidament (Dhingra i cols., 2013).

La següent generació de motors amb moviments alternants realitzen un moviment asimètric en sentit horari (CW) i antihorari (CWW). En alguns motors es poden seleccionar els angles del moviment alternant i en altres sols es poden utilitzar els moviments alternants preprogramats al motor:

- Motor ATR Tecnika Vision (Dentsply-Maillefer)
- Motor Dual Satelec Endo (Acteon) amb contraangle reductor 16:1 de W&H o 20:1 de NSK, en aquest motor es poden modificar els angles del moviment alternant.
- VDW Silver (VDW) amb contraangle reductor 6:1 de Sirona Dental Systems
- Motor WaveOne (Dentsply- Maillefer) amb contraangle reductor 6:1 de Sirona Dental Systems
- X-Smart plus (Dentsply-Maillefer)

I l'última generació de motors amb moviments alternants, que són motors sense fil amb aplicacions per a iPad:

- VDW.Connect Drive™ amb l'aplicació VDW.CONNECT Mobility (VDW)
- X-Smart iQ™ amb l'aplicació Apple iOS iQ (Dentsply-Maillefer)

1.5 LIMITACIONS DE LES LLIMES DE NITI ACCIONADES MECÀNICAMENT.

Actualment, les llimes de NiTi accionades per motor són l'elecció per a instrumentar el conducte radicular. Les innovacions tecnològiques han resultat en nous conceptes de disseny dels instruments, dels aliatges de NiTi i dels moviments, amb tècniques més senzilles i més ràpides (Peters i Paqué, 2010).

La superelasticitat dels aliatges de NiTi, la capacitat de tall dels instruments i les puntes no actives, permeten realitzar preparacions més centrades (Gutman i cols., 2012, Peters i Paqué, 2010). D'aquesta manera s'aconsegueix que les llimes de NiTi siguin més conservadores i precises, reduint els errors que es poden produir amb la instrumentació dels conductes radiculars com: transports apicals o *zips* apicals, esgraons, formacions de falses vies, perforacions... A més, aquests sistemes realitzen una conformació del conducte amb una conicitat adequada que afavoreix la irrigació i la posterior obturació. Malgrat aquestes millores, el principal inconvenient continua sent la fractura d'aquestes llimes de manera inesperada (Sattapan i cols., 2000; Gutmann i cols., 2012).

La fractura d'una llima, si els intents d'eliminar-la fracassen, produirà que siga impossible completar-se la preparació, desinfecció i obturació del sistema de conductes com s'havia planificat. Com és qüestionable si el fragment de l'instrument pot segellar el conducte suficientment, en els plànols longitudinal o transversal, hi ha un risc continu d'infecció persistent i, eventualment, de fracàs del tractament (Hülsmann, 2009).

1.5.1 MECANISMES DE FRACTURA.

En general, els instruments rotatoris es fracturen de dues maneres diferents: per torsió i per flexió.

- La fractura per torsió o el límit de resistència màxima dels instruments, ocorre quan la punta o altra part de l'instrument permanece bloquejada en el conducte mentre el mànec segueix rotant, amb el que s'exerceix un *torque* suficient com per a fracturar la punta, superant-se el límit elàstic del metall i produint-se una deformació plàstica prèvia a la fractura (Sattapan i cols., 2000, Bassi, 2002).

- La fractura per fatiga cíclica o fatiga per flexió es dona quan la càrrega cíclica duu a la fatiga del metall. La causa és el moviment de flexió i de deflexió de les llimes en conductes radiculars corbats, de manera que apareix una contracció en la superfície interna i una expansió en la superfície externa. Al girar la llima i completar 180 graus o mitja volta, les molècules de la superfície de la llima sofreixen una inversió i passen a sofrir expansió. Aquest tipus de fractura ocorre de manera inesperada, sense signes de deformació prèvia (Sattapan i cols., 2000; Pruett i cols., 1997; Cheung, 2007c).

Es considera que la fatiga cíclica és un dels pitjors esforços que una aliatge ha de suportar i degut al moviment rotatori que les llimes de NiTi descriuen quan treballen dins dels conductes radiculars, aquestes estan subjectes a la fatiga cíclica. Aquest problema impedeix la fabricació d'instruments endodòncics d'acer inoxidable per a la rotació continua, degut a que l'acer desenvolupa fatiga cíclica després de soles unes quantes voltes (Bassi, 2002).

En una revisió realitzada per Parashos i Messer a l'any 2006, la freqüència de fractura clínica dels instruments rotatoris de NiTi era aproximadament d'un 1%, en un rang del 0,4 al 3,7%. Altres autors han descrit que la prevalença de fractures dels instruments de NiTi es trobava entre l'1-6% de les dents estudiades (Hülmann, 2009; Tzanetakis i cols., 2008). A l'analitzar els factors clínics participants en la fractura de l'instrument, s'han de tenir en compte ambdós factors, la càrrega per torsió i la fatiga cíclica. Parashos i cols. (2004) trobaren que d'un 5%, el 3,5% eren causades per fatiga cíclica, i l'1,5% per fractura per torsió. En canvi Sattapan i cols. (2000) observaren que la fractura per torsió es donava al 55,7% dels casos, i per fatiga cíclica al 44,3%.

Clínicament, la fatiga cíclica pareix que es dona de manera més prevalent al conductes corbats, mentre que la fractura per torsió també pot ocórrer en conductes rectes quan s'utilitza molta força apical (Sattapan i cols., 2000; Cheung i cols., 2007c). De totes maneres, no es tracta d'entitats separades, especialment en conductes corbats (Peters i Paqué, 2010; Kim i cols., 2012b).

1.5.2 FACTORS QUE INFLUEIXEN EN LES FRACTURES DELS INSTRUMENTS.

1.5.2.1 Factors dentaris

Són els factors d'estrès que podem trobar a les dents:

- Grau i localització de les curvatures dels conductes radiculars (relacionades directament amb les fractures per fatiga cíclica):
 - Curvatures severes.

Les curvatures abruptes moltes vegades no permeten una instrumentació adequada del terç apical de la curvatura. Els instruments emprats per a preparar el conducte són sotmesos a una tensió alta en el punt de màxima curvatura, i es produeix un augment del risc de fractura (Hülsmann i Schäfer, 2009).

Per a determinar la severitat d'una curvatura hem de tindre en compte els paràmetres de la curvatura i la posició d'aquesta dins del conducte radicular:

Paràmetres de la curvatura.

La curvatura d'un conducte radicular es va definir històricament utilitzant el mètode d'Schneider en 1971. Aquest mètode utilitza únicament un paràmetre per a definir un angle en graus sexagesimals. Per a determinar els graus de la curvatura radicular Schneider dibuixava un línia paral·lela a l'eix longitudinal de l'arrel i un altra línia recta des de l'apex que interceptava la primera línia en el punt en el qual el conducte comença a desviar-se de l'eix longitudinal. L'angle agut format per aquestes dos línies definia els graus de la curvatura radicular (Schneider, 1971).

Aquest mètode utilitza únicament un paràmetre per a definir la curvatura del conducte radicular, però té moltes limitacions. I una mateixa curvatura canvia l'angle mesurat segons la seua localització (Plotino i cols., 2009b).

És per això que actualment s'utilitza el mètode de Pruett i cols. (1997), que descriu la forma de qualsevol curvatura del conducte radicular amb més

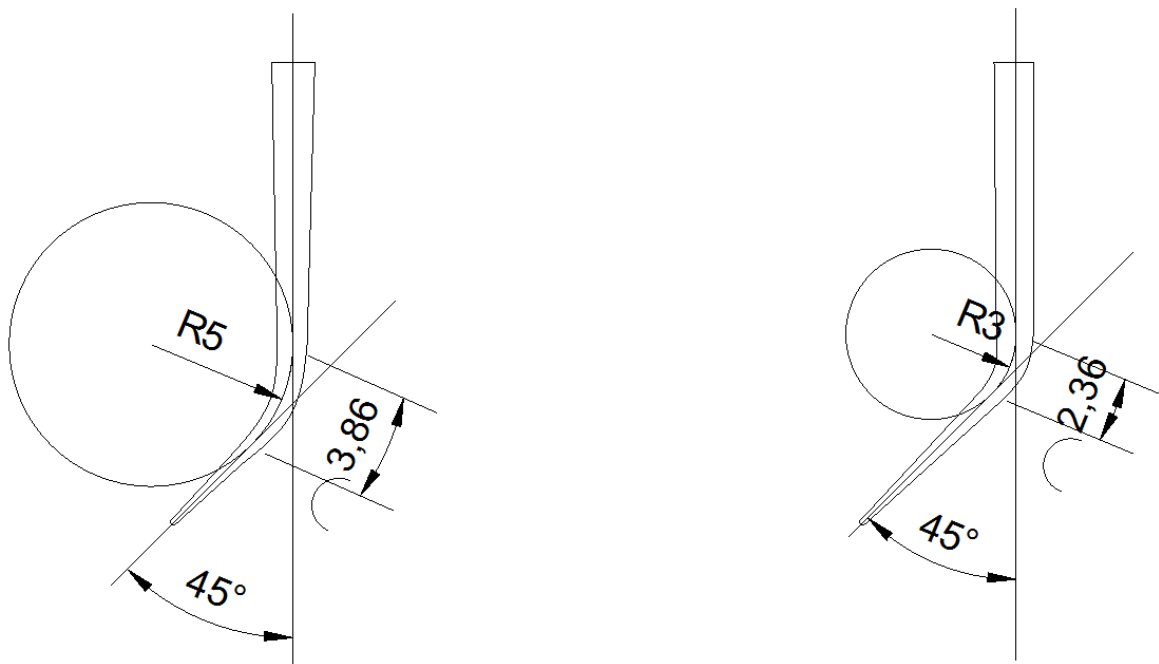
precisió utilitzant dos paràmetres: l'angle de curvatura i el radi de curvatura.

Aquests paràmetres es mesuren traçant una línia al llarg del l'eix longitudinal de la part coronal del conducte radicular i una segona línia al llarg de l'eix longitudinal de la porció apical del conducte. Hi ha dos punts d'inflexió on aquestes dos línies es desvien, el punt de la primera línia seria on comença la curvatura del conducte i el de la segona línia seria el punt on acaba la curvatura (Pruett i cols., 1997).

- L'angle de curvatura. És l'angle agut que formen l'intercepció de l'eix longitudinal de la part coronal i el de la porció apical, que també es pot definir com l'angle format per les línies perpendiculars traçades a partir dels dos punts d'inflexió i que s'intercepten en el centre d'un cercle.
- El radi de curvatura del conducte radicular. Està constituït pel radi del cercle traçat per eixes dues línies perpendiculars als punts on es desvien els eixos longitudinals coronal i apical del conducte, que per tant seria la longitud en mm d'eixes dues línies.

El radi de curvatura representa la severitat amb la qual un conducte es desvia d'una línia recta o dit d'una altra manera, com és d'abrupta una determinada curvatura.

Els paràmetres de l'angle i radi de curvatura són independents, de manera que dues arrels poden tenir el mateix angle de curvatura, però radis de curvatura diferents, que indica que determinades curvatures són més tancades que altres. Quant més menut siga el radi de curvatura, més abrupta és la desviació del conducte (Martin i cols., 2003).



Il·lustració 1: Influència del radi en la curvatura del conducte (D. Ramón)

La curvatura del conductes és un dels factors més importants que augmenten el risc de fractura de les llimes. Quant major és l'angle de curvatura d'una arrel, menors seran els cicles fins la fractura (Zelada i cols., 2002; Li i cols., 2002; Martín i cols., 2003; Bui i cols. 2008; Bhagabati i cols. 2012; Elsaka i el Elnaghi, 2015).

I s'han testat instruments amb radis de curvatura de 2 mm, 5 mm, 6 mm , 9 mm i 10 mm, amb la conclusió que quant menor és el radi de curvatura, menor és la resistència a la fatiga cíclica. (Pruet i cols., 1997; Mize i cols., 1998; Haïkel i cols., 1999; Grande i cols., 2006; Inan i cols., 2007; Inan i cols., 2011; Lopes i cols., 2013c).

Plotino i cols. (2010c) mostraren que les curvatures apicals abruptes de 90° augmentaven molt el risc de fractura dels instruments.

Posició de la curvatura en el conducte radicular.

La posició de la curvatura en el conducte radicular també és un factor important, ja que quan la curvatura està localitzada en una porció coronal

del conducte, l'instrument sofrirà major estrès, perquè en eixa posició el diàmetre de l'instrument és major. La resistència a la fatiga cíclica augmenta en la zona apical (Lopes i cols., 2011; Arias i cols., 2012; Lopes i cols., 2013c).

- Dobles curvatures (en forma de "S").

Els conductes radiculars que tenen aquesta forma en "S" o en baioneta, tenen dos curvatures, que recorren en direccions oposades. Segons els estudis la incidència d'aquest tipus de conductes és del 17,5% de tots els conductes radiculars. Són molt comuns en l'arrel distovestibular dels molars maxil·lars i en les arrels mesials dels molars mandibulars (Hülsmann i Schäfer, 2009).

L'anatomia tant complicada d'aquests tipus de conductes implica un risc molt gran en adreçar el conducte, produir transports apicals, pèrdua de la longitud de treball i, per suposat, fractures dels instruments.

Hi ha dos estudis que han testat l'efecte que tenen aquests tipus de curvatures en la resistència a la fatiga cíclica dels instruments i han observat que quant més complex és el conducte, més adversos són els seus efectes. I en aquests models de doble curvatura els instruments sempre es fracturaven primer en la segona curvatura apical (Al-sudani i cols., 2012; Neelakantan i cols., 2015).

- Conductes radiculars confluents.

Aquest tipus de conductes poden produir confusió durant la preparació i l'obturgació. Moltes vegades un dels conductes s'uneix a l'altre amb una curvatura molt desfavorable, que cal detectar, i que farà que siga impossible arribar a la constricció apical des dels dos conductes (Hülsmann i Schäfer, 2009). Les fractures dels instruments en aquest punt de confluència poden produir-se amb molta facilitat, perquè es tracta de curvatures molt tancades o abruptes.

- Conductes estrets i / o calcificats.

Inicialment la calcificació és un procés que involucra la reducció de la grandària de la càmera i conductes radiculars com a resultat de formació de dentina pels odontoblasts de la polpa vital de manera fisiològica. Aquest procés es pot accelerar quan es produeixen diferents estímuls patològics (com la caries, trauma oclusal, luxacions...) formant dentina terciària, per produir una barrera (Hülsmann i Barthel, 2009). També es pot produir una calcificació completa o parcial del conducte radicular com a reacció d'una pulpitis crònica de llarga duració. Les calcificacions del sistema de conductes es produeixen més freqüentment al terç coronal i mig que al terç apical (Hülsmann i Schäfer, 2009).

És en aquest tipus de conductes atrèsics on la fractura per torsió pot ocórrer perquè avançant cap a la longitud de treball, la llima podrà trobar situacions anatòmiques que podran impedir l'avanç o dificultar el pas d'aquesta en la seua porció més fràgil. Si es força el pas de la llima, l'instrument podrà sofrir una tensió superior a les seues característiques i fracturar-se. Des del punt de vista mecànic, quant major siga la diferència entre el diàmetre del conducte i de la llima, major és la força que l'operador deurà exercir sobre el contraangle per a que la llima faça la seua feina de tall. Per tant, la gran dificultat és aprendre o dominar la sensibilitat per a distingir situacions de risc (Bassi, 2002).

1.5.2.2 Factors de l'instrument

- Disseny de la llima (Secció transversal, conicitat, grandària i eficàcia de tall).

El comportament dels instruments també està relacionat amb la seua geometria i el seu disseny i la secció transversal de les llimes n'és un factor important. Sabem per les lleis de la física, que quant major és el diàmetre i més massa tinga aquesta secció més estarà subjecta a fatiga cíclica (Berutti i cols., 2003; Grande i cols. 2006). Per tant, quan major siga l'àrea de la secció transversal menor serà la resistència a la fatiga cíclica (Oh i cols., 2010).

De la mateixa manera, les llimes de major conicitat es fracturen amb menor nombre de cicles (Peters, 2004; Parashos i cols., 2004; Inan i cols., 2007). Varis

estudis han trobat que la resistència a la fatiga cíclica disminueix a mesura que s'augmenta el diàmetre en el punt de màxima curvatura, el qual està determinat per la grandària de l'instrument i per tant, pel diàmetre de la punta i la conicitat (Pruett i cols., 1997; Grande i cols., 2006; Plotino i cols., 2006).

No obstant, també s'ha observat que un augment del diàmetre de l'instrument o de l'àrea de la secció transversal pot contribuir a incrementar la resistència a la fractura per torsió (Parashos i Messer, 2006; He i Ni, 2010; Baek i cols., 2011). Perquè des del punt de vista de la mecànica podem dir que el límit de resistència d'una llima endodòncica és proporcional al radi de l'instrument en la zona de treball i per tant, també seria directament proporcional al *torque* (esforç de torsió) necessari per trencar les forces de cohesió dels àtoms en aquell punt (Bassi, 2002).

El disseny de la llima és important per a evitar errors en la preparació i és per això que les llimes amb puntes actives produïen més *zips* apicals i perforacions que les llimes amb puntes no actives, sobretot en corbes apicals tancades. I respecte a l'eficàcia de tall, les primeres llimes tenien fulles de tall passives, però la introducció de seccions transversals amb fulles tallants (actives) no va afectar a l'habilitat de centrat de les llimes. Sols augmenta la possibilitat de transport apical quan es treballa per davall del foramen apical (Peters, 2004).

La forma de la secció transversal també pot influir, de manera que estudis com els de Cheung i cols. (2011) i Versluis i cols. (2012), mitjançant una anàlisi d'elements finits, observaren que les seccions transversals triangulars presenten una major resistència a la fatiga que les quadrades. Però, segons Baek i cols. (2011), les seccions rectangulars presenten una major rigidesa torsional que les triangulars.

Diemer i cols. (2013) van observar que l'estrès que es generava durant la instrumentació era menor en els instruments amb una secció transversal de triple hèlix asimètrica, mentre que el *torque* no canviava. Segons aquests autors la rotació continua asimètrica augmenta la resistència a la fatiga cíclica dels instruments (Çapar i cols., 2015b).

Pel que respecta a la distància entre espires o *pitch*, la rigidesa torsional dels instruments augmenta quan el *pitch* és menor i per tant, disminueix la flexibilitat (Baek i cols., 2011; He i Ni, 2010).

- Tipus d'aliatge metàl·lic, procés i qualitat de la fabricació.

Com hem vist anteriorment, en l'actualitat els fabricants busquen la millora de les propietats mecàniques dels instruments de NiTi mitjançant el control de la microestructura, i no reduint els defectes de superfície. Per això, s'han centrat en perfeccionar els aliatges de NiTi, realitzant procediments termomecànics capaços de modificar les temperatures de transició -TTR- (Shen i cols.,2013). Això ha fet que els nous aliatges com M-Wire, Fase-R, CM-Wire i Gold pareix que milloren les propietats de superelasticitat i memòria de forma, que a la seua vegada augmenten la resistència a la fatiga cíclica d'aquests instruments.

- Tipus de moviment, velocitat i *torque*.

La utilització del moviment alternant en lloc del moviment de rotació continua es va proposar com un avantatge per a la preparació del conductes corbats. S'han realitzat varis estudis comparant els moviments de rotació continua amb els moviments alternants i la majoria d'autors han observat que el moviment alternant augmenta la resistència a la fatiga cíclica dels instruments (Gavini i cols., 2012; Gambarini i cols., 2012a; Lopes i cols., 2013; Pedullà i cols., 2013a; Pérez-Higueras i cols., 2013; Rubini i cols., 2013; Kiefner i cols., 2014; Vadhana i cols., 2014; Karatas i cols., 2015; Arslan i cols., 2015).

La velocitat de rotació pot influir en la resistència a la fractura, de manera que quan els instruments són utilitzats a majors rpm (revolucions per minut) augmenta la fatiga cíclica, a diferència de quan són gastats amb velocitats menors (Yared i cols., 2001a; Zelada i cols., 2002; Li i cols., 2002; Martín i cols., 2003; Lopes i cols., 2009; De Deus i cols., 2010b, Pérez-Higueras i cols. 2013). Però hi ha autors com Pedullà i cols. (2014a) que observen que la velocitat no afecta la fatiga cíclica dels instruments Mtwo amb una mateixa grandària i conicitat.

El *torque* és un altre paràmetre que pot influir. Si s'utilitza un motor que genera un alt *torque* és possible que s'excedeixi el límit màxim de resistència d'un instrument (o fractura per torsió), a més de reduir la resistència a la fatiga cíclica (Gambarini, 2001). Però Yared i cols. (2001b) no trobaren diferències utilitzant varis tipus de motors: sense control de *torque* i amb control de *torque* alt i baix; en canvi, Berutti i cols. (2004) en un estudi amb conductes en blocs de resina trobaren que la vida dels instruments augmentava quan s'utilitzaven un *torque* de 6,8 Ncm, comparant-lo amb un *torque* de menys de 3 Ncm.

Teòricament, un instrument que es gasta amb un motor d'alt *torque* és més actiu, i la probabilitat de que l'instrument es quedi bloquejat és alta, però un baix *torque* redueix l'eficàcia de tall, i la progressió de l'instrument es pot dificultar perquè l'operador intente forçar l'instrument (Yared i cols., 2001b); és possible que per aquests motius els resultats són dispars. Peters i Paqué (2010), aconsellen baix *torque* per a les llimes de menor conicitat i augmentar el *torque* en les de major conicitat per a millorar l'eficàcia de la preparació.

De totes maneres, és recomanable gastar motors endodòncics amb control de *torque*, perquè les llimes poden utilitzar-se dins d'un rang de força de rotació permesa per a cadascuna. (Gambarini, 2001; Peters i Paqué, 2010). El límit màxim de resistència d'un instrument, o la fractura per torsió d'aquest, és directament proporcional a les forces de cohesió dels àtoms del metall que el componen. Per tant, és igual al *torque* necessari per fracturar aquest instrument.. La definició és molt simple, però no podem oblidar que les llimes endodònciques presenten una conformació cònica, i les forces resultants en la superfície lateral de la llima no es distribueixen uniformement, ja que posseïxen diversos radis (Yared i cols., 2001b; Bassi, 2002).

El Factor de Macpadden per a la fractura dels instruments per càrrega torsional és el quocient entre el *torque* necessari per a la fractura i el *torque* de treball. De manera que quan major és el valor, més segura és la llima (Peters i Peters, 2011).

- Efecte de la solució irrigadora

Un altre factor potencial que pot limitar la resistència a la fatiga cíclica de les llimes és la corrosió que es pot donar en presència d'una solució d'hipoclorit de sodi (Cheung i cols., 2008). La literatura ha reportat diferents resultats de l'efecte d'aquest irrigant, però amb diferents tests i protocols d'immersió. Peters i cols. (2007) van trobar una reducció en la resistència a la fatiga cíclica després del contacte amb ClONa durant 1 o 2 hores. Però altres estudis van concloure que la immersió de ClONa durant 45 segons, 1, 3 i 5 minuts no va reduir de manera significativa la resistència a la fatiga cíclica dels instruments Reciproc, WaveOne i ProTaper (Pedullà i cols., 2013b i 2014b). Per tant, la corrosió podria donar-se si els instruments quedaren immersos completament en ClONa, però en la pràctica clínica l'irrigant sols està en contacte amb les vores tallants i durant un temps limitat (Peter i Paqué, 2010).

Amb la utilització de l'EDTA al 17% durant 3 minuts d'immersió sí que s'ha trobat una reducció de la resistència a la fatiga cíclica dels instruments. En canvi els productes que combinen diferents irrigants amb surfactants, com per exemple Hypoclean (ClONa al 5,25% i surfactant) o EDTA Plus (EDTA al 17% i surfactant) no van influir en la resistència a la fatiga cíclica, excepte per a la llima Reciproc en contacte amb Hypoclean. (Pedullà i cols., 2014b).

- Tractaments tèrmics addicionals: efecte de l'esterilització.

L'efecte de l'esterilització dels instruments en la resistència a la fatiga cíclica ha sigut tractat en varis estudis, i s'han trobat resultats dispars. Mize i cols. (1998) no trobaren diferències significatives amb els instruments autoclavats o no, argumentant que les temperatures que s'utilitzen als autoclaus no eren el suficientment altes com per a modificar l'estructura cristal·lina dels aliatges de NiTi convencional. En canvi, Viana i cols., (2006) trobaren que després de cinc cicles d'esterilització sí que es produïen canvis en les propietats mecàniques dels instruments, de manera que va augmentar la resistència a la fatiga cíclica. Altres estudis com el de Hilfer i cols. (2011) i Plotino i cols., (2012a) mostraren diferents resultats segons les llimes testades.

- Nombre d'utilitzacions.

Fractures inesperades poden ocórrer si l'usuari insisteix en no tirar els instruments, inclús quan s'han utilitzat molt poques vegades, degut a la fatiga metàl·lica. El motiu d'aquestes fractures són les microfractures que ocorren en la superfície dels instruments, que no són visibles amb els ulls (Bassi 2002). Els instruments de NiTi també poden fallar en un sol ús, quan es produeix una sobrecàrrega de l'instrument. És per això que hi ha molta variabilitat de recomanacions de nombre d'usos, entre 1 i 27 conductes radiculars (Pedullà i cols., 2013b).

De manera que l'ideal és un únic ús de l'instrument, que a pesar de no eliminar al 100% el risc de produir-se una fractura (Plotino i cols., 2012b), redueix l'acumulació de la fatiga del metall i a més evita el risc de contaminació creuada. És per això que actualment molts dels instruments que han sorgit al mercat són d'un sol ús.

1.5.2.3 Factors de l'operador o de manipulació

Factors relacionats com una pressió excessiva, una apertura cameral inadequada, o la no realització d'una via de lliscament o *glide path* poden influir en que un instrument es trenque dins del conducte radicular (Berutti i cols., 2004). També s'han recomanat diferents estratègies per a la conformació del conducte radicular mitjançant varies tècniques de preparació com l'apico-coronal (*crown-down*), la instrumentació amb una llima única i l'aplicació d'un moviment de raspallat o de picat segons les llimes que s'utilitzen (Lee i cols, 2013).

Una de les majors dificultats per als usuaris dels sistemes rotatoris amb l'ús de les llimes de NiTi és la determinació de la força aplicada al contraangle per a que la llima execute el tall. Els fabricants sempre han insistit en que s'ha de fer poca pressió. Però aquesta regla és difícil de transmetre a l'usuari. De manera que les habilitats individuals existeixen i cada individu rep els missatges de forma diferent i els posa en pràctica també de manera diferent. Però no podem considerar per tot açò, que el factor humà siga el principal motiu de les fractures de les llimes endodònciques (Bassi, 2002).

L'experiència de l'operador pot ser un altre factor. Hi ha estudis que han observat un major nombre de fractures en el període d'aprenentatge o amb operadors inexperts (Yared i cols., 2001a; Al-Omari i cols., 2010). Però també hi ha altres que demostren que els instruments rotatoris poden ser usats tant per odontòlegs sense experiència com experimentats, com un estudi recent de Muñoz i cols. (2013) que observaren que la conformació del conducte utilitzant la llima Recipro R25 no depenia de l'experiència. Però sí que observaren que el temps de treball era menor per als de major experiència i que era molt important entrenar abans d'utilitzar qualsevol sistema de llimes nou per molt senzill que siga.

1.6 AVALUACIÓ DE LA RESISTÈNCIA A LA FATIGA CÍCLICA DE LES LLIMES DE NITI UTILITZADES AMB MOVIMENTS ALTERNANTS EN DIFERENTS CURVATURES. REVISIÓ BIBLIOGRÀFICA.

Com hem vist, la fractura per fatiga cíclica es produeix per cicles alternants de tensió i compressió als que els instruments estan sotmesos quan roten en la regió de màxima curvatura dels conductes radiculars. La resistència a la fatiga cíclica dels instruments rotatoris de níquel-titani ha estat estudiada per la majoria d'autors utilitzant conductes radiculars artificials amb diferents característiques, com per exemple l'angle, radi i arc de la curvatura, la localització del punt de màxima curvatura i el tipus de conducte radicular artificial. Però hi ha una varietat molt àmplia de dispositius usats per a testar la fatiga cíclica dels instruments (Plotino i cols., 2009b).

L'any 2008 Yared i cols. van publicar l'estudi que es considera el precursor dels actuals sistemes alternants de llima única, mitjançant la utilització d'una única llima ProTaper F2 amb moviment alternant per a conformar el conducte radicular. Els autors van proposar la utilització dels moviments alternants com una alternativa a la rotació continua per a reduir els risc de fractures dels instruments.

Posteriorment Varela-Patiño i cols. (2010) testaren les llimes ProTaper (S1, S2, F1, F2 i F3) amb moviment de rotació continua i moviment alternant de 45° en sentit antihorari (CCW) i de 60° en sentit horari (CW). Utilitzaren 120 conductes de molars amb un angle

de curvatura major de 30°. Els resultats indicaren que els instruments utilitzats amb moviment alternant aguantaren més nombre d'usos, sent en els instruments S1 i S2 on es va observar la major diferència.

A l'any 2010, De Deus i cols. (2010b) també estudiaren la resistència a la fatiga cíclica de la llima ProTaper F2 utilitzada amb moviments alternants i de rotació continua. Realitzaren un model estàtic amb un tub doblegat que simulava un conducte radicular, amb 1,04 mm de diàmetre, 20 mm de llarg i un radi de curvatura de 6 mm; l'arc del tub mesurava 9,4 mm i la porció recta 10,6 mm.

Dividiren les mostres de 30 llimes en tres grups:

- a) ProTaper F2 moviment de rotació continua a 250 rpm
- b) ProTaper F2 moviment de rotació continua a 400 rpm
- c) ProTaper F2 moviment alternant a 400 rpm.

Els moviments alternants milloraven la resistència a la fatiga cíclica de manera estadísticament significativa comparats amb la rotació continua i la utilització d'una major velocitat afectava també a la fatiga cíclica, de manera que els instruments es fracturen més ràpidament a 400 rpm.

Altres estudis observaren com la tècnica introduïda per Yared i cols. (2008) d'una única llima ProTaper F2 utilitzada amb moviments alternants produïa menys extrusió apical de detritus que la tècnica manual i una quantitat similar que la tècnica convencional de ProTaper Universal (De Deus i cols., 2010a). I Paqué i cols. (2011) concluiren al seu estudi amb microtomografia, que la conformació del conducte també era similar a la tècnica convencional de ProTaper, però que amb la utilització d'una única llima s'arribava més ràpidament a la longitud de treball.

You i cols. (2010) avaluaren la vida útil i els temps de treball de les llimes ProTaper F2 utilitzades com a llima única amb moviments alternants (140° CW, 45° CCW) comparant-la amb la seqüència de llimes de ProTaper Universal amb moviment de rotació continua. Els autors utilitzaren 120 conductes de molars superiors i inferiors corbats entre 20° i 45° angle de curvatura. Les conclusions de l'estudi van ser que la tècnica amb una llima única ProTaper F2 amb moviment alternant podia utilitzar-se de forma segura fins la longitud

de treball com a mínim en 6 conductes, i que la tècnica de llima única era significativament més ràpida.

Wan i cols. (2011) realitzaren un estudi de la resistència a la fatiga cíclica de 4 instruments endodòncics de NiTi: K3, ProFile, GT series X i SafeSiders (instrument alternant). Tots els instruments eren de 30/.04. Cada grup de l'estudi estava format per 12 llimes (192 llimes en total). Cada tipus de llimes es testaren en un model estàtic de tubs metàl·lics d'1,8 mm de calibre, doblegats a diferents curvatures, de manera que cada grup de llimes es dividia en 4 subgrups:

- a) 30° i 5 mm de radi de curvatura.
- b) 30° i 7,5 mm de radi de curvatura.
- c) 45° i 5 mm de radi de curvatura.
- d) 45° i 7,5 mm de radi de curvatura.

Les llimes SafeSiders no es fracturaren dins del 5 primers minuts de rotació alternant sense pausa.

Entre els instruments testats, deixant a banda les llimes SafeSiders, K3 es fracturava significativament abans que ProFile i GT Series X per a totes les curvatures i radis; mentre que no es trobaren diferències estadísticament significatives entre ProFile i GT Series X.

Excepte amb els instruments SafeSiders que no es fracturaren en els 5 minuts que durava l'estudi per a cada llima, la resta de llimes es fracturaren més prompte amb l'angle de curvatura de 45° ($p < 0,008$).

Respecte al radi de curvatura es trobaren diferències significatives amb l'angle de curvatura de 30°, en canvi amb l'angle de 45° no hi havia diferències.

Kim i cols. (2012a) testaren la fatiga cíclica i la resistència torsional de Reciproc, WaveOne i ProTaper Universal. Per a realitzar l'avaluació de la fatiga cíclica crearen un model dinàmic de conductes similar al de Gambarini (2001) que consistia en dues peces metàl·liques: un bloc còncau amb un solc i un cilindre convex, de 45° d'angle de

curvatura, 6,06 mm de radi de curvatura i 0,6 mm de diàmetre apical. Utilitzaren moviments continus de dalt a baix d'uns 4 mm en cada direcció, per a simular el moviment de picar.

En aquest estudi s'utilitzaren 10 llimes per a cada grup:

- a) Reciproc R25 amb moviment alternant recomanat pel fabricant (Reciproc all: 150° *CCW*, 30° *CW*)
- b) WaveOne Primary amb moviment alternant recomanat pel fabricant (WaveOne all: 170 *CCW* i 50° *CW*)
- c) ProTaper F2 amb moviment de rotació continua a 300 rpm

Dels tres grups els millors resultats foren per a la llima Reciproc ($p < 0,05$) i WaveOne va tindre una millor resistència a la fatiga cíclica que ProTaper, també de manera significativa.

Gavini i cols. (2012) estudiaren la resistència a la fatiga per flexió de la llima Reciproc R25 utilitzada amb moviments de rotació continua i alternant. Utilitzaren un model dinàmic (que simulava el moviment de picar) de cilindres que creaven 40° d'angle de curvatura i 5 mm de radi.

L'estudi estava format per dos grups de 18 llimes cadascú:

- a) Reciproc amb moviment de rotació continua (300 rpm)
- b) Reciproc amb moviment alternant (mode Reciproc all: 150° *CCW*, 30° *CW*).

La llima Reciproc R25 utilitzada amb moviment alternant aconseguia de manera significativa un nombre major de cicles abans de la fractura (mitjana de 1787,78 cicles) que utilitzada amb el moviment de rotació continua (mitjana de 816,39 cicles).

Plotino i cols. (2012b) van fer un altre estudi de resistència a la fatiga cíclica amb les llimes Reciproc R25 i WaveOne Primary, en conductes radiculars simulats. Aquest autors utilitzaren el model que ja havien descrit anteriorment en 2009 (Plotino i cols., 2009b). Es tractava d'un model estàtic de conductes en un bloc d'acer inoxidable, on el conductes tenien 60° d'angle de curvatura i 5 mm de radi de curvatura. El centre de la curvatura

estava a 5 mm de la punta de l'instrument i el segment de la curvatura mesurava uns 5 mm. I el conducte va estar fabricant reproduint la forma de l'instrument.

Cada grup de l'estudi estava format per 15 llimes:

- a) Grup Reciproc R25 amb moviments alternants recomanats pel fabricant, mode "Reciproc all" (150° *CCW*, 30° *CW*).
- b) Grup WaveOne Primary amb moviments alternants recomanats pel fabricant, mode "WaveOne all" (170° *CCW*, 50° *CW*).

La llima Reciproc R25 va obtenir millor resultats de resistència a la fatiga cíclica que la llima WaveOne Primary d'una manera estadísticament significativa.

Gambarini i cols. (2012a) realitzaren una anàlisi de la fatiga cíclica de la llima Twisted File (0,25/0,08) amb moviments alternants. Utilitzaren un model estàtic de conductes metàl·lics en un bloc d'acer inoxidable de 60° d'angle de curvatura, 3 mm de radi, 1,5 mm d'ample i una longitud de treball de 19 mm.

Testaren un total de 30 llimes, dividides en 3 grups segons el moviment a estudiar:

- a) TF amb rotació continua a 300 rpm
- b) TF amb moviment alternant 30 *CCW* i 150 *CW*
- c) TF amb moviment alternant 150 *CCW* i 30 *CW*

Aquesta llima usada amb moviments alternants tenia una resistència major a la fatiga cíclica de manera significativa comparada amb quan va ser utilitzada en rotació continua.

En canvi, no es van trobar diferències significatives entre el dos tipus de moviment alternant.

Arias i cols. (2012) investigaren diferències entre la resistència a la fatiga cíclica a nivell apical i coronal de les llimes Reciproc i WaveOne. Testaren les llimes en un model estàtic de 60° d'angle curvatura i 3 mm de radi. Aquest dispositiu el fabricaren per poder estudiar la fatiga cíclica de les llimes a 5 mm i a 13 mm de la seua punta. Utilitzaren el moviment

recomanat pel fabricant per a cada llima, i realitzaren l'estudi amb 4 grups de 30 llimes cadascú:

- a) Grup Reciproc a 5mm (150° CCW, 30° CW)
- b) Grup Reciproc a 13 mm (150° CCW, 30° CW)
- c) Grup WaveOne a 5 mm (170° CCW, 50° CW)
- d) Grup WaveOne a 13 mm (170° CCW, 50° CW)

Les llimes Reciproc eren més resistents a la fatiga cíclica que les WaveOne a les dues distàncies. I els dos sistemes van obtenir un millor resultat a 5 mm que a 13 mm de la punta.

Gambarini i cols. (2012b) estudiaren com influeixen diferents angles del moviment alternant en la fatiga cíclica de la llima K3XF de grandària 40 i conicitat de 0,06. Per a l'estudi utilitzaren un model estàtic de conductes metàl·lics en un bloc d'acer inoxidable de la sèrie 300, de 60° d'angle de curvatura, 5 mm de radi de curvatura en el centre d'un conducte d'1,5 mm d'ample. El centre de la curvatura estava a 5 mm de la punta i el segment corbat mesurava aproximadament 5 mm també.

Realitzaren 5 grups de 10 llimes cadascú, on totes les llimes s'utilitzaren a 300 rpm:

- a) Moviment alternant 30° CCW, 90° CW (angle de progrés per a cada cicle: 60°)
- b) Moviment alternant 30° CCW, 150° CW (angle de progrés per a cada cicle: 120°)
- c) Moviment alternant 30° CCW, 210° CW (angle de progrés per a cada cicle: 180°)
- d) Moviment alternant 30° CCW, 390° CW (angle de progrés per a cada cicle: 360°)
- e) Rotació continua (grup control)

El resultat del grup de rotació continua foren significativament inferiors que la resta. El grup que va obtenir els millors resultats va ser el primer grup, seguit del segon. De manera que van concloure que augmentant els angles del sentit horari (CW), que per a la llima K3XF es tracta de l'angle de progressió, es reduïa la resistència a la fatiga cíclica.

Castelló-Escrivá i cols. (2012) feren un estudi *in vitro* per a comparar la resistència a la fatiga cíclica de 3 instruments. Utilitzaren un model estàtic de conducte en un bloc de

metall, les característiques del qual eren que tenia 20 mm de llarg, 0,4 mm en la punta i 0,9 de conicitat amb diferents graus i radis de curvatura:

1. 60° i 8 mm de radi de curvatura
2. 45° i 8 mm de radi de curvatura
3. 60° i 5 mm de radi de curvatura
4. 45° i 5 mm de radi de curvatura

S'utilitzaren un total de 184 llimes: 80 llimes ProTaper F2, 24 llimes WaveOne Primary i 80 llimes TF (25/0,08).

- Les llimes ProTaper s'utilitzaren en rotació continua a 300 rpm.
- Les llimes TF s'utilitzaren en rotació continua a 500 rpm
- I les llimes WaveOne s'utilitzaren amb moviment alternant mode “WaveOne all” (170° CCW, 50° CW; i velocitat de 350 rpm)

WaveOne va obtenir els millors resultats de manera significativa als conductes de 45° (2 i 4). També al conducte de 60° i 5mm de radi (3), però la diferència amb la llima TF no era estadísticament significativa.

La llima TF obtingué els millors resultats al conducte de 60° i 8 mm de radi de curvatura (1) ; però el resultat va ser pràcticament igual al de la llima WaveOne.

ProTaper obtingué els pitjors resultats en tots els conductes i de manera significativa en els conductes 1 i 2.

El conducte amb la curvatura de 60° i 8 mm de radi, va ser el que pitjors resultats va obtenir amb els tres sistemes testats de manera significativa. En canvi el conducte de 45° i 5 mm de radi el que millors resultats va obtenir de manera estadísticament significativa també per al tres sistemes.

Pedullà i cols. (2013a) realitzaren un estudi on utilitzaren 180 llimes. Testaren les llimes rotatòries alternants Reciproc R25 i WaveOne Primary amb les llimes Mtwo (0,25/0,06) i les TF (0,25/0,06), en un model estàtic de conductes radiculars de 60° i 5 mm de radi de curvatura en un bloc metàl·lic, descrit anteriorment per Plotino i cols. (2009b). I cada

grup de llimes va ser dividit a la seua vegada en tres subgrups (de 15 llimes cadascú) segons el moviment testat:

- a) Moviment rotatori (300 rpm)
- b) Mode Reciproc all (150° CCW, 30° CW; i velocitat de 300 rpm)
- c) Mode WaveOne all (170° CCW, 50° CW; i velocitat de 350 rpm)

Les llimes usades amb moviments alternants mostraren de manera significativa una major resistència a la fatiga cíclica en totes les marques comparant amb moviments de rotació continua. Però no s'observà cap diferència entre els dos tipus de moviments alternants (Reciproc all i WaveOne all).

A l'estudiar les diferents marques de llimes de l'estudi, el grup que obtingué millors resultats en global, i especialment quan s'usà amb moviments alternants, va ser el de la llima TF, seguit de Mtwo, Reciproc R25 i WaveOne Primary.

Es trobaren també diferències significatives quan es comparà el mateix tipus de moviment entre Reciproc R25 i WaveOne Primary, de manera que Reciproc R25 va tindre una major resistència a la fatiga cíclica.

Quan es considerà el moviment recomanat pels fabricants per a cada grup, no es trobaren diferències significatives entre TF, Mtwo i Reciproc R25, mentre que la resistència a la fatiga cíclica de les llimes WaveOne Primary va ser menor que la resta.

Pedullà i cols. (2013b) estudiaren també la resistència a la fatiga cíclica de Reciproc i WaveOne després de realitzar una immersió en hipoclorit de sodi.

Utilitzaren un model estàtic similar al descrit per Plotino i cols. anteriorment (Plotino i cols., 2009b), en el que el conductes artificials tenien 60° de curvatura i 5 mm de radi, però en aquest cas el centre de la curvatura estava a 6 mm i el segment corbat mesurava uns 6 mm.

Testaren 15 llimes en cada grup (45 de cada marca), de manera que realitzaren 3 subgrups segons el protocol d'immersió en ClONa:

- a) Grup 1: cap immersió (grup control)

- b) Grup 2: immersió del 16 primers mm de la llima en ClONa al 5% i a 37° C en moviment durant 1 minut.
- c) Grup 3: la mateixa immersió que el grup 2 però durant 5 minuts.

Després de realitzar la immersió les llimes foren neutralitzades amb aigua destil·lada i foren sotmeses a l'estudi de fatiga cíclica:

1. Les llimes Reciproc R25 s'accionaren amb el protocol de moviment alternant recomanat pel fabricant "Reciproc all".
2. Les llimes WaveOne Primary s'accionaren amb el moviment alternant "WaveOne all".

No hi havia diferències dins del mateix grup de llimes al comparar els tres protocols d'immersió. Però els grups de llimes Reciproc R25 obtingueren un millor resultat de resistència a la fatiga cíclica que els grups de WaveOne Primary ($p < 0,0001$).

Rubini i cols. (2013) van realitzar un estudi amb l'objectiu de comprovar la resistència a la fatiga cíclica de la llima de NiTi Hyflex de 40/.04.

L'experiment es va dur a terme amb un model estàtic de conductes metàl·lics de diàmetre constant en un bloc d'acer inoxidable amb un angle de 135° (45° de curvatura).

Es feren dos grups de treball amb 12 llimes en cadascú:

- a) Hyflex 40/.04 amb moviment de rotació continua a 300 rpm
- b) Hyflex 40/.04 amb moviment alternant a 150° CCW, 30° CW i velocitat de 300 rpm (mode "Reciproc all")

Els resultats mostraren una millora significativa amb el moviment alternant.

Saber i El Sadat (2013) realitzaren un estudi sobre l'efecte d'alterar el rang de moviment alternant sobre la resistència a la fatiga cíclica i l'habilitat de conformació de la llima de NiTi WaveOne.

Per a l'estudi de la resistència a la fatiga cíclica utilitzaren un model estàtic de conductes metàl·lics en un bloc. Els conductes tenien 60° de curvatura i 5 mm de radi de curvatura, similars als de Plotino i cols. (2009b). Les llimes foren usades a 250 rpm i *torque* de 2,8 Ncm. L'estudi es va dividir en tres grups de 10 llimes cadascun, segons el tipus de moviment alternant:

- a) WaveOne Primary a 150° CCW, 30° CW (grup control)
- b) WaveOne Primary a 120° CCW, 30° CW.
- c) WaveOne Primary a 90° CCW, 45° CW.

La resistència a la fatiga cíclica augmentava quan el rang de moviment alternant disminuïa, sent significatiu per al grup de 90° CCW i 45° CW. També observaren que es produïen menys transports apicals i preparacions més centrades del conductes radiculars, però que es necessitava major temps de treball.

Lopes i cols. (2013b) efectuaren un estudi per a avaluar la influència de la flexibilitat i el moviment alternant dels instruments subjectes a dos tipus de test de fatiga cíclica: estàtic i dinàmic.

Els instruments que testaren foren les llimes Mtwo (0,25/0,06) i les llimes Reciproc R25. Per als tests de fatiga cíclica utilitzaren tubs metàl·lics doblegats per simular conductes radiculars amb 1,4 mm de diàmetre, 19 mm de llarg, longitud de curvatura de 9 mm i 6 mm de radi de curvatura, i dos segments rectes de 7 mm i 3 mm. Aquest model s'utilitzà de forma estàtica i dinàmica. El model dinàmic es va realitzar amb un moviment d'amplitud axial de 3 mm i realitzant una oscil·lació cada dos segons. També realitzaren tests de resistència a la flexió.

De manera que hi havia dos grups amb 10 llimes cadascú per a cada model (estàtic i dinàmic) :

- a) Reciproc R25 amb moviments alternants al mode "Reciproc all" (150° CCW, 30° CW; i velocitat de 300 rpm).
- b) Mtwo (0,25/0,06) amb moviment de rotació continua a 300 rpm.

Els resultats observats tant al test dinàmic com a l'estàtic mostraren millors resultats per a Reciproc de manera estadísticament significativa.

Comparant els dos tipus de test, es van observar que independentment de la llima que es va testar es trobaren millors resultats de resistència a la fatiga cíclica al model dinàmic ($p < 0,05$).

Per tant, els resultats segons el moviment realitzat foren superiors per al moviment alternant en comparació amb la rotació continua.

Amb el test de resistència a la flexió es va observar una menor resistència per a la llima Recipro R25 de manera significativa, i per tant aquesta llima és més flexible que la llima Mtwo 0,25/0,06.

Lee i cols. (2013) estudiaren l'efecte d'utilitzar moviments alternants o moviments de rotació continua en les llimes ProTaper F2 i ProFile 0,25/0,06. Les testaren en un model dinàmic de 2 plaques metàl·liques, una d'elles amb forma circular, que formen un conducte de 60° i 5 mm de radi de curvatura i 1,5 de diàmetre interior, similar al d'Oh i cols.(2010). El model dinàmic es va realitzar amb un moviment d'amplitud axial de 4 mm (simulant el moviment de picar) i realitzant una oscil·lació cada segon.

S'utilitzaren 12 llimes per a cada grup:

- a) ProTaper F2 rotació continua a 300 rpm
- b) ProTaper F2 moviment alternant de 140° CW, 45° CCW.
- c) ProFile 25/.06 rotació continua a 300 rpm
- d) ProFile 25/.06 moviment alternant de 140° CW, 45° CCW.

Els resultats observats són contraris a altres estudis previs, perquè no hi hagueren diferències estadísticament significatives entre el moviment alternant i la rotació continua. Però la llima ProFile obtingué millor resultats de manera significativa comparada amb la llima ProTaper, independentment del moviment emprat.

Pérez-Higueras i cols. (2013), al seu estudi, compararen les llimes K3, K3XF i TF, totes de diàmetre 30 i conicitat 0,06. Utilitzaren el mateix model estàtic que Arias i cols. (2012), de 60° de curvatura i 3 mm de radi.

Dividiren l'estudi en 7 grups de 30 llimes cadascú, on comparen moviments alternants i de rotació continua a diferents velocitats:

- a) K3 rotació continua a 300 rpm
- b) K3XF rotació continua a 300 rpm
- c) TF rotació continua a 300 rpm
- d) TF rotació continua a 500 rpm
- e) K3 moviment alternant (144° CW, 72° CCW)
- f) K3XF moviment alternant (144° CW, 72° CCW)
- g) TF moviment alternant (144° CW, 72° CCW)

El resultat coincideixen amb estudis previs que observaven que els moviments alternants augmenten la resistència a la fatiga cíclica, en comparació amb els moviments de rotació continua de manera estadísticament significativa.

I comparant els diferents grups dins del moviment de rotació continua, K3XF va ser més resistent que K3 i TF. TF va obtenir millors resultats a 300 rpm. En moviment de rotació alternant no es trobaren diferències entre K3XF i TF, però sí que superaren a les llimes K3, de manera que els moviments alternants en llimes amb fase-R van augmentar la resistència a la fatiga cíclica.

De Deus i cols. (2014) testaren les llimes Wave One Large i Reciproc R40, ambdues de diàmetre 0,40 mm en la punta. L'estudi tenia tres parts: test de resistència a la flexió, test de fatiga cíclica dinàmic i estàtic.

Per als tests de fatiga cíclica utilitzaren un dispositiu fabricat amb un tub d'acer inoxidable de 19 mm de llargària i d'1,4 mm de diàmetre, que formava una curvatura de 9 mm de llarg i 6 mm de radi, creant dos extrems rectes de 7 i 3 mm. Les llimes foren testades en grups de 12 i amb el moviment recomanat pel fabricant. Per als tests dinàmics es realitzaren moviment axials de 3 mm d'amplitud i dos segons en cada oscil·lació.

Els resultats per als tests de fatiga cíclica van ser millors per a la llima R40 de manera significativa ($p < 0,05$).

Kiefner i cols. (2014) estudiaren si el moviment alternant per ell mateix millorava la resistència a la fatiga cíclica. Testaren les llimes Reciproc i Mtwo amb moviments alternants i de rotació continua.

Utilitzaren un conducte artificial amb 1,4 mm de diàmetre i amb curvatura de 60° i 5 mm de radi en un bloc d'acer inoxidable. El centre de la curvatura es trobava a 5 mm del final del conducte i aplicaren un moviment axial a les llimes (model dinàmic).

Realitzaren 8 grups de 18 llimes cadascú:

- a) Reciproc R25 en moviment alternant (“Reciproc all”)
- b) Reciproc R40 en moviment alternant
- c) Reciproc R25 en moviment de rotació continua
- d) Reciproc R40 en moviment de rotació continua
- e) Mtwo M25 en moviment alternant
- f) Mtwo M40 en moviment alternant
- g) Mtwo M25 en moviment de rotació continua
- h) Mtwo M40 en moviment de rotació continua

Hi havia una diferència significativa de millora de la resistència a la fatiga cíclica per al moviment alternant comparat amb el de rotació continua. Les llimes Reciproc en moviment alternant tenien major resistència que les Mtwo amb moviment de rotació continua, de manera significativa. El millor resultat va ser per a les llimes Reciproc amb moviment alternant, seguit per les llimes Mtwo amb moviment alternant. I en aquest estudi van trobar resultats similars entre les llimes de diferents diàmetres (0,25 i 0,40).

Dagna i cols. (2014) van estudiar la fatiga cíclica de tres sistemes de llima única. Realitzaren els tests en un model estàtic que consistia en conductes corbats de 20 mm de llarg, amb un diàmetre de la punta de 0,40 mm i una conicitat constant del 9%, basats en el model realitzat per Castelló-Escrivá i cols. (2012).

Les llimes testades: OneShape (OS), Reciproc R25 (R25), WaveOne Primary (WO) i com a grup control, ProTaper F2 (PT F2), van ser dividides en 4 grups de 10 llimes cadascú. I cada grup va ser testat en 4 tipus de curvatures amb els moviments recomanats pels fabricants:

1. Conducte de 60° i 8 mm de radi de curvatura
2. Conducte de 45° i 8 mm de radi de curvatura
3. Conducte de 60° i 5 mm de radi de curvatura
4. Conducte de 45° i 5 mm de radi de curvatura

Els resultats obtinguts foren els següents:

- La resistència a la fatiga cíclica més alta va ser la de la llima R25, seguida de OS, WO i PT F2.
- Segons la curvatura, R25 va obtenir els millors resultats als conductes 1, 2, 3 i 4 ($p < 0,05$). WO i OS van tindre una resistència similar a la fatiga cíclica en tots els conductes ($p > 0,05$) i PT F2 va obtenir el menor nombre de cicles fins la fractura (NCF) en tots els conductes ($p < 0,05$).
- Els pitjors resultats s'obtingueren en la curvatura del conducte 1 (60° i 8 mm de radi de curvatura), que segons l'estudi va ser la de major dificultat, seguides de la curvatura 3 (60° i 5 mm) i la curvatura 2 (45° i 8 mm). La curvatura més senzilla va ser la del conducte número 4 (45° i 5 mm).

Pirani i cols. (2014) van avaluar la resistència a la fatiga cíclica i van fer l'anàlisi metal·lúrgica de WaveOne i ProTaper.

Per al test de fatiga cíclica utilitzaren un model estàtic de tubs metàl·lics doblegats simulant conductes radiculars d'1,6 mm de diàmetre, 20 mm de longitud total, 60° de curvatura i 5 mm de radi de curvatura.

Realitzaren tres grups de 24 llimes cadascú:

- a) Llima WaveOne Primary amb moviment alternant recomanat pel fabricant, que és el mode WaveOne all (170° CCW, 50° CW; i velocitat de 350 rpm)
- b) ProTaper F2 amb moviment alternant, amb el mode WaveOne all.
- c) ProTaper F2 amb moviment de rotació continua a 300 rpm.

El grup A (llima WaveOne) va mostrar significativament una major resistència a la fatiga cíclica que els grups B (ProTaper en moviment alternant) i C (ProTaper en moviment continu). I no hi havien diferències significatives entre els grups B i C.

Vadhana i cols. (2014) realitzaren un estudi per comprovar si la fatiga cíclica dels instruments Mtwo i RaCe millorava en utilitzar-los amb moviment alternant. Construïren un dispositiu format per dos peces metàl·liques de llautó, una còncava i l'altra convexa, que s'adaptaven perfectament a la conicitat i diàmetre de les llimes. El conducte que formaven aquestes dos peces tenia 60° de curvatura, 5 mm de radi, i la curvatura començava a 5 mm de la punta.

Es realitzaren grups de 15 llimes cadascú:

- a) Mtwo 25/06 en rotació continua a 300 rpm.
- b) Mtwo 25/06 en moviment alternant (WaveOne all).
- c) RaCe 25/ 06 en rotació continua a 600 rpm.
- d) RaCe 25/06 en moviment alternant (WaveOne all).

Observaren un major temps fins a la fractura per a les dos llimes utilitzades amb moviments alternants respecte a la rotació continua de manera estadísticament significativa ($p < 0,001$).

Pedullà i cols. (2014b) estudiaren la fatiga cíclica dels instruments Reciproc R25, WaveOne Primary i ProTaper F2, després de fer immersions amb diferents irrigants. Per a l'estudi utilitzaren un model estàtic de conductes artificials de 60° i 5 mm de radi de curvatura dins d'un bloc metàl·lic, on el conducte tenia un diàmetre de 2 mm constant, 16 mm de llarg, el centre de la curvatura estava a 5 mm de la punta i el segment corbat mesurava 7 mm. Es realitzaren grups de 10 llimes cadascú utilitzant els moviments recomanats pels fabricants i foren immerses en els diferents irrigants durant 45 segons o 3 minuts.

La immersió amb Hipoclorit de Sodi (ClONa al 5,25%) no va reduir la fatiga cíclica de cap de les llimes. En canvi l'EDTA al 17% va reduir la resistència a la fatiga cíclica després de 3 minuts. Els millors resultats de fatiga cíclica foren per a la lima Reciproc, seguida de WaveOne i per últim ProTaper de manera significativa ($p < 0,001$).

Da Frota i cols. (2014) van comparar els dos sistemes de lima única amb moviments alternants, les limes Reciproc R25 i WaveOne Primary, amb les limes de rotació continua ProTaper Universal F2 i Mtwo 25.06. Dividiren les limes en 8 grups de 10 limes cadascú, on realitzaren test estàtics i dinàmics amb un dispositiu que consistia en dos peces metàl·liques (una cònca i altra convexa), amb una curvatura de 45° i 5 mm de radi, on el punt de màxima curvatura estava a uns 4 mm de la punta. Per al test dinàmic utilitzaren moviments axials continus d'uns 1,5 mm.

Els sistemes de lima única amb moviments alternants obtingueren millor resultat de manera significativa. El sistema Reciproc va obtenir més nombre de cicles fins la fractura (NCF) comparat amb WaveOne únicament en els tests dinàmics, però no s'observen diferències entre aquests dos sistemes amb els tests estàtics.

Higuera i cols. (2015) testaren les limes WaveOne Primary, Reciproc R25 i Twisted File Adaptive M-L1, en un model estàtic de conductes artificials dins d'uns blocs metàl·lics amb una curvatura de 60°, 5 mm de radi, el centre de la curvatura a 6 mm de la punta i el segment corbat aproximadament de 6 mm de llarg, com l'utilitzat per Grande i cols. (2006). Utilitzaren els moviments recomanats pel fabricant: WaveOne all, Reciproc all i TF Adaptive.

La resistència a la fatiga cíclica de R25 i TF Adaptive M-L1 va ser similar, però significativament major que la de WO Primary.

Karatas i cols. (2015) avaluaren com afectaven els moviments cinemàtics a la resistència a la fatiga cíclica en dos grups de limes: OneShape i WaveOne Primary.

Els tests de fatiga cíclica consistiren en uns dispositius metàl·lics d'acer inoxidable amb un diàmetre constant d'1,5 mm, 60° d'angle de curvatura i 3 mm de radi de curvatura. La longitud de treball era de 19 mm. Seguiren el dispositiu descrit per Larsen i cols. (2009).

Realitzaren 8 grups de 20 limes cadascú:

1. OS rotació continua: 350 rpm, 250g/cm⁻¹ de *torque*

2. OS moviment alternant 30° CCW, 150° CW (angle de progrés per a cada cicle: 120°)
3. OS moviment alternant 30° CCW, 210° CW (angle de progrés per a cada cicle: 180°)
4. OS moviment alternant 30° CCW, 360° CW (angle de progrés per a cada cicle: 330°)
5. WO rotació continua: 350 rpm, 250g/cm⁻¹ de torque (però amb la direcció de CCW)
6. WO moviment alternant 150° CCW, 30° CW
7. WO moviment alternant 210° CCW, 30° CW
8. WO moviment alternant 360° CCW, 30° CW

La resistència a la fatiga cíclica sí que es va vore afectada pels moviments cinemàtics ($p < 0,001$), de manera que les llimes OS van augmentar de manera significativa la resistència a la fatiga cíclica quan es van testar amb moviments alternants. Però els millors resultats van ser per al moviment alternant de 150° CW, perquè a mesura que s'augmentava aquest angle s'obtingueren resultats inferiors.

La resistència a la fatiga cíclica de OS va ser significativament major que WO fins i tot en el moviment de rotació continua.

Elsaka SE i Elnaghy AM. (2015) també testaren les llimes OneShape i WaveOne Primary utilitzant diferents angles de curvatura.

Els tests estàtics es van realitzar en conductes de 5 mm de radi de curvatura, el segment corbat era de 5 mm, la distància del centre de la curvatura a la punta era de 5 mm i els angles de curvatura, mesurats segons Schneider (1971), eren de: 45°, 60° i 90°.

Realitzaren 6 grups de 30 llimes cadascú, utilitzant els moviments recomanats pel fabricant: a) OS 45°, b) OS 60°, c) OS 90°, d) WO 45°, e) WO 60° i f) WO 90°.

La llima WO va obtenir una major resistència a la fatiga cíclica que OS per a tots els angles de curvatura ($p < 0,05$), utilitzant els moviments recomanats pels fabricants. Els millors resultats es van obtenir a l'angle de 45°, després al de 60° i per últim al de 90°.

Arslan i cols. (2015) han estudiat la fatiga cíclica de la llima Reciproc R25 amb diferents cinemàtiques. Per als tests de fatiga cíclica utilitzaren un model similar al de Larsen i cols. (2009), que consistia en un conducte artificial metàl·lic de diàmetre constant d'1,5

mm i un angle de curvatura de 60° amb un radi de 3 mm. La longitud del conducte era de 19 mm.

Realitzaren 4 grups de 20 llimes cadascú, segons el moviment que realitzaria la llima:

1. Moviment alternant 150° CCW-30° CW (angle de progressió: 120°) i 300 rpm.
2. Moviment alternant 270° CCW-30° CW (angle de progressió: 240°) i 300 rpm.
3. Moviment alternant 360° CCW-30° CW (angle de progressió: 330°) i 300 rpm
4. Rotació continua, però en sentit antihorari (CCW) a 300 rpm i 200 gcm⁻¹ de torque.

Es trobaren diferències significatives entre els grups de moviments alternants i el grup de rotació continua ($p < 0,0001$). Els millors resultats respecte als angles del moviment alternant foren per al primer grup (150° CCW-30° CW). En canvi, no es trobaren diferències significatives entre el grups 2 i 3 de moviments alternants.

Çapar i cols. (2015a), també testaren la llima OS, comparant-la amb ProTaper Next X2, Hyflex i Revo-S. Però totes aquestes llimes foren testades sense moviments alternants. Utilitzaren un model estàtic amb un conducte dins d'un bloc metàl·lic de 60°, 3 mm de radi de curvatura i 1,5 mm de diàmetre, com el descrit per Larsen i cols. (2009). La llima OS va obtenir el mateix resultat que ProTaper Next, però la major resistència a la fatiga cíclica va ser per a la llima Hyflex.

I en un article recent, Neelakantan i cols. (2015) van estudiar la fatiga cíclica de les llimes OneShape i Reciproc R25, però en conductes simulats amb forma de S similar al d'Al-Sudani i cols. (2012) i amb un model estàtic i dinàmic (amb una amplitud de 3 mm). El centre de la primera curvatura, de 60° i 5 mm de radi, estava localitzat a 8 mm de la punta, i a la segona curvatura de 70° i 2 mm de radi, a 2 mm de la punta. Per a l'estudi utilitzaren 25 instrument per grup i es testaren amb els moviments recomanats: R25 amb el programa Reciproc all i OS a 400 rpm i 4 Ncm de *torque*.

El autors observaren una major resistència a la fatiga cíclica de Reciproc de manera significativa per a ambdós models ($p < 0,05$), i que totes les llimes trencaven primer a la curvatura més apical. A més, amb el model dinàmic la resistència a la fatiga cíclica es va prolongar ($p < 0,05$).

1.7 JUSTIFICACIÓ DE L'ESTUDI.

Els instruments rotatoris de NiTi disminueixen substancialment la incidència de varis problemes clínics (bloquejos, esgraons, transports i perforacions), però també tenen tendència a fracturar-se amb més facilitat que els instruments manuals. Aquests problemes no predisposen per ells mateixos a la malaltia persistent després del tractament, però al limitar l'accés dels irrigants desinfectants al sistema de conductes radiculars eviten l'eliminació suficient dels microorganismes (Peters i Peters, 2011).

Per a millorar la resistència a la fractura dels instruments rotatoris de NiTi, els fabricants han introduït nous aliatges en la fabricació d'aquestes llimes i l'ús dels moviments alternants (Pedullà i cols., 2013a).

Molt del que sabem sobre els instruments de NiTi, incloent les raons de la seua fractura i la seqüència d'ús més favorable, es basa en dades recollides en la pràctica clínica i en les recomanacions del fabricant. La investigació *in vitro* continua aclarint la relació entre la metal·lúrgia dels instruments i el seu rendiment.

La resistència a la fatiga cíclica dels sistemes de NiTi accionats per motor amb moviments alternants i amb moviments de rotació continua ha estat estudiada utilitzant diferents tipus de dispositius que simulen curvatures del conducte radicular, i la literatura recent pareix que mostra uns millors resultats mecànics pers als moviments alternants (Varela-Patiño i cols., 2010; De Deus i cols., 2010; Gavini i cols., 2012; Gambarini i cols., 2012a; Gambarini i cols., 2012b; Pedullà i cols., 2013a; Rubini i cols., 2013; Lopes i cols., 2013; Pérez-Higuera i cols., 2013; Kiefner i cols., 2014; Vadhana i cols. (2014); Karatas i cols., 2015; Arslan i cols., 2015).

En l'actualitat disposem de 4 sistemes de lima única, dos sistemes que treballen amb moviments alternants WaveOne (Dentsply-Maillefer) i Reciproc (VDW), els quals han estat més estudiats, i dos sistemes que treballen en rotació continua, la lima OneShape (Micro-Mega), de la que hi ha pocs articles a la literatura i el sistema F360 (Komet) del que, dins el nostre coneixement, no hem trobat cap article que estude la seua resistència a la fatiga cíclica.

De manera que pensem que és pertinent la realització d'un estudi *in vitro* per a testar la fatiga cíclica d'aquests instruments i observar com influeix el grau de curvatura del conducte radicular i el tipus de moviment utilitzat.

1.8 OBJECTIUS

1.8.1 OBJECTIU GENERAL:

Avaluar la resistència a la fatiga cíclica dels sistemes de NiTi de llima única en conductes corbats.

1.8.2 OBJECTIUS ESPECÍFICS:

- Comparar els sistemes de llima única entre sí amb els moviments recomanats.
- Estudiar la influència de la utilització de moviments alternants o de rotació continua en la resistència a la fatiga cíclica de cada instrument i fer la comparació entre els instruments estudiats.
- Avaluar quines són les característiques cinemàtiques més idònies per a millorar la resistència a la fatiga cíclica dels instruments de NiTi.
- Comparar els sistemes amb aliatges de NiTi de nova generació i moviments alternants amb els sistemes fabricats amb NiTi convencional i utilitzats en moviment de rotació continua.
- Descriure com influeixen diferents curvatures del conducte radicular a 30°, 45° i 60° (amb radi constant de 5 mm).
- Establir quines curvatures són les més desfavorables quan instrumentem un conducte radicular.
- Estudiar com afecta el disseny i la conicitat dels instruments testats.

La hipòtesi nul·la proposada és que tots els sistemes de llima única es comporten de la mateixa manera respecte a la resistència a la fatiga cíclica en les diferents curvatures i que no hi ha diferències significatives amb l'ús de diferents moviments.

2. METODOLOGIA

2. METODOLOGIA

2.1 DE LA REVISIÓ BIBLIOGRÀFICA.

L'estratègia de recerca bibliogràfica i recollida de dades ha sigut realitzada mitjançant la base de dades Medline, amb el motor de recerca PubMed. Als termes de recerca escollirem les paraules claus: “*cyclic fatigue resistance*”, “*reciprocating motion*”, “Reciproc”, “WaveOne”, “OneShape”, “F360”, i “M-Wire”, combinant-les amb els diferents connectors booleans. I com a criteris d'inclusió, que els articles foren publicats en revistes dentals en els últims 10 anys i que l'idioma fora l'anglès, castellà o italià. Amb la lectura dels títols i els resums seleccionarem els articles pertinents.

L'altra base de dades que vam consultar va ser la de la Biblioteca Cochrane Plus, en la que no trobàrem cap article que estudiara les llimes de NiTi utilitzades amb moviments alternants.

Es va dur a terme també una recerca de llibres en les biblioteques de la Facultat de Medicina i Odontologia i del Màster en Endodòncia de la Universitat de València.

Després de la lectura dels articles seleccionats vam triar altres referències bibliogràfiques interessants.

La recerca bibliogràfica s'ha finalitzat el dia 31 d'agost de 2015.

2.2 DE L'ESTUDI.

2.2.1 DESCRIPCIÓ DE LES LLIMES UTILITZADES.

Per a la realització d'aquesta Tesi hem escollit 4 sistemes de llima única i hem seleccionat les llimes que tenien un diàmetre similar en la punta. A continuació desenvoluparem cadascuna.

2.2.1.1 WaveOne Primary (Densply-Maillefer, Ballaigues, Suïssa)

Es tracta d'una llima descrita per la casa comercial com a llima única a la majoria de casos, d'un sol ús i amb moviments alternants. Ha estat dissenyada per a utilitzar-se amb una tècnica similar a la de “forces balancejades” (Webber i cols., 2011; Van der Vyver, 2013) i està fabricada amb l'aliatge M-Wire que segons alguns estudis millora la flexibilitat i la resistència a la fatiga cíclica (Shen i cols., 2013).

La llima WaveOne Primary està disponible en tres llargàries de 21, 25 i 31 mm, el diàmetre a la punta és de 0,25 mm i la conicitat apical és del 8% i es va reduint cap al final de la part activa de l'instrument. És la llima del sistema que s'usa per a la majoria de conductes (Webber i cols., 2001; Patel, 2015).

Longitud (mm)	025.08	
	Conicitat	Diàmetre
0		0,250
1	8,0%	0,330
2	8,0%	0,410
3	8,0%	0,490
4	5,5%	0,545
5	5,5%	0,600
6	5,5%	0,655
7	5,5%	0,710
8	5,5%	0,765
9	5,5%	0,820
10	5,5%	0,875
11	5,5%	0,930
12	5,5%	0,985
13	5,5%	1,040
14	5,5%	1,095
15	5,5%	1,150
16	5,5%	1,205

Taula 3: Paràmetres de conicitat de la llima WaveOne Primary

La llima WaveOne té un disseny de les espines a esquerres o hèlix inversa (Ruddle, 2012) i treballa amb una acció de tall negativa o inversa. És per això que el moviment alternant recomanat per la casa comercial és de 170° en moviment antihorari (*CCW*) i de 50° en moviment horari (*CW*), de manera que hi ha una angle de rotació més ampli a la direcció de tall que segons la casa comercial proporciona una alta eficàcia (Webber i cols., 2011).

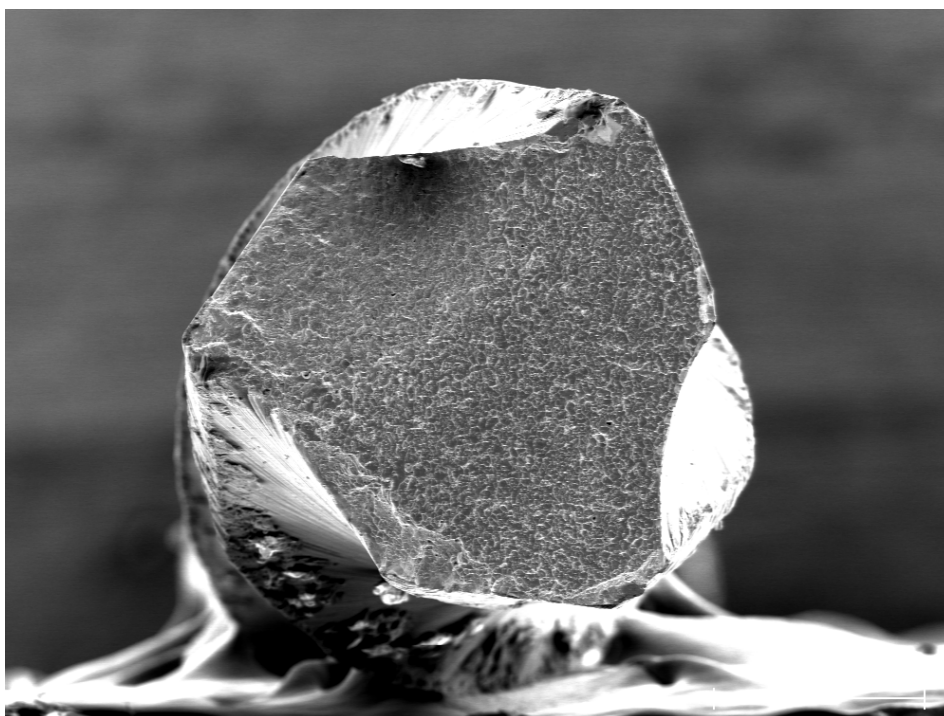
Aquest instrument té una secció diferent al llarg de la seua longitud, a la zona de la punta. Entre D1 i D8 presenta un disseny de triangle modificat amb recolzaments radials, i cap a la zona mitja de la part activa, entre D9 i D16, canvia a un disseny de triangle convex amb un angle d'atac neutre, que seria una secció pareguda a la de ProTaper F2 (Bürklein i cols., 2011; Ruddle, 2012). Aquest disseny de la llima amb dues seccions millora la flexibilitat final de l'instrument (Patel B, 2015).

La punta no tallant també ha sigut modificada per a seguir la curvatura del conducte radicular. I el disseny té un angle helicoïdal variable i una distància entre espines o *pitch* també variable al llarg de l'instrument que millora la seguretat (Webber i cols, 2011).

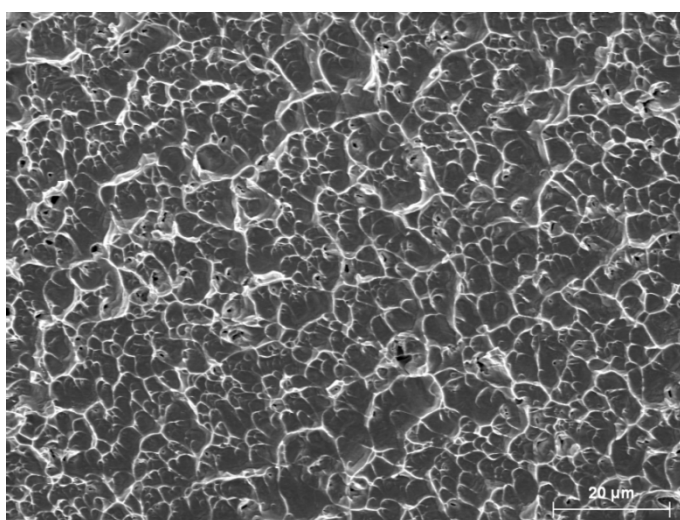
Segons Dhingra i cols. (2013), el tractament del conducte radicular amb aquest sistema de llima única es realitza 4 vegades més ràpid que amb els sistemes convencionals.



Il·lustració 2: Llima WaveOne Primary



Il·lustració 3: Micrografia (MER) x 130. Secció de WO Primary a 5 mm de la punta (realitzada al SCSIE)



Il·lustració 4: Micrografia (MER) x1000. Detall de l'estructura cristal·lina de WO Primary (realitzada al SCSIE)

2.2.1.2 Reciproc R25 (VDW, Munich, Alemanya)

Els instruments Reciproc han sigut dissenyats específicament per a l'ús amb tècnica alternant, d'un sol ús i amb punta no tallant. La llima Reciproc R25 està fabricada amb l'aliatge M-Wire a l'igual que la llima WaveOne, que segons alguns autors genera una major resistència a la fatiga cíclica (Shen i cols., 2013).

La casa comercial ha dissenyat aquests instruments per a ser utilitzats com a instrument únic a la majoria de casos. La llima Reciproc R25 prepara el conducte radicular amb un diàmetre de 0,25mm a la punta i una conicitat de 8% als primers mm de la punta que va disminuint a llarg de la part activa (VDW, 2015).

Longitud (mm)	025.08	
	Conicitat	Diàmetre
0		0,250
1	8,0%	0,330
2	8,0%	0,410
3	8,0%	0,490
4	6,5%	0,555
5	6,0%	0,615
6	5,5%	0,670
7	5,0%	0,720
8	5,0%	0,770
9	5,0%	0,820
10	4,0%	0,860
11	4,0%	0,900
12	3,0%	0,930
13	3,0%	0,960
14	3,0%	0,990
15	3,0%	1,020
16	3,0%	1,050

Taula 4: Paràmetres de conicitat de la llima Reciproc R25

Està disponible en les longituds de 21, 25 i 31 mm. I segons la casa comercial s'utilitza en conductes estrets, ja que es tracta de la llima de menor diàmetre del sistema Reciproc. La secció transversal de la llima Reciproc té una forma de "S" durant tota la longitud, per tant té dos fulles tallants (VDW, 2015). És similar a les seccions de Mtwo i F360, però amb la secció transversal invertida (Saleh i cols., 2015).

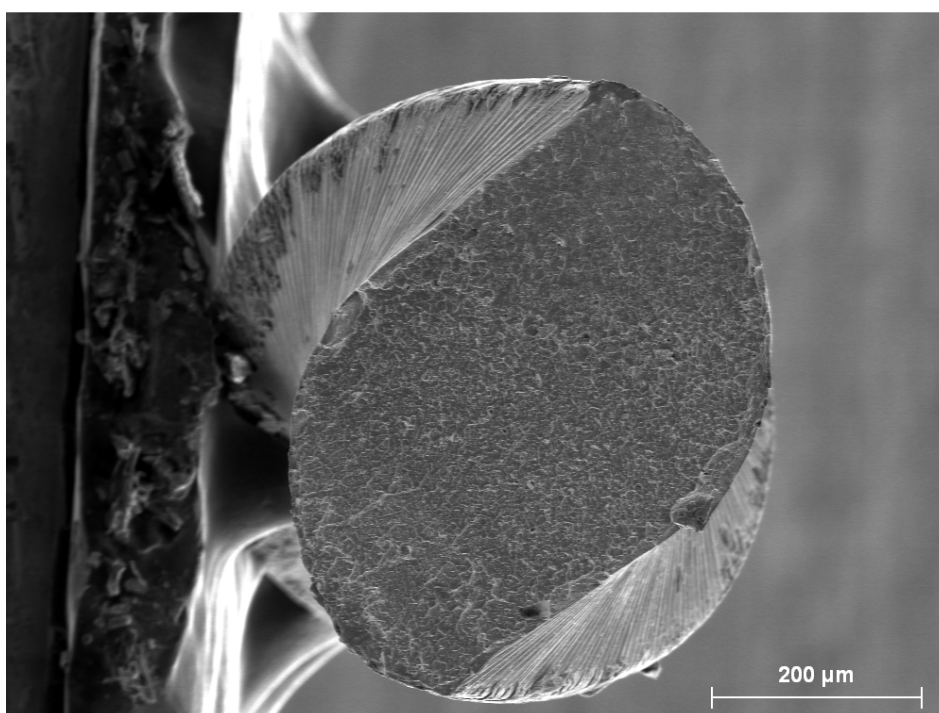
Aquesta llima completa els 360° després de realitzar diferents girs alternants, de manera que l'angle de la direcció de tall és major que l'invers, i d'aquesta manera l'instrument avança contínuament cap a l'àpex. A l'igual que la llima WaveOne, té un disseny de les

espires a esquerres. Els angles recomanats per a aquesta llima concretament són: 150° en moviment antihorari i 30° en moviment horari. Per això la llima treballa amb una acció de tall negativa (Pedullà i cols., 2013a).

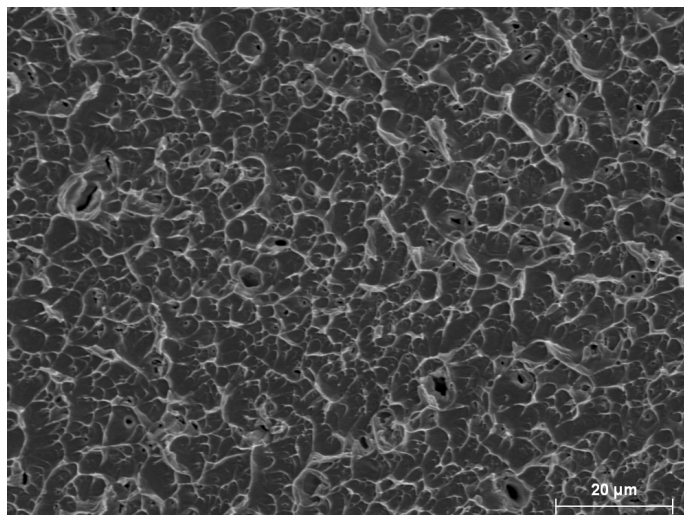
El sistema Reciproc redueix el temps de treball al 60% si el comparem amb el sistema Mtwo (Burklein i cols., 2013). Segons Park i cols. (2013), la llima WaveOne és més ràpida que Reciproc, però Saber i cols. (2015) i Saleh i cols. (2015) afirmen el contrari.



Il·lustració 5: Llima Reciproc R25



Il·lustració 6: Micrografia (MER) x 130. Secció de R25 a 5 mm de la punta (realitzada al SCSIE)



Il·lustració 7: Micrografia (MER) x1000. Detall de l'estructura cristal·logràfica de R25 (realitzada al SCSIE)

2.2.1.3 One Shape (Micro-Mega, Besançon, França)

Aquesta llima està dissenyada per a utilitzar-se com a llima única, i és la única que té el sistema. El seu diàmetre a la punta és de 0,25 mm i està disponible en 21 mm, 25 mm i 29 mm de llargària. La conicitat de la llima és del 6% al llarg de tota la part activa (Bürklein i cols., 2013).

La llima OneShape té una secció transversal asimètrica, basant-se en estudis com el de Diemer i cols. (2013), on es va observar que les seccions transversals asimètriques disminueixen l'estrès axial de les llimes. A més la secció transversal és variable al llarg de la longitud de l'instrument, dividint-lo en tres zones diferents: a la zona de la punta, un disseny triangular asimètric amb concavitats i convexitats amb tres vores tallants; a la zona de transició va canviant de tres vores tallants cap a dues; i a la part més coronal de l'instrument hi ha dues vores tallants amb un forma similar a una "S" (Dagna i cols., 2014). El disseny asimètric de la secció transversal produeix el que s'ha anomenant recentment moviment rotatori asimètric (Çapar i cols., 2015).

La distància entre espines o *pitch* és variable, va augmentant de la punta cap a la fi de la part activa, de manera que redueix l'efecte de cargolament. A més, té una punta no activa. Segons el fabricant, la distància més llarga entre espines permet una bona evacuació dels resquills de dentina, millorant la qualitat de la conformació. També augmenta la flexibilitat i facilita la progressió de l'instrument cap a l'àpex (Micro-Mega, 2015, Baek i cols., 2011).

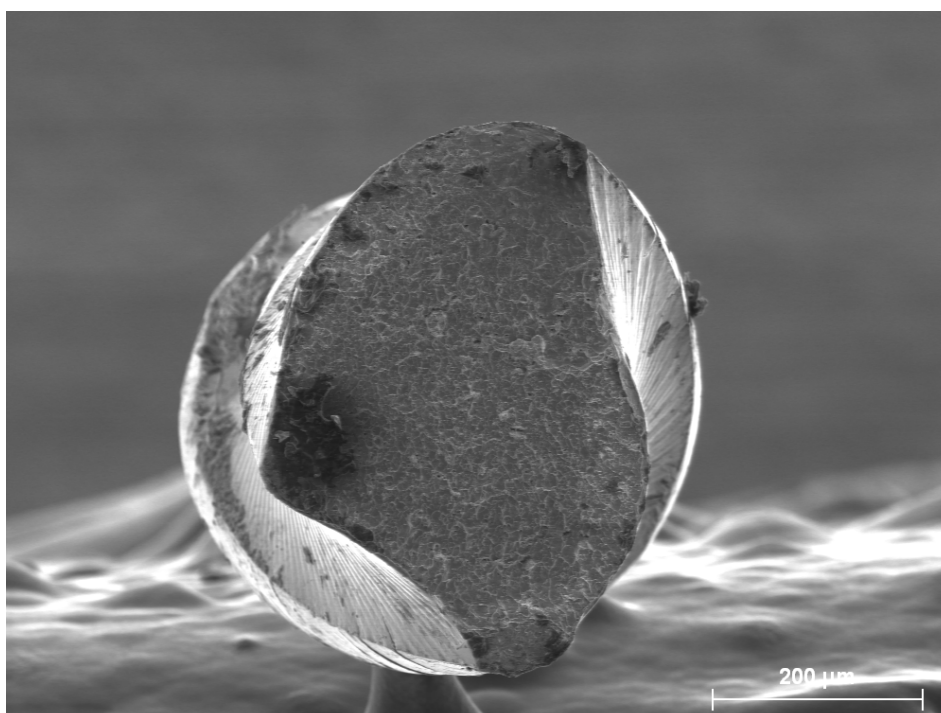
La llima One Shape està fabricada amb NiTi-55 convencional i s'utilitza amb moviment de rotació continua. El fabricant recomana entre 350 i 450 rpm i un *torque* màxim de 4 Ncm (Micro-Mega, 2015).

Segons els fabricants es facilita l'ús de les llimes rotatòries, perquè es tracta d'una llima única i d'un sol ús (Micro-Mega, 2015).

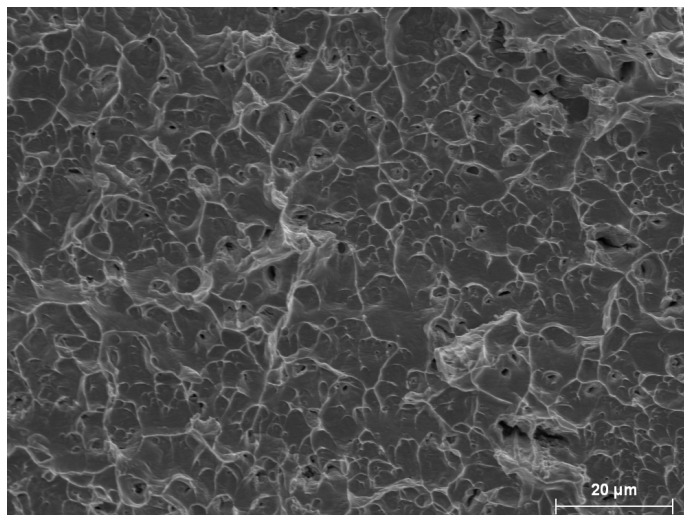
L'ús del One Shape redueix el temps de preparació del conducte en un 59% comparant amb el sistema Mtwo (Bürklein i cols., 2013) i és significativament més ràpida que WaveOne i Reciproc (Saber i cols., 2015)



Il·lustració 8: Llima OneShape



Il·lustració 9: Micrografia (MER) x 130. Secció de OS a 5 mm de la punta (realitzada al SCSIE)



Il·lustració 10: Micrografia (MER) x1000. Detall de l'estructura cristal·logràfica de OS (realitzada al SCSIE)

2.2.1.4 F360 #25 (Komet Brasseler, Lemgo, Alemanya)

Aquest sistema de llimes està compost per 4 llimes de grandària 25, 35, 45 i 55. Segons el fabricant, s'utilitza una única llima en conductes estrets i dues llimes o més si els conductes foren més amples. Per tant, en molts casos s'utilitzaria una o dues llimes, i per això aquest sistema està classificat també com a llima única (Komet, 2015).

La llima F360 de 25 està disponible en 21, 25 i 31 mm i a l'igual que la resta del sistema, s'utilitza amb rotació continua fins la longitud de treball. Es tracta de llimes d'un sol ús i el fabricant recomana una velocitat entre 250-350 rpm i un *torque* d'1,8 Ncm. Està fabricada amb NiTi-55 convencional austenític, té un diàmetre a la punta de 0,25 mm i una conicitat constant del 4%. Segons el fabricant aquesta conicitat fa que la llima siga molt flexible, per a poder adaptar-se perfectament a les diferents morfologies dels conductes radiculars (Bürklein i cols., 2013; Komet, 2015).

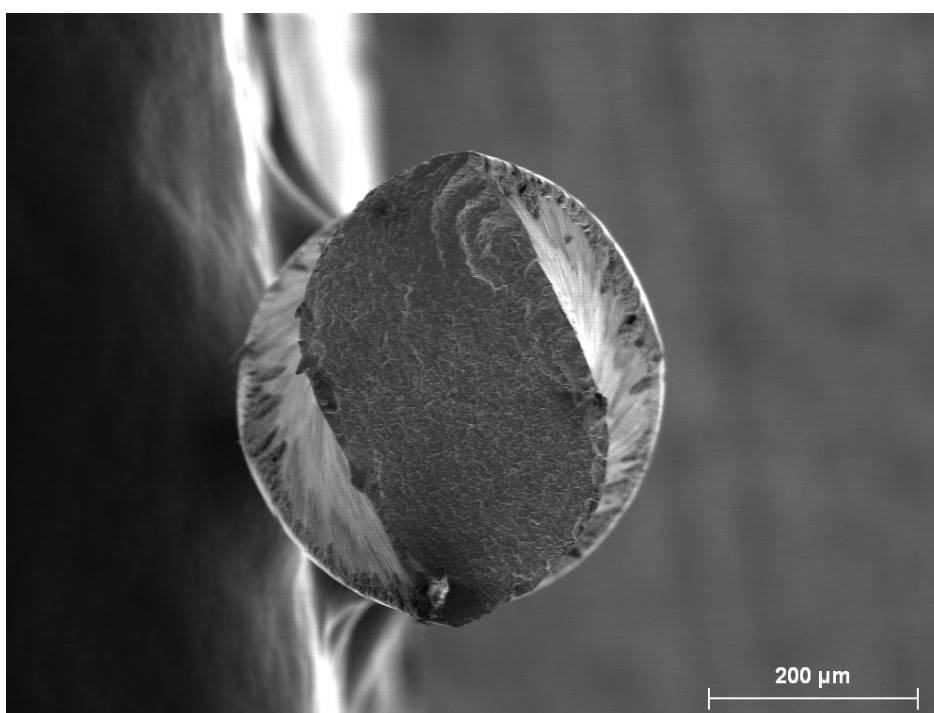
A l'igual que la resta de llimes d'un sol ús té avantatges com: reduir la fatiga cíclica, el risc de contaminació creuada i que no és necessari netejar, desinfectar i esterilitzar els instruments, ni controlar la quantitat d'usos (Komet, 2015).

La secció transversal de la llima té una forma de "S" modificada en tota la part activa, amb una bona eficiència de tall i grans espais per a l'evacuació dels detritus. Segons Bürklein i cols. (2014), els sistemes de llima única que utilitzen la rotació continua produeixen una menor extrusió de detritus en comparació amb els moviments alternants.

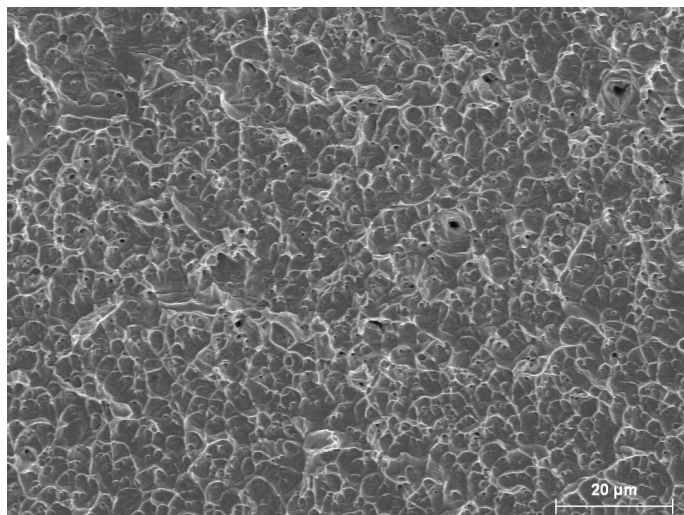
El temps de treball es redueix, gràcies a que en la majoria de conductes és suficient amb una o dues llimes. La llima F360 redueix el temps de treball en un 30% respecte a la llima Mtwo (Bürkein i cols., 2013) i si la comparem amb els sistemes de llima única, OneShape i Reciproc són significativament més ràpids que WaveOne i F360. Però en general tots els sistemes de llima única redueixen el temps de treball i les diferències no són importants a nivell clínic (Saleh i cols., 2015).



Il·lustració 11: Llima F360#25



Il·lustració 12: Micrografia (MER) x 130. Secció de F360#25 a 5 mm de la punta (realitzada al SCSIE)



Il·lustració 13: Micrografia (MER) x1000. Detall de l'estructura cristal·logràfica de F360#25 (realitzada al SCSIE)

2.2.2 DESCRIPCIÓ DEL MOTOR D' ENDODÒNCIA

Per a la realització de tots els tests de fatiga cíclica vam escollir el motor amb control de *torque* WaveOne (Densply-Maillefer, Ballaigues, Suïssa). Es tracta d'un motor amb bateria recarregable que opera amb un contraangle reductor 6:1 (Sirona Dental Systems, Bensheim, Alemanya). Aquest motor té varis programes a la seua memòria, així que pot treballar amb moviments alternants, amb els angles en sentit antihorari i horari i la velocitat concreta per a cada llima (programes predeterminats WaveOne all i Reciproc all). També té la possibilitat de treballar amb moviments de rotació continua preprogramats per a diferents llimes o utilitzar un programa on es pot escollir la velocitat i el *torque* desitjats (Webber i cols., 2011). De manera que amb aquest motor es podien testar tots els sistemes de llimes de NiTi del nostre estudi.

Les llimes que treballen amb moviments alternants (WaveOne Primary i Reciproc R25) tenen un angle de tall negatiu, per tant els fabricants han elegit que aquestes llimes treballen amb un moviment major en sentit antihorari que horari. Quan la llima realitza el moviment antihorari avança pel conducte, enganxa i talla la dentina, i el moviment horari desenganxa l'instrument de la dentina abans de que es quede travat. D'aquesta manera els instruments necessiten realitzar pocs moviments al voltant del seu eix per a completar un gir complet de 360°, segons els fabricants es necessiten uns tres cicles de moviments alternants per a completar un gir revers complet (Webber i cols., 2011).



Il·lustració 14: Motor Densply-Maillefer

2.2.3 CRITERIS PER AL DISSENY DELS DISPOSITIUS: PARÀMETRES GEOMÈTRICS DE LES CURVATURES TESTADES.

Els paràmetres geomètrics que descriuen una curvatura i que s'han de tenir en compte per a definir la curvatura que segueixen els instruments al realitzar els tests de fatiga cíclica són:

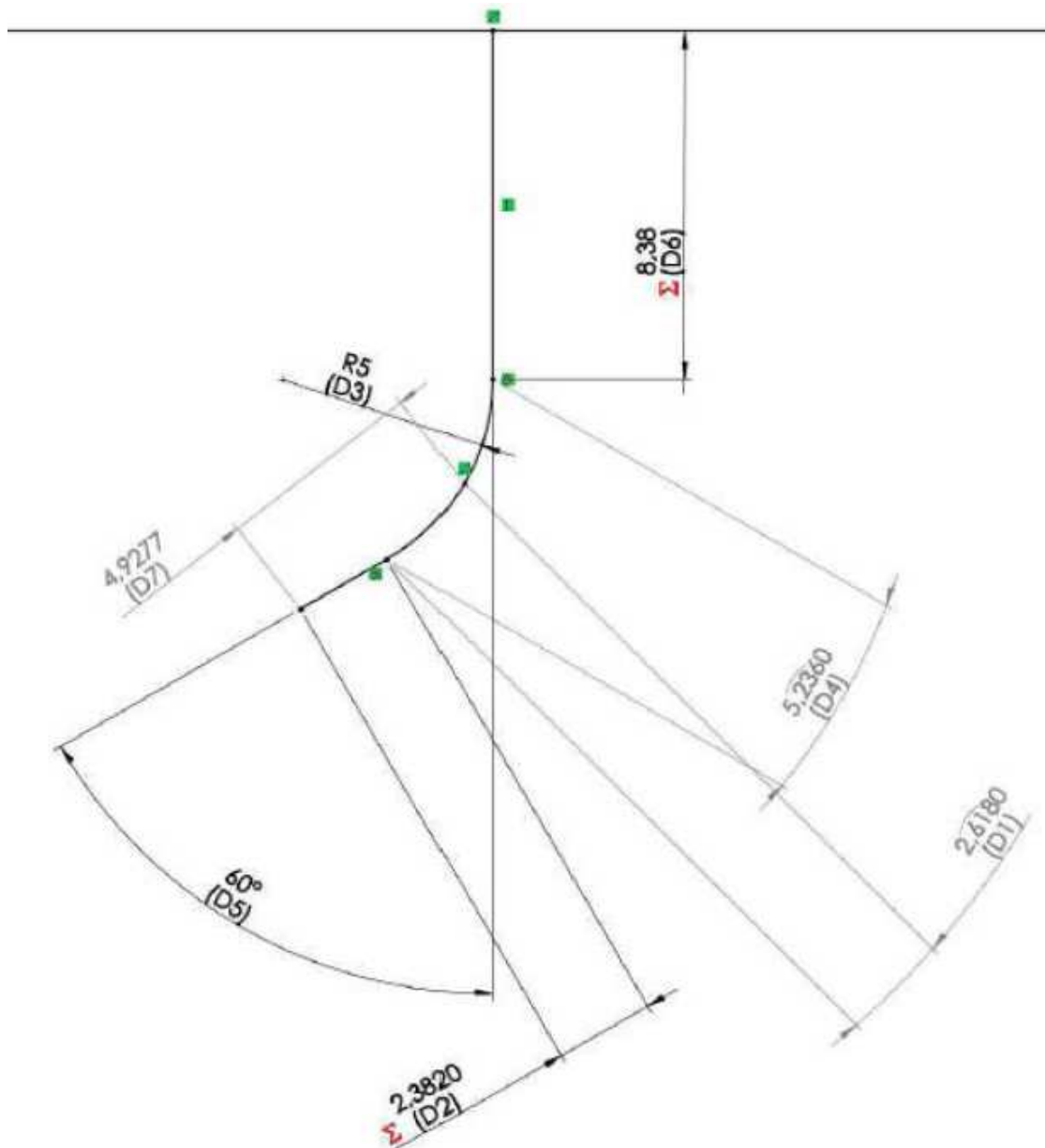
- Angle de curvatura i radi de curvatura, segons Pruett i cols. (1997).
- La posició del centre de la curvatura.

Altres paràmetres serien la longitud del segment corbat i la longitud del segment lineal (entre la punta de l'instrument i l'inici del segment corbat), que dependran dels anteriors paràmetres.

Com es testaren 3 tipus de curvatures, cada dispositiu tenia els seus paràmetres concrets, que es basaren en estudis previs per a la realització de tests de fatiga cíclica com els de Plotino i cols. (2009) i Pedullà i cols. (2013a, 2013b):

2.2.3.1 Test de 60°:

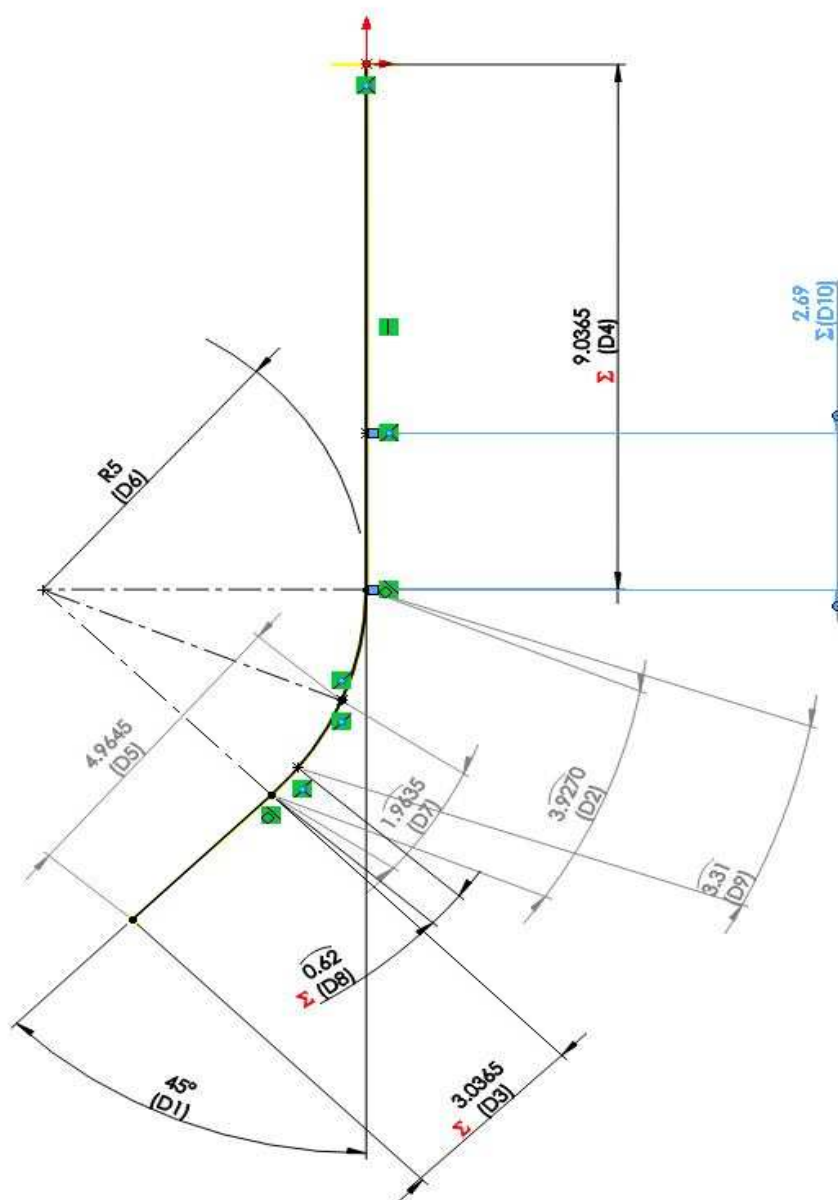
- Angle de curvatura: 60°
- Radi de curvatura: 5 mm
- Posició del centre de la curvatura a 5 mm de la punta de l'instrument.
- Longitud del segment corbat: 5,23 mm



Il·lustració 15: Geometria del test de 60° (Disseny de X. Jiménez)

2.2.3.2 Test de 45°

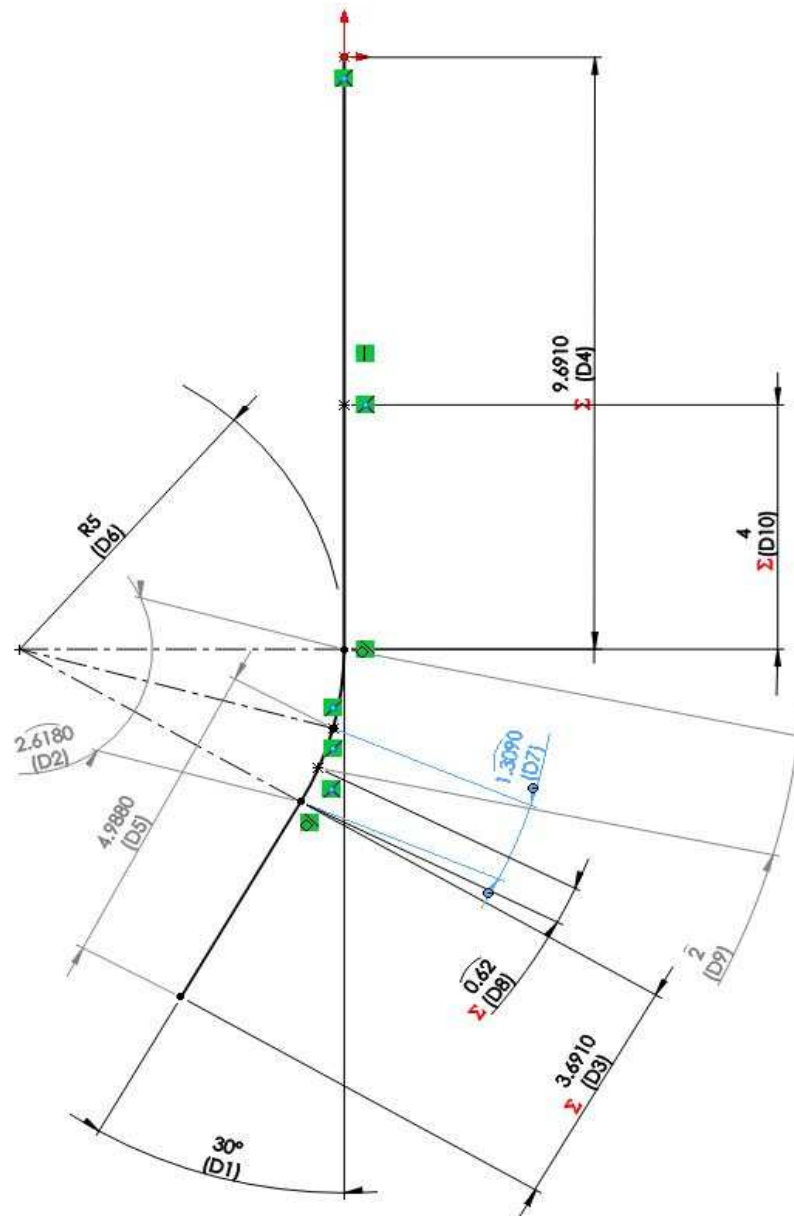
- Angle de curvatura: 45°
- Radi de curvatura: 5 mm
- Posició del centre de la curvatura a 5 mm de la punta de l'instrument
- Longitud del segment corbat: 3,92 mm



Il·lustració 16: Geometria del test de 45° (Disseny de X. Jiménez)

2.2.3.3 Test de 30°

- Angle de curvatura: 30°
- Radi de curvatura: 5 mm
- Posició del centre de la curvatura a 5 mm de la punta de l'instrument
- Longitud del segment corbat: 2,61 mm

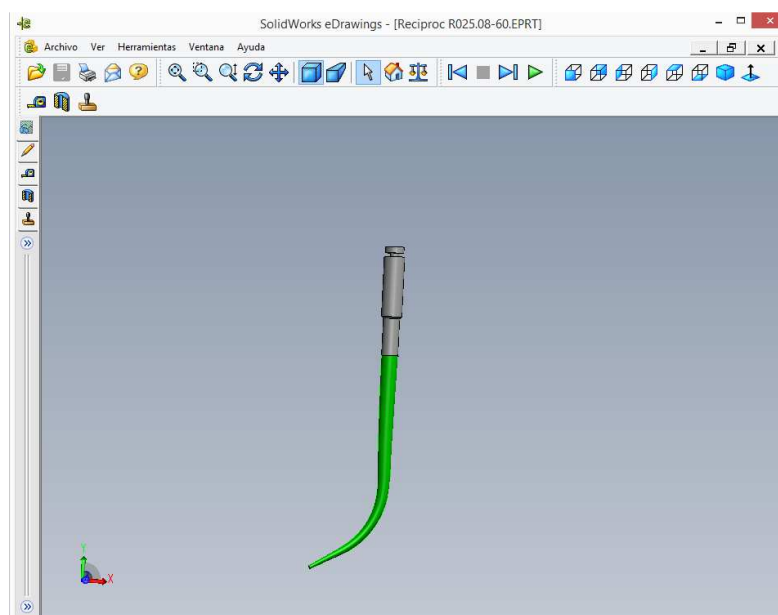


Il·lustració 17: Geometria del test de 30° (Disseny de X. Jiménez)

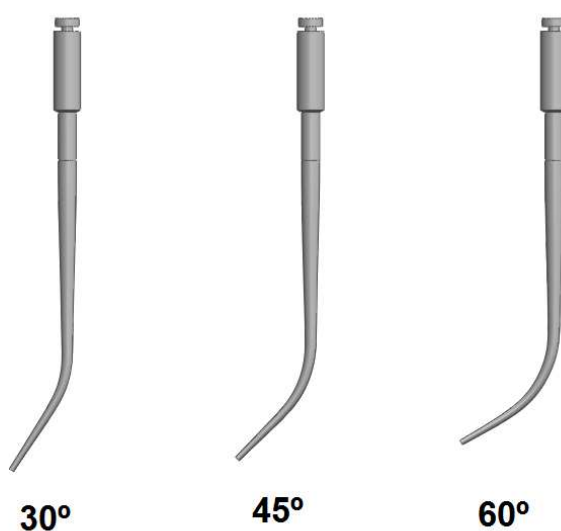
2.2.4 DESCRIPCIÓ DE LA TÈCNICA.

2.2.4.1 Per a la realització dels dispositius metàl·lics de simulació de curvatures.

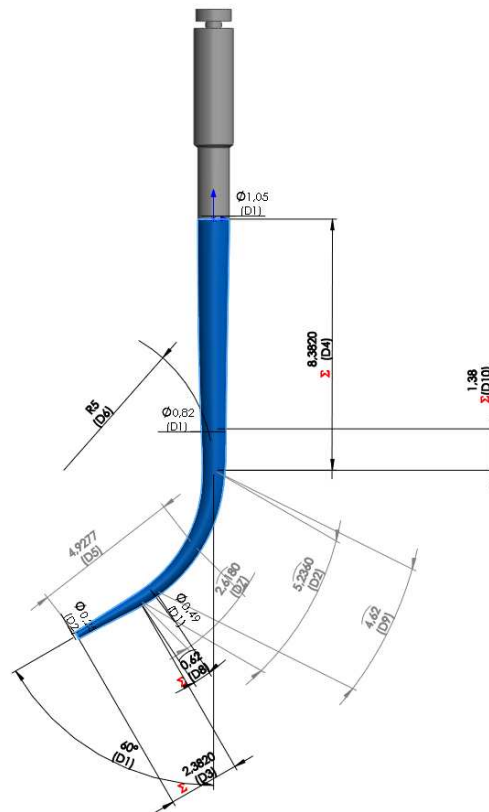
Es van crear uns models en tres dimensions individualitzats per a cada llima amb el programa de disseny assistit per ordinador SolidWorks® (Dassault Systèmes, S.A., Vélizy, França), tenint en compte els diàmetres i conicitats específiques de cadascuna, com també els paràmetres de les curvatures descrits anteriorment.



Il·lustració 18: Model 3D de la llima Reciproc R25

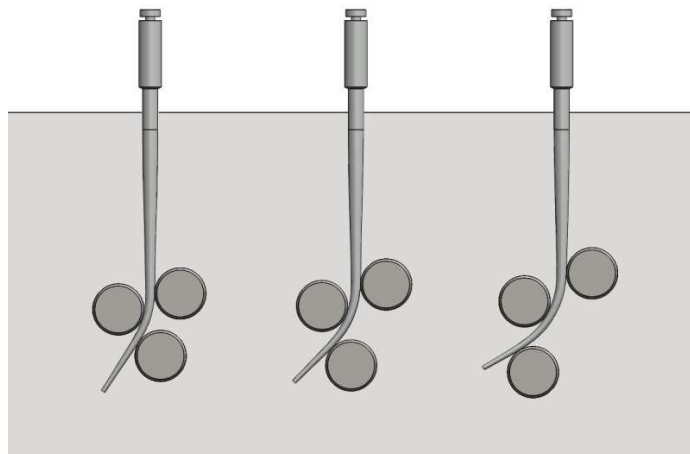


Il·lustració 19: Models d'una mateixa llima amb diferents angles de curvatura (Disseny de X. Jiménez)

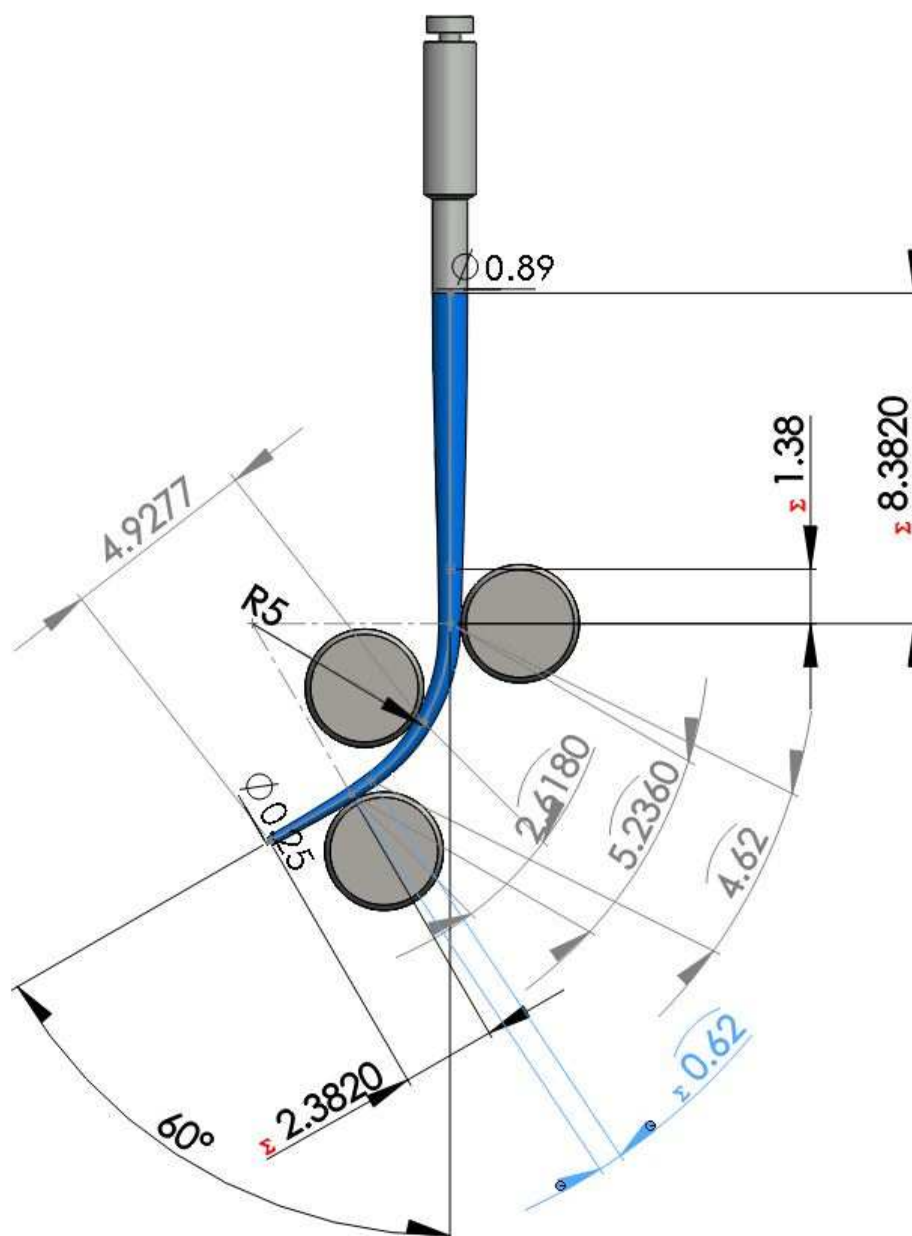


Il·lustració 20: Dimensions del model de la llima Reciproc R25 conformada a 60° i 5 mm de radi de curvatura (Disseny de X. Jiménez)

Posteriorment, basant-nos en els estudis de Cheung i cols. (2007a), es dissenyaren els dispositius de test de fatiga cíclica amb tres punts de recolzament. Els tres pivots cilíndrics, completament llisos i de 3 mm de diàmetre, es col·locaren exactament per a que cada llima fora testada amb els paràmetres de curvatura descrits anteriorment.



Il·lustració 21: Models de les curvatures amb 3 pivots (Disseny de X. Jiménez)



Il·lustració 22: Posicionament dels pivots en un dispositiu de 60° amb 5 mm de radi de curvatura (Disseny de X. Jiménez)

Els 12 dispositius, un per a cada llima i amb les tres curvatures de l'estudi (60° , 45° i 30°), foren fabricats amb acer inoxidable de la sèrie 300 en un centre de mecanitzat per control numèric de 3 eixos, model VM-2 (Haas Automation Inc., Oxnard, EUA) a 12.000 rpm i una precisió de $5\mu\text{m}$, de l'empresa Umesal, S.L. (Moncada, Espanya).



Il·lustració 23: Model 3D dels dispositius (disseny de X. Jiménez)



Il·lustració 24: Fotografia del dispositiu per a la llima F360#25 (curvatures de 30°, 45° i 60°)

2.2.4.2 De l'estudi de fatiga cíclica.

- Tamany de la mostra.

S'utilitzaren limes de 4 sistemes rotatoris ($N=240$): 60 limes WaveOne Primary, 60 limes Reciproc R25, 60 limes OneShape i 60 limes F360 #25, que foren dividides de manera aleatòria en 24 grups ($n_i=10$ cadascú). Totes les limes tenien en comú que eren sistemes de llima única i que el seu diàmetre a la punta era de 25 (0,25 mm).

Prèviament a l'estudi, tots els instruments van ser inspeccionats amb un lupa estereomicroscòpica OPMI Pico (Carl Zeiss Meditec AG, Jena, Alemanya) a 16 augments, per a la seua anàlisi morfològica i per descartar qualsevol signe visible de

deformació. Tots els instruments també van ser fotografiats i no es va descartar cap perquè no es trobaren instruments defectuosos.

- Assignació a grups.

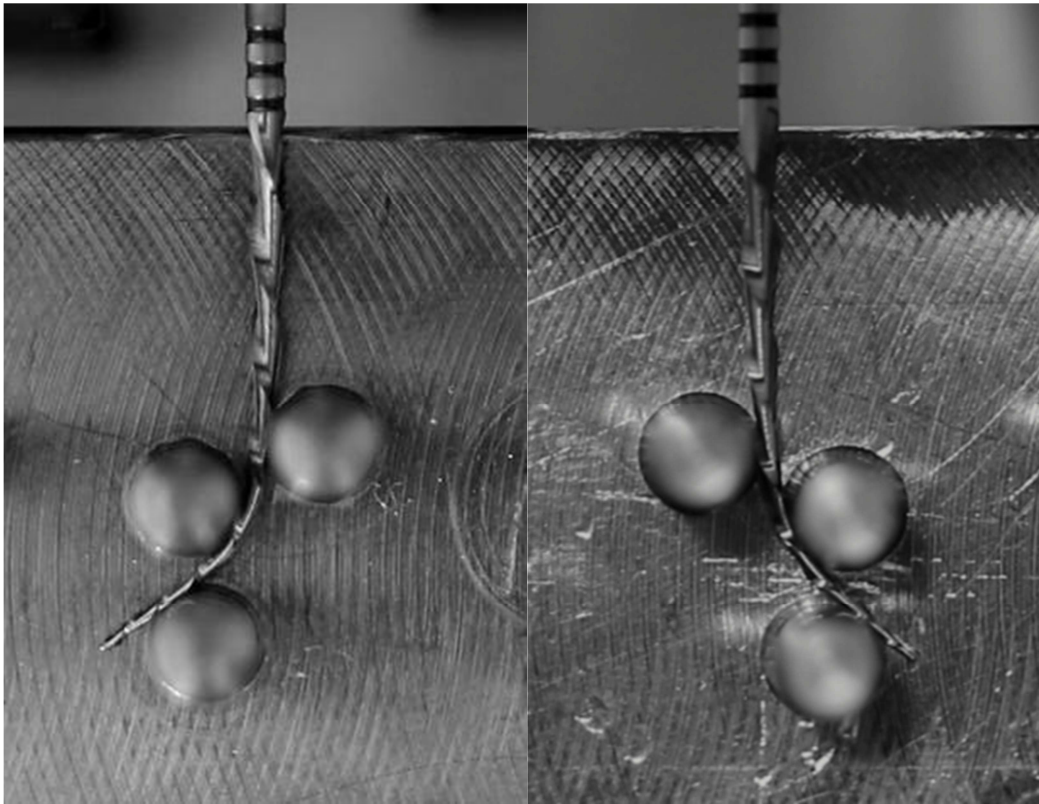
Totes les llimes van ser sotmeses als tests de fatiga cíclica. Es feren 8 grups:

- 4 grups testats amb els moviments recomanats pels fabricants:
 1. WaveOne Primary (WO) amb moviment alternant.
 2. Reciproc R25 (R25) amb moviment alternant.
 3. OneShape (OS) amb moviment de rotació continua.
 4. F360 #25 (F360) amb moviment de rotació continua.
- 4 grups més utilitzats amb el moviment contrari al recomanat pel fabricant:
 5. WaveOne Primary (WO) amb moviment de rotació continua.
 6. Reciproc R25 (R25) amb moviment de rotació continua.
 7. OneShape (OS) amb moviment alternant.
 8. F360 #25 (F360) amb moviment alternant.

Aquests 8 grups a la vegada van ser testats en les tres curvatures de l'estudi:

- 60° i 5 mm de radi de curvatura
- 45° i 5 mm de radi de curvatura
- 30° i 5 mm de radi de curvatura

De manera que es van fer servir un total de 12 dispositius metàl·lics, un per a cada curvatura i cada llima. Com hem descrit prèviament, es dissenyaren dispositius individualitzats, perquè les llimes escollides per a l'estudi tenien en comú que el diàmetre de la punta era de 0,25 mm, però cadascuna tenia una conicitat diferent. A l'estar dissenyats de manera simètrica, cada dispositiu tenia l'opció d'utilitzar-se en una cara o en l'altra, i permetre així que les llimes foren testades realitzant la curvatura cap a l'esquerra o cap a la dreta sense que les condicions canviaren. Per als tests de fatiga cíclica amb moviments de rotació continua es van utilitzar els dispositius amb la curvatura cap a l'esquerra i quan els instruments es testaren amb moviments alternants la curvatura escollida va ser cap a la dreta.



Il·lustració 25: Imatges del dispositiu amb curvatures cap a l'esquerra i cap a la dreta

Tots els instruments van ser col·locats en els dispositius per als tests de fatiga cíclica a 17 mm de la punta, i el contraangle reductor quedava subjecte de forma estàtica amb un braç articulat col·locat exactament per a que cada instrument entrara en la posició correcta en els tres eixos de l'espai. I els dispositius metàl·lics es van sostindre amb unes mordasses, de manera que tots els mecanismes quedaren fixes.



Il·lustració 26: Banc d'assajos

Amb el Motor WaveOne (Dentsply-Maillefer) es seleccionaren els moviments recomanats pels diferents fabricants per als 4 primers grups de l'estudi:

- WO: moviment alternant amb el programa preestablert al motor WaveOne all (170° CCW, 50° CW; i velocitat de 350 rpm).
- R25: moviment alternant amb el programa preestablert al motor Reciproc all (150° CCW, 30° CW; i velocitat de 300 rpm).
- OS: moviment de rotació continua a 400 rpm i 4 Ncm de *torque*.
- F360: moviment de rotació continua a 300 rpm i 1,8 Ncm de *torque*.

I en els 4 grups següents s'utilitzaren els moviments contraris als recomanats:

- WO: moviment de rotació continua a 350 rpm i 3 Ncm de *torque*.
- R25: moviment de rotació continua a 300 rpm i 3 Ncm de *torque*.
- OS: moviment alternant amb el programa preestablert al motor Reciproc all (150° CCW, 30° CW; i velocitat de 300 rpm).
- F360: moviment alternant amb el programa preestablert al motor Reciproc all (150° CCW, 30° CW; i velocitat de 300 rpm).

Per a gravar totes les mostres vam emprar una càmera de fotografar (Canon EOS Rebel T5i i objectiu macro-compacte EF50mm f/2,5) amb un trípod. La gravadora de vídeo s'accionava uns segons abans que les llimes començaren a moure's, així quedava tot registrat, des de l'inici fins el moment del trencament de la llima.

Les llimes es movien dins dels paràmetres de curvatura escollits per a cada test, perquè els tres pivots estaven col·locats específicament en els punts on la llima havia de corbar-se. Únicament es produïa contacte en aquest tres punts. La resta de la llima no tenia fricció, i per tant podia girar lliurement.

Els fragments de les llimes van ser arreplegats i emmagatzemats adequadament.

2.2.4.3 Estudis complementaris.

- Anàlisi d'elements finits

Per a fer l'anàlisi d'elements finits de SolidWorks® es va crear un model de llima amb els següents paràmetres:

Geometria:

- Aproximació tronco-cònica (sense modelar els surcs ni el fil tallant)
- Longitud total de la part activa de 16 mm
- Diàmetre de la punta de 0,25 mm
- Conicitat constant del 6%

Paràmetres físics de NiTi convencional (Lee i cols., 2011):

- Mòdul de Young: 36 GPa
- Coeficient de Poisson: 0,3

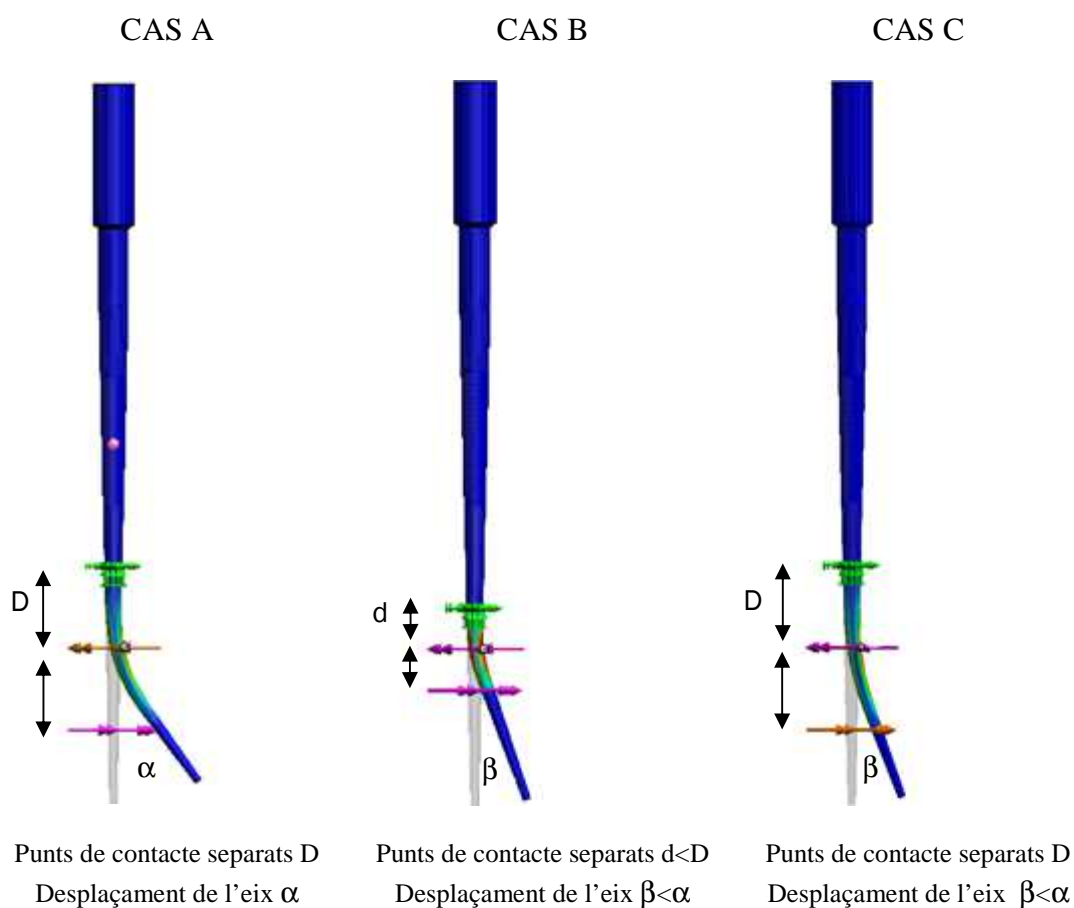
Definició del model d'elements finits:

- N° d'elements: 11135
- Forma dels elements: hexaèdrica
- Grandària dels elements: 0,2 mm
- Tolerància: 0,01 mm
- N° de nodes: 18058

Es van definir 3 seccions circulars d'interacció amb el model, situades a una distància similar als punts de contacte entre la llima i els pivots dels dispositius. La secció superior es va fixar, i a les altres dues s'aplicà un esforç de manera que l'aplicat al punt central sempre fora de magnitud doble a l'aplicat al punt inferior, i de sentit contrari. Això es fa perquè es necessita un punt, com a mínim, sense cap grau de llibertat per a que l'anàlisi puga solucionar-se. Aquesta aproximació no afecta al resultat de l'anàlisi.

Com a efecte d'aquest esforç es produeix per una part un desplaçament de l'eix de la llima, i per una altra es provoca una tensió sobre el model.

Es van plantejar tres casos de simulació:



Il·lustració 27: Definició dels casos de simulació per elements finits (disseny de X. Jiménez)

- CAS A: Partim d'un cas inicial on situem els punts d'interacció a una distància determinada D. En aquests punts apliquem unes forces per a provocar que l'eix del model es desplaci un angle α determinat respecte a la situació de repòs. Aquest cas és equivalent al dispositiu amb curvatura de 60° i 5 mm de radi en quant a la ubicació dels punts de

contacte (pivots), i per tant, també es pot fer una analogia amb les tensions que patirà el material.

- CAS B: Els punts d'interacció en aquest cas s'apropen a una distància $d < D$, i s'apliquen les forces necessàries per a desplaçar l'eix del model un angle $\beta < \alpha$. Aquest cas és equivalent a una curvatura de 30° i 5 mm de radi.
- CAS C: Es manté l'angle β del cas de simulació anterior, i es separen els punts d'interacció, tornant a una separació D com al cas inicial. En aquest cas no hi ha una analogia amb cap dels dispositius fabricats, perquè equivaldria a una curvatura de 30° però a un radi major (10 mm).

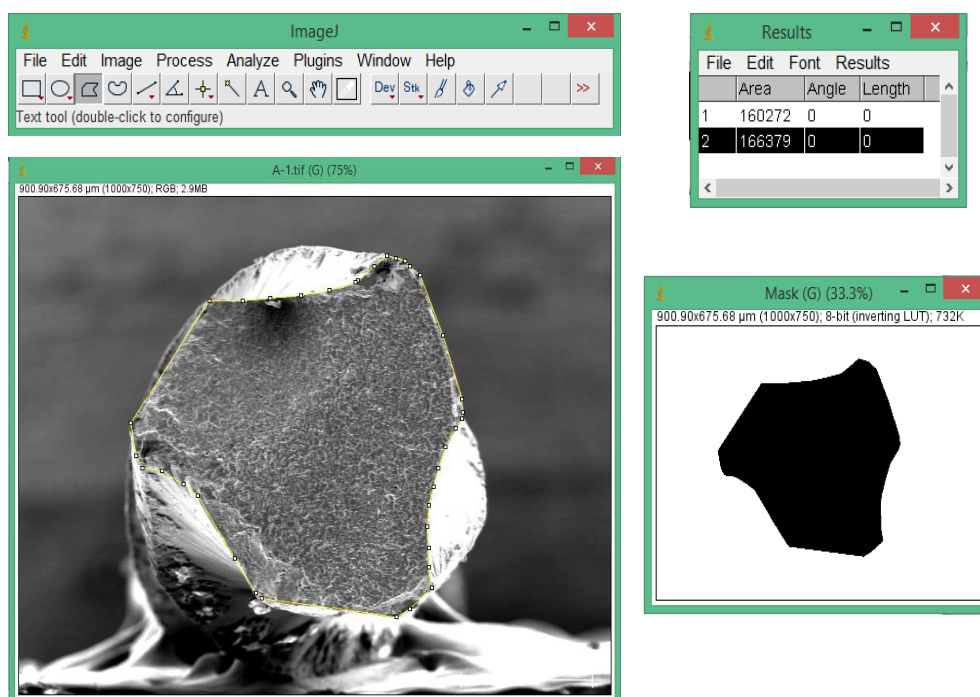
En tots els casos, el simulador ens dona com a resultat la distribució de les tensions al llarg del model, que és el paràmetre que analitzarem per a treure conclusions.

- Imatges microscòpiques.

S'ha realitzat la captació d'imatges de les seccions de les llimes de l'estudi amb un microscopi electrònic de rastreig (MER) S-4100 (Hitachi, Tokio, Japó), de la Secció de Microscòpia Electrònica del Servei Central de Suport a la Investigació i Experimentació (SCSIE).

Les llimes van ser inspeccionades a 5 mm de la punta, que és el punt on es troba el centre de la curvatura de tots els dispositius, i es realitzaren imatges a 130 augments per a poder veure la forma de la secció transversal de cadascuna de les llimes. També es va captar una imatge en detall a 1000 augments de l'estructura cristal·logràfica del metall.

Amb les micrografies realitzades al MER i el programa d'anàlisi d'imatges Image J (National Institute of Health, de domini públic) es van calcular el diàmetre i l'àrea de la secció transversal de totes les llimes de l'estudi i es van treure les mitjanes de les mesures obtingudes per a cada llima.



Il·lustració 28: Programa image J. Mesura de l'àrea de la secció transversal de la llima WaveOne Primary

2.2.5 PARÀMETRES QUE S'HAN MESURAT.

Es van mesurar el temps fins a la fractura (TFs), el nombre de cicles fins la fractura (NCF) i la longitud del fragment fracturat (LFF).

Els temps fins a la fractura en segons (TFs) de cada mostra es van comptabilitzar exactament mitjançant el vídeos registrats a tots els tests de fatiga cíclica. També es calcularen els NCF, aquesta mesura es realitzà multiplicant els temps fins a la fractura (en segons) per les revolucions per segon que corresponien a cada llima, que es va calcular a partir de les revolucions per minut (rpm) que s'havien utilitzat durant l'experimentació. Es pot resumir amb la següent fórmula: temps (en segons) fins la fractura x velocitat de rotació (rpm) / 60.

Les longituds dels fragments van ser mesurades amb un calibre digital mil·limetrat Absolute Digimatic Caliper series 500 (Mitutoyo Corporation, Kanagawa, Japó) i s'anotaren a la corresponent taula de resultats.



Il·lustració 29: Calibre digital

2.2.6 ANÀLISI DE LES DADES.

Per a l'anàlisi de les dades s'ha utilitzat un paquet estadístic SPSS 21.0 (IBM, Armonk, EUA). En primer lloc es van calcular els valors mitjans i les desviacions estàndard per a les variables TFs, NCF, LFF, per a cada instrument, mode d'ús i curvatura.

A continuació, després de comprovar que les variables a estudi no seguien una distribució normal, es va aplicar el test no paramètric de Kruskal Wallis. Amb aquest test van comprovar per a cada curvatura si les mitjanes per a TFs, NCF i LFF dels 8 grups de l'estudi tenien diferències estadísticament significatives. En els casos en els que es van trobar diferències estadísticament significatives es va utilitzar el test U de Mann-Whitney per a comprovar els grups dos a dos.

En un segon pas, utilitzant aquestes mateixes proves estadístiques, es va comparar per a cada grup la diferència entre les mitjanes per a les totes les variables TFs, NCF i LFF entre les diferents curvatures.

En un tercer pas es van comparar els valors mitjans de TFs i NCF agrupant els instruments per tipus d'aliatge i moviment recomanat, i es van comparar els dos grups obtinguts mitjançant el test d'U de Mann-Whitney.

Per últim, aquests grups de la mateixa aliatge i amb el mateix moviment es van comparar per a TFs i NCF entre curvatures mitjançant el test de Kruskal Wallis.

En tots els casos es va treballar amb un nivell de significació de $p < 0,05$.

3. RESULTATS I DESENVOLUPAMENT ARGUMENTAL

3. RESULTATS I DESENVOLUPAMENT ARGUMENTAL.

La introducció dels instruments de NiTi en endodòncia va millorar l'eficàcia dels tractaments de conductes en el que respecta al temps, precisió i reducció de riscos, però la fractura d'aquests instruments continua sent un dels problemes principals. Per conseqüent, al present estudi hem testat com afecten les diferents curvatures i el mode d'ús dels instruments en la resistència a la fatiga cíclica de quatre sistemes de llima única.

3.1 RESULTATS DE L'ESTUDI.

En primer lloc veurem els resultats dels tests de fatiga, després l'anàlisi d'elements finits i per últim de les mesures de les seccions transversals de les llimes.

3.1.1 TESTS DE FATIGA CÍCLICA.

Presentem els resultats obtinguts en els tests de fatiga cíclica segons els objectius establerts.

3.1.1.1 Comparació dels sistemes de llima única entre sí.

➤ Resultats per a la curvatura de 60°

En les següents taules es mostren les mitjanes i les desviacions típiques dels temps fins a la fractura (TFs) i del nombre de cicles fins a la fractura (NCF) en la curvatura de 60° per a tots els grups:

TFs	Mitjana	Desviació típica	95% de l'interval de confiança per a la mitjana	
			Límit inferior	Límit superior
WO alternant	102,60 ^{a,b}	32,00	79,70	125,49
R25 alternant	119,70 ^a	28,98	98,96	140,43
OS rotació continua	40,20	6,76	35,36	45,04
F360 rotació continua	101,10 ^{a,b}	25,74	82,68	119,51
WO rotació continua	8,60	5,14	4,92	12,28
R25 rotació continua	68,50 ^c	11,13	60,53	76,47
OS alternant	80,40 ^{b,c}	18,96	66,83	93,96
F360 alternant	164,50	29,46	143,42	185,57

Taula 5: Temps fins a la fractura en 60° (n=10)

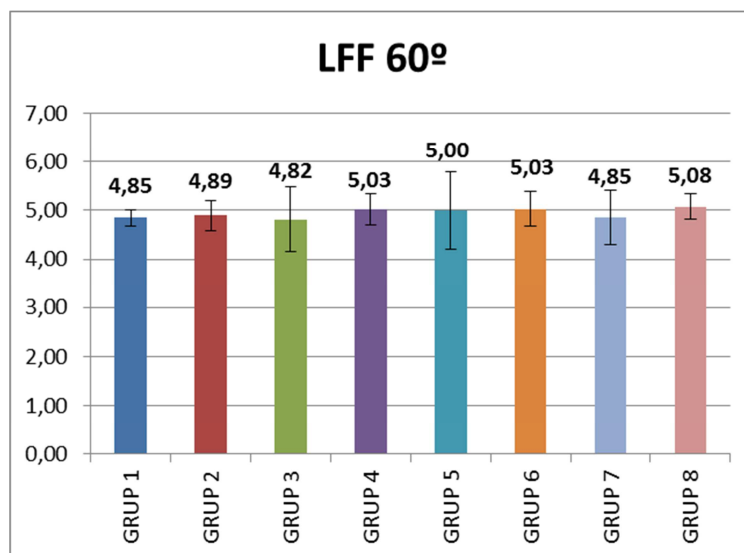
Les mateixes lletres indiquen que no hi ha diferències estadísticament significatives (p>0,05).

NCF	Mitjana	Desviació típica	95% de l'interval de confiança per a la mitjana	
			Límit inferior	Límit superior
WO alternant	598,60 ^a	186,70	465,04	732,16
R25 alternant	598,50 ^a	144,91	494,83	702,17
OS rotació continua	268,00	45,09	235,75	300,25
F360 rotació continua	505,50 ^{a,b}	128,72	413,42	597,58
WO rotació continua	50,10	30,08	28,58	71,62
R25 rotació continua	342,50 ^c	55,69	302,66	382,34
OS alternant	402,00 ^{b,c}	94,82	334,17	469,83
F360 alternant	822,50	147,30	717,13	927,87

Taula 6: Nombre de cicles fins a la fractura en 60° (n=10)

Les mateixes lletres indiquen que no hi ha diferències estadísticament significatives ($p > 0,05$).

Les mitjanes de les longituds dels fragments fracturats (LFF) per a la curvatura de 60° es presenten a la següent gràfica:

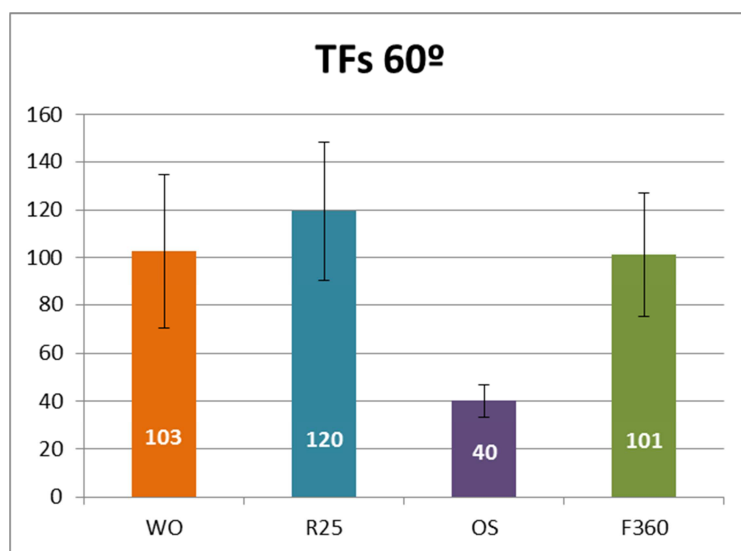


Il·lustració 30: LFF per a tots els grups a 60° (n=10)

Llegenda: Grup 1 WO alternant, Grup 2 R25 alternant, grup 3 OS rotació, grup 4 F360 rotació, Grup 5 WO rotació, Grup 6 R25 rotació, Grup 7 OS alternant, Grup 8 F360 alternant.

Al comparar el TFs, el NCF i la LFF de les llimes utilitzades amb els moviments recomanats, es pot observar que:

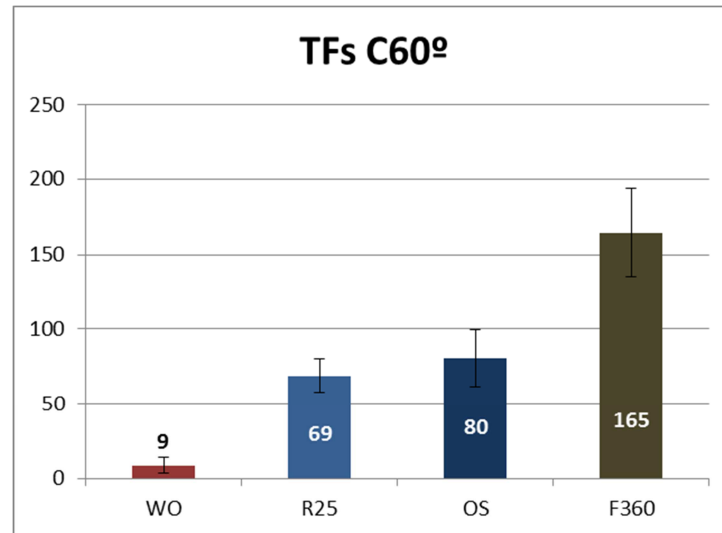
- No hi ha diferències estadísticament significatives entre WO, R25 i F360 ($p > 0,05$).
- Hi ha diferències estadísticament significatives ($p < 0,001$) entre OS i la resta de grups.
- No trobem diferències entre les longituds dels fragments de llima fracturats ($p > 0,05$).



Il·lustració 31: Mitjanes i desviació típica de TFs per a la curvatura de 60° amb els moviments recomanats

Quan comparem els resultats de TFs, NCF i LFF dels grups de llimes utilitzades amb els moviments contraris als recomanats:

- Trobem diferències estadísticament significatives entre tots els grups ($p < 0,001$), excepte entre R25 i OS ($p > 0,05$).
- No hi ha cap diferència significativa entre les LFF ($p > 0,05$).



Il·lustració 32: Mitjanes i desviació típica de TFs per a la curvatura de 60° amb els moviments contraris

I quan comparem els TFs i els NCF de tots els grups de l'estudi de 60°, tant si les llimes s'han testat amb el moviment recomanat com amb el contrari:

- Els millors resultats de l'estudi són per a la llima F360 utilitzada amb moviments alternants ($p < 0,02$).
- Els pitjors resultats són per a la llima WO utilitzada amb el moviment contrari al recomanat ($p < 0,001$).

➤ Resultats per a la curvatura de 45°

En les següents taules es mostren les mitjanes i les desviacions típiques del TFs i del NCF en la curvatura de 45° per a tots els grups:

TFs	Mitjana	Desviació típica	95% de l'interval de confiança per a la mitjana	
			Límit inferior	Límit superior
WO alternant	51,70 ^a	17,64	39,08	64,32
R25 alternant	57,60 ^a	20,85	42,69	72,52
OS rotació continua	35,10	9,49	28,31	41,89
F360 rotació continua	89,10	27,74	69,25	108,95
WO rotació continua	3,20	0,92	2,54	3,86
R25 rotació continua	25,10	7,13	20,00	30,20
OS alternant	59,90 ^a	19,54	45,92	73,88
F360 alternant	159,50	49,69	123,95	195,05

Taula 7: Temps fins a la fractura en 45° (n=10)

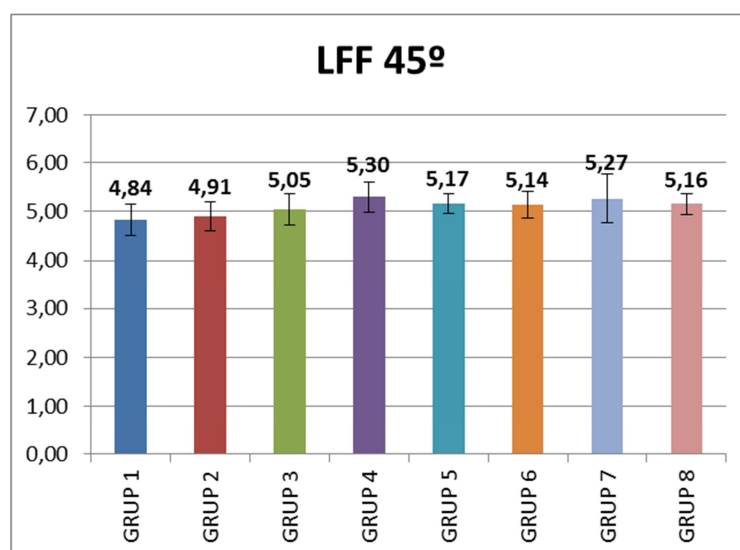
Les mateixes lletres indiquen que no hi ha diferències estadísticament significatives ($p > 0,05$).

NCF	Mitjana	Desviació típica	95% de l'interval de confiança per a la mitjana	
			Límit inferior	Límit superior
WO alternant	296,70 ^a	101,38	224,18	369,22
R25 alternant	288,00 ^a	104,25	213,43	362,58
OS rotació continua	234,00 ^a	63,50	188,57	279,43
F360 rotació continua	445,50	138,71	346,27	544,73
WO rotació continua	18,90	5,11	15,25	22,55
R25 rotació continua	125,50	35,63	100,02	150,98
OS alternant	299,50 ^a	97,68	229,62	369,38
F360 alternant	797,50	248,45	619,77	975,23

Taula 8: Nombre de cicles fins a la fractura en 45° (n=10)

Les mateixes lletres indiquen que no hi ha diferències estadísticament significatives ($p > 0,05$).

Les mitjanes de les longituds dels fragments fracturats (LFF) per a la curvatura de 45° es presenten a la següent gràfica:

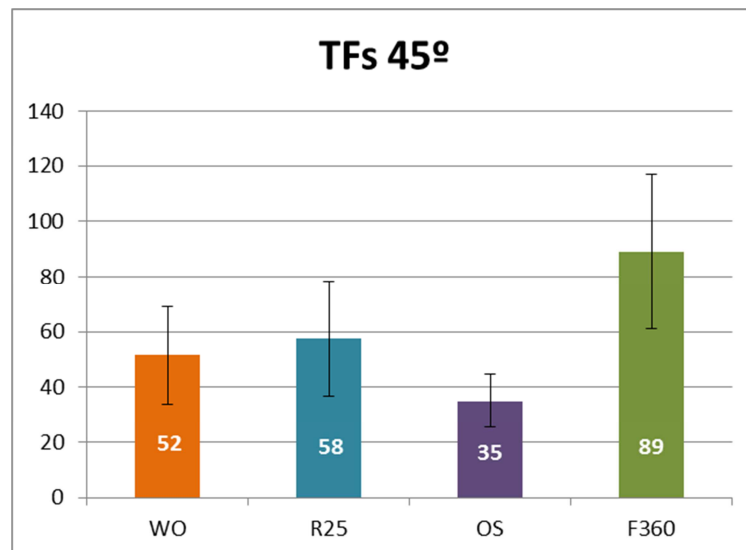


Il·lustració 33: LFF per a tots els grups a 45° (n=10)

Llegenda: Grup 1 WO alternant, Grup 2 R25 alternant, grup 3 OS rotació, grup 4 F360 rotació, Grup 5 WO rotació, Grup 6 R25 rotació, Grup 7 OS alternant, Grup 8 F360 alternant.

Al comparar les mitjanes obtingudes de TFs, NCF i LFF als grups on les limes han treballat amb els moviments recomanats pels fabricants en la curvatura de 45°:

- La major resistència a la fatiga cíclica és per a la llima F360 ($p < 0,01$)
- No trobem diferències estadísticament significatives entre WO i R25. La llima OS té la menor resistència a la fatiga ($p < 0,02$) quan comparem amb el TFs.
- Però quan comparem amb el NCF no hi ha diferències entre els grups WO, R25 i OS ($p > 0,05$).
- Les LFF dels grups presenten diferències entre WO i F360 ($p = 0,04$), i també entre R25 i F360 ($p = 0,01$).

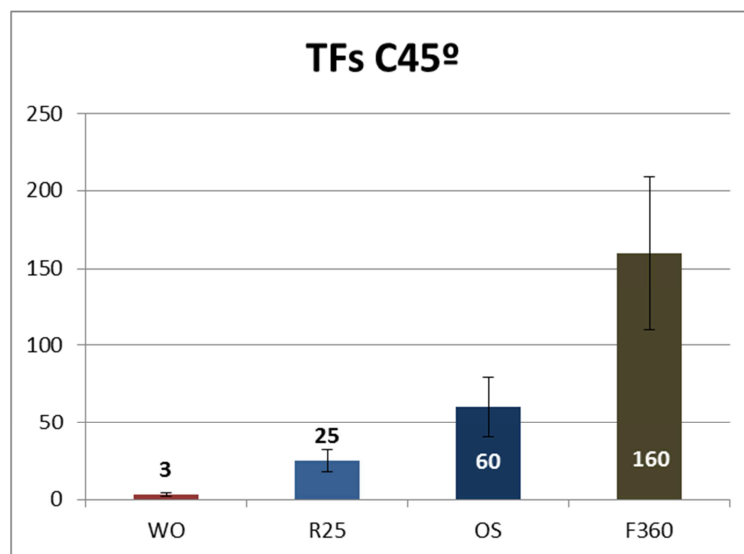


Il·lustració 34: Mitjanes i desviació típica de TFs per a la curvatura de 45° amb els moviments recomanats

Si comparem els resultats per a TFs, NCF i LFF de les limes utilitzades amb els moviments contraris als recomanats:

- La llima F360 amb moviments alternants també ha obtingut els millors resultats ($p < 0,001$).
- La llima OS amb moviments alternants supera a les limes WO i R en rotació continua ($p < 0,001$).
- Els pitjors resultats són per a la llima WO en rotació continua ($p < 0,001$).

- No existeixen diferències significatives ($p > 0,05$) entre les longituds dels fragments (LFF).



Il·lustració 35: Mitjanes i desviació típica de TFs per a la curvatura de 45° amb els moviments contraris

I al comparar el TFs i el NCF entre tots els grups de llimes, tant si s'han testat amb els moviments recomanats com amb el contraris:

- La major resistència a la fatiga cíclica a la curvatura de 45° és per a la llima F360 utilitzada amb moviments alternants ($p \leq 0,001$), però utilitzada amb moviment de rotació continua també ha obtingut molt bons resultats si la comparem amb la resta de grups ($p < 0,01$).
- Respecte al TFs, les llimes WO, R25 i OS utilitzades amb moviments alternants han obtingut un resultat similar ($p > 0,05$). Per al NCF la llima OS amb moviment de rotació continua també ha obtingut un resultat similar als tres grups anteriors ($p > 0,05$).
- La menor resistència a la fatiga cíclica és per la llima WO utilitzada amb el moviment no recomanat ($p < 0,001$).

➤ **Resultats per a la curvatura de 30°**

En les següents taules es mostren les mitjanes i les desviacions típiques del TFs i del NCF en la curvatura de 45° per a tots els grups:

TFs	Mitjana	Desviació típica	95% de l'interval de confiança per a la mitjana	
			Límit inferior	Límit superior
WO alternant	29,20	9,96	22,07	36,33
R25 alternant	13,40 ^a	4,14	10,44	16,36
OS rotació continua	4,90	2,60	3,04	6,76
F360 rotació continua	43,60	18,99	30,02	57,18
WO rotació continua	2,70	0,67	2,22	3,18
R25 rotació continua	11,90 ^a	3,14	9,65	14,15
OS alternant	16,30 ^a	10,72	8,63	23,97
F360 alternant	91,00	33,81	66,82	115,18

Taula 9: Temps fins a la fractura en 30° (n=10)

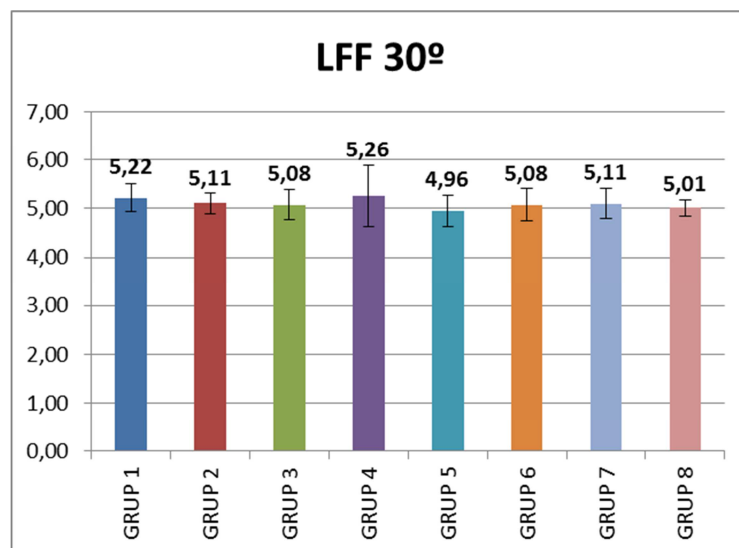
Les mateixes lletres indiquen que no hi ha diferències estadísticament significatives (p>0,05).

NCF	Mitjana	Desviació típica	95% de l'interval de confiança per a la mitjana	
			Límit inferior	Límit superior
WO alternant	170,60 ^a	58,12	129,03	212,17
R25 alternant	67,00 ^b	20,71	52,19	81,81
OS rotació continua	32,70	17,29	20,33	45,07
F360 rotació continua	218,00 ^a	94,93	150,09	285,91
WO rotació continua	16,10	3,84	13,35	18,85
R25 rotació continua	59,50 ^b	15,71	48,26	70,74
OS alternant	81,50 ^b	53,60	43,16	119,84
F360 alternant	455,00	169,03	334,08	575,92

Taula 10: Nombre de cicles fins a la fractura en 30° (n=10)

Les mateixes lletres indiquen que no hi ha diferències estadísticament significatives (p>0,05).

Les mitjanes de les longituds dels fragments fracturats (LFF) per a la curvatura de 30° es presenten a la següent gràfica:

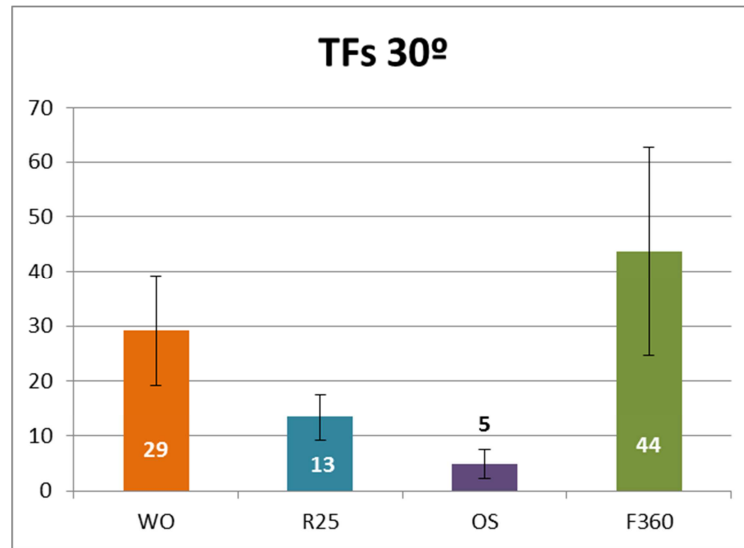


Il·lustració 36: LFF per a tots els grups a 30° (n=10)

Llegenda: Grup 1 WO alternant, Grup 2 R25 alternant, grup 3 OS rotació, grup 4 F360 rotació, Grup 5 WO rotació, Grup 6 R25 rotació, Grup 7 OS alternant, Grup 8 F360 alternant.

En comparar les mitjanes de TFs, NCF i LFF obtingudes als grups on les llimes han treballat amb els moviments recomanats pels fabricants per a la curvatura de 30°:

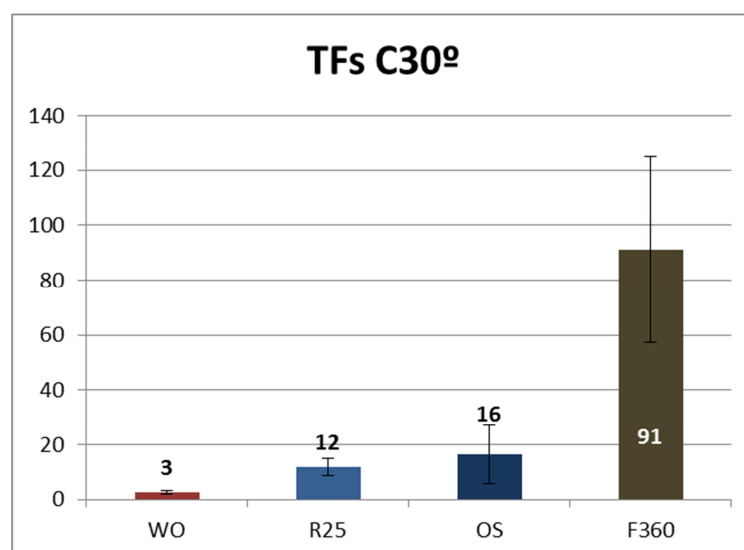
- La llima F360 ha obtingut una major resistència quan analitzem els resultats amb TFs ($p < 0,02$), però si analitzem els NCF no existeixen diferències entre les llimes F360 i WO ($p > 0,05$).
- La llima R25 en aquesta curvatura ha obtingut pitjors resultats que la llima WO ($p < 0,001$).
- La llima OS ha obtingut la menor resistència a la fatiga cíclica ($p < 0,001$).
- No s'observen diferències significatives entre les LFF ($p > 0,05$).



Il·lustració 37: Mitjanes i desviació típica de TFs per a la curvatura de 30° amb els moviments recomanats

Si comparem els resultats de les llimes utilitzades amb els moviments contraris als recomanats per a TFs, NCF i LFF:

- La llima que destaca es la llima F360 utilitzada amb moviments alternants ($p < 0,001$).
- Els pitjors resultats són per a la llima WO en rotació continua ($p < 0,001$).
- Les llimes R25 en rotació continua i la llima OS amb moviment alternant han obtingut un resultat similar ($p > 0,05$).
- No s'han trobat diferències estadísticament significatives entre les LFF ($p > 0,05$).



Il·lustració 38: Mitjanes i desviació típica de TFs per a la curvatura de 30° amb els moviments contraris

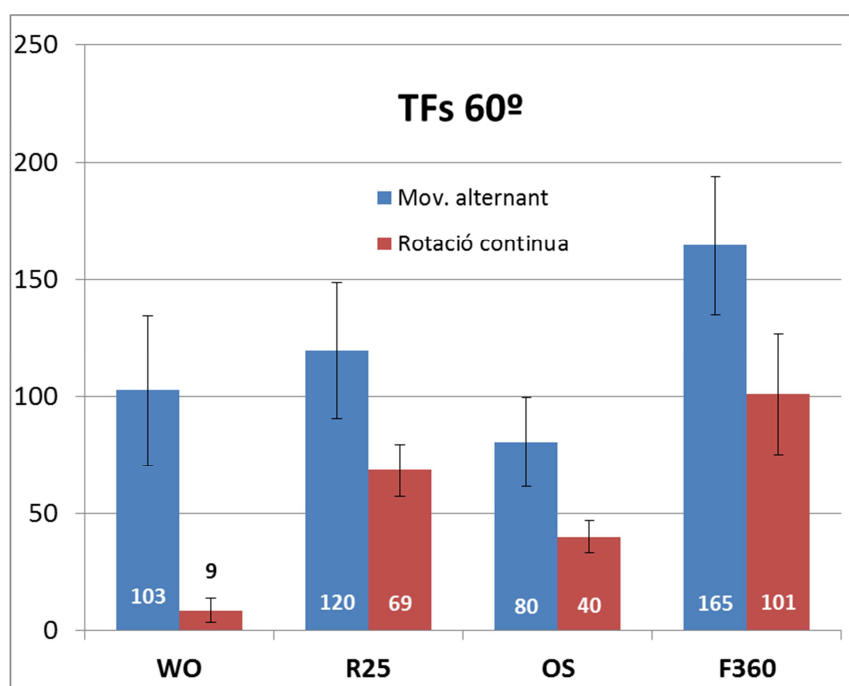
I al comparar els TFs i NCF de tots els grups de llimes, tant si s'han testat amb els moviments recomanats com amb els contraris

- La major resistència a la fatiga cíclica a la curvatura de 30° és per a F360 utilitzada amb moviments alternant ($p < 0,001$).
- Els pitjors resultats són per a la llima WO en rotació continua ($p \leq 0,009$).

3.1.1.2 Estudi de la influència del moviment.

➤ Curvatura de 60°

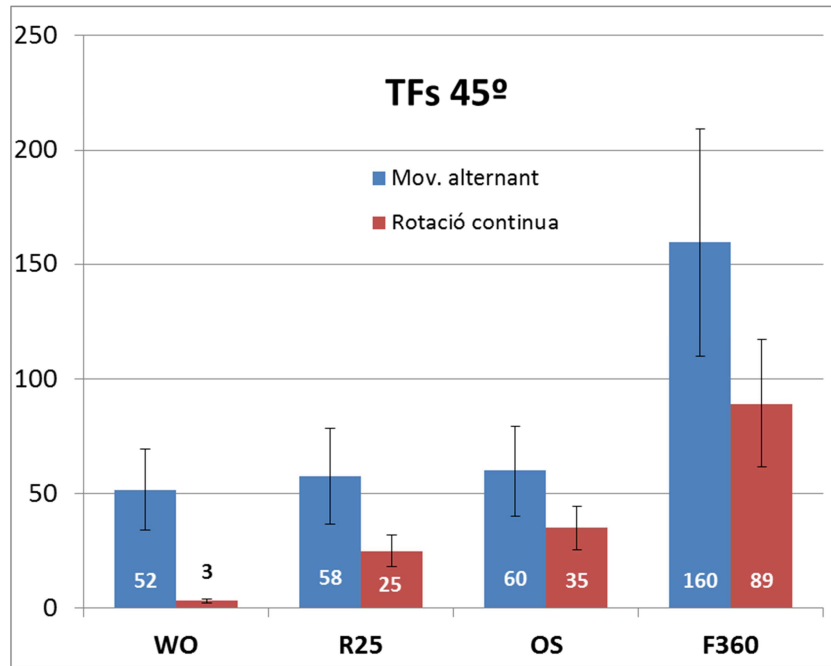
S'han trobat diferències estadísticament significatives en totes les llimes quan són utilitzades amb distints moviments, tots els sistemes han obtingut millors resultats quan treballen amb moviments alternants ($p < 0,001$).



Il·lustració 39: Mitjanes i desviació típica de TFs per a la curvatura de 60°, comparació entre moviments (n=10)

➤ Curvatura de 45°

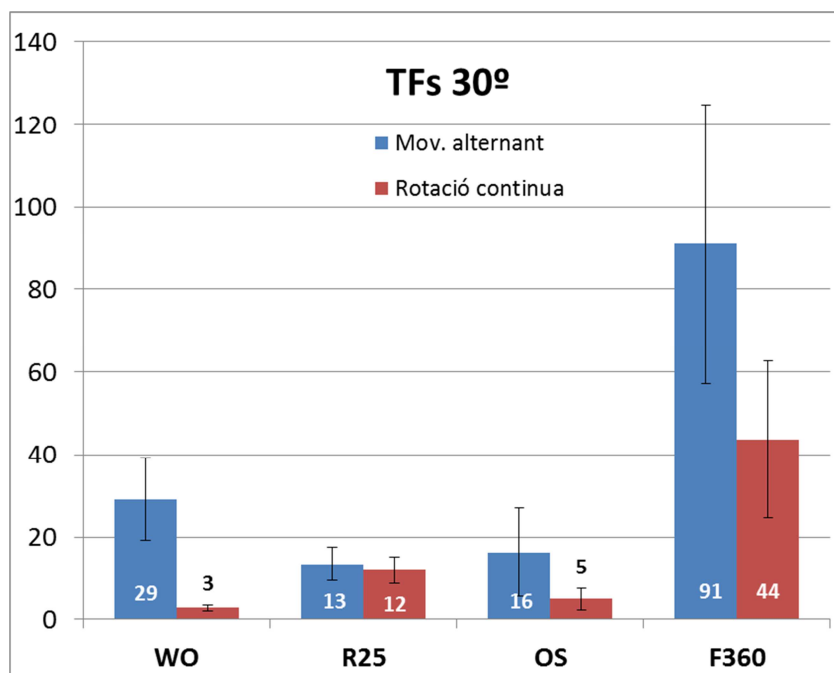
En aquesta curvatura també hi ha diferències estadísticament significatives a favor del moviment alternant en tots els sistemes de llima única ($p < 0,003$).



Il·lustració 40: Mitjanes i desviació típica de TFs per a la curvatura de 45°, comparació entre moviments (n=10)

➤ Curvatura de 30°

També hi ha diferències estadísticament significatives per a tots els grups ($p < 0,001$), excepte per a la lima R25 on la resistència a la fatiga cíclica ha sigut molt similar amb els dos moviments ($p > 0,05$).

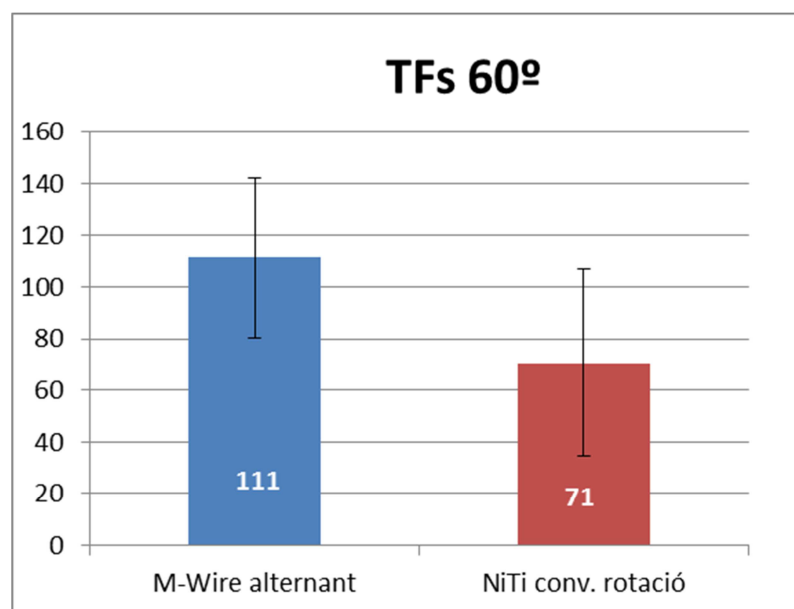


Il·lustració 41: Mitjanes i desviació típica de TFs per a la curvatura de 30°, comparació entre moviments (n=10)

3.1.1.3 Comparació entre sistemes M-Wire i moviments alternants amb sistemes NiTi convencional i rotació continua.

➤ **Curvatura de 60°**

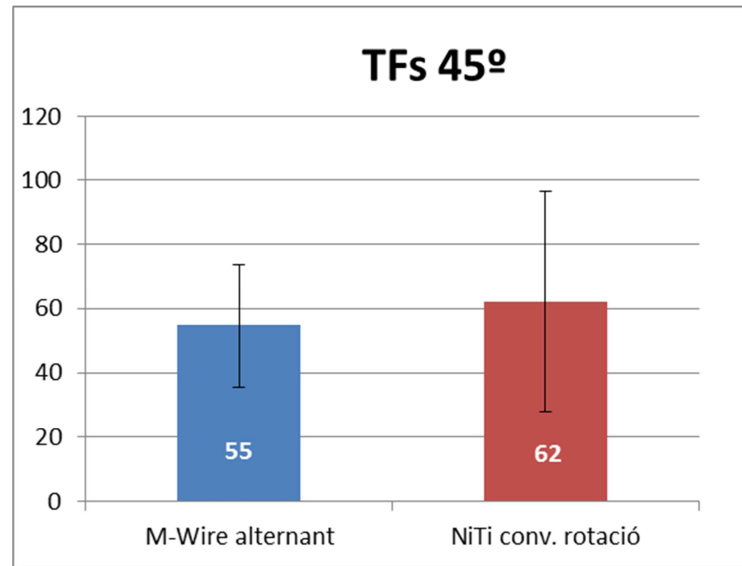
Si comparem els sistemes que utilitzen moviments alternants i estan fabricats amb M-Wire (WO i R) amb els que utilitzen rotació continua i el seu aliatge és NiTi convencional (OS i F360), trobem una major resistència a la fatiga cíclica per al primer grup de manera estadísticament significativa, per a la variable TFs ($p < 0,001$) i NCF ($p = 0,001$).



Il·lustració 42: Mitjanes i desviació típica de TFs per a 60°, comparació entre grups d'un mateix aliatge i moviment (n=20)

➤ **Curvatura de 45°**

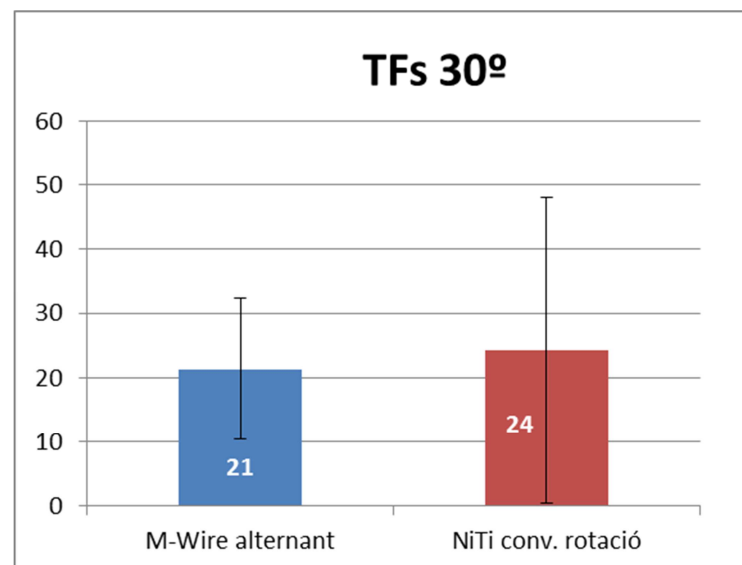
Quan comparem els grups d'un mateix aliatge i moviment per a la curvatura de 45° no apareixen diferències estadísticament significatives ($p > 0,05$).



Il·lustració 43: Mitjanes i desviació típica de TFs per a 45°, comparació entre grups d'un mateix aliatge i moviment (n=20)

➤ Curvatura de 30°

I el mateix ocorre a la curvatura de 30°, al comparar els grups de les llimes amb un mateix aliatge i el mateix moviment recomanat no trobem diferències estadístiques.



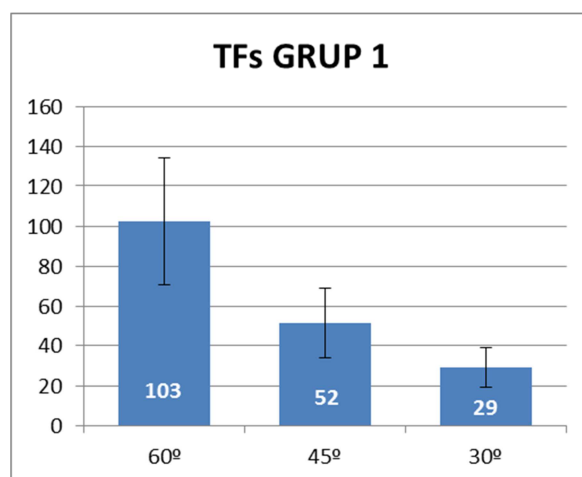
Il·lustració 44: Mitjanes i desviació típica de TFs per a 30°, comparació entre grups d'un mateix aliatge i moviment (n=20)

3.1.1.4 Influència de la curvatura del conducte radicular

Hem comparat els resultats de cada grup de llimes en les tres curvatures de l'estudi i les diferències estadístiques són iguals per a TFs i NCF.

➤ **Grup 1: WaveOne Primary amb moviments alternants.**

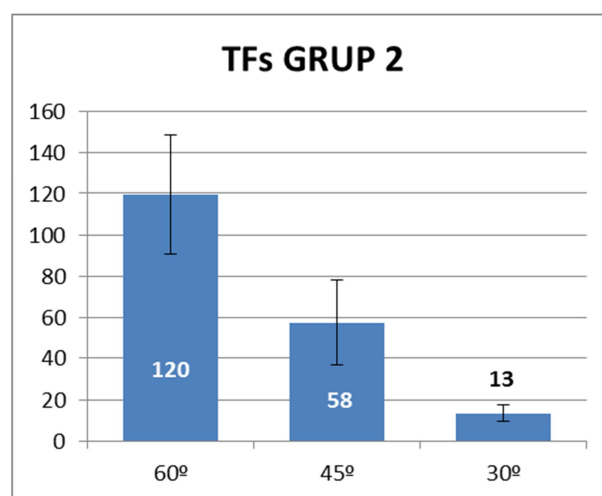
Hi ha diferències estadísticament significatives entre les tres curvatures ($p=0,004$). La llima WO utilitzada amb els moviments recomanats resisteix més a la fractura en una curvatura de 60° i 5 mm de radi, la segueix la curvatura de 45° i 5 mm de radi, i per últim la curvatura de 30° i 5 mm de radi.



Il·lustració 45: Mitjanes i desviació típica de TFs per al Grup 1, comparació entre curvatures (n=10)

➤ **Grup 2: Reciproc R25 amb moviments alternants.**

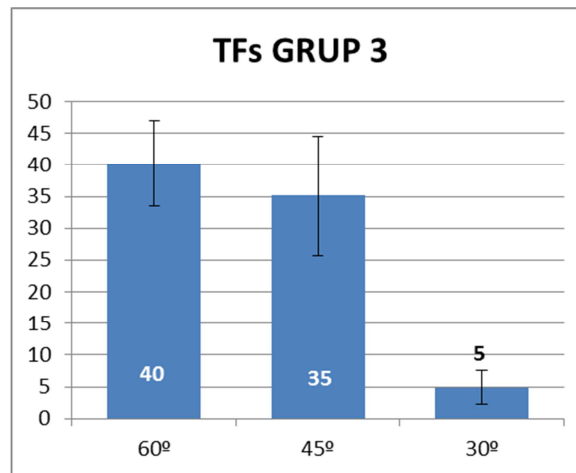
La llima R25 amb moviments alternants també presenta diferències estadístiques quan és testada en diferents curvatures ($p<0,001$). Els millors resultats també es donen a la curvatura de 60° , seguida de la de 45° i per últim de la de 30° .



Il·lustració 46: Mitjanes i desviació típica de TFs per al Grup 2, comparació entre curvatures (n=10)

➤ **Grup 3: OneShape en rotació continua.**

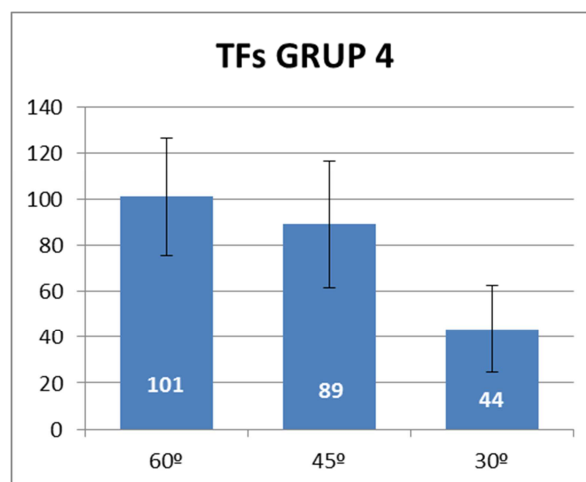
La llima OS quan és utilitzada amb els moviments recomanats, que són els de rotació continua, no presenta diferències entre els resultats obtinguts a la curvatura de 60° i 45° ($p > 0,05$), però sí apareixen diferències en la curvatura de 30° ($p < 0,001$).



Il·lustració 47: Mitjanes i desviació típica de TFs per al Grup 3, comparació entre curvatures (n=10)

➤ **Grup 4: F360#25 en rotació continua.**

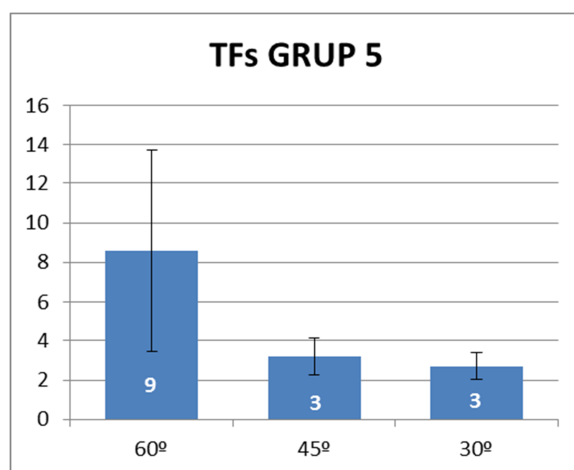
La llima F360 utilitzada amb els moviments recomanats no presenta diferències entre les curvatures de 60° i 45° ($p > 0,05$), però sí que hi ha diferències estadístiques entre aquestes curvatures i la de 30° ($p < 0,001$).



Il·lustració 48: Mitjanes i desviació típica de TFs per al Grup 4, comparació entre curvatures (n=10)

➤ **Grup 5: WaveOne Primary en rotació continua.**

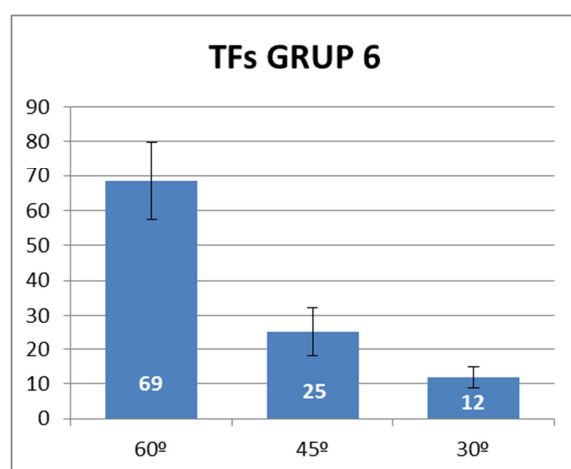
La llima WO utilitzada en rotació continua ha obtingut els mateixos resultats per als conductes de 45° i 30°, però presenta diferències en el conducte de 60° ($p < 0,001$). Aquesta llima utilitzada amb els moviments no recomanats ha obtingut una baixa resistència a la fatiga cíclica.



Il·lustració 49: Mitjanes i desviació típica de TFs per al Grup 5, comparació entre curvatures (n=10)

➤ **Grup 6: Reciproc R25 en rotació continua.**

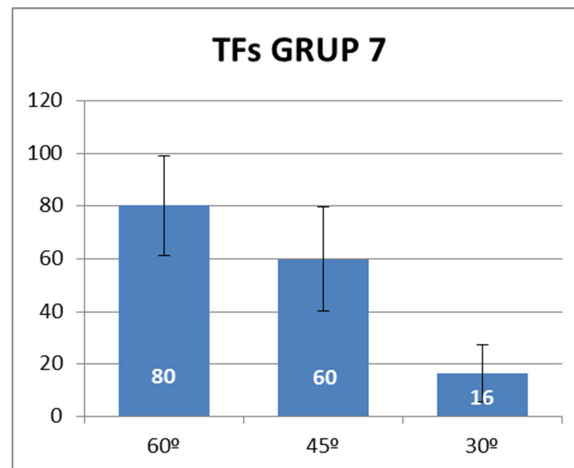
Aquesta llima ha obtingut diferències estadístiques per a les tres curvatures ($p < 0,001$). Els millors resultats també han sigut per a la curvatura de 60°, seguida de la de 45° i per últim 30°.



Il·lustració 50: Mitjanes i desviació típica de TFs per al Grup 6, comparació entre curvatures (n=10)

➤ **Grup 7: OneShape amb moviments alternants.**

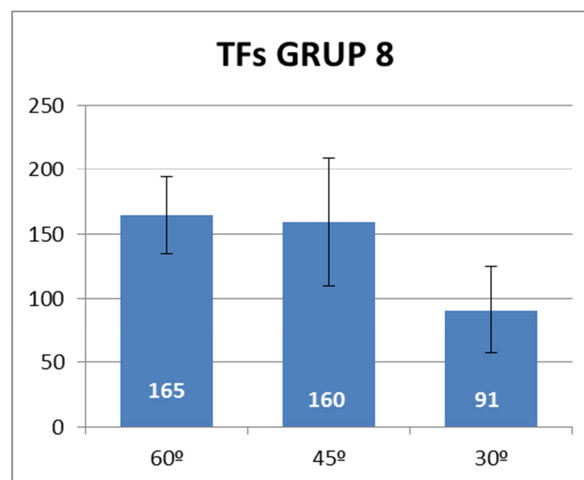
La llima OS utilitzada amb moviments alternants presenta millor resultats en la curvatura de 60° comparant-la amb la de 45° ($p=0,03$). I en la curvatura de 30° presenta la menor resistència a la fatiga cíclica ($p<0,001$).



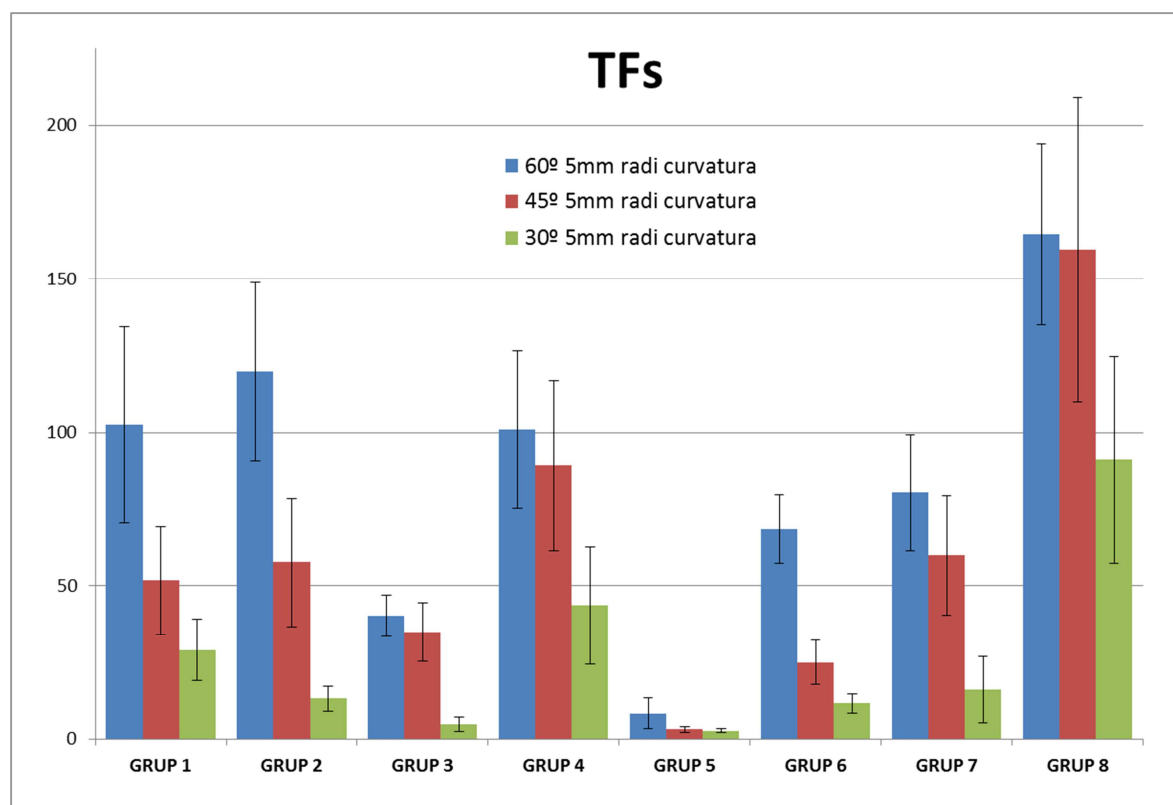
Il·lustració 51: Mitjanes i desviació típica de TFs per al Grup 7, comparació entre curvatures (n=10)

➤ **Grup 8: F360#25 amb moviments alternants.**

La llima F360 quan és utilitzada amb moviments alternants ha obtingut els millors resultats de l'estudi. Quan comparem els resultats entre curvatures, no hi ha diferències entre el conducte de 60° i 45° ($p>0,05$), però sí que disminueix la resistència a la fatiga cíclica en la curvatura de 30° ($p\leq 0,002$).



Il·lustració 52: Mitjanes i desviació típica de TFs per al Grup 8, comparació entre curvatures (n=10)

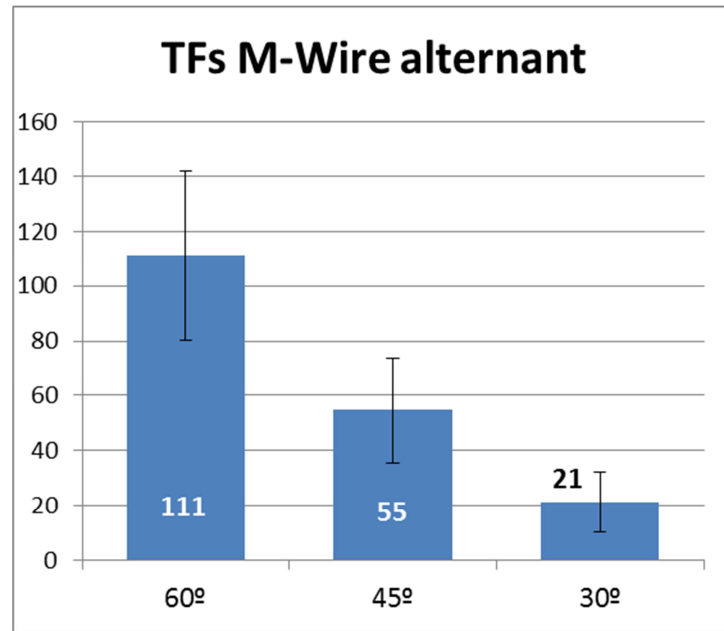


Il·lustració 53: Resum de mitjanes i desviació típica de TFs, comparació entre curvatures

Llegenda: Grup 1 WO alternant, Grup 2 R25 alternant, grup 3 OS rotació, grup 4 F360 rotació, Grup 5 WO rotació, Grup 6 R25 rotació, Grup 7 OS alternant, Grup 8 F360 alternant.

➤ Grup aliatge M-Wire i moviment alternant (WO i R25)

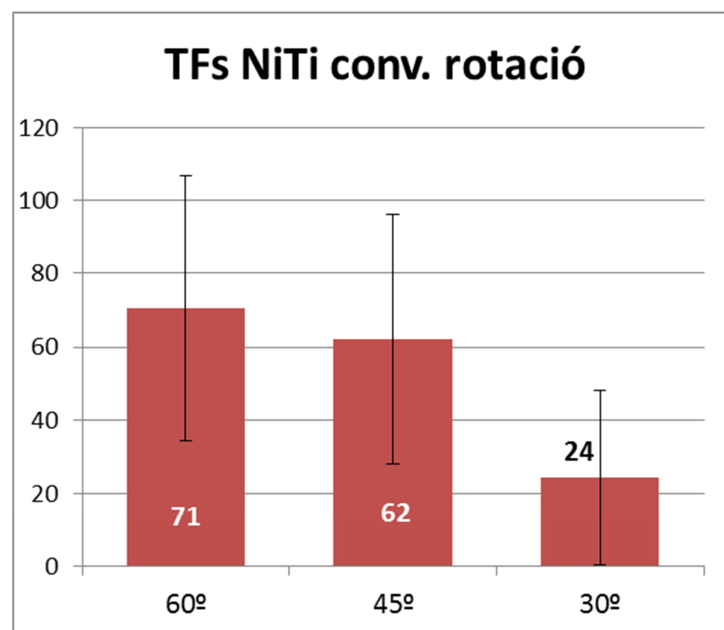
Quan comparem el grup format per les llimes fabricades amb M-Wire i que s'utilitzen amb moviments alternants (WO i R25) en les tres curvatures testades, apareixen diferències estadísticament significatives entre 60°, 45° i 30° ($p < 0,001$). Els millors resultats, a l'igual que en la resta dels grups, són per a la curvatura de 60°, després la de 45° i per últim la de 30°.



Il·lustració 54: Mitjanes i desviació típica de TFs per al grup M-Wire i moviment alternant (n=20)

➤ **Grup aliatge NiTi convencional i rotació continua (OS i F360)**

I amb el grup format per les llimes fabricades amb NiTi convencional i utilitzades en rotació continua (OS i F360), no apareixen diferències estadístiques entre les curvatures de 60° i 45° ($p > 0,05$), però sí que hi ha una menor resistència a la fatiga cíclica d'aquest grup en el conducte de 30° ($p < 0,001$).

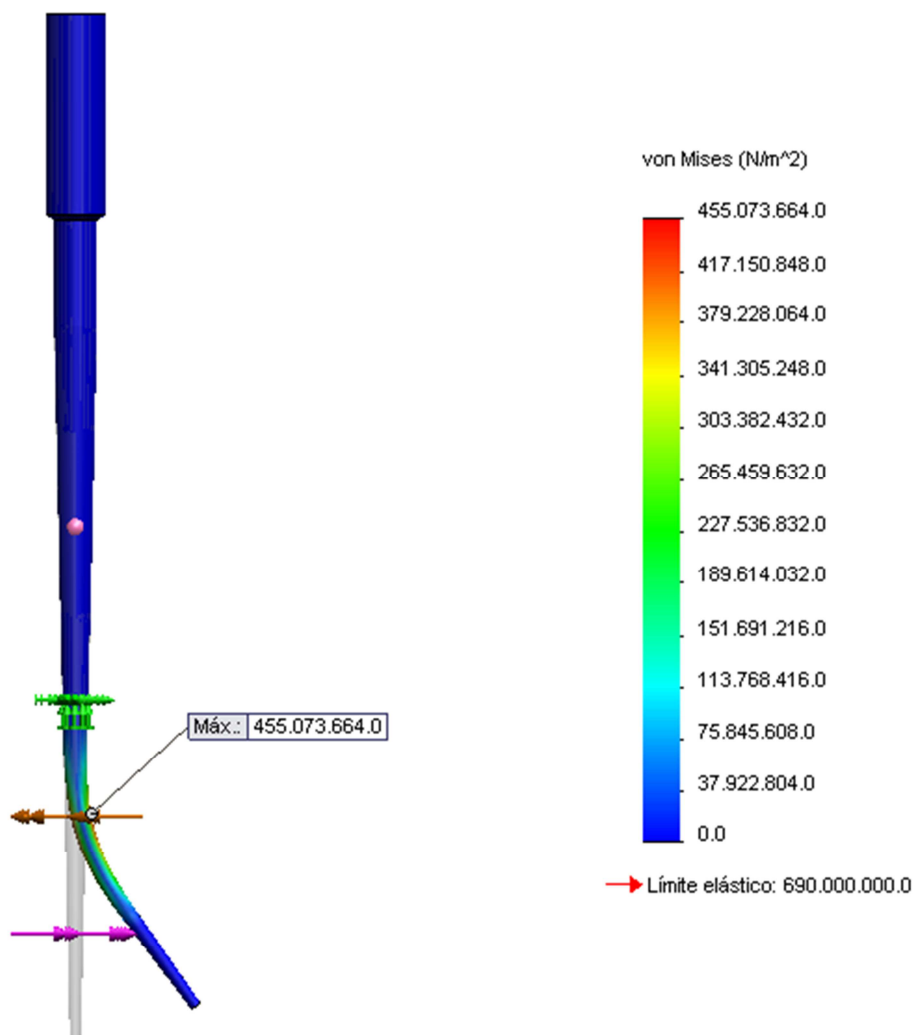


Il·lustració 55: Mitjanes i desviació típica de TFs per el grup NiTi convencional i rotació continua (n=20)

3.1.2 ANÀLISI D'ELEMENTS FINITS

A continuació presentem els resultats obtinguts en els tres casos de simulació plantejats.

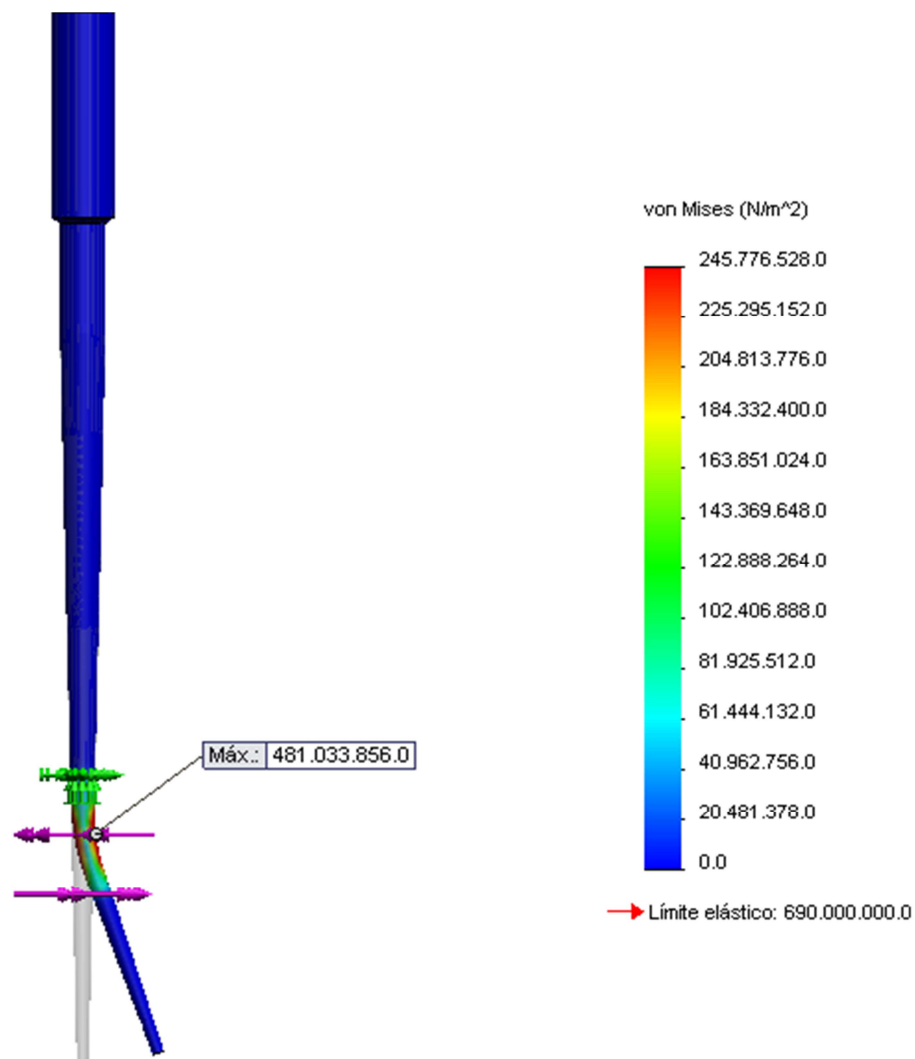
- CAS A (equivalent a una curvatura de 60° i 5 mm de radi):



Il·lustració 56: Model de curvatura de 60° i 5 mm de radi (disseny de X. Jiménez)

El simulador representa la distribució de les tensions al llarg del model, i ens indica on està situat el punt de màxima tensió i la seua magnitud (455 MPa).

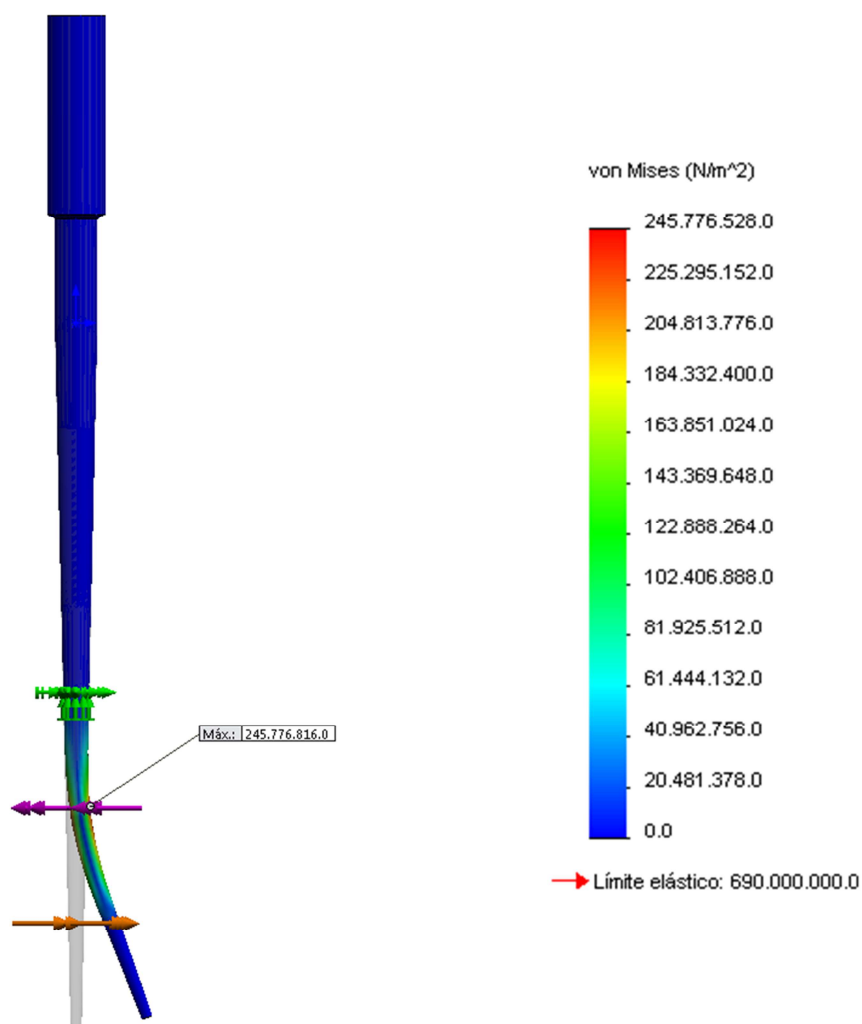
- CAS B (equivalent a una curvatura de 30° i 5 mm de radi):



Il·lustració 57: Model de curvatura de 30° i 5 mm de radi (disseny de X. Jiménez)

El punt de màxima tensió correspon ara a 481 MPa.

- CAS C (equivalent a una curvatura de 30° i 10 mm de radi):



Il·lustració 58: Model de curvatura de 30° i 5 mm de radi (disseny de X. Jiménez)

El punt de màxima tensió correspon a 245 MPa.

Els resultats mostren que la tensió que sofreix el material en la curvatura de 30° i 5mm de radi és major que en la de 60° i 5mm (481 MPa front a 455 MPa). Al tercer cas d'estudi, 30° amb 10 mm de radi, la tensió màxima resultant (245 MPa) és aproximadament la meitat que en el cas de 30° i radi 5 mm (481 MPa).

3.1.3. ESTUDI DE LES SECCIONS TRANSVERSALS AMB EL MICROSCOPI ELECTRÒNIC DE RASTREIG.

Amb les imatges captades al MER del SCSIE i el Programa Image J, hem obtingut els següents resultats del diàmetre i l'àrea de la secció transversal de les llimes de l'estudi:

	ÀREA de la secció (μm^2)	DIAGONAL major (mm)
WaveOne Primary	166379	0,58
Reciproc R25	177588	0,609
OneShape	135920	0,53
F360 #25	89608	0,455

Taula 11: Àrea de la secció i diàmetre dels sistemes de llima única a 5mm de la punta

3.2 DISCUSSIÓ SOBRE LA METODOLOGIA.

En aquest estudi s'han testat els 4 sistemes de llima única que existeixen al mercat i per a poder-los comparar hem elegit les llimes que tenien un diàmetre en la punta de 0,25 mm. És a dir, la llima Primary del sistema WaveOne, la llima R25 del sistema Reciproc, la llima 25 del sistema F360, i l'única llima del sistema OneShape, la qual té un diàmetre en la punta de 0,25 mm. Com en tots els estudis de fatiga cíclica, i com ja s'ha descrit, les llimes van ser inspeccionades prèviament i cap llima va ser descartada.

Tot i que tant la fatiga cíclica com la fractura per torsió es produeixen simultàniament, la majoria d'estudis que simulen les fractures de les llimes de NiTi són realitzats de manera separada (Kim i cols., 2012b). Per tant, els tests de fatiga cíclica serveixen per a investigar *in vitro* la influència de diferents factors en la resistència a la fatiga cíclica de les llimes. La fatiga cíclica és una variable molt important quan s'utilitzen les llimes de NiTi accionades per motor en la conformació de conductes corbats (Cheung i cols., 2007).

Els tests de fatiga cíclica han de reproduir les mateixes condicions per a totes les mostres mitjançant condicions experimentals estandarditzades, principalment respecte una curvatura predefinida (Plotino i cols., 2009b). En aquests tipus de tests la utilització de dents extretes per a realitzar l'experimentació no està indicada, encara que emule situacions clíniques, perquè no estan anatòmicament estandarditzades (cada llima es testaria en condicions diferents) i la forma del conducte radicular canviaria durant la instrumentació. A més, també podrien aparèixer punts d'estrès torsional addicionals si la llima s'encasta en alguna part del conducte (Yao i cols., 2006; Plotino i cols., 2009b). Per tot açò, la majoria d'autors que han estudiat la fatiga cíclica de les llimes utilitzen dispositius metàl·lics, perquè són el millor mètode per a minimitzar la influència d'altres variables i és la única manera de poder testar les llimes en unes mateixes condicions (Karatas i cols., 2015).

L'American Dental Association en la seua especificació n°28, descriu com han de ser els tests per a mesurar la resistència a la torsió i la flexibilitat de les llimes manuals (ANSI/ADA, 2008), però no existeix cap especificació per a testar la fatiga cíclica dels instruments de NiTi accionats per motor. Així que al no existir un dispositiu universalment acceptat trobem en la literatura una gran varietat de dispositius que

permeten que els instruments roten fins la fractura utilitzant varies corbes geomètriques (Plotino i cols., 2009b), com per exemple:

- Conductes artificials construïts a partir de tubs de vidre o metall de diferents diàmetres, com el de Pruett i cols. (1997).
- Curvatures produïdes fent que l'instrument treballa contra un blocs metàl·lics inclinats que contenen un solc per a que la llima es mantinga dins d'aquest (Li i cols., 2002).
- Conductes artificials dins d'un bloc metàl·lic simulant diferents curvatures però amb un diàmetre constant, com el de Larsen i cols. (2009) o amb una conicitat constant però no individualitzada com el de Castelló-Escrivá i cols. (2012).
- Conductes artificials mitjançant dos peces metàl·liques: un bloc còncav amb un solc i un cilindre convex, com el de Gambarini (2001) i adaptat a la llima com el de Vadhana i cols. (2014).
- Conductes artificials metàl·lics reproduint l'instrument (tamany i conicitat) i augmentant 0,2 mm o 0,1 mm el seu diàmetre. Grande i cols. (2006) augmentaven 0,2 mm el diàmetre de l'instrument per a que poguera girar lliurement i més endavant el disminuïren a 0,1 mm (Plotino i cols., 2009b).
- Dispositius creats amb tres pivots cilíndrics metàl·lics (Cheung i cols., 2007a).
- Dispositius creats amb dos pivots cilíndrics com el de Zinelis i cols. (2007).

Però de tots els dispositius que s'han utilitzat per a testar la fatiga cíclica, els únics que compleixen l'estandardització de les condicions de l'estudi són els que s'han dissenyat i fabricat de manera individualitzada per a cada llima, ajustant-se al diàmetre i conicitat de cada instrument. Aquest tipus d'estudis són molt limitats i la majoria es realitzen en tubs o en conductes metàl·lics cilíndrics amb un diàmetre constant o cònics, però amb la mateixa conicitat per a tots els instruments.

Segons Plotino i cols (2009a) una estandardització del test de fatiga cíclica seria obligatòria per obtindre uns resultats consistents i poder-se comparar i avaluar la resistència a la fatiga cíclica dels diferents sistemes de NiTi. Aquest grup d'investigació va demostrar que si un conducte artificial no estava confeccionat adaptat perfectament a la forma de l'instrument, aquest tendeix a posicionar-se en la seua forma recta original,

treballant amb unes condicions més favorables (un major radi de curvatura i un angle més reduït). Quanta menys adaptació tinga l'instrument en el conducte radicular artificial, més paràmetres de curvatura variaran en la investigació que es duga a terme (Plotino i cols., 2010b). En un altre estudi, Plotino i cols. (2010a) demostren que inclús xicotetes variacions en els paràmetres de curvatura dels instruments sotmesos a test de fatiga cíclica produeixen un canvi significatiu en els resultats. Per aquesta raó és difícil comparar els resultats de diferents instruments testats en un mateix conducte artificial si aquest no ha estat construït amb les dimensions concretes de cada instrument. Si instruments de diferents dimensions segueixen diferents trajectòries al ser testades amb el mateix dispositiu per als tests de fatiga cíclica, els resultats obtinguts posteriorment no es podran comparar, degut a que aquests instruments hauran estat sotmesos a diferents condicions.

En el present estudi el dispositiu per als tests de fatiga cíclica s'ha dissenyat individualitzat per a cada llima mitjançant un procés novedós. Amb l'ajuda d'un programa de disseny assistit per ordinador es va fer un modelatge en 3D per a cada instrument, tenint en compte les característiques pròpies de grandària i conicitat. A partir d'aquests models en 3D es van dissenyar un total de 12 dispositius individualitzats per a cada llima i cada curvatura de l'estudi.

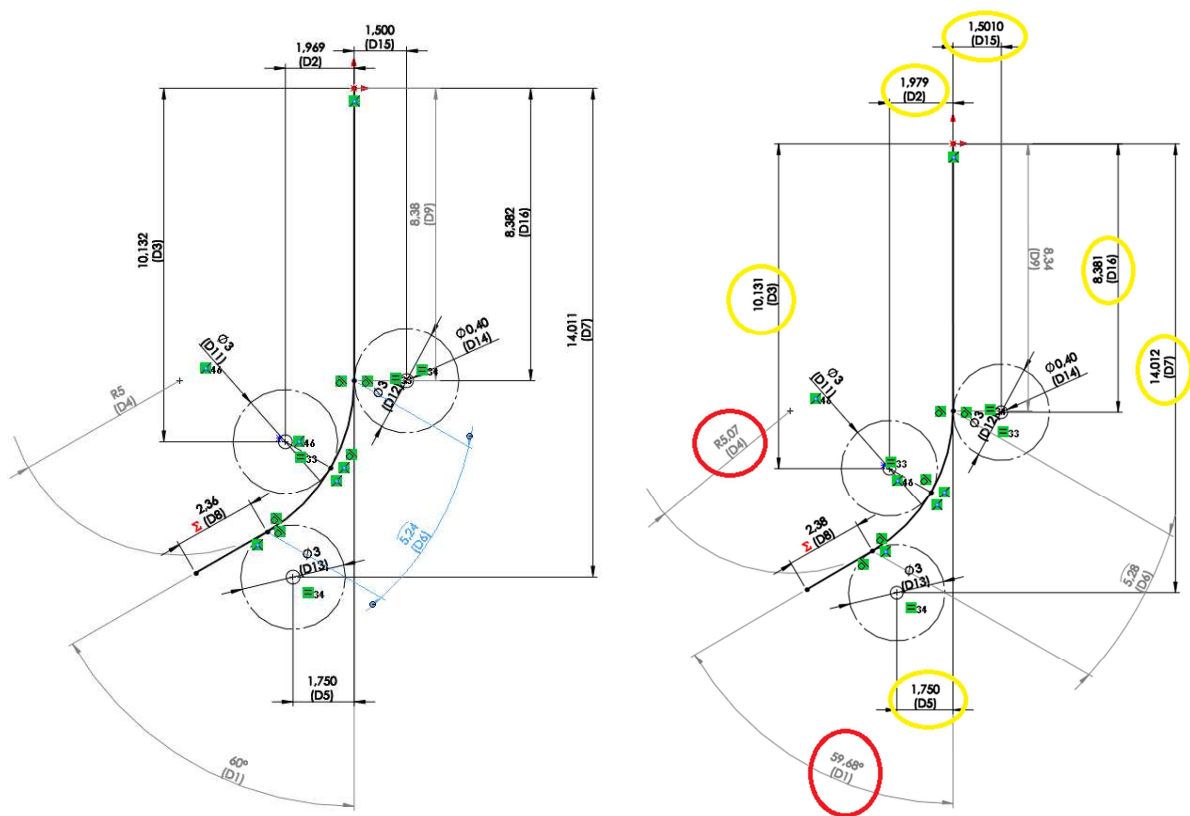
Quan una llima treballa dins d'un conducte corbat, degut al seu mòdul elàstic, el contacte es produeix en tres punts. El mateix ocorre en tots els dispositius metàl·lics que simulen conductes radiculars. En el nostre dispositiu, similar al de Cheung i cols. (2007a), amb tres pivots metàl·lics s'aconsegueix que la llima rote lliurement recolzada en aquests tres punts que la fan treballar en una curvatura específica. Amb aquests tipus de dispositius metàl·lics s'aconsegueix eliminar també altres variables que podrien influir en els tests com la torsió, el bloqueig o la capacitat de tall, avaluant-se únicament la fatiga cíclica.

De la mateixa manera que Cheung i cols., hem utilitzat tres pivots cilíndrics, llisos i d'acer inoxidable per mantenir la llima en la curvatura elegida, però en el nostre dispositiu els pivots tenen un diàmetre de 3 mm en compte de 2 mm. Una altra diferència és que nosaltres hem fabricat el dispositiu completament en acer inoxidable de la sèrie 300, d'aquesta manera no es produeix desgast del material en cap punt, que significaria un canvi de les condicions de treball dissenyades originalment. El dispositiu per al test de fatiga cíclica que van fabricar Cheung i cols. podia ajustar-se horitzontalment mitjançant

3 blocs separats on cadascú tenia un pivot, perquè no estava fabricat per a treballar a una curvatura determinada. Aquest ajustament es feia a partir d'una foto. En el present estudi, en canvi, els pivots són fixes i com hem comentat anteriorment han estat dissenyats individualment per a cada grup experimental.

Per a evitar que les toleràncies durant el procés de fabricació o ajustament influeixen en els resultats, els dispositius han sigut fabricats en un centre de mecanitzat industrial de 3 eixos, que permet unes toleràncies màximes de 5 µm. Així hem sigut el més rigorosos possible cenyint-nos al disseny en 3D realitzat prèviament.

A mode aclaridor anem a descriure la influència que té la tolerància en el procés de fabricació sobre els paràmetres de la curvatura resultant. Als següents gràfics s'han simplificat les limes per línies que descriuen una trajectòria equivalent.

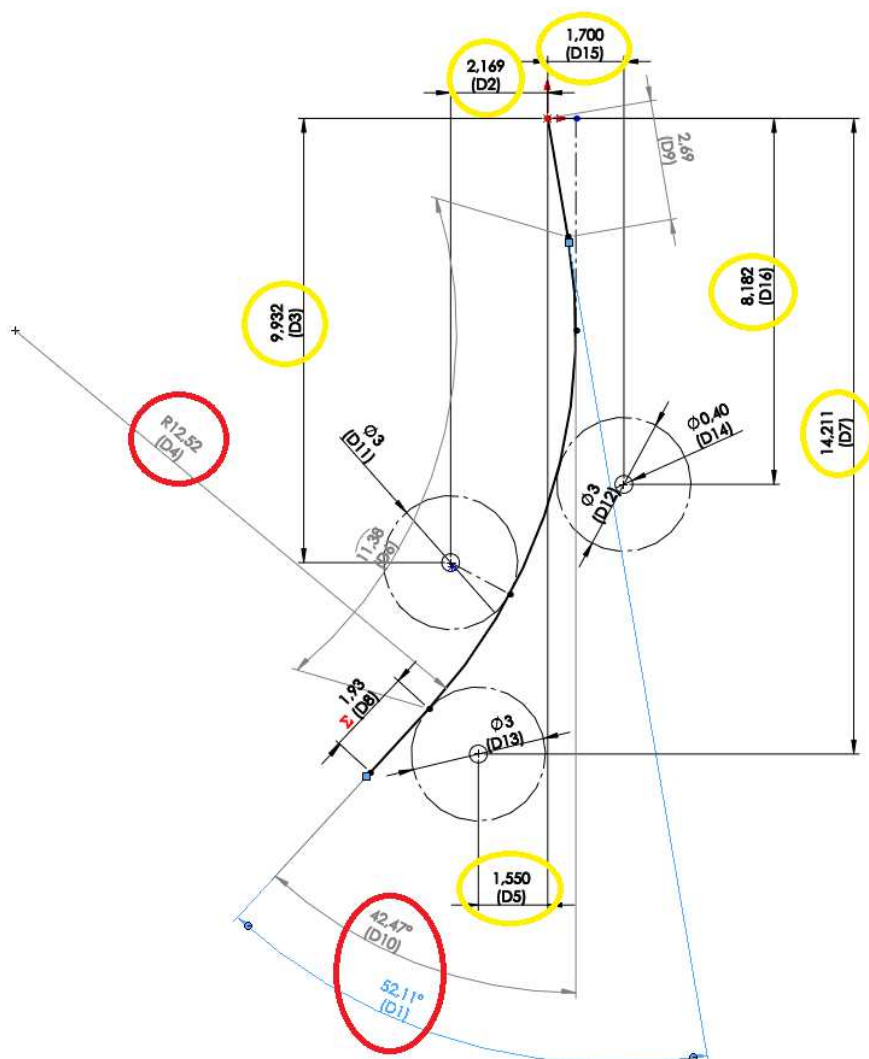


Il·lustració 59: Model ideal (esquerra) i cas pitjor de toleràncies del fabricant (dreta). (X. Jiménez)

La imatge de l'esquerra mostra el model ideal (sense cap tipus de desplaçament dels pivots per toleràncies). Es pot comprovar que el resultat és una curvatura de 60°, amb un radi de 5 mm.

A la imatge de la dreta s'ha simulat un desplaçament dels pivots equivalent al cas pitjor de tolerància de la màquina de control numèric utilitzada a la fabricació. Els càlculs indiquen que la curvatura passaria a ser de $59,6^\circ$ i el radi $5,07$ mm.

A continuació es presenta la simulació d'un hipotètic posicionament manual dels pivots (100 micres de tolerància en el millor dels casos):



Il·lustració 60: Model amb posicionament manual dels pivots (disseny de X. Jiménez)

Els resultats són una curvatura de $52,11^\circ$ i un radi de $12,52$ mm que, com es pot veure, dista molt dels criteris inicials del disseny.

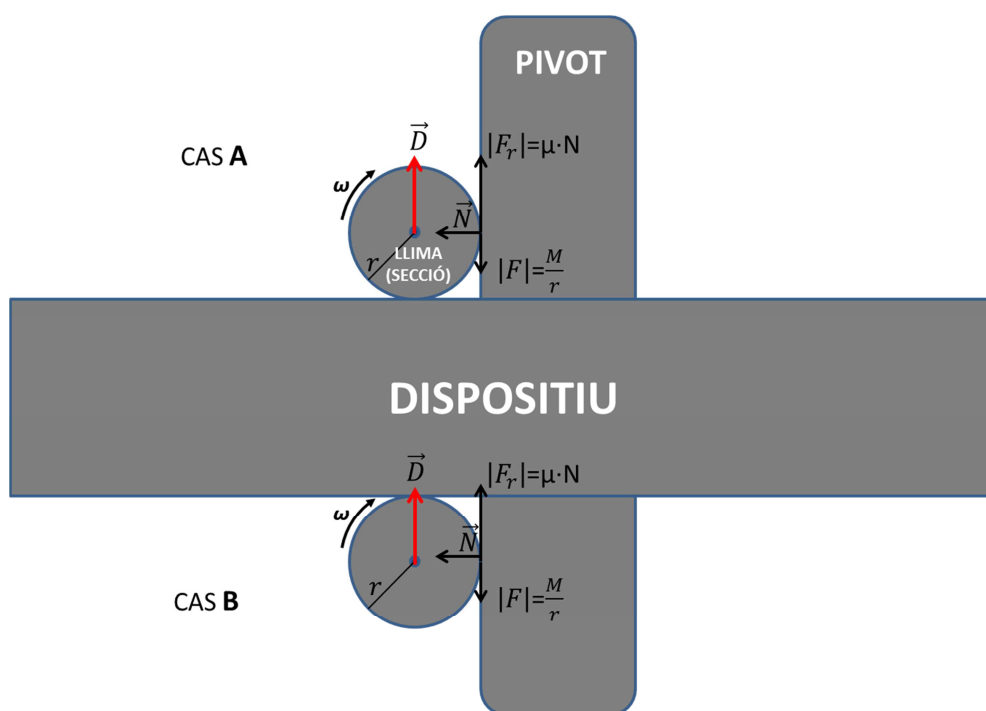
Un problema que pot sorgir en els dispositius de fatiga cíclica és que la punta de la llima pot tendir a desplaçar-se i fins i tot a sortir-se'n si no té cap retenció (com per exemple, un vidre en alguns dispositius de conductes). Cheung i cols. van detectar aquest efecte i el van solucionar a la seua fase d'experimentació preparant una xicoteta ranura en forma de "V" en l'últim pivot que mantenia la posició de la punta de l'instrument durant la rotació.

Al nostre estudi no ha sigut necessari implementar eixe sistema de retenció degut a que la simetria en la construcció del dispositiu permet contrarestar l'efecte de desplaçament de la punta de la llima, simplement fent-la treballar a una banda o altra del dispositiu, com passem a justificar a continuació.

L'efecte físic causant d'aquest desplaçament és una força de translació que afecta a l'eix de la llima, i que es produeix com a conseqüència de la força de fricció existent al punt de contacte entre la llima i el pivot. Depenent de si la llima gira en sentit horari o antihorari per a una mateixa cara del dispositiu l'efecte d'aquesta força pot ser juntar la punta a la superfície del dispositiu o bé separar-la i acabar provocant que se n'ixca.

El dispositiu que hem utilitzat permet fer treballar les llimes en unes condicions de curvatura donades a una cara, i amb les mateixes condicions però amb la curvatura simètrica a l'altra cara del dispositiu. Partint de la base de que la simetria no afecta a la fatiga cíclica, hem optat per aprofitar el moviment de translació nomenat anteriorment per a mantindre la punta de la llima en contacte amb la cara del dispositiu de manera natural. D'aquesta manera, quan el sentit predominant del moviment és horari treballarem a una cara (curvatura cap a l'esquerra), i quan és antihorari, a l'altra (curvatura cap a la dreta).

A la següent imatge es poden veure les forces implicades corresponents a un moviment de la llima en sentit horari:



Il·lustració 61: Representació de les forces d'interacció entre la llima i un dels pivots del dispositiu (D. Ramón)

- ω Velocitat angular (revolucions per minut del motor)
- r Radi de la secció de la llima al punt de contacte amb el pivot
- M Moment de forces o *torque*
- F Força de moviment
- μ Coeficient de fricció entre la llima (NiTi) i el pivot (acer)
- N Força normal que exerceix la llima sobre el pivot deguda a l'elasticitat
- F_r Força de fricció
- D Força de desplaçament

En el cas “A” la força de desplaçament resultant tendeix a separar la punta de la llima del dispositiu. En canvi, si treballem a la cara oposada del dispositiu (cas “B”), aquesta força de desplaçament fa l'efecte contrari, que és justament el que busquem. Hem plantejat el present estudi aprofitant aquest efecte, i fent treballar a cada llima a la cara corresponent del dispositiu depenent de si el sentit de moviment predominant és horari o antihorari.

A pesar de solucionar el problema del desplaçament de la punta, una de les limitacions que hem observat als dispositius realitzats amb pivots és que degut al disseny de l'instrument, la zona que contacta amb el pivot pot ser la vora tallant o l'estria, i com aquest contacte va alternant-se, la llima experimenta vibracions que es poden observar a la punta de l'instrument.

En aquest estudi, a l'igual que la majoria d'estudis que han avaluat la resistència a la fatiga de llimes de NiTi utilitzades amb moviments alternants, hem testat les llimes a una

longitud constant en un model estàtic. Els models dinàmics inclouen uns moviments axials cíclics que representen els moviments que es realitzen durant la instrumentació quan treballem amb les llimes accionades per motor (Li i cols., 2002). La resistència a la fatiga cíclica és significativament major en els models dinàmics, degut a que en els models estàtics la concentració de la tensió es dona en una àrea reduïda de l'instrument (De-Deus i cols., 2014; Lopes i cols., 2013b). Malgrat proporcionar una simulació clínica, tenen limitacions, perquè a pesar de poder-se estandarditzar la velocitat i l'amplitud del moviment axial, aquestes variables basades en l'operador són completament subjectives. La velocitat i l'amplitud a la que es realitza el moviment de picar o de raspallar és dubtós que siguin constants i per tant són difícils de controlar experimentalment. Al ser variables arbitràries poden produir resultats irrellevants (Wan i cols., 2011). A més, l'habilitat de constrènyer les llimes en una trajectòria precisa és més complicada en el tests dinàmics (Pedullà i cols., 2013a; Vadhana i cols., 2014).

En la literatura s'han usat distints paràmetres de curvatures per a testar la fatiga cíclica de les llimes de NiTi accionades per motor: angles de curvatura des de 25° fins 90°, radis de curvatura de 2 a 10 mm i varietat de posicions d'aquestes curvatures dins del conducte radicular. Concretament en la revisió bibliogràfica que hem realitzat dels instruments de NiTi utilitzats amb moviments alternants les curvatures que s'han testat han sigut les següents:

- 30°- 5 mm de radi:
Wan i cols. (2011)
- 30°- 7,5 mm de radi:
Wan i cols. (2011)
- 40°- 5 mm de radi:
Gavini i cols. (2012)
- 45°- 5 mm de radi:
Wan i cols. (2011); Castelló-Escrivá i cols. (2012); Dagna i cols. (2014);
Da Frota i cols. (2014); Elsaka i Elnaghy (2015).
- 45° - 6,06 mm de radi:
Kim i cols. (2012)

- 45°- 7,5 mm de radi:
Wan i cols. (2011)
- 45°- 8 mm de radi:
Castelló i cols. (2012); Dagna i cols. (2014)
- 60°- 3 mm de radi :
Gambarini i cols. (2012a); Arias i cols. (2012); Pérez-Higueras i cols. (2013); Karatas i cols. (2015); Arslan i cols. (2015)
- 60°- 5 mm de radi:
Plotino i cols. (2012); Gambarini i cols. (2012b); Castelló- Escrivá i cols. (2012); Pedullà i cols. (2013a); Pedullà i cols. (2013b); Saber i El Sadat (2013); Lee i cols. (2013); Kiefner i cols. (2014); Dagna i cols. (2014); Pirani i cols. (2014); Vadhana i cols. (2014); Pedullà i cols. (2014b); Higuera i cols. (2015); Elsaka i el Elnaghy (2015)
- 60°- 8 mm de radi:
Castelló i cols. (2012); Dagna i cols. (2014).
- 90°- 5 mm de radi:
Elsaka i Elnaghy (2015)

La majoria d'estudis han utilitzat la curvatura de 60° i 5 mm de radi de curvatura com la de Plotino i cols. (2009b), i en segon lloc la curvatura de 60° i 3 mm de radi, que utilitzen els autors que han escollit un dispositiu de conductes metàl·lics amb diàmetre constant similar al de Larsen i cols. (2009).

El problema, a banda de la gran varietat de paràmetres de curvatura, és que alguns autors no determinen amb exactitud la curvatura que han utilitzat com Lopes i cols, (2013) que indiquen únicament que és una curvatura de 6 mm de radi o Rubini i cols. (2013) que utilitzen un angle de 135° (que equival a 45°) però no donen més dades.

L'altra variable que fa que encara hi haja més variacions és el mètode de mesura dels paràmetres de la curvatura, on la majoria d'autors utilitzen el mètode de Pruett (Pruett i cols., 1997), però hi ha estudis on l'angle de curvatura el mesuren amb el mètode d'Schneider (Schneider, 1971) i el radi de curvatura com Pruett. I per últim la posició del centre de la curvatura, que en la majoria d'estudis està a 5 mm de la punta, però hi ha altres estudis que la col·loquen a 4, 6, 7,5 i 13 mm, i altres estudis que no indiquen on està la curvatura.

Nosaltres hem escollit una curvatura similar a la de Plotino i cols. (2009b), de 60° d'angle, 5 mm de radi de curvatura i el centre de la curvatura a 5 mm de la punta de l'instrument. I per als altres grups experimentals hem decidit mantenir el radi i el centre de la curvatura a 5 mm i canviar l'angle de la curvatura a 45° i 30°.

Tots els instruments de l'estudi han sigut testats amb el motor amb control de *torque* de WaveOne (Maillefer) amb el contraangle reductor 6:1 (Sirona Dental Systems). En els quatre primers grups de cada curvatura, cadascuna de les llimes s'ha testada amb els moviments recomanats pels fabricants. Els sistemes Reciproc i WaveOne estan fabricats per a utilitzar-se amb moviments alternants i l'aliatge d'aquestes llimes és M-Wire, mentre que els sistemes OneShape i F360 treballen en rotació continua i estan fabricats amb NiTi convencional.

Les llimes WaveOne i Reciproc s'han usat amb els modes preprogramats que són els que s'utilitzen en la pràctica clínica, en els quals l'operador no pot influir en la velocitat i *torque*. Segons els fabricants, el programa "Reciproc all" utilitza moviments alternants amb una diferència entre els seus angles de 120° i a unes 300 rpm; el programa "WaveOne all" és similar, però la velocitat de rotació és un poc més alta, 350 rpm (Kim i cols., 2012). Per a les llimes OneShape i F360 també s'han escollit les velocitats i *torque* recomanats pels fabricants.

Segons Pirani i cols. (2014), avaluant únicament les llimes amb els moviments recomanats, no és possible fer una distinció clara entre la influència dels nous aliatges (M-wire) i els moviments utilitzats. Per això hem realitzat una segona part de l'estudi amb 4 grups més per a cadascuna de les curvatures (60°, 45° i 30°), per tant un total de 12 grups més en els que hem testat els moviments contraris als recomanats. Així hem pogut avaluar la influència dels moviments alternants en la resistència a la fatiga de cada sistema, tant si l'aliatge és NiTi convencional com M-Wire.

Per a testar les llimes amb el moviment contrari al recomanat, per a les llimes One Shape i F360 #25 hem elegit el programa "Reciproc all", on les llimes treballen amb moviments alternants de 150° CCW, 30° CW i una velocitat de 300 rpm. Per a la llima Reciproc la rotació continua s'ha fixat en 300 rpm i 3 Ncm de *torque* i per a WaveOne en 350 rpm i 3

Ncm, que com hem comentat anteriorment, aquestes velocitats corresponen, segons els fabricants, al programa “Reciproc all” i “WaveOne all” respectivament.

Les llimes WaveOne i Reciproc pel seu disseny (direcció de les espires a esquerres i angle de tall negatiu) treballen en sentit antihorari, i el sentit horari desenganxa l'instrument de la dentina. És per això que alguns autors, com Elsaka i Elnaghy (2015) inverteixen els sentits horari i antihorari al testar les llimes amb els moviments contraris als que han estat fabricades, així amb les llimes WaveOne utilitzen un moviment de rotació continua, però en sentit antihorari. Altres autors com Gambarini i cols. (2012b), Lee i cols. (2013) i Pérez-Higueras i cols. (2013) fan el mateix per a les llimes que treballen normalment en rotació continua en sentit horari: quan les testen amb moviments alternants canvien el sentit dels angles, de manera que l'angle major és del sentit horari i l'angle menor és el del sentit antihorari (a la inversa que els moviments Reciproc All o WaveOne All).

Tanmateix al nostre estudi no hem canviat les direccions dels moviments rotatoris i alternants adaptant-les al disseny dels instruments, perquè segons Gambarini i cols. (2012a) als tests de fatiga cíclica, donat que la relació entre els angles és la mateixa, el fet que un instrument gire principalment en sentit horari o antihorari no és un factor significatiu en la resistència a la fatiga cíclica. Aquests autors en el seu estudi no trobaren diferències entre els moviments alternants 150° CCW/ 30° CW i el de 30° CCW/ 150° CW. I en un altre estudi on testaren llimes de NiTi en rotació continua horària i antihorària no trobaren diferències significatives en el test de fatiga cíclica (Gambarini i cols., 2013). Pel contrari, en la pràctica clínica, degut al fet del disseny de les espires, els instruments tenen una direcció específica de treball (a dretes o a esquerres), i per tant en aquest cas sí que el moviment horari o antihorari predominant podria afectar a l'eficàcia de tall, l'eliminació de detritus i la tendència a enroscar-se dins dels conductes radiculars (Gambarini i cols., 2012a).

Al present estudi no ha sigut necessari utilitzar cap tipus de lubricant perquè als dispositius amb pivots les llimes es mouen lliurement i no es queden travades, en canvi els estudis que utilitzen conductes metàl·lics sí que el fan servir.

La majoria dels estudis utilitzen un cronòmetre per a mesurar el temps fins a la fractura de les diferents llimes. Nosaltres hem optat per calcular el temps mitjançant la visualització dels vídeos enregistrats a cadascú dels tests, perquè d'aquesta manera es pot veure el moment exacte on es produeix la fractura de la llima.

El temps fins la fractura (TFs) i el nombre de cicles fins a la fractura (NCF) són els dos paràmetres que s'utilitzen per a avaluar la resistència a la fatiga cíclica dels instruments. Als estudis on es testen les llimes de NiTi amb moviments alternants la majoria d'autors han optat per donar els resultats amb el TF expressat en segons i no amb els NCF, basant-se en alguns dels següents motius:

- El TFs presenta una rellevància clínica major, perquè per a l'operador és més fàcil controlar el temps que el nombre de cicles que un instrument pot suportar (Wan i cols., 2011).
- En les llimes utilitzades amb moviments alternants calcular els NCF es basa en dades proporcionades pels fabricants dels motors, que segons Pedullà i cols. (2013b) són qüestionables i no han sigut verificades.

Lopes i cols. (2013) expliquen que per a calcular els NCF hauria de saber-se l'amplitud del moviment oscil·latori (és a dir l'angle d'avanç) en cada cicle, com també la freqüència de cada cicle en una constant de temps, que són dades que generalment no són proporcionades pels fabricants. Gavini i cols. (2012) exposen, que, segons els fabricants, el mode "Reciproc all" realitza 10 cicles de moviments alternants per segon, que equival a 300 rpm. Però Pedullà i cols. (2013b) critiquen que aquesta dada no pot ser correcta perquè 10 cicles per segon correspondria a 3,33 revolucions per segon, perquè una volta completa es produeix en tres cicles de moviments alternants (ja que l'angle de progressió correspon a 120°) i d'aquesta manera la velocitat del programa "Reciproc all" hauria de ser 200 rpm i no de 300 rpm que és el valor donat pels fabricants. En canvi per a "WaveOne all" no hi ha cap dada dels cicles de moviment alternant per segon que genera.

- La velocitat de rotació és molt possible que no siga constant durant el moviment alternant, perquè a diferència del que ocorre en la rotació continua, el motor elèctric pot tindre certes limitacions per a invertir la direcció de rotació (Kim i cols., 2012).

Altres estudis exposen els seus resultats amb els NCF, ja que encara que el temps fins a la fractura presente una informació clínicament més rellevant i la velocitat de rotació podria no ser constant, el NCF ofereix una informació més pertinent pel que respecta a l'habilitat d'un instrument per a suportar la fatiga cíclica, perquè té la particularitat que estandarditza algunes de les variables introduïdes pels diferents mètodes d'ús dels instruments, com són les velocitats utilitzades (Wan i cols., 2011). Aquest paràmetre és interessant quan es comparen limes amb velocitats de treball molt diferents, com als articles que testen la llima TF (500 rpm) amb altres limes que treballen a 300 o 350 rpm, com per exemple a l'estudi de Pedullà i cols. (2013b), Castelló-Escrivá i cols. (2012) o Higuera i cols. (2015).

Nosaltres hem optat per avaluar els resultats amb els dos paràmetres, TF (en segons) i NCF com han fet altres autors com Wan i cols. (2011), Kiefner i cols. (2014) i Da Frota i cols. (2015).

L'altre paràmetre que hem registrat ha sigut la longitud del fragment fracturat (LLF), a l'igual que alguns estudis previs com Elsaka i Elnaghy (2015), Da Frota i cols. (2015), Vadhana i cols. (2014), Pirani i cols. (2014), Lee i cols. (2013), Pedullà i cols. (2013a), Plotino i cols.(2012) i Kim i cols. (2012). Nosaltres per mesurar la LLF hem utilitzat un calibre digital, la precisió del qual és de 10 µm (0,01mm). Segons Plotino i cols. (2012) amb aquesta dada es pot avaluar la correcta posició dels instruments durant el test de fatiga cíclica i si s'ha induït un estrès similar.

Per a complementar la informació obtinguda als tests de fatiga cíclica, hem realitzat un estudi d'elements finits i la mesura de les seccions transversals de les limes amb el MER.

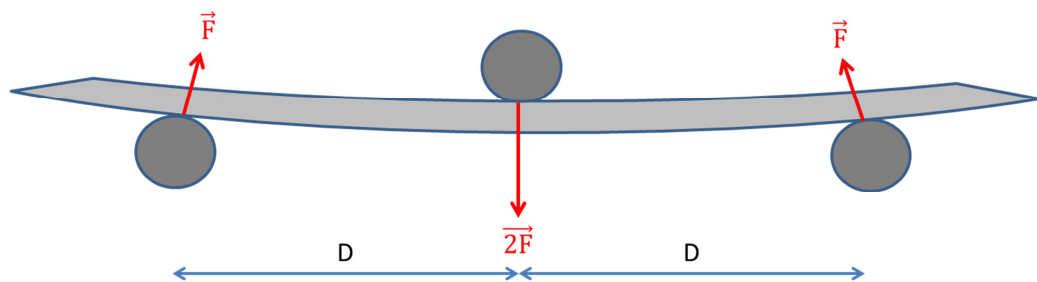
Altres autors han utilitzat l'anàlisi d'elements finits per a estudiar la relació entre el disseny de les limes i la seua mecànica (He i Ni, 2010; Lee i cols., 2011; Baek i cols., 2011; Versluis i cols., 2012).

Al nostre estudi cal recalcar que l'anàlisi realitzat és un anàlisi estàtic bàsic, amb certes simplificacions respecte als casos reals. No ens han interessat tant els resultats de manera absoluta, sinó més bé poder treure conclusions a partir de les comparacions entre els diferents casos plantejats. Ara bé, al nostre cas la fatiga cíclica s'ha calculat a partir de la

tensió obtinguda dels càlculs estàtics, de tal manera que el nombre de cicles de vida fins a trencar-se la llima és proporcional a la referida tensió.

A l'hora de definir les simulacions s'han tingut en compte els següents principis:

1. Segons la geometria, per tres punts només passa una curvatura simple. Açò significa que la solució serà única: el model no pot descriure cap altra trajectòria que la que incloga eixos tres punts de contacte.
2. Al forçar a un material elàstic a descriure una curvatura fixant tres punts de contacte de manera simètrica (amb la mateixa separació entre ells), la tensió que suporta el punt de contacte central és el doble que la que suporten els altres dos punts de contacte.



Il·lustració 62: Representació de les forces resultants a la flexió d'un material elàstic per tres punts (D . Ramón)

Per aquest motiu, a les simulacions s'ha decidit mantindre fixe un dels punts de contacte (un dels extrems) i aplicar sempre les forces en la proporció $2F$ (al punt central) i F (al punt restant).

S'ha emprat un model de llima simplificat, amb conicitat constant i sense tindre en compte la secció transversal, amb l'objectiu de simplificar els càlculs numèrics. Les forces s'han aplicat de manera perpendicular a l'eix de la llima en repòs, ja que degut a la forma de la llima, el simulador no permet aplicar-les de manera perpendicular a la superfície de contacte entre la llima i el pivot (que representaria el cas real).

Tenint en compte les simplificacions, els casos d'estudi A i B s'aproximarien a les condicions de treball dels dispositius de test per a la llima OS de 60° i 30° , respectivament. El cas C és merament il·lustratiu i no correspon amb cap dispositiu fabricat, però equivaldria a un conducte d'angle 30° i radi 10 mm.

Mitjançant unes micrografies realitzades al MER i el programa d'anàlisi d'imatges hem calculat els diàmetres i les àrees de les seccions transversals a 5 mm de la punta dels quatre sistemes. A l'igual que altres autors hem considerat que era una dada important a l'hora de comparar la influència del disseny en la fatiga cíclica de les llimes de l'estudi (Grande i cols., 2006; Oh i cols., 2010; Lee i cols., 2013). Hi ha autors com Kim i cols. (2012) que van calcular les àrees de les seccions transversals de WaveOne Primary i Reciproc R25; i Elsaka i Elnaghy que calcularen les de WaveOne Primary i OneShape. Però les mesures de WaveOne Primary no coincideixen entre aquests dos estudis i a més no teníem la informació de l'àrea de la secció transversal de F360 #25. Per tot açò hem decidit realitzar aquest estudi complementari.

3.3 DISCUSSIÓ SOBRE ELS RESULTATS.

La resistència a la fatiga cíclica d'una llima es defineix com el nombre de cicles o el temps que un instrument pot suportar abans de fracturar-se durant un test amb una curvatura concreta. El NCF i el TFs són acumulatius i estan relacionats amb la intensitat de la tensió produïda per les forces de tracció i compressió generades en el punt de màxima curvatura de la llima durant la instrumentació (Inan i cols., 2007).

Un millor temps fins la fractura o un major NCF està associat amb una llima que té una resistència major a la fatiga cíclica i per tant els resultats d'aquest estudi refusen la hipòtesi nul·la, ja que tots els sistemes de llima única no es comporten igual i apareixen diferències estadísticament significatives entre ells. Altrament, l'ús de diferents moviments sí que influeix en la resistència a la fatiga cíclica.

Els sistemes de llima única estan comercialitzats com instruments d'un sol ús, evitant el debilitament del metall degut a un ús clínic prolongat. Però, un únic ús vol dir que l'instrument pot ser usat en 3 o 4 conductes, que poden ser complexos i tortuosos. De tal manera que un únic ús redueix, però no elimina, el risc d'acumulació de fatiga del metall i la fractura (Plotino i cols., 2012). A més, la utilització d'una única llima per a completar tot el conducte està subjecta a una gran quantitat d'estrès (Kim i cols., 2012). Tanmateix

la incidència de fractura de les llimes WaveOne i Reciproc és baixa. Segons un estudi de Cunha i cols. (2014) la incidència de WaveOne és del 0,13% del conductes tractats, i per a Reciproc, Plotino i cols. (2015) trobaren que és del 0,21%.

El dispositiu que hem dissenyat i fabricat assegura una trajectòria precisa i repetible en termes de radi i d'angle de curvatura. I per tant els resultats que hem obtingut als diferents tests es poden avaluar de manera fiable. Però la gran varietat de dispositius per a la fatiga cíclica, de tipus de curvatures, de mètodes de mesura i tècniques, fan quasi impossible poder comparar els resultats dels tests de fatiga cíclica entre els diferents estudis.

Si analitzem els resultats obtinguts al present estudi en una curvatura de 60° i 5 mm de radi amb els moviments recomanats pel fabricant, els millors resultats els han obtingut les llimes Reciproc (TFs: 120", NCF: 599), WaveOne (TFs: 103", NCF: 599) i F360 (TFs: 101, NCF: 506) que tenen mitjanes similars ($p > 0,05$). La llima OS (TFs: 40"; NCF: 268) ha tingut la menor resistència a la fatiga cíclica dels quatre sistemes de llima única ($p < 0,001$).

Si valorem tant els moviments recomanats com els contraris, la llima F360 utilitzada amb moviments alternants (TFs: 165", NCF: 823) ha obtingut la major resistència a la fatiga cíclica en la curvatura de 60° ($p < 0,02$) i els pitjors resultats són per a la llima WaveOne utilitzada en rotació continua (TFs: 9", NCF: 50), que és el moviment no recomanat pel fabricant ($p < 0,001$).

Tot i que la majoria d'estudis previs per a testar els sistemes de llima única han utilitzat un conducte de 60° i 5 mm de radi, no podem comparar de forma fiable els resultats, perquè com hem vist, hi ha més paràmetres que poden influir, com són el centre de la curvatura, el tipus de mètode de mesura de la curvatura i per suposat, la individualització dels dispositius. Els únics estudis que han utilitzat un dispositiu similar al nostre, amb tots els paràmetres de la curvatura iguals i realitzats de forma individualitzada per a cada llima, són aquells que es basen en el dispositiu de Plotino i cols. (2009b) que són únicament dos: l'estudi de Plotino i cols. (2012) i l'estudi de Saber i El Sadat (2013).

Plotino i cols. (2012) van testar les llimes Reciproc R25 i WaveOne Primary com hem dit abans, utilitzant unes condicions similars al nostre estudi. Per a la llima R25 van obtenir

un temps fins a la fractura (TFs) de $130 \pm 18,4$ segons i nosaltres de $119,7 \pm 29,98$ segons, de manera que és un resultat semblant al que hem obtingut. Amb la llima WO Primary s'observen resultats encara més similars, $97,8 \pm 15,9$ segons i al nostre estudi $102,6 \pm 32$ segons. Tanmateix, l'estudi de Plotino i cols. (2012) sí que va obtenir diferències significatives entre estes dues llimes i amb els nostres resultats no hi ha diferències estadísticament significatives ($p > 0,05$).

L'estudi de Castelló-Escrivá i cols. (2012) també va testar la llima WO Primary en un conducte de 60° i 5 mm de radi amb un resultat de $614,43 \pm 175,39$ NCF. En canvi, al nostre estudi hem obtingut per a la llima WO utilitzada amb els moviments recomanats $598,6 \pm 187,7$ NCF. Però aquest estudi utilitza un conducte cònic no individualitzat, amb una conicitat constant de 0,9.

Pedullà i cols. (2013a) van obtenir per a la llima R25 un NCF de $617,70 \pm 55,6$ i per a la llima WO Primary un NCF de $490,70 \pm 75,75$. De manera que els resultats no coincideixen amb el present estudi, sobretot per a la llima WO. El mateix estudi també va testar aquestes dues llimes amb moviment de rotació continua a 300 rpm i va obtenir per a la llima WO un NCF de $293 \pm 67,69$ i per a la llima R25 un NCF de $459 \pm 61,27$. Però a l'igual que ocorre amb els moviments recomanats, els resultats són molt diferents als que hem obtingut, sobretot per a la llima WO. Aquest fet pot ser degut a que tot i que s'ha realitzat en un dispositiu individualitzat, els autors han mesurat l'angle de curvatura amb el mètode de Schneider (Schneider, 1971) i per tant els resultats difereixen perquè en realitat es tracta d'una curvatura diferent.

En un altre estudi de Pedullà i cols. (2013b) els resultats es presenten en temps fins la fractura (TFs), per a la llima R25 és de $119,7 \pm 17,72$ segons i per a WO Primary $74,8 \pm 14,59$ segons. Els resultats de la llima R25 són iguals que els del nostre estudi ($119,7 \pm 29,98$ segons). En canvi la llima WO té uns resultats inferiors, ja que per al nostre test és de $102,6 \pm 32$ segons. A l'igual que passa amb l'anterior estudi dels mateixos autors, utilitzen un conducte individualitzat però no mesuren l'angle de la curvatura amb el mètode de Pruett (Pruett i cols., 1997), sinó que ho fan amb el mètode d'Schneider i a més el centre de la curvatura està a 6 mm de la punta de l'instrument.

A l'estudi de Saber i El Sadat (2013) la llima WO Primary va ser testada amb diferents rangs de moviments alternants. Els resultats d'aquest estudi per al moviment alternant de 150° CCW i 30° CW són de $104,52 \pm 16,8$ segons, pràcticament els mateixos que hem

obtingut nosaltres ($102,6 \pm 32$ segons). Aquest estudi utilitza, a l'igual que nosaltres, un dispositiu individualitzat basant-se en el de Plotino i cols. (2009b). La única diferència és que van testar la llima WO amb un moviment com el de Reciproc all en compte del moviment WaveOne all, però com es tracta de moviments similars no afecta als resultats, com es va veure a l'estudi de Pedullà i cols. (2013a).

Kiefner i cols. (2014) van testar la llima R25 amb moviments alternants (NCF: 10.332) i amb rotació continua (NCF: 8.550), però aquests autors van realitzar un model dinàmic i per tant no podem comparar els resultats.

L'estudi de Dagna i cols. (2014) testa les llimes WO Primary, R25 i OneShape en diferents curvatures. En la curvatura de 60° i 5 mm de radi els millors resultats en NCF van ser per a la llima R25 ($782,24 \pm 94,78$), seguida de la llima OS ($601,65 \pm 138,97$) i per últim la llima WO ($580,86 \pm 114,99$). Si els comparem amb el present estudi, els resultats són similars per a la llima WO, però nosaltres obtenim una menor resistència a la fatiga cíclica per a la llima R25 i sobretot per a la llima OS ($268 \pm 45,08$). Com aquest estudi es basa en el de Castelló-Escrivá i cols. (2012), ocorre el mateix, ja que es tracta d'un conducte no individualitzat on el diàmetre a la punta és de 0,40 mm i el conducte té una conicitat constant del 9%.

Pirani i cols. (2014) van testar la llima WO Primary i els resultats utilitzant el moviment recomanat van ser de $160,8 \pm 47,3$ segons. Aquest resultat també és diferent al que nosaltres hem obtingut ($102,6 \pm 32$ segons). En aquest cas l'estudi es va fer amb tubs metàl·lics d'1,6 mm de diàmetre i per tant, a l'igual que a la majoria dels tests de fatiga cíclica, no s'ha realitzat una individualització del dispositiu.

En un altre treball de Pedullà i cols. (2014) la llima R25 va obtenir un TFs de $313,8 \pm 25,74$ segons i la llima WO Primary de $169 \pm 21,5$ segons. En aquest estudi els autors utilitzen un conducte de 2 mm de diàmetre constant dins d'un bloc metàl·lic. Per conseqüent, no testen totes les llimes amb les mateixes condicions i per això els resultats difereixen dels que hem obtingut.

Higuera i cols., en un estudi recent de 2015, estudien la resistència a la fatiga cíclica de les llimes R25 i WO Primary. Els resultats per a la llima R25 són de 1325 ± 115 NCF i per a WO Primary de 1225 ± 104 NCF. Aquests resultats difereixen molt dels nostres i dels de la resta d'autors, malgrat que aquests autors han utilitzat un dispositiu

individualitzat. Aquest dispositiu està basat en el de Grande i cols., (2006) i la diferència amb el de Plotino i cols., (2009b) és que el centre de la curvatura està a 6 mm de la punta i que al realitzar el conducte metàl·lic en compte d'augmentar 0,1 el diàmetre respecte a l'instrument testat, aquests autors l'augmenten 0,2 mm, però no pareix que hi haja tanta diferència per a obtenir més del doble de resistència a la fatiga cíclica que la que hem obtingut al present estudi.

En un altre estudi recent d'Elsaka i Elnaghi (2015), els resultats per al conducte de 60° i 5 mm de radi van ser per a la llima WO Primary de $674,37 \pm 110,34$ NCF i per a la llima OS de $195,37 \pm 35,38$ NCF. Aquests autors no utilitzen tampoc conductes individualitzats, utilitzen el mètode de Schneider (1971) per mesurar l'angle de curvatura i a més no especifiquen exactament quin dispositiu gasten per a testar la fatiga cíclica, ja que refereixen estudis previs de Gambarini (2001) i Lee (2011), i aquest dos estudis utilitzen dispositius diferents. De totes maneres, encara que els resultats no són iguals, coincideixen amb el nostre estudi en que hi ha diferències estadísticament significatives entre la llima WO i OS, obtenint millors resultats per a la llima WO. En canvi Dagna i cols. (2014) discrepen, ja que van observar uns resultats similars amb aquestes dues llimes.

Altres autors també han testat la llima WO, R25 i OS però en una curvatura de 60° i 3 mm de radi i amb conductes de diàmetre constant d'1,5 mm, basant-se en el dispositiu de Larsen i cols. (2009). Però aquests estudis no es poden comparar amb els nostres resultats perquè no és la mateixa curvatura, ja que el radi és menor i a més, tots els tests de fatiga cíclica s'han fet amb dispositius no individualitzats. Un d'aquests estudis és el de Karatas i cols. (2015) que compara WO amb OS utilitzant diferents moviments (rotació continua i canviant els angles del moviments alternants). En tots els grups la llima OS va tindre major resistència a la fatiga cíclica que la llima WO. Nosaltres hem observat que quan la llima OS és utilitzada amb moviment de rotació continua supera a la llima WO amb el mateix moviment de manera estadísticament significativa ($p < 0,001$). Però quan aquestes dues llimes són utilitzades amb moviments alternants, la llima WO no té diferències estadísticament significatives amb la llima OS per a TFs ($p > 0,05$), i quan comparem els resultats en NCF, la llima WO obté millors resultats que la llima OS ($p < 0,02$). Çapar i

cols. (2015) van observar que la llima OneShape obtenia uns resultats similars a la llima ProTaper Next, però no la van comparar amb altres sistemes de llima única.

Per al test de 45° i 5 mm de radi, quan comparem les llimes amb els moviments recomanants els resultats canvien, perquè la llima que té una major resistència a la fatiga cíclica de manera significativa és la llima F360 (TFs: 89", NCF: 446) ($p < 0,01$). La segueixen les llimes WaveOne (TFs: 52", NCF: 297) i Reciproc (TFs: 58", NCF: 288), i per últim la llima OneShape (TFs: 35", NCF: 234). Si comparem els resultats amb NCF no hi ha diferències significatives entre WO, R i OS ($p > 0,05$); però amb els TFs les llimes WO i R obtenen un resultat similar ($p > 0,05$) i la llima OS és la que menor resistència a la fatiga obté ($p < 0,02$). En ambdós casos les llimes WO i R obtenen uns resultats similars, com a la curvatura de 60°.

Quan comparem tots els grups de llimes que s'han testat a 45°, la llima F360 amb moviments alternants (TFs: 160", NCF: 798) ha obtingut els millors resultats ($p < 0,001$). Mentre que el sistema de llima única que menys resistència a la fatiga cíclica té, de manera estadísticament significativa ($p < 0,001$), és la llima WaveOne utilitzada amb moviment de rotació continua (TFs: 3", NCF: 19). Aquests resultats coincideixen amb els que hem obtingut a la curvatura de 60°.

Molts pocs autors han testat els sistemes de llima única en una curvatura de 45° i 5 mm de radi, i cap d'ells ha utilitzat dispositius individualitzats:

Castelló-Escrivá i cols. (2012) van obtenir per a la llima WO Primary un NCF de $1161,03 \pm 136,71$. Aquest resultat és molt diferent del resultat que hem obtingut ($296,7 \pm 101,37$). Però no es poden comparar de forma fiable, perquè com hem comentat abans, les curvatures testades, encara que tenen el mateix angle i radi, tenen altres paràmetres diferents com són: el centre de la curvatura, el diàmetre i la conicitat.

A l'estudi de Dagna i cols. (2014) els resultats en NCF per a la llima WO Primary són de $1028,34 \pm 102,9$, per a la llima R25 de $1265,49 \pm 151,61$ i per a OS de $992,65 \pm 109,91$. Aquests resultats també difereixen molt dels obtinguts al present estudi, donat que aquests autors es basen en l'estudi de Castelló-Escrivá i cols. (2012), i així trobem els mateixos problemes que hem anomenat abans.

Da Frota i cols. (2014) realitzen tests dinàmics i estàtics en un conducte no individualitzat mitjançant dos peces metàl·liques, una cònca i altra convexa. Estudien les llimes únicament en una curvatura de 45° i 5 mm de radi, amb el centre de la curvatura a 4 mm de la punta. I exposen els seus resultats en TFs i NCF, però obtenen el NCF d'una manera diferent a la resta d'autors, per tant no són comparables. Els resultats per a la llima Reciproc en TFs són de $2388 \pm 745,6$ segons i per a WaveOne de $1821 \pm 815,3$ segons. Aquests resultats són molt superiors als obtinguts al nostre estudi, però coincidim en que no s'observen diferències estadísticament significatives entre els dos sistemes ($p > 0,05$).

Elsaka i Elnaghi (2015) també estudien les llimes WO i OS en un conducte de 45° i 5 mm de radi. Els resultats en NCF són $1389,4 \pm 291,75$ per a la llima WO i $404,23 \pm 40,42$ per a OS. A l'igual que amb l'angle de 60°, s'observen diferències significatives entre les dos llimes. Al nostre estudi els resultats no coincideixen perquè obtenim uns resultats menors amb l'angle de 45°. Però sí que coincidim en que la llima WO ha obtingut millors resultats de manera estadísticament significativa comparant-la amb la llima OS ($p = 0,015$).

En la curvatura de 30° i 5 mm de radi i utilitzant els moviments recomanats, els millors resultats per a TFs són, a l'igual que al test de 45°, per a la llima F360 (TFs: 44", NCF: 218) ($p < 0,02$). Però si la comparació la fem amb els NCF la llima WaveOne (TFs: 29", NCF: 170) obté uns resultats similars a la llima F360 ($p > 0,05$). La llima Reciproc (TFs: 13", NCF: 67) ha obtingut menors resultats que F360 i WO ($p \leq 0,002$). I la llima amb pitjors resultats de manera estadísticament significativa, coincidint amb les curvatures de 60° i 45°, és la llima OneShape (TFs: 5", NCF: 33) ($p < 0,01$).

Quan analitzem tots els grups testats a 30°, independentment d'utilitzar el moviment recomanat o el contrari, els millors resultats els torna a obtenir la llima F360 utilitzada amb moviments alternants (TFs: 91", NCF: 455) de manera estadísticament significativa ($p < 0,001$), a l'igual que a 60° i 45°. En aquest test els pitjors resultats són també, com en les altres curvatures, per a la llima WaveOne utilitzada amb moviment de rotació continua (TFs: 3", NCF: 16) ($p \leq 0,009$).

No hem trobat cap estudi que haja testat els sistemes de llima única en un conducte de 30° i 5 mm de radi de curvatura. L'únic estudi que ha utilitzat aquest conducte per a testar llimes de NiTi amb moviments alternants és el de Wan i cols. (2011) que realitza un

estudi que compara la llima Safesiders amb altres llimes rotatòries de NiTi. Per tant, els resultats que hem obtingut no podem comparar-los amb els de cap autor. El mateix ocorre amb la llima F360, de la qual no hem trobat cap referència que estudei el comportament mecànic d'aquesta llima. A la literatura sols apareixen estudis de l'habilitat de conformació o de l'extrusió de detritus com els de Bürklein i cols. en 2013 i 2014, i el de Saleh i cols. en 2015.

La resistència a la fatiga cíclica de les llimes de NiTi, com hem vist en estudis previs, està influïda per molts factors com són el disseny de la llima, el tipus de moviment, l'aliatge metàl·lic i la curvatura del conducte radicular.

Hi ha autors com Bouska i cols. (2012) que exposen que un dels factors més importants que diferència la resistència a la fatiga cíclica dels instruments és el seu disseny, sobre tot el diàmetre i l'àrea de la secció transversal (Grande i cols., 2006; Oh i cols., 2010; Lee i cols., 2013). Però també hi ha autors com Cheung i cols. (2007a) que observen que el disseny no influeix.

Al nostre estudi el punt de màxima curvatura es troba a 5 mm de la punta de l'instrument, així és en aquest punt on es produeixen les majors tensions. Si comparem els diàmetres de les llimes a 5 mm, els resultats que hem obtingut amb les imatges a 130 augments del MER són: per a la llima WaveOne Primary de 0,58 mm, per a Reciproc R25 de 0,609 mm, per a OneShape de 0,53 mm i per F360 #25 de 0,455 mm. Aquestes mesures són molt semblants a les obtingudes al calcular el diàmetre mitjançant els valors de conicitat de les llimes aportats pels fabricants.

Segons varis autors les llimes amb un diàmetre o una àrea de la secció transversal més grans tendeixen a tenir una menor resistència a la fatiga cíclica (Berutti i cols., 2003; Grande i cols. 2006; Oh i cols., 2010). Per conseqüent, nosaltres hem calculat les àrees de les seccions transversals de les llimes de l'estudi a 5 mm de la punta i hem obtingut que per a la llima WO Primary és de $166379 \mu\text{m}^2$, per a la llima R25 de $177588 \mu\text{m}^2$, per a la llima OS de $135920 \mu\text{m}^2$ i per al F360 #25 de $89608 \mu\text{m}^2$. Aquest resultats són diferents als obtinguts per Kim i cols. (2012) que van calcular que l'àrea de la secció transversal de WO Primary era d'uns $323000 \mu\text{m}^2$ i la de R25 d'uns $275000 \mu\text{m}^2$; i tampoc coincideixen amb els d'Elsaka i Elnaghi (2015), que per a OS van obtenir uns $523125 \mu\text{m}^2$.

Les llimes WO Primary i R25 utilitzades amb moviments alternants han obtingut uns resultats molt semblants ens els conductes de 60° i 45° perquè no s'observen diferències significatives entre elles ($p > 0,05$). D'altra banda en el conducte de 30° la llima WO ha tingut major resistència a la fatiga cíclica que la llima R25 ($p < 0,001$). Aquestes llimes tenen moltes característiques similars, com són l'aliatge M-Wire, la utilització amb moviments alternants i una conicitat del 8% en els primers mil·límetres de la part activa, i ambdues llimes tenen un diàmetre semblant a 5 mm de la punta ($\pm 0,6$ mm). La diferència més important és la forma de la part activa. Però l'àrea de la secció transversal a 5 mm de la llima WO és de $166379 \mu\text{m}^2$ i la de la llima R25 de $177588 \mu\text{m}^2$. Per tant la llima R25 té un àrea major que la de WO, però les diferències no són molt grans. Per això al nostre estudi aquestes dues llimes obtenen resultats molt similars quan són utilitzades amb els moviments recomanats. És possible que la diferència en l'àrea de la secció transversal haja pogut afectar a la llima R25 quan és testada amb un major estrès, i per això al test de 30° i 5 mm de radi ha obtingut una menor resistència a la fatiga cíclica. No obstant això, utilitzada amb el moviment contrari al recomanat, la llima R25 té uns millors resultats que la llima WO, per a tots el conductes i de manera estadísticament significativa ($p < 0,001$).

La llima OS utilitzada amb moviment de rotació continua, quan és comparada amb la resta de llimes utilitzant els moviments recomanats, ha obtingut la menor resistència a la fatiga cíclica per a les curvatures de 60° i 30° ($p < 0,001$) i també en 45° per al TFs ($p < 0,02$). Aquest fet es pot deure a que està fabricada amb NiTi convencional i a que treballa amb moviment de rotació continua. Perquè el diàmetre i l'àrea de la secció transversal a 5 mm de la punta són menors que per a R25 i WO. En canvi, en les curvatures de 45° i 30°, quan aquesta llima s'utilitza amb moviments alternants ha obtingut uns resultats semblants a la llima R25 utilitzada amb moviments alternants ($p > 0,05$). Pel que respecta a la secció transversal asimètrica, en aquest estudi no s'ha pogut observar que millore la resistència a la fatiga cíclica.

La llima F360 ha mostrat molt bons resultats per a totes les curvatures i ha obtingut els millors resultats en la curvatura de 45° ($p < 0,01$) i en la de 30° en TFs ($p < 0,02$). Al nostre estudi, és en aquestes curvatures on s'ha produït un major estrès i aquesta llima ha obtingut els millors resultats. La llima F360 #25 té una conicitat del 4%, una secció de "S" modificada i un diàmetre d'uns 0,45 mm a 5 mm de la punta, que fa que siga una llima molt flexible. A més l'àrea de la secció transversal és la menor dels 4 sistemes de

llima única ($89.608 \mu\text{m}^2$), i aquest fet pot explicar el que tot i ser un instrument fabricat amb NiTi convencional i que treballa amb rotació continua ha obtingut uns molt bons resultats. Quan la llima F360 és utilitzada amb moviments alternants ha obtingut la major resistència a la fatiga cíclica de manera estadísticament significativa per a la curvatura de 60° ($p < 0,02$) i per a 45° i 30° ($p \leq 0,001$).

Així, un dels problemes de comparar els sistemes de llima única és que malgrat tenir el mateix diàmetre a la punta, les conicitats de WO i R25 són pràcticament iguals, un poc diferents per a OS (6% de conicitat) i més diferents per a F360 (4% de conicitat). Per tant, la fatiga cíclica està influïda per les dimensions de l'instrument (Plotino i cols., 2006) i les llimes amb major rigidesa flexional presentaran un menor nombre de cicles fins la fractura, perquè produeixen molta tensió en el punt de màxima flexió (Inan i cols., 2007).

Dels resultats d'aquest estudi podem extrapolar les diferents indicacions a l'hora d'escollir un sistema de llima única. Els instruments de major diàmetre tenen una major resistència a la torsió (Parashos i Messer, 2006; He i Ni, 2010; Baek i cols., 2011), i així, estarien indicats en conductes estrets. En canvi, els instruments amb menor diàmetre, que són més flexibles, serien idonis per a ser utilitzats en conductes corbats (Kim i cols., 2012). Les llimes WO i R25 tenen una major conicitat, i conseqüentment un major diàmetre i àrea de la secció transversal, per tant estarien indicades sobretot en conductes estrets. També per a curvatures, però quan es tracta de curvatures amb un radi menor, és a dir quan la curvatura és abrupta, la llima més indicada segons els nostres resultats és la llima F360. Aquesta llima té una conicitat del 4%, i per tant és la que menor conicitat presenta de tots els sistemes de llima única. Com hem vist al MER és la llima que menor àrea de la secció transversal té ($89.608 \mu\text{m}^2$). Per açò és l'instrument idoni per als conductes amb curvatures tancades. Però la llima OS, al present estudi, ha obtingut la menor resistència a la fatiga cíclica, a pesar de tenir una àrea de la secció transversal ($135.920 \mu\text{m}^2$) menor que WO i R25, per tant ha influït l'aliatge i el mode d'ús.

Hi ha estudis recents com el de Saleh i cols. (2015) que han estudiat la capacitat de conformació d'aquests sistemes de llima única i han mostrat que els quatre sistemes preparen els conductes en forma de "S" de forma eficient. La llima F360 va preparar els conductes significativament més estrets que la resta de les llimes. OS va preparar els conductes més estrets que WO i R25, però els sistemes alternants tendiren a adreçar els conductes. Segons aquests autors els sistemes de llima única amb una menor conicitat

estarien més recomanats per a utilitzar-se en conductes en forma de “S”, perquè mantenen la curvatura original millor que els sistemes amb major conicitat.

Hi ha autors com Saber i El Sadat (2013) que, amb els resultats dels seu estudi, proposen que una possible solució per a utilitzar les llimes amb moviments alternants en conductes amb anatomies abruptes, seria disminuir el rang del moviment alternant (90 CCW- 45 CW) i Shin i cols. (2014) plantegen que un moviment alternant amb un increment progressiu dels angles augmentaria la resistència a la fatiga cíclica de les llimes.

En relació a com afecta el moviment en la fatiga cíclica dels instruments testats, al nostre estudi hem observat que:

- En el test de 60° totes les llimes utilitzades amb moviments alternants milloren els seus resultats de manera estadísticament significativa ($p < 0,001$), tant si es tracta del moviment recomanat, com si són llimes fabricades per a utilitzar-se en rotació continua. En el cas de la llima WaveOne els resultats varien molt, de $102,6 \pm 32$ segons a $8,6 \pm 5,14$ en rotació continua.
- En el test de 45°, també totes les llimes tenen una major resistència a la fatiga cíclica utilitzades amb moviments alternants ($p < 0,003$). Els sistemes fabricats per a treballar en rotació continua doblen els seus resultats quan són utilitzats amb moviments alternants. La llima F360 passa d'obtenir un TFs de $89,1 \pm 27,74$ segons a un de $159,5 \pm 49,69$ segons, i la llima OneShape obté un TFs de $35,1 \pm 9,42$ segons amb moviment de rotació continua. En canvi, utilitzada amb moviments alternants té menys fatiga cíclica ($59,9 \pm 19,53$).
- En el test de 30°, la majoria de llimes milloren els seus resultats amb els moviments alternants ($p < 0,001$), excepte la llima Reciproc que ha obtingut els mateixos resultats utilitzada amb moviments alternants o de rotació continua ($p > 0,05$).

Per tant, les llimes utilitzades amb moviments alternants han mostrat una major resistència a la fatiga cíclica, independentment de l'aliatge, disseny de l'instrument i de si han estat o no fabricades per a utilitzar-se en rotació continua. Aquest fet coincideix amb la majoria dels estudis que han testat la influència dels moviments alternants en la resistència a la fatiga cíclica de les llimes de NiTi (Varela-Patiño i cols., 2010; De Deus i

cols., 2010; Gavini i cols., 2012; Gambarini i cols., 2012a; Gambarini i cols., 2012b; Pedullà i cols., 2013a; Rubini i cols., 2013; Lopes i cols., 2013; Pérez-Higueras i cols., 2013; Kiefner i cols., 2014; Vadhana i cols. (2014); Karatas i cols., 2015; Arslan i cols., 2015). Encara que també hi ha articles on no s'han observat diferències significatives com al de Lee i cols. (2012) i Pirani i cols. (2014).

Els instruments de NiTi, com hem comentat anteriorment, quan roten dins d'un conducte corbat experimenten tensions de tracció i compressió que produeixen la fractura de l'instrument. El que ocorre és que els instruments que treballen amb moviments alternants també estan subjectes a estes tensions, però en menor valor, perquè les distàncies angulars travessades en cada cicle són inferiors, permetent que pugen operar durant un major temps sense trencar-se (Wan i cols., 2010). A més, segon Kim i cols. (2012) aquest procés d'acceleració i deceleració en ambdues direccions de rotació genera menys tensió a l'instrument i d'aquesta manera proporciona una major resistència a la fatiga cíclica, com hem observat al nostre estudi.

La fractura d'un instrument per fatiga cíclica es caracteritza pel desenvolupament de microclevells al punt de màxima flexió de la llima (Kiefner i cols., 2014). Sembla que aquests es desenvolupen a partir d'irregularitats de la superfície i van aprofundint-se cap a l'interior fins que produeixen la fractura de la llima (Anderson i cols., 2007; Gambarini i cols., 2012b). D'aquesta manera altres autors descriuen que la resistència a la fatiga cíclica està associada al nombre de vegades que un clevell que s'ha format s'obri i es tanca. Durant el moviment alternant un instrument realitza una rotació completa (360°) després d'un o normalment més cicles alternants, de manera que es necessita més temps que en rotació continua per a completar una gir complet, i per això el nombre de vegades que un clevell s'obri i es tanca es menor per al moviment alternant comparat amb el de rotació continua al mateix temps. Aquesta podria ser una de les explicacions de per què els moviments alternants augmenten la resistència a la fatiga cíclica dels instruments (You i cols., 2010; Gambarini i cols., 2012b). A més, amb els moviments alternants les forces de tracció i compressió no estan concentrades en una àrea i és distribueixen en més punts (Wan i cols., 2011; Vadhana i cols., 2014). En resum, amb els moviments alternants hi ha una alliberació de la tensió acumulada degut a la inversió de la direcció de rotació (You i cols., 2010; De-Deus i cols., 2010b; Gavini i cols., 2012).

Els angles del moviment alternant són específics per a cada sistema i estan determinats segons les propietats torsionals de cada instrument (Pedullà i cols., 2013a). L'objectiu del moviment alternant és disminuir el risc de la fractura torsional donat que l'angle antihorari (*CCW*), que és el de la direcció de tall, està dissenyat per a ser menor que el límit elàstic de l'instrument (Gambarini i cols., 2012b).

Segons els fabricants, amb els programes de moviment alternants "Reciproc All" i "WaveOne All" es necessiten uns 3 cicles per a completar una rotació sencera, perquè l'angle d'avanç per ambdós és de 120°, en canvi la velocitat és de 300 rpm per a Reciproc i 350 rpm per a WaveOne. Hi ha autors com Castelló-Escrivá i cols. (2012) que exposen que es necessiten 6 cicles, però en aquest cas l'angle d'avanç seria d'uns 60° o Gavini i cols. (2012) que citen que la llima Reciproc realitza 10 cicles de moviments alternants per segon. De totes maneres és molt difícil de determinar la quantitat de cicles exactes i la velocitat que una llima amb moviments alternants necessita per a completar un gir complet. Segons un estudi recent de Fidler (2014) la cinemàtica de la instrumentació amb moviments alternants és més complexa que descriure únicament els angles i la velocitat de rotació, ja que aquest autor observa que els valors cinemàtics reals difereixen dels declarats pels fabricants.

En la pràctica clínica, malgrat utilitzar moviments alternants la llima no ha d'estar estàtica dins del conducte radicular, perquè el moviment axial de les llimes augmenta la resistència a la fatiga cíclica dels instruments com s'ha observat en varis estudis on han trobat millors resultats en els tests dinàmics comparant-los amb els estàtics (Lopes i cols., 2013; De Deus i cols., 2014; Neelakantan i cols., 2015). Si volguérem aplicar el moviments alternants, que han donat millors resultats en aquest estudi, per a les llimes que treballen en sentit horari hauríem d'adaptar els angles del moviment alternant, per a que l'angle predominant fora en direcció horària i el menor en direcció antihorària. D'aquesta manera les llimes tallarien dentina en el sentit en que han estat dissenyades (a dretes) i el moviment antihorari desenganxaria l'instrument de la dentina (Gambarini i cols., 2012a). Però s'hauria d'estudiar com afecta el canvi de moviment a l'eficiència de tall, a l'eliminació de detritus i a la tendència a enroscar-ser dins del conducte. Així totes les variables haurien de ser estudiades en un futur i comparades amb dissenys d'instruments per a entendre completament les avantatges i inconvenients dels moviments alternants en aquestes llimes dissenyades per a la rotació continua.

Els sistemes de llima única amb aliatge M-Wire i que s'utilitzen amb moviments alternants (WaveOne i Reciproc) han obtingut millors resultats en test de 60° comparats amb els sistemes fabricats amb NiTi convencional i que treballen en rotació continua (OneShape i F360) en el TFs ($p < 0,001$) i en els NCF ($p = 0,001$). Però al test de 45° i 30° els resultats són similars ($p > 0,05$). Açò és degut a que la llima F360 ha obtingut molt bons resultats utilitzada amb moviment de rotació continua i compensa els resultats de la llima OS.

Segons Gao i cols. (2010) l'aliatge M-Wire, fabricat a partir d'un procés termomecànic, es converteix en una estructura multifàsica (fase martensítica, fase-R premartensítica i austenita) que augmenta la resistència a la fatiga cíclica comparant amb la fase austenítica dominant de la microestructura del NiTi convencional. La martensita té una habilitat superior per a reordenar-se i fa que siga més deformable i dúctil. Per tant, una microestructura amb una certa proporció de martensita oferiria una major resistència a la propagació de cracks que una microestructura austenítica sencera.

Altres autors exposen que l'aliatge M-Wire augmenta la flexibilitat i la resistència a la fatiga cíclica comparat amb el NiTi convencional (Johnson i cols., 2008; Larsen i cols., 2009; Al-Hadlaq i cols., 2010; Gao i cols., 2010; Pereira i cols., 2012; Montalvão i cols., 2014). Però també hi ha estudis que reporten que no troben diferències entre aquests dos aliatges com el de Gambarini i cols. (2008), Kramkowski i Bahcall (2009) i Çapar i cols. (2015).

Segons Pirani i cols. (2014), al realitzar una anàlisi metal·logràfica s'observa que en la massa de les llimes amb M-Wire apareix una barreja de grans microcristal·lins martensítics incrustats en una matriu austenítica. Aquesta estructura cristal·logràfica en la qual els grans són de dimensions més menudes que en el NiTi convencional, pot proporcionar un augment de la resistència a la fatiga cíclica d'aquests instruments. La grandària del gra d'un aliatge pot influir en la resistència a la fatiga cíclica, perquè la propagació d'un clellill a través de l'estructura d'un aliatge és facilitada per la presència de grans gruixuts, mentre que la presència de grans més fins pot disminuir la velocitat de progressió d'un crack. Aquests autors van observar al seu estudi que el gra es reduïa significativament des del mànec fins la zona de la punta dels instruments, i d'aquesta manera es pot millorar la resistència a la fatiga cíclica de la zona on més estrès suporten les llimes. A més van veure que en la superfície de WO (M-Wire) aparegueren múltiples

zones d'iniciació de cracks, i aquesta característica millora la fatiga cíclica d'un instrument perquè l'aplicació de l'estrès està disseminada entre tots els cracks, de manera que es redueix la localització de la tensió i la velocitat de propagació de la fatiga.

La majoria d'estudis han observat que l'aliatge M-Wire combinat amb els moviments alternants millora de manera estadísticament significativa la resistència dels instruments de NiTi i redueix el risc de fractura (Kim i cols., 2012; Castelló-Escrivá i cols., 2012; Lopes i cols., 2013b; Kiefner i cols., 2014; Pirani i cols., 2014; Pedullà i cols., 2014; Da Frotta i cols., 2014). Però també hi ha autors com Pedullà i cols. (2013a) que observen uns millors resultats a la llima Mtwo 25 (rotació continua) que a la llima WO Primary, i Dagna i cols. (2014) que observen uns resultats similars per a la llima WO Primary i OS. Per tant, els resultats depenen d'amb quines llimes són comparades WO i R25, perquè molts estudis les han comparades amb ProTaper F2.

En una anàlisi d'elements químics de l'aliatge M-Wire i el NiTi convencional realitzat al nostre departament (Jiménez i cols., 2012), es va revelar una composició similar d'ambdós metalls (percentatge de titani per a: Recipro 42,91%, WaveoOne 42,8%, MTwo 43,91% i ProTaper 42,91%; percentatge de níquel per a: Recipro 56,92%, WaveoOne 56,28%, MTwo 56,02%, ProTaper 55,34%). Per tant les propietats mecàniques millorades en relació a l'aliatge M-Wire que es veuen en alguns estudis pareix que es deuen als processos especials termomecànics i no a una diferent composició, com també observen Pirani i cols. (2014).

La qüestió és que al comparar diferents sistemes de llimes hi ha més factors que poden influir en la resistència a la fatiga cíclica, com és el disseny de les llimes (conicitat, secció transversal...) i el mode d'ús, per tant la influència de l'aliatge per si soles no es pot avaluar en el present estudi.

Pel que fa a l'efecte de la curvatura del conducte radicular, hem avaluat la influència que han tingut en la resistència a la fatiga cíclica les curvatures de 60°, 45° i 30° amb radi constant de 5 mm. Primer vam comparar cada grup de llimes per separat i vam observar que en tots el grups hi havia diferències estadísticament significatives entre la curvatura de 60° i la de 30°, de tal manera que tots els instruments de l'estudi han obtingut millors

resultats en la curvatura de 60° i 5 mm de radi que en la de 30° i el mateix radi de curvatura.

Però hi ha grups on hi ha diferències estadísticament significatives entre les tres curvatures, on la major resistència a la fatiga es dona a la curvatura de 60°, seguida de la de 45° i per últim de la de 30°:

- La llima WO amb moviments alternants ($p=0,004$).
- La llima R25 amb els dos moviments ($p<0,001$).
- La llima OS amb moviments alternants entre 60° i 45° ($p=0,03$), i amb 30° ($p<0,001$).

Altres grups obtenen uns resultats similars per a la curvatura de 60° i 45° ($p>0,05$), i una menor resistència a la fatiga cíclica per a 30°:

- Les llimes OS i F360 en rotació continua ($p<0,001$).
- La llima F360 amb moviments alternants ($p\leq 0,002$).

I per últim, el grup de WO amb moviment de rotació continua on hi ha una major resistència a la fatiga en 60° ($p<0,001$), però no hi ha diferències estadísticament significatives entre les curvatures de 45° i 30° ($p>0,05$):

També vam comparar com influïa la curvatura del conducte radicular en els grups amb el mateix aliatge i moviment. En el grup de M-Wire i moviment alternant hem trobat diferències entre les tres curvatures ($p<0,001$) i a l'igual que a l'estudiar els grups per separat la curvatura on menys afectava la fatiga cíclica era la de 60°, després la de 45° i per últim la de 30°. En l'altre grup amb el mateix aliatge i moviment recomanat, format per les llimes OS i F360, no hem observat diferències entre la curvatura de 60° i 45° ($p>0,005$), però la curvatura on les llimes resisteixen menys i es trenquen abans és la de 30° ($p<0,001$),

Amb tots aquests resultats podem dir que al nostre estudi la curvatura més favorable, en la que es presenten els millors resultats de resistència a la fatiga cíclica, és la curvatura de 60° i 5 mm de radi, seguida de la curvatura de 45° i 5 mm de radi, i per últim la curvatura de 30° i 5 mm de radi, que és on s'han obtingut els menors TFs i NCF de l'estudi.

Com podem observar en l'anàlisi d'elements finits que hem realitzada, el model que equival a la curvatura de 60° i 5 mm de radi (cas A) ha obtingut una tensió de 455 MPa. En canvi el model de 30° i 5 mm de radi (cas B) ha obtingut una tensió de 481 MPa. En un angle de 30° es produeix una major tensió que en un angle de 60°, és a dir, la tensió decreix quan augmenta l'angle (per a un mateix radi). Aquesta afirmació és coherent amb els resultats que hem obtingut de l'experimentació, on hem observat que totes les llimes testades tenen una major resistència a la fatiga cíclica en la curvatura de 60°.

Al present estudi on tots els dispositius són de radi constant, la diferència de tensions ve donada per l'angle de curvatura: a menor angle, major tensió. Si comparem les trajectòries que segueixen les llimes i ens fixem en el segment corbat, a menor angle de curvatura menor és també la longitud d'aquest segment. Per exemple, al cas de 30° el segment mesura 2,61 mm, al de 45° 3,93 mm i al de 60° 5,23 mm. Fent una analogia podem afirmar que a menor longitud del segment corbat, major serà la tensió que patirà la llima (sempre per a un mateix radi).

Però aquests resultats estan en desacord amb altres estudis que han comparat la fatiga cíclica dels sistemes de llima única amb diferents curvatures:

Wan i cols. (2011) van observar que les llimes es fracturaven més prompte amb una curvatura de 45° que en una de 30° ($p < 0,008$). Però la diferència entre un radi de 7,5 i 5 mm va ser significativa per a la curvatura de 30°. En canvi en la curvatura de 45° no hi hagueren diferències estadísticament significatives. Segons aquests autors podia ser degut a que els valors de radi elegits eren semblants i era possible que l'efecte de xicotetes variacions del radi de curvatura fora menor a mesura que l'angle de curvatura augmentara.

A l'estudi de Castelló-Escrivá i cols. (2012), van testar quatre curvatures: 60° amb radis de 5 i 8 mm i 45° amb radis de 5 i 8 mm. El conducte amb millors resultats va ser el de 45° i 5 mm de radi, i els pitjor resultats, el de la curvatura de 60° i 8 mm de radi.

Aquest fet contradiu el que s'ha observat en molts estudis on a major radi de curvatura augmenta la resistència a la fatiga cíclica dels instruments (Pruet i cols., 1997; Mize i cols., 1998; Haïkel i cols., 1999; Grande i cols., 2006; Inan i cols., 2007; Inan i cols., 2011; Lopes i cols., 2013c). Però segons els autors aquest és el conducte de major dificultat, degut a que han mesurat els angles de curvatura d'acord al mètode d'Schneider

i fan coincidir el radi amb la distància des del centre de la curvatura fins a la punta de l'instrument. D'aquesta manera el punt de màxima curvatura es trobava més coronal i per tant l'instrument tenia una secció transversal major en el punt de màxima tensió.

Per a Dagna i cols. (2014) que utilitzen el mateix dispositiu que Castelló-Escrivá i cols. (2012), els pitjors resultats també els van obtenir a la curvatura de 60° i 8 mm, seguida de la curvatura de 60° i 5 mm, de la de 45° i 8 mm i per últim la més favorable va ser la de 45° i 5 mm de radi. És per això que, a l'igual que Castelló-Escrivá, han obtingut millors resultats al disminuir el radi de curvatura, que contradiu el fet que a menor radi major tensió de l'instrument.

En un recent estudi d'Elsaka i Elnaghi (2015), els millors resultats es van obtenir amb l'angle de 45° i 5 mm de radi, després amb el de 60° i 5 mm de radi i per últim amb el de 90° i 5 mm de radi. Així, a major angle i mantenint el radi de curvatura a 5 mm es reduïa la fatiga cíclica dels instruments testats.

Elsaka i Elnaghi (2015) no utilitzen l'angle de 30° al seu estudi perquè segons Pruett i cols. (1997) aquest angle no afecta significativament a la fatiga cíclica dels instruments. Però hi ha autors com Mize i cols. (1998) que sí que han utilitzat i van observar diferències estadísticament significatives entre un radi de 2 i 5 mm, de manera que a menor radi disminueix la resistència a fatiga cíclica, o Bui i cols. (2008) que testaren les curvatures de 30°, 45° i 60° amb un radi constant de 5 mm per a estudiar l'efecte de l'electropolit. No obstant, van observar resultats que estan en desacord amb els nostres, perquè trobaren una major resistència a la fatiga en l'angle de 30°.

En el present estudi al testar de forma precisa l'angle de 30° amb un radi de 5 mm és on majors tensions s'han produït, de manera que els nostres resultats no coincideixen amb tots aquests estudis previs. A l'igual que ens ha passat al comparar la fatiga cíclica entre llimes, els autors utilitzen dispositius no individualitzats, confeccionats amb menys precisió que el que hem realitzat. Aquest fet provoca que amb lleugeres variacions, com hem vist anteriorment quan explicàvem les toleràncies en la fabricació dels dispositius, el que més s'afecta és el radi de curvatura. Els dispositius utilitzats són més amples que la llima a testar i per tant la llima tendeix a posicionar-se en la seua forma recta original, treballant en unes condicions més favorables, que són un major radi de curvatura i un angle més reduït (Plotino i cols., 2010b).

En el tercer cas de simulació per elements finits plantejat al nostre estudi hem mantingut la curvatura de 30° però hem variat el radi de 5 a 10 mm. Hem observat que per a un mateix angle de curvatura de 30°, a un radi major (de 10 mm) la tensió que sofreix la llima és aproximadament la meitat (245 MPa) del resultat obtingut amb 5 mm (481 MPa). Açò explica com en una curvatura amb un mateix angle quan augmentem el radi les tensions són significativament menors.

I en els estudis de Castelló-Escrivá i cols. (2012) i Dagna i cols. (2014) a més de no utilitzar un dispositiu individualitzat (0,4 mm en al punta i conicitat constant del 9%), han mesurat la curvatura amb el mètode d'Schneider, i d'aquesta manera encara hi ha més variació a l'hora de comparar entre curvatures.

S'ha d'aclarir que tot cos té un límit de fatiga propi per a una determinada situació. Així, una determinada llima suporta diferents cicles de fatiga segons els paràmetres de la curvatura del conducte. Per aquest motiu, és molt difícil controlar els cicles de fatiga d'instruments endodòncics, perquè en una mateixa dent tenim conductes radiculars amb diferents graus de curvatura (Bassi, 2002). Però el que sí que podem extrapolar és que a les curvatures tancades o més abruptes és on més probabilitats tenim de fracturar una llima i segons el nostre estudi, una curvatura, independentment de l'angle que tinga, serà més perillosa quan més tancada és i per tant, quan més es redueix l'arc de la curvatura més tensió patirà l'instrument.

Hem calculat també les mitjanes de les longituds del fragments fracturats en tots el grups. Per a la curvatura de 60° estan entre 4,85 mm i 5,08 mm, per a la de 45° entre 4.84 mm i 5,30 mm i per a la de 30° entre 4.96 mm i 5.26 mm, de manera que al comparar dins de cada curvatura trobem que en la majoria de grups no existeixen diferències significatives ($p > 0,05$).

Els fragments de les llimes fracturades es troben al voltant dels 5 mm en tots els grups de l'estudi degut a que és en aquesta distància on està el centre de totes les curvatures testades, i correspon al punt on major tensió es produeix. Aquests resultats estan en consonància amb estudis previs com els d'Elsaka i Elnaghi (2015), Vadhana i cols. (2014), Pirani i cols. (2014), Pedullà i cols. (2013a), Plotino i cols. (2012) i Kim i cols. (2012).

De l'anàlisi d'elements finits podem extraure una conclusió relacionada amb el punt pel que partirà la llima: el punt de màxima tensió es troba situat al punt d'interacció central, que als dispositius correspon amb el pivot central. Han sigut dissenyats per a que aquest punt estiga a 5mm respecte a la punta, i coincideix amb la longitud del fragment fracturat de les llimes a l'experimentació.

En canvi hi ha estudis com el de Da Frota i cols. (2014) on el centre de la curvatura està a 4 mm de la punta i els fragment obtinguts als tests estàtics varien segons la llima testada, sent la mitjana de la llima Reciproc $7,27 \pm 0,32$ mm i de la llima WaveOne $7,07 \pm 1,13$, però en canvi la de la llima ProTaper de $2,32 \pm 0,58$ mm i la de la llima Mtwo de $3,09 \pm 0,14$ mm.

També l'estudi de Lee i cols. (2013) utilitzen un dispositiu on el centre de la curvatura està a 3 mm, però les mitjanes dels fragments fracturats varien des de $3,86 \pm 0,63$ fins $4,60 \pm 0,97$.

El fet que els fragments de llima queden tots a una mateixa distància és un fet positiu, perquè és una dada objectiva de que les llimes de l'estudi s'han posicionat correctament en el dispositius i que les tensions que s'han induït són similars (Plotino i cols., 2012).

4. CONCLUSIONS FINALS

4. CONCLUSIONS FINALS

La fractura d'una llima és una de les majors preocupacions durant la fase d'instrumentació del conducte radicular i la fatiga cíclica de les llimes és una de les principals causes, sobretot en conductes corbats.

Amb l'anàlisi dels resultats de tots els tests de fatiga cíclica realitzats als quatre sistemes de llima única per a tres tipus de curvatures amb diferents moviments, la valoració de l'estudi d'elements finits i el càlcul de les àrees de les seccions transversals de les micrografies obtingudes al MER, les conclusions del nostre estudi, responent al objectius prèviament plantejats i dins les limitacions de l'estudi, són:

- Les llimes WaveOne Primary i Reciproc R25 quan són utilitzades amb els moviments recomanats han obtingut uns resultats similars per als conductes de 60° i 45°, mostrant la millor resistència a la fatiga cíclica en la curvatura de 60°.
- La llima F360 #25 en rotació continua ha mostrat una bona resistència a la fatiga cíclica en totes les curvatures. Ha obtingut els millors resultats de l'estudi per a 45° i 30°, i no mostra diferències estadísticament significatives amb les llimes WaveOne Primary i Reciproc R25 per a la curvatura de 60°.
- La llima OneShape presenta la menor resistència a la fatiga cíclica per a totes les curvatures quan es utilitzada amb els moviments recomanats.
- La llima F360° #25 utilitzada amb moviments alternants ha obtingut la major resistència a la fatiga cíclica de tot l'estudi i la llima WaveOne Primary en rotació continua és la que menor resistència a la fatiga cíclica ha mostrat entre les llimes testades.
- Els moviments alternants milloren la resistència a la fatiga cíclica dels instruments de NiTi. Tots els sistemes, independentment del moviment recomanat, han obtingut millors resultats amb moviments alternants, excepte la llima R25 en la curvatura de 30° que no presenta diferències estadísticament significatives.
- Quan comparem els sistemes de llima única amb aliatge M-Wire i moviments alternants amb els de NiTi convencional i rotació continua, els primers obtenen millors resultats per a la curvatura de 60°, però no hi ha diferències a les curvatures de 45° i 30°.

- Per a un radi constant de 5 mm, les llimes sofreixen una menor tensió a la curvatura de 60°, seguida de la de 45° i per últim a la de 30° és on es produeix la major tensió. En tots el grups apareixen diferències estadísticament significatives entre la curvatura de 60° i la de 30°.
- A un radi constant, l'angle de curvatura està directament relacionat amb la longitud del segment corbat. La tensió, en canvi, és menor quan augmenta aquesta longitud. Una menor longitud del segment corbat es traduirà en majors tensions en la llima i per tant el risc de fractura augmentarà.
- Les llimes amb menor conicitat, i per conseqüent una menor secció transversal, com la llima F360 #25, presenten una major resistència a la fatiga cíclica sobretot en conductes amb curvatures tancades.
- Seria necessària una estandardització dels tests de fatiga cíclica per a comparar les propietats mecàniques de les llimes de NiTi entre els diferents estudis.

FUTURES LÍNIES D'INVESTIGACIÓ

L'estudi dels sistemes de llima única és ampli i complex, ja que existeixen moltes variables que poden influir en la mecànica d'aquests instruments. En futures línies d'investigació es podria avaluar la resistència a la fatiga cíclica amb altres tipus de moviments alternants i també amb altres curvatures.

A més la investigació en aquest camp de l'Endodòncia ha de ser continua, degut a la velocitat amb la que es produeixen els avanços i els canvis a la indústria.

5. BIBLIOGRAFIA

5. BIBLIOGRAFIA

AAE. Glossary of Endodontic Terms (revised 2011) [base de dades en Internet]. American Association of Endodontics. 8 ed. [citat 7 Desembre 2013]. Disponible en: <http://www.aae.org/publications-and-research/glossaries-and-guides/glossaries---guides.aspx>

AEDE. Glosario de terminología endodóncica. Madrid: Ergon; 2004. 58p

Alapati SB, Brantley WA, Iijima M, Clark WA, Kovarik L, Buie C, Liu J, Ben Johnson W. Metallurgical characterization of a new nickel-titanium wire for rotary endodontic instruments. *J Endod.* 2009;35(11):1589-93.

Alexandrou GB, Chrissafis K, Vasiliadis LP, Pavlidou E, Polychroniadis EK. SEM observations and differential scanning calorimetric studies of new and sterilized nickel-titanium rotary endodontic instruments. *J Endod.* 2006;32(7):675-9.

Al-Hadlaq SM, Aljarbou FA, AlThumairy RI. Evaluation of cyclic flexural fatigue of M-wire nickel-titanium rotary instruments. *J Endod.* 2010;36(2):305-7.

Al-Omari MA, Aurich T, Wirtti S. Shaping canals with ProFiles and K3 instruments: does operator experience matter? *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2010;110(3):e50-5.

Al-Sudani. D, Grande NM, Plotino G, Pompa G, Di Carlo S, Testarelli L, and Gambarini G. Cyclic Fatigue of Nickel-Titanium Rotary Instruments in a Double (S-shaped) Simulated Curvature. *J Endod* 2012; 38(7):987–989.

American Dental Association. Chicago, IL. ANSI/ADA Standard No. 28. Root canal files and reamers, type K for hand use: 2008 (Reaffirmed 2013). Chicago, IL: American Dental Association. Disponible en: <http://www.ada.org/en/science-research/dental-standards/dental-products/products-standards-technical-specifications-and-technical-reports#>

Anderson ME, Price JW, Parashos P. Fracture resistance of electropolished rotary nickel-titanium endodontic instruments. *J Endod.* 2007;33(10):1212-6.

Arangunen J. WaveOne Gold surfea el conducto radicular con confianza. *Revista SCO [Internet]*. 2015 [citad 10 de juliol de 2015];(3):4-9. Disponible en: http://www.dentsply.es/Revista/PDF/SolucionesClinicas03_2015.pdf

Arias A, Perez-Higueras JJ, de la Macorra JC. Differences in cyclic fatigue resistance at apical and coronal levels of Reciproc and WaveOne new files. *J Endod.* 2012;38(9):1244-8.

Arias A, Perez-Higueras JJ, de la Macorra JC. Influence of clinical usage of GT and GTX files on cyclic fatigue resistance. *Int Endod J.* 2014;47(3):257-63.

Arslan H, Alsancak M, Doğanay E, Karataş E, Davut Çapar İ, Ertas H. Cyclic fatigue analysis of Reciproc R25® instruments with different kinematics. *Prepublicació, Aust Endod J.* 2015 (Publicació electrònica disponible des del 7 de juliol).

Baek SH, Lee CJ, Versluis A, Kim BM, Lee W, Kim HC. Comparison of torsional stiffness of nickel-titanium rotary files with different geometric characteristics. *J Endod.* 2011;37(9):1283-6.

Bassi HAA. Sistema Easy Endo. En: Leonardo MR, Leonardo RT. *Sistemas Rotatorios en Endodoncia: instrumentos de níquel-titanio*. Sao Paulo: Editora Artes Médicas Ltda.; 2002. p. 291-318.

Berutti E, Chiandussi G, Gaviglio I, Ibba A. Comparative analysis of torsional and bending stresses in two mathematical models of nickel-titanium rotary instruments: ProTaper versus ProFile. *J Endod.* 2003;29(1):15-9.

Berutti E, Negro AR, Lendini M, Pasqualini D. Influence of manual preflaring and torque on the failure rate of ProTaper rotary instruments. *J Endod.* 2004; 30(4):228-30.

Bhagabati N, Yadav S, Talwar S. An in vitro cyclic fatigue analysis of different endodontic nickel-titanium rotary instruments. *J Endod.* 2012;38(4):515-8.

Bouska J, Justman B, Williamson A, DeLong C, Qian F. Resistance to cyclic fatigue failure of a new endodontic rotary file. *J Endod.* 2012; 38(5):667-9.

Braga LC, Faria Silva AC, Buono VT, de Azevedo Bahia MG. Impact of heat treatments on the fatigue resistance of different rotary nickel-titanium instruments. *J Endod.* 2014;40(9):1494-7.

Brantley WA, Svec TA, Lijima M, Powers JM, Grentzer TH. Differential scanning calorimetric studies of nickel titanium rotary endodontic instruments. *J Endod* 2002;28(8):567-72.

Bui TB, Mitchell JC, Baumgartner JC. Effect of electropolishing ProFile nickel-titanium rotary instruments on cyclic fatigue resistance, torsional resistance, and cutting efficiency. *J Endod.* 2008;34(2):190-3.

Bürklein S, Hinschitzka K, Dammaschke T, Schäfer E. Shaping ability and cleaning effectiveness of two single-file systems in severely curved root canals of extracted teeth: Reciproc and WaveOne versus Mtwo and ProTaper. *Int Endod J.* 2012; 45(5):449-61.

Bürklein S, Benten S, Schäfer E. Shaping ability of different single-file systems in severely curved root canals of extracted teeth. *Int Endod J.* 2013; 46(6):590-7.

Bürklein S, Benten S, Schäfer E. Quantitative evaluation of apically extruded debris with different single-file systems: Reciproc, F360 and OneShape versus Mtwo. *Int Endod J.* 2014;47(5):405-9.

Çapar ID, Ertas H, Arslan H. Comparison of cyclic fatigue resistance of novel nickel-titanium rotary instruments. *Aust Endod J.* 2015;41(1):24-8.

Çapar ID, Arslan H. A review of instrumentation kinematics of engine-driven nickel-titanium instruments. Prepublicació, *Int Endod J.* 2015 (Publicació electrònica disponible des del 29 de gener).

Castelló-Escrivá R, Alegre-Domingo T, Faus-Matoses V, Román-Richon S, Faus-Llácer VJ. In vitro comparison of cyclic fatigue resistance of ProTaper, WaveOne, and Twisted Files. *J Endod.* 2012;38(11):1521-4.

Cheung GS, Darvell BW. Fatigue testing of a NiTi rotary instrument. Part 1: Strain-life relationship. *Int Endod J.* 2007;40(8):612-8.

Cheung GS, Shen Y, Darvell BW. Does electropolishing improve the low-cycle fatigue behavior of a nickel-titanium rotary instrument in hypochlorite? *J Endod.* 2007;33(10):1217-21.

Cheung GS, Shen Y, Darvell BW. Effect of environment on low-cycle fatigue of a nickel-titanium instrument. *J Endod.* 2007;33(12):1433-7.

Cheung GS, Darvell BW. Low-cycle fatigue of rotary NiTi endodontic instruments in hypochlorite solution. *Dent Mater.* 2008;24(6):753-9.

Cheung GS, Zhang EW, Zheng YF. A numerical method for predicting the bending fatigue life of NiTi and stainless steel root canal instruments. *Int Endod J.* 2011;44(4):357-61.

Coltène Endo. With Hyflex®, We Changed the DNA of NiTi [Internet]. [Citat 11 de juliol de 2015]. Disponible en: http://www.coltene.com/download.php?file_id=5811

Cunha RS, Junaid A, Ensinas P, Nudera W, Bueno CE. Assessment of the separation incidence of reciprocating WaveOne files: a prospective clinical study. *J Endod.* 2014;40(7):922-4.

Da Frotta MF, Espir CG, Berbert FL, Marques AA, Sponchiado-Junior EC, Tanomaru-Filho M, Garcia LF, Bonetti-Filho I. Comparison of cyclic fatigue and torsional resistance in reciprocating single-file systems and continuous rotary instrumentation systems. *J Oral Sci.* 2014;56(4):269-75.

Dagna A, Poggio C, Beltrami R, Colombo M, Chiesa M, Bianchi S. Cyclic fatigue resistance of OneShape, Reciproc, and WaveOne: An in vitro comparative study. *J Conserv Dent.* 2014;17(3):250-4.

De-Deus G, Brandão MC, Barino B, Di Giorgi K, Fidel RA, Luna AS. Assessment of apically extruded debris produced by the single-file ProTaper F2 technique under reciprocating movement. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2010;110(3):390-4.

De-Deus G, Moreira EJ, Lopes HP, Elias CN. Extended cyclic fatigue life of F2 ProTaper instruments used in reciprocating movement. *Int Endod J.* 2010;43(12):1063-8.

De-Deus G, Leal Vieira VT, Nogueira da Silva EJ, Lopes H, Elias CN, Moreira EJ. Bending resistance and dynamic and static cyclic fatigue life of Reciproc and WaveOne large instruments. *J Endod.* 2014;40(4):575-9.

Dentsply- Maillefer. ProTaper Next™ Flexible performance. [Internet]. [Citat 11 de juliol de 2015]. Disponible en:
http://www.protapernext.com/downloads/A6607den_protaper_next_brochure_ES_LR-1.pdf

Dentsply -Maillefer. WaveOne™. La sencillez es la innovación real [Internet]. [Citat 4 de febrer de 2015]. Disponible en:

http://www2.dentsplymaillefer.com/#/218x624/218x7718/line_218x7727/product_218x8642/

Dentsply Tulsa Dental Specialties. ProFile® Vortex. Rotary files with M-Wire NiTi. [Internet]. [Citat 11 de juliol de 2015]. Disponible en:

http://www.tulsadentalspecialties.com/Libraries/Tab_Content_-_Endo_Access_Shaping/ProFileVortexSalesSheet.sflb.ashx

Dentsply. WaveOne® Gold. Surf the canal with confidence [Internet]. [Citat 11 de juliol de 2015]. Disponible en:

<http://www.dentsply.co.uk/uploads/files/dentsply-waveone-gold-brochure.pdf>

Dhingra A, Srivstava P, Chadda D, Banerjee S. Simplify your Endodontics with Single File Systems- Case Reports. IOSR-JDMS [Internet] 2013. [citat 7 de maig de 2015] 6(6):44- 51. Disponible en:

<http://www.iosrjournals.org/iosr-jdms/papers/Vol6-issue6/H0664451.pdf>

Diemer F, Michetti J, Mallet JP, Piquet R. Effect of asymmetry on the behavior of prototype rotary triple helix root canal instruments. J Endod. 2013;39(6):829-32.

Dietrich MA, Kirkpatrick TC, Yaccino JM. In vitro canal and isthmus debris removal of the self-adjusting file, K3, and WaveOne files in the mesial root of human mandibular molars. J Endod. 2012;38(8):1140-4.

Elnaghy AM, Elsaka SE. Torsion and bending properties of OneShape and WaveOne instruments. J Endod. 2015;41(4):544-7.

Elsaka SE, Elnaghy AM. Cyclic fatigue resistance of OneShape and WaveOne instruments using different angles of curvature. Dent Mater J. 2015;34(3):358-63.

Essential Dental Systems. SafeSiders. Endodontic instrumentation system [Internet].

[Citat 15 de juliol de 2015]. Disponible en:

<http://www.edsdental.com/inst/safesiders/sidersinst.pdf>

Faus-López J, Forner-Navarro L. Vocabulari d'Endodòncia. València. Castellà. Anglès. València: Promolibro; 2008. 135p.

Fidler A. Kinematics of 2 reciprocating endodontic motors: the difference between actual and set values. *J Endod.* 2014;40(7):990-4.

Gambarini G. Cyclic fatigue of nickel-titanium rotary instruments after clinical use with low- and high-torque endodontic motors. *J Endod.* 2001; 27(12):772-4.

Gambarini G, Grande NM, Plotino G, Somma F, Garala M, De Luca M, Testarelli L. Fatigue resistance of engine-driven rotary nickel-titanium instruments produced by new manufacturing methods. *J Endod.* 2008 Aug;34(8):1003-5.

Gambarini G, Gergi R, Naaman A, Osta N, Al Sudani D. Cyclic fatigue analysis of twisted file rotary NiTi instruments used in reciprocating motion. *Int Endod J.* 2012;45(9):802-6.

Gambarini G, Rubini AG, Al Sudani D, Gergi R, Culla A, De Angelis F, Di Carlo S, Pompa G, Osta N, Testarelli L. Influence of different angles of reciprocation on the cyclic fatigue of nickel-titanium endodontic instruments. *J Endod.* 2012;38(10):1408-11.

Gambarini G, Gergi R, Grande NM, Osta N, Plotino G, Testarelli L. Cyclic fatigue resistance of newly manufactured rotary nickel titanium instruments used in different rotational directions. *Aust Endod J.* 2013; 39(3):151-4.

Gao Y, Shotton V, Wilkinson K, Phillips G, Johnson WB. Effects of raw material and rotational speed on the cyclic fatigue of ProFile Vortex rotary instruments. *J Endod.* 2010;36(7):1205-9.

Gavini G, Caldeira CL, Akisue E, Candeiro GT, Kawakami DA. Resistance to flexural fatigue of Reciproc R25 files under continuous rotation and reciprocating movement. *J Endod.* 2012;38(5):684-7.

Grande NM, Plotino G, Pecci R, Bedini R, Malagnino VA, Somma F. Cyclic fatigue resistance and three-dimensional analysis of instruments from two nickel-titanium rotary systems. *Int Endod J.* 2006; 39(10):755-63.

Gutmann JL, Gao Y. Alteration in the inherent metallic and surface properties of nickel-titanium root canal instruments to enhance performance, durability and safety: a focused review. *Int Endod J.* 2012;45(2):113-28.

Haïkel Y, Serfaty R, Bateman G, Senger B, Allemann C. Dynamic and cyclic fatigue of engine-driven rotary nickel-titanium endodontic instruments. *J Endod.* 1999;25(6):434-40.

He R, Ni J. Design improvement and failure reduction of endodontic filesthrough finite element analysis: application to V-Taper file designs. *J Endod.* 2010;36(9):1552-7.

Hieawy A, Haapasalo M, Zhou H, Wang ZJ, Shen Y. Phase Transformation Behavior and Resistance to Bending and Cyclic Fatigue of ProTaper Gold and ProTaperUniversal Instruments. *J Endod.* 2015;41(7):1134-8.

Higuera O, Plotino G, Tocci L, Carrillo G, Gambarini G, Jaramillo DE. Cyclic fatigue resistance of 3 different nickel-titanium reciprocating instruments in artificial canals. *J Endod.* 2015;41(6):913-5.

Hilfer PB, Bergeron BE, Mayerchak MJ, Roberts HW, Jeansonne BG. Multiple autoclave cycle effects on cyclic fatigue of nickel-titanium rotary files produced by new manufacturing methods. *J Endod.* 2011;37(1):72-4.

Hülsmann M, Barthel C. Problems in gaining access to the root canal systems. En: Hülsmann M, Schäfer E, editors. Problems in Endodontics. Etiology, Diagnosis and Treatment. London: Quintessence Publishing Co, Ltd.; 2009. p. 145-172.

Hülsmann M, Schäfer E. Problems in root canal preparation. En: Hülsmann M, Schäfer E, editors. Problems in Endodontics. Etiology, Diagnosis and Treatment. Londres: Quintessence Publishing Co, Ltd.; 2009. p. 209-51.

Hülsmann M. Instruments fractures. En: Hülsmann M, Schäfer E, editors. Problems in Endodontics. Etiology, Diagnosis and Treatment. Londres: Quintessence Publishing Co, Ltd.; 2009. p. 401-19

Inan U, Aydin C, Tunca YM. Cyclic fatigue of ProTaper rotary nickel-titanium instruments in artificial canals with 2 different radii of curvature. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod. 2007;104(6):837-40.

Inan U, Aydin C. Comparison of cyclic fatigue resistance of three diferent rotary nickel-titanium instruments designed for retreatment. J Endod. 2012;38(1):108-11.

Jiménez B, Forner L, Llena MC, Almenar A, Mory N. Microanálisis de cuatro sistemas de limas rotatorias de níquel-titanio mediante microscopía electrónica de barrido y espectrometría de energía dispersa de rayos X. Comunicación en el XXXIII Congreso Nacional de Endodoncia. En: AEDE. Libro de resúmenes. 2012.

Johnson E, Lloyd A , Kuttler S, Namerow K. Comparison between a novel nickel-titanium alloy and 508 nitinol on the Cyclic Fatigue Life of ProFile 25/.04 Rotary Instruments. J Endod 2008; 34(11): 1406-9

Johnson WT i Kulild JC. Obturación del sistema de conductos radiculares limpios y conformados. En: Hargreaves KM, Cohen S, editores. Vías de la Pulpa. 10 ed. Barcelona: Elsevier España, S.L; 2011. p. 349-388.

Karataş E, Arslan H, Büker M, Seçkin F, Çapar ID. Effect of movement kinematics on the cyclic fatigue resistance of nickel-titanium instruments. Prepublicació, IntEndod J. 2015 (Publicació electrònica disponible des del 30 de març).

Kiefner P, Ban M, De-Deus G. Is the reciprocating movement per se able to improve the cyclic fatigue resistance of instruments? Int Endod J. 2014;47(5):430-6.

Kim HC, Kwak SW, Cheung GS, Ko DH, Chung SM, Lee W. Cyclic fatigue and torsional resistance of two new nickel-titanium instruments used in reciprocation motion: Reciproc versus WaveOne. J Endod. 2012;38(4):541-4.

Kim JY, Cheung GS, Park SH, Ko DC, Kim JW, Kim HC. Effect from cyclic fatigue of nickel-titanium rotary files on torsional resistance. J Endod. 2012;38(4):527-30.

Komet. F 360®. Fácil y seguro [Internet]. [Citat 20 de gener de 2015]. Disponible en: http://www.kometdental.de/fileadmin/_migrated/media/412601V0_BRO_ES_F360_Screen.pdf

Kramkowski TR, Bahcall J. An in vitro comparison of torsional stress and cyclic fatigue resistance of ProFile GT and ProFile GT Series X rotary nickel-titanium files. J Endod. 2009;35(3):404-7.

Larsen CM, Watanabe I, Glickman GN, and He J. Cyclic Fatigue Analysis of a New Generation of Nickel Titanium Rotary Instruments. J Endod 2009;35(3):401-3.

Lee MH, Versluis A, Kim BM, Lee CJ, Hur B, Kim HC. Correlation between experimental cyclic fatigue resistance and numerical stress analysis for nickel-titanium rotary files. J Endod. 2011; 37(8):1152-7.

Lee W, Hwang YJ, You SY, Kim HC. Effect of reciprocation usage of nickel-titanium rotary files on the cyclic fatigue resistance. Aust Endod J. 2013;39(3):146-50.

Li UM, Lee BS, Shih CT, Lan WH, Lin CP. Cyclic fatigue of endodontic nickel titanium rotary instruments: static and dynamic tests. *J Endod.* 2002;28(6):448-51.

Lopes HP, Ferreira AA, Elias CN, Moreira EJ, de Oliveira JC, Siqueira JF Jr. Influence of rotational speed on the cyclic fatigue of rotary nickel-titanium endodontic instruments. *J Endod.* 2009; 35(7):1013-6.

Lopes HP, Chiesa WM, Correia NR, de Souza Navegante NC, Elias CN, Moreira EJ, Chiesa BE. Influence of curvature location along an artificial canal on cyclic fatigue of a rotary nickel-titanium endodontic instrument. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2011 Jun;111(6):792-6.

Lopes HP, Gambarra-Soares T, Elias CN, Siqueira JF Jr, Inojosa IF, Lopes WS, Vieira VT. Comparison of the mechanical properties of rotary instruments made of conventional nickel-titanium wire, M-wire, or nickel-titanium alloy in R-phase. *J Endod.* 2013;39(4):516-20.

Lopes HP, Elias CN, Vieira MV, Siqueira JF Jr, Mangelli M, Lopes WS, Vieira VT, Alves FR, Oliveira JC, Soares TG. Fatigue Life of Reciproc and Mtwo Instruments Subjected to Static and Dynamic Tests. *J Endod.* 2013;39(5): 693-6.

Lopes HP, Vieira MV, Elias CN, Gonçalves LS, Siqueira JF Jr, Moreira EJ, Vieira VT, Souza LC. Influence of the geometry of curved artificial canals on the fracture of rotary nickel-titanium instruments subjected to cyclic fatigue tests. *J Endod.* 2013;39(5):704-7.

Madureira R. Evolução dos Instrumentos endododônticos. Manuais versus Mecanizados. Aço inox Flexível versus Níquel Titânio. Provas de Aptidão Pedagógica e Capacidade Científica. Instituto Superior de Ciências da Saúde Norte, CESPU, Portugal; 2001.

Malagnino VA, Grande NM, Plotino G, Somma F. The Mtwo NiTi rotary system for root canal preparation. *Roots* [Internet]. 2006 [citad 15 de març de 2015];(3): 67-70.

Disponible en:

<http://www.vdw-dental.com/fileadmin/redaktion/downloads/presse/en/Roots-2006-3-Malagnino.pdf>

Martín B, Zelada G, Varela P, Bahillo JG, Magán F, Ahn S, Rodríguez C. Factors influencing the fracture of nickel-titanium rotary instruments. *Int Endod J*. 2003;36(4):262-6.

Metzger Z, Teperovich E, Zary R, Cohen R, Hof R. The self-adjusting file(SAF). Part 1: respecting the root canal anatomy--a new concept of endodontic files and its implementation. *J Endod*. 2010;36(4):679-90.

Metzger Z, Basrani B, Goodis HE. Instrumentos, materiales y dispositivos. En: Hargreaves KM, Cohen S, editores. *Vías de la Pulpa*. 10 ed. Barcelona: Elsevier España, S.L.; 2011. p. 223-282.

Micro-Mega. One Shape®. One single file in continuous rotation [Internet]. [Citad 4 de juliol de 2015]. Disponible en: http://micro-mega.com/en/wp-content/uploads/2012/10/brochure_OneShapeNG_EN1_v1.pdf

Mize SB, Clement DJ, Pruett JP, Carnes DL Jr. Effect of sterilization on cyclic fatigue of rotary nickel-titanium endodontic instruments. *J Endod*. 1998; 24(12):843-7.

Montalvão D, Shengwen Q, Freitas M. A study on the influence of Ni-Ti M-Wire in the flexural fatigue life of endodontic rotary files by using Finite Element Analysis. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*. 2014;40:172-9.

Muñoz E, Forner L, Llana C. Influence of operator's experience on root canal shaping ability with a rotary nickel-titanium single-file reciprocating motion system. *J Endod*. 2014; 40(4):547-50.

Neelakantan P, Reddy P, Gutmann JL. Cyclic fatigue of two different single files with varying kinematics in a simulated double-curved canal. Prepublicació, J Investig ClinDent. 2015 (Publicació electrònica disponible des del 3 de maig).

Oh SR, Chang SW, Lee Y, Gu Y, Son WJ, Lee W, Baek SH, Bae KS, Choi GW, Lim SM, Kum KY. A comparison of nickel-titanium rotary instruments manufactured using different methods and cross-sectional areas: ability to resist cyclic fatigue. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod. 2010;109(4): 622-8.

Paqué F, Zehnder M, De-Deus G. Microtomography-based comparison of reciprocating single-file F2 ProTaper technique versus rotary full sequence. J Endod. 2011;37(10):1394-7.

Parashos P, Gordon I, Messer HH. Factors influencing defects of rotary nickel-titanium endodontic instruments after clinical use. J Endod. 2004;30(10):722-5.

Parashos P, Messer HH. Rotary NiTi instrument fracture and its consequences. J Endod. 2006;32(11):1031-43.

Park SK, Kim YJ, Shon WJ, You SY, Moon YM, Kim HC, Lee W. Clinical efficiency and reusability of the reciprocating nickel-titanium instruments according to the root canal anatomy. Scanning. 2014; 36(2):246-51.

Patel B. Endodontic Armamentarium. En: Patel B, editor. Endodontic Diagnosis, Pathology, and Treatment Planning. Mastering Clinical Practice. Cham: Springer International Publishing AG; 2015. p. 117-40.

Pedullà E, Grande NM, Plotino G, Gambarini G, Rapisarda E. Influence of continuous or reciprocating motion on cyclic fatigue resistance of 4 different nickel-titanium rotary instruments. J Endod. 2013;39(2):258-61.

Pedullà E, Grande NM, Plotino G, Palermo F, Gambarini G, Rapisarda E. Cyclic fatigue resistance of two reciprocating nickel-titanium instruments after immersion in sodium hypochlorite. *Int Endod J.* 2013;46(2):155-9.

Pedullà E, Plotino G, Grande NM, Scibilia M, Pappalardo A, Malagnino VA, Rapisarda E. Influence of rotational speed on the cyclic fatigue of Mtwo instruments. *Int Endod J.* 2014;47(6):514-9.

Pedullà E, Franciosi G, Ounsi HF, Tricarico M, Rapisarda E, Grandini S. Cyclic fatigue resistance of nickel-titanium instruments after immersion in irrigant solutions with or without surfactants. *J Endod.* 2014;40(8):1245-9.

Pereira ES, Peixoto IF, Viana AC, Oliveira II, Gonzalez BM, Buono VT, BahiaMG. Physical and mechanical properties of a thermomechanically treated NiTi wire used in the manufacture of rotary endodontic instruments. *Int Endod J.* 2012;45(5):469-74.

Pérez-Higueras JJ, Arias A, de la Macorra JC. Cyclic fatigue resistance of K3, K3XF, and twisted file nickel-titanium files under continuous rotation or reciprocating motion. *J Endod.* 2013;39(12):1585-8.

Peters OA. Current challenges and concepts in the preparation of root canal systems: a review. *J Endod.* 2004;30(8):559-67.

Peters OA, Roehlike JO, Baumann MA. Effect of immersion in sodium hypochlorite on torque and fatigue resistance of nickel-titanium instruments. *J Endod.* 2007;33(5):589-93.

Peters OA, Paque F. Current developments in rotary root canal instrument technology and clinical use: a review. *Quintessence Int.* 2010;41(6):479-88.

Peters OA, Peters CI. Limpieza y conformación del sistema de conductos radiculares. En: Hargreaves KM, Cohen S, editores. *Vías de la Pulpa*. 10 ed. Barcelona: Elsevier España, S.L.; 2011. p. 283-348.

Peters OA, Gluskin AK, Weiss RA, Han JT. An in vitro assessment of the physical properties of novel Hyflex nickel-titanium rotary instruments. *Int Endod J.* 2012;45(11):1027-34.

Pirani C, Ruggeri O, Cirulli PP, Pelliccioni GA, Gandolfi MG, Prati C. Metallurgical analysis and fatigue resistance of WaveOne and ProTaper Nickel-Titanium instruments. *Odontology* 2014;102(2): 211-6.

Plotino G, Grande NM, Sorci E, Malagnino VA, Somma F. A comparison of cyclic fatigue between used and new Mtwo Ni-Ti rotary instruments. *Int Endod J.* 2006;39(9):716-23.

Plotino G, Grande NM, Cordaro M, Testarelli L, Gambarini G. Measurement of the trajectory of different NiTi rotary instruments in an artificial canal specifically designed for cyclic fatigue tests. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2009;108(3): e152-6.

Plotino G, Grande NM, Cordaro M, Testarelli L, Gambarini G. A review of cyclic fatigue testing of nickel-titanium rotary instruments. *J Endod.* 2009;35(11):1469-76.

Plotino G, Grande NM, Cordaro M, Testarelli L, Gambarini G. Influence of the shape of artificial canals on the fatigue resistance of NiTi rotary instruments. *Int Endod J.* 2010;43(1):69-75.

Plotino G, Grande NM, Mazza C, Petrovic R, Testarelli L, Gambarini G. Influence of size and taper of artificial canals on the trajectory of NiTi rotary instruments in cyclic fatigue studies. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2010;109(1):e60-6.

Plotino G, Grande NM, Melo MC, Bahia MG, Testarelli L, Gambarini G. Cyclic fatigue of NiTi rotary instruments in a simulated apical abrupt curvature. *Int Endod J.* 2010; 43(3):226-30.

Plotino G, Costanzo A, Grande NM, Petrovic R, Testarelli L, Gambarini G. Experimental evaluation on the influence of autoclave sterilization on the cyclic fatigue of new nickel-titanium rotary instruments. *J Endod.* 2012;38(2):222-5.

Plotino G, Grande NM, Testarelli L, Gambarini G. Cyclic fatigue of Reciproc and WaveOne reciprocating instruments. *Int Endod J.* 2012;45(7):614-8.

Plotino G, Testarelli L, Al-Sudani D, Pongione G, Grande NM, Gambarini G. Fatigue resistance of rotary instruments manufactured using different nickel-titanium alloys: a comparative study. *Odontology.* 2014;102(1):31-5.

Plotino G, Grande NM, Porciani PF. Deformation and fracture incidence of Reciproc instruments: a clinical evaluation. *Int Endod J.* 2015 Feb;48(2):199-205.

Pruett JP, Clement DJ, Carnes DL. Cyclic fatigue testing of nickel-titanium endodontic systems. *J Endod.* 1997;23(2):77-85.

Rapisarda E, Bonaccorso A, Tripi TR, Fragalk I, Condorelli GG. The effect of surface treatments of nickel-titanium files on wear and cutting efficiency. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2000;89(3):363-8.

Riitano F. Anatomic Endodontic Technology (AET)--a crown-down root canal preparation technique: basic concepts, operative procedure and instruments. *Int Endod J.* 2005;38(8):575-87.

Roane JB, Sabala CL, Duncanson MG Jr. The "balanced force" concept for instrumentation of curved canals. *J Endod* 1985;11(5):203-11.

Rodrigues RC, Lopes HP, Elias CN, Amaral G, Vieira VT, De Martin AS. Influence of different manufacturing methods on the cyclic fatigue of rotary nickel-titanium endodontic instruments. *J Endod.* 2011;37(11):1553-7.

Rubini AG, Sannino G, Pongione G, Testarelli L, Al Sudani D, Jantarat J, De Luca M, Gambarini G. Influence of file motion on cyclic fatigue of new nickel titanium instruments. *Ann Stomatol (Roma)*. 2013;4(1):149-51.

Ruddle CJ. Canal Preparation: Single-File Shaping Technique. [Internet]. 13/1/2012 [Citat 4 de febrer de 2015]. Disponible en: <http://www.dentistrytoday.com/endodontics/6717-canal-preparation-single-file-shaping-technique>.

Saber SE, Nagy MM, Schäfer E. Comparative evaluation of the shaping ability of WaveOne, Reciproc and OneShape single-file systems in severely curved root canals of extracted teeth. *Int Endod J*. 2015 Jan;48(1):109-14.

Saber SE, El Sadat SM. Effect of Altering the Reciprocation Range on the Fatigue Life and the Shaping Ability of WaveOne Nickel-Titanium Instruments. *J Endod*. 2013;39(5): 685-8.

Saleh AM, Vakili Gilani P, Tavanafar S, Schäfer E. Shaping ability of 4 different single-file systems in simulated S-shaped canals. *J Endod*. 2015;41(4):548-52.

Sattapan B, Nervo GJ, Palamara JE, Messer HH. Defects in rotary nickel-titanium files after clinical use. *J Endod*. 2000;26(3):161-5.

Schäfer E. Effect of physical vapor deposition on cutting efficiency of nickel-titanium files. *J Endod*. 2002; 28(12):800-2.

Schneider SW. A comparison of canal preparations in straight and curved root canals. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1971;32(2):271-5.

Shen Y, Zhou HM, Zheng YF, Campbell L, Peng B, Haapasalo M. Metallurgical characterization of controlled memory wire nickel-titanium rotary instruments. *J Endod* 2011;37(11):1566-71.

Shen Y, Qian W, Abtin H, Gao Y, Haapasalo M. Effect of environment on fatigue failure of controlled memory wire nickel-titanium rotary instruments. *J Endod* 2012;38(3):376-80.

Shen Y, Zhou HM, Zheng YF, Peng B, Haapasalo M. Current challenges and concepts of the thermomechanical treatment of nickel-titanium instruments. *J Endod*.2013;39(2):163-72.

Shin CS, Huang YH, Chi CW, Lin CP. Fatigue life enhancement of NiTi rotary endodontic instruments by progressive reciprocating operation. *Int Endod J*. 2014 Sep;47(9):882-8.

SybronEndo. K3TMXF. Fuerza y flexibilidad se unen [Internet]. [Citat 11 de juliol de 2015]. Disponible en:
http://www.sybronendo.com.mx/wp-content/uploads/2013/10/Limas-K3XF_SybronEndo_KaVo_Kerr_Ormco_18122013.pdf

SybronEndo. Streght. Efficiency. Safety. K3 Files [Internet]. [Citat 10 de juliol de 2015]. Disponible en:
http://www.sybronendo.com.mx/wpcontent/uploads/2012/10/baja_k3_Ficha_Tecnica.pdf

SybronEndo. TF Adaptive. [Internet]. [Citat 11 de juliol de 2015]. Disponible en:
http://www.sybronendo.com.mx/wp-content/uploads/2013/10/TF_Adaptive_-SybronEndo_-KaVo_Ormco_Kerr_181220132.pdf

Sydney GB, Batista A. Instrumentación no Convencional de Conductos Radiculares: Sistemas de Rotación Alternada. En: Leonardo, MR. Endodoncia: Tratamiento de conductos radiculares. Principios técnicos y biológicos. 2º vol. Sao Paulo: Artes Médicas Latinoamérica; 2005. p. 689-704.

Testarelli L, Plotino G, Al-Sudani D, Vincenzi V, Giansiracusa A, Grande NM, Gambarini G. Bending properties of a new nickel-titanium alloy with a lower percent by weight of nickel. *J Endod.* 2011;37(9):1293-5.

Thompson SA. An overview of nickel-titanium alloys used in dentistry. *Int Endod J.* 2000;33(4):297-310.

Tripi TR, Bonaccorso A, Condorelli GG. Cyclic fatigue of different nickel-titanium endodontic rotary instruments. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2006;102(4):e106-14.

Tzanetakis GN, Kontakiotis EG, Maurikou DV, Marzelou MP. Prevalence and management of instrument fracture in the postgraduate endodontic program at the Dental School of Athens: a five-year retrospective clinical study. *J Endod.* 2008;34(6):675-8.

Universitat de València. Reglament sobre dipòsit, avaluació i defensa de la Tesi Doctoral. [citad 13 de juny de 2015]. Disponible en:
<http://www.uv.es/sgeneral/Reglamentacio/Doc/Estudis/C63.pdf>

Vadhana S, SaravanaKarthikeyan B, Nandini S, Velmurugan N. Cyclic fatigue resistance of RaCe and Mtwo rotary files in continuous rotation and reciprocating motion. *J Endod.* 2014;40(7):995-9.

Van der Vyver PJ. The WaveOne reciprocating endodontic system. *Int Dent-African ed.*[Internet]. 2013 [citad 7 d'abril de 2015]; 3(5):6-20. Disponible en:
http://www.moderndentistrymedia.com/sept_oct2013/van-der-vyver.pdf

Varela-Patiño P, Ibañez-Párraga A, Rivas-Mundiña B, Cantatore G, Otero XL, Martín-Biedma B. Alternating versus continuous rotation: a comparative study of the effect on instrument life. *J Endod.* 2010; 36(1):157-9.

VDW. Reciproc® one file endo [Internet]. [Citat 20 de gener de 2015]. Disponible en: http://www.es.vdw-dental.com/fileadmin/redaktion/z-es/downloads/RECIPROC_User_Brochure_es_view.pdf

Versluis A, Kim HC, Lee W, Kim BM, Lee CJ. Flexural stiffness and stresses in nickel-titanium rotary files for various pitch and cross-sectional geometries. *J Endod.* 2012;38(10):1399-403.

Viana AC, Gonzalez BM, Buono VT, Bahia MG. Influence of sterilization on mechanical properties and fatigue resistance of nickel-titanium rotary endodontic instruments. *Int Endod J.* 2006; 39(9):709-15.

Walia HM, Brantley WA, Gerstein H. An initial investigation of the bending and torsional properties of Nitinol root canal files. *J Endod.* 1988;14(7):346-51.

Wan J, Rasimick BJ, Musikant BL, Deutsch AS. Cutting efficiency of 3 different instrument designs used in reciprocation. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2010;109(5):e82-5.

Wan J, Rasimick BJ, Musikant BL, Deutsch AS. A comparison of cyclic fatigue resistance in reciprocating and rotary nickel-titanium instruments. *Aust Endod J.* 2011;37(3):122-7.

Webber J, Machtou P, Pertot W, Kuttler S, Ruddle C, West J. The WaveOne single-file reciprocating system. *Roots* [Internet]. 2011 [Citat 7 d'abril de 2015];(1): 28-33. Disponible en: <http://www.endoexperience.com/documents/WaveOne.pdf>

Wolle CF, Vasconcellos MA, Hinrichs R, Becker AN, Barletta FB. The effect of argon and nitrogen ion implantation on nickel-titanium rotary instruments. *J Endod.* 2009;35(11):1558-62.

Yao JH, Schwartz SA, Beeson TJ. Cyclic fatigue of three types of rotary nickel-titanium files in a dynamic model. *J Endod.* 2006; 32(1): 55-7.

Yared GM, Bou Dagher FE, Machtou P. Influence of rotational speed, torque and operator's proficiency on ProFile failures. *Int Endod J.* 2001; 34(1):47-53.

Yared GM, Bou Dagher FE, Machtou P. Failure of ProFile instruments used with high and low torque motors. *Int Endod J.* 2001; 34(6):471-5.

Yared GM. Canal preparation using only one Ni-Ti rotary instrument: preliminary observations. *International Endodontic Journal*, 2008;41(4):339–344.

Ye J, Gao Y. Metallurgical characterization of M-Wire nickel-titanium shape memory alloy used for endodontic rotary instruments during low-cycle fatigue. *J Endod.* 2012;38(1):105-7.

You SY, Bae KS, Baek SH, Kum KY, Shon WJ, Lee W. Lifespan of one nickel-titanium rotary file with reciprocating motion in curved root canals. *J Endod.* 2010;36(12):1991-4.

Zelada G, Varela P, Martín B, Bahillo JG, Magán F, Ahn S. The effect of rotational speed and the curvature of root canals on the breakage of rotary endodontic instruments. *J Endod.* 2002; 28(7):540-2.

Zinelis S, Darabara M, Takase T, Ogane K, Papadimitriou GD. The effect of thermal treatment on the resistance of nickel-titanium rotary files in cyclic fatigue. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2007;103(6):843-7.

Zinelis S, Eliades T, Eliades G. A metallurgical characterization of ten endodontic Ni-Ti instruments: assessing the clinical relevance of shape memory and superelastic properties of Ni-Ti endodontic instruments. *Int Endod J.* 2010;43(2):125-34.