



Università degli Studi di Genova
Scuola di Scienze Mediche e Farmaceutiche
Corso di Laurea in Odontoiatria e Protesi
Dentaria

Presidente del corso di laurea: Chiar.ma Prof.ssa Maria Menini

Tesi di Laurea

***“I laser in endodonzia: efficacia della
tecnica PIPS come metodo di attivazione
degli irriganti”***

Relatore: Chiar.mo Prof. Stefano Benedicenti

Correlatore: Prof. a C. Francesco Maria Manconi

Candidato: Matteo Piccinno

Anno accademico: 2021/2022

INDICE

INTRODUZIONE	3
1. ENDODONZIA	3
1.1 - CHE COS'E' L'ENDODONZIA	3
1.2 - CENNI ANATOMICI	3
1.3 - EZIOPATOGENESI DELLE PATOLOGIE PULPARI	4
1.4 - EZIOPATOGENESI DELLE LESIONI DI ORIGINE ENDODONTICA	5
1.5 - CLASSIFICAZIONE CLINICA DELLE MALATTIE PULPARI E DELLE LESIONI DI ORIGINE ENDODONTICA	5
1.6 - LA FLORA BATTERICA NELLE INFEZIONI ENDODONTICHE	6
1.7 - INDICAZIONI E CONTROINDICAZIONI ALLA TERAPIA ENDODONTICA	10
1.8 - FASI DEL TRATTAMENTO ENDODONTICO	10
1.9 - CAVITA' D'ACCESSO	10
1.10 - SAGOMATURA DEL SISTEMA DEI CANALI RADICOLARI	11
1.11 - DETERSIONE DEL SISTEMA DEI CANALI RADICOLARI	13
1.12 - ATTIVAZIONE DEGLI IRRIGANTI	18
1.13 - OTTURAZIONE TRIDIMENSIONALE DEL SISTEMA DEI CANALI RADICOLARI	23
1.14 - BIBLIOGRAFIA	23
2. FISICA DEI LASER.....	32
2.1 - CENNI STORICI	32
2.2 - PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO	34
2.3 - PRINCIPI FISICI DI FUNZIONAMENTO DELL'APPARECCHIO LASER	35
2.4 - PARAMETRI CHE CARATTERIZZANO E DESCRIVONO LE ONDE ELETTRROMAGNETICHE	38
2.5 - PROPRIETA' FONDAMENTALI DELLA LUCE LASER	39
2.6 - ELEMENTI COSTITUTIVI DEI SISTEMI LASER	40
2.7 - MODALITA' DI EMISSIONE DELLA LUCE LASER	43
2.8 - SISTEMI DI CONDUZIONE DELLA LUCE LASER	44
2.9 - REGOLE PRATICHE PER L'UTILIZZO	46
3. INTERAZIONE LASER-TESSUTO.....	47
3.1 - EFFETTI BIOLOGICI DEI LASER	49

3.2 - BIBLIOGRAFIA	51
4. LASER IN ODONTOIATRIA.....	51
4.1 - LASER A DIODO	52
4.2 - LASER AD ERBIO	62
4.3 – BIBLIOGRAFIA	65
5. NORME DI SICUREZZA	66
5.1 - NORME GENERALI	66
5.2 – PROCEDURA OPERATIVA	67
6. LASER IN ENDODONZIA	68
6.1 - BIBLIOGRAFIA	75
7. REVISIONE DELLA LETTERATURA	78
7.1 - METODOLOGIA DI RICERCA DELLA LETTERATURA	78
7.2 - RISULTATI	80
7.3 - DISCUSSIONE	87
7.4 - BIBLIOGRAFIA	89
MATERIALI E METODI	97
RISULTATI	101
DISCUSSIONE	105
CONCLUSIONI	107
RINGRAZIAMENTI	111

INTRODUZIONE

1. ENDODONZIA

1.1 - CHE COS'E' L'ENDODONZIA

Secondo la definizione data dall'American Association of Endodontists [1] l'Endodonzia non è semplicemente una “branca” dell'odontoiatria, bensì è la “specialità” odontoiatrica che si occupa della morfologia, fisiologia e patologia della polpa dentale umana e dei tessuti periradicolari; in essa è compresa la biologia della polpa normale, l'eziologia, la diagnosi, la prevenzione e il trattamento delle patologie pulpari e delle patologie periapicali ad esse connesse.

1.2 - CENNI ANATOMICI

Da quando Hess & Zurcher pubblicarono il loro studio (Hess & Zurcher 1925), si ha cognizione del fatto che i denti non presentano canali semplificati, ma piuttosto sistemi canalari complessi.

Lo spazio che ospita la polpa, interno al dente e delimitato dalla dentina, è denominato cavità pulpare. Il suo contorno corrisponde al contorno esterno del dente (Bjørndal *et al.* 1999), tuttavia, fattori quali l'invecchiamento fisiologico o processi patologici o il carico occlusale determinano apposizione di dentina secondaria o terziaria, o di cemento. In conseguenza di questi fenomeni la cavità pulpare generalmente diminuisce in dimensione e si modifica nella forma, col procedere dell'età. La cavità pulpare è divisa in due compartimenti: la camera pulpare che si trova all'interno della corona dentale, e i canali radicolari che si trovano internamente alle radici.

Altre particolarità anatomiche dello spazio endodontico da considerare sono i canali laterali, i canali accessori e gli istmi.

I canali laterali sono quelli che si dipartono dal canale principale approssimativamente ad angolo retto; i canali accessori, quelli che nella regione apicale decorrono obliquamente e concorrono a formare il delta apicale.

Gli istmi, invece, sono comunicazioni nastriformi strette tra due canali radicolari, che

contengono polpa o tessuto di derivazione pulpare e possono divenire serbatoio batterico. L'identificazione e il trattamento di tali strutture sono di vitale importanza per il successo del trattamento endodontico.

1.3 - EZIOPATOGENESI DELLE PATOLOGIE PULPARI

Le cause di pulpopatia sono riconducibili a cinque grandi gruppi riportati schematicamente qui sotto:

1) **Cause batteriche:**

- *ingresso coronale*
- *fratture*
- *anomalie di struttura*
- *ingresso radicolare*
- *infezione retrograda*

2) **Cause fisiche:**

- *meccaniche*
- *termiche*
- *elettriche*
- *traumatiche*

3) **Cause iatrogene:**

- *preparazione di cavità, monconi*
- *profondità della preparazione*
- *estensione dei cornetti pulpari*
- *disidratazione*
- *emorragia pulpare*
- *esposizione pulpare*
- *presa dell'impronta*
- *cementazione*
- *calore provocato da lucidatura*
- *movimenti ortodontici*
- *curettage parodontale*

4) **Cause chimiche:**

- *vernici cavitarie*
- *liners*
- *sottofondi*
- *mordenzanti*
- *adesivi smalto-dentinali*

5) **Cause da alterazioni idiopatiche:**

- *invecchiamento*
- *riassorbimento interno*
- *riassorbimento esterno*
- *ipofosfatasi*
- *anemia falciforme*
- *herpes zoster*

1.4 - EZIOPATOGENESI DELLE LESIONI DI ORIGINE ENDODONTICA

La polpa è un organo estremamente delicato che può facilmente andare incontro a infiammazione, necrosi e gangrena per tre motivi anatomici e topografici:

- è rappresentata da un grosso volume di tessuto con apporto sanguigno relativamente scarso;
- gode di una circolazione di tipo “terminale”;
- è accolta all'interno di “pareti inestensibili” di dentina e quindi non può trarre alcun vantaggio dal processo infiammatorio che comporta un aumento di volume del tessuto (vasodilatazione, fuoriuscita degli elementi del sangue dai vasi etc.) per portare alla “restitutio ad integrum”.

Una volta che la polpa è andata in necrosi, i batteri, le tossine batteriche, gli enzimi diffusori (elastasi, collagenasi), gli enzimi proteolitici (fosfatasi acida, beta-glicuronidasi) raggiungono la zona periradicolare passando attraverso tutte le vie di comunicazione tra endodonto e parodonto e avremo così le lesioni periapicali.

1.5 - CLASSIFICAZIONE CLINICA DELLE MALATTIE PULPARI E DELLE LESIONI DI ORIGINE ENDODONTICA

Le malattie pulpari possono essere classificate clinicamente in:

- *Polpa clinicamente normale*
- *Iperemia pulpare o ipersensibilità dentinale*

- *Pulpite*
- *Necrosi e gangrena*

Invece le lesioni periapicali di origine endodontica, dal punto di vista clinico, possono essere classificate in:

- *Periodontite apicale acuta*
- *Ascesso alveolare acuto*
- *Periodontite apicale cronica*
- *Periodontite apicale cronica riacutizzata*

1.6 - LA FLORA BATTERICA NELLE INFEZIONI ENDODONTICHE

Tra le patologie dentali, l'infezione del canale radicolare ha caratteristiche di unicità poiché avviene in una sede dove i microrganismi normalmente non risiedono. Le altre patologie infettive del cavo orale come la carie e le malattie parodontali, insorgono in siti nei quali già risiede un biofilm microbico, e una modifica nelle condizioni ambientali, nel tipo di flora microbica, o nell'efficienza della risposta immune dell'ospite favoriscono l'avvento della patologia [2]. Finché smalto e cemento sono intatti, polpa e canale radicolare rimangono protetti dall'invasione, ma la perdita di integrità di tali strutture a causa di carie, fratture o traumi apre una via per la penetrazione batterica attraverso i tubuli dentinali.

Tutti i batteri del cavo orale hanno le medesime opportunità per invadere il canale radicolare; tuttavia, solo un ristretto gruppo di specie è stato identificato nei canali infetti [3-5], anche se l'utilizzo di recenti tecniche molecolari per l'identificazione di microrganismi ha suggerito che la complessità della flora endodontica possa essere maggiore di quanto ritenuto in passato [6]. L'ambiente anaerobico, le interazioni tra microrganismi, e la disponibilità di nutrienti sono i principali fattori che definiscono la composizione della flora microbica.

L'ambiente endodontico è un habitat selettivo che favorisce lo sviluppo di microflora anaerobica in proporzioni specifiche. Il consumo di ossigeno e la produzione di anidride carbonica e idrogeno, insieme alla progressiva diminuzione del potenziale ossidoriduttivo, a causa dei microrganismi che per primi hanno invaso il canale, favoriscono la crescita selettiva di batteri anaerobi.

Il tipo e la disponibilità di nutrienti è importante per determinare la crescita batterica. I nutrienti possono derivare dal cavo orale, da tessuto connettivo in fase degenerativa, dal contenuto dei tubuli dentinali, o da fluido proveniente dai tessuti periapicali.

Il fatto che all'interno del canale gli anaerobi obbligati si sostituiscano nel tempo agli anaerobi facoltativi molto probabilmente dipende da modificazioni delle sostanze nutrienti disponibili, e anche dalla ridotta disponibilità di ossigeno.

Inoltre, tra i batteri orali, vi è un ampio spettro di interazioni nutrizionali che possono anche influenzare le associazioni tra batteri all'interno del canale radicolare [7-9].

Nella fase iniziale di una infezione del canale radicolare il numero di specie batteriche è normalmente limitato. Se l'invasione avviene a causa della carie i batteri sul fronte iniziale del processo carioso sono i primi a raggiungere la polpa. Nei casi dove non c'è comunicazione apparente con il cavo orale e i batteri penetrano attraverso i tubuli dentinali, come nei traumi dentali senza esposizione della polpa, l'invasione batterica primaria non segue uno schema ricorrente [5].

Sembra, inoltre, che vi sia una correlazione tra la dimensione della lesione periapicale e il numero di specie e cellule batteriche presenti nel canale radicolare.

Poiché il tipo di ambiente e la disponibilità nutrizionale all'interno del canale radicolare regolano la dinamica della flora batterica, il tipo di batteri presenti dipenderà dallo stadio dell'infezione. All'inizio può non esservi una chiara associazione tra specie batteriche, ma ben presto si sviluppa una forte associazione positiva tra un ristretto gruppo di microrganismi della flora orale dovuta al tipo di nutrienti presenti nell'ambiente [8, 10-12].

Nelle infezioni endodontiche i batteri non sono presenti come colonie separate, ma crescono sotto forma di comunità tra loro interconnesse all'interno di una matrice extracellulare, formando il cosiddetto biofilm batterico. Nair descrisse l'aspetto di tali biofilm nel canale infetto come comunità aggregate con una struttura a palizzata [13]. Il significato clinico di questa modalità di crescita in un biofilm è che i batteri all'interno di comunità coaggragate sono relativamente protetti rispetto alle forme planctoniche (in sospensione), e sono più resistenti ai trattamenti antimicrobici [14-16].

Si ritiene generalmente che la persistenza dell'infezione endodontica sia correlata a difficoltà incontrate durante il trattamento iniziale. Un insufficiente controllo della sterilità, un'imprecisa preparazione della cavità di accesso, la mancata identificazione di tutti i canali, una inadeguata strumentazione, e danneggiamenti a restauri temporanei o permanenti sono tutti esempi di difetti procedurali che possono causare persistenza della patologia endodontica [17].

Normalmente nei canali di denti con patologia persistente si ritrovano solo una o poche

specie batteriche. Esse sono perlopiù microrganismi Gram-positivi con eguale distribuzione di anaerobi facoltativi e obbligati [18-19]. La flora microbica è nettamente diversa rispetto a quella tipica delle infezioni di denti non trattati, che è polimicrobica con proporzioni simili di specie Gram-positive e Gram-negative, e predominanza di anaerobi obbligati. Nonostante le differenze tra specie isolate da diversi canali con medesima presentazione clinica (patologia periapicale persistente) molti studi concordano che vi sia una elevata prevalenza di enterococchi e streptococchi [18-24]. Altre specie che sono state rilevate in proporzioni notevoli in alcuni studi sono lactobacilli [18], Actinomiceti e peptostreptococchi [22], *Pseudoramibacter alactolyticus*, *Propionibacterium propionicum*, *Dialister pneumosintes*, *Filifactor alocis* [24] e *Candida albicans* [18-20, 22-24]. Vi è differenza nella flora microbica campionata durante il ritrattamento, tra denti trattati in modo inadeguato e denti ben trattati. Nei primi, la flora è simile a quella delle infezioni polimicrobiche tipiche dei canali non trattati [19-25].

La prevalenza di enterococchi è stata rilevata in tutti gli studi che hanno investigato la flora dei canali trattati endodonticamente [18-25], con una sola eccezione [26], e questo implica che *Enterococcus faecalis* sia da considerarsi un patogeno opportunistico specifico della patologia periapicale persistente.

L'ambiente del canale radicolare infetto non trattato fornisce ai microrganismi una varietà di sostanze nutrizionali, che si modificano nel corso dell'infezione. Mentre nel canale infetto non trattato la flora microbica può trovare nutrimento in abbondanza, nel canale ben trattato endodonticamente può andare incontro a carestia. Idealmente, tutta la polpa necrotica presente in origine sarà stata eliminata, lasciando condizioni asciutte e povere per la sopravvivenza delle specie microbiche rimaste. Tali specie devono sopportare la fame ed un ambiente statico, ma a volte possono trovare un pò di nutrimento nell'essudato proveniente dal tessuto periapicale. Le specie persistenti sono quelle sopravvissute ai trattamenti antimicrobici oppure sono entrate nel canale durante il trattamento e si sono stabilite dove altre specie non hanno potuto farlo. Se il sigillo coronale è difettoso ci può essere infiltrazione batterica e quindi vi è la possibilità di una nuova infezione del canale.

In generale, i microbi coinvolti nelle infezioni persistenti adottano una delle seguenti tre strategie per sfuggire alla risposta immune: sequestro, evasione cellulare, evasione umorale [27]. Il sequestro implica una barriera fisica tra microbo e ospite. L'evasione cellulare significa che i microrganismi evitano i meccanismi difensivi leucocitari. L'evasione umorale significa che i batteri evitano il riconoscimento da parte di anticorpi e complemento

dell'ospite. Almeno due di queste tre strategie sono adottate dai microrganismi coinvolti nella patologia endodontica persistente [28]. *A. israelii* è un esempio di patogeno endodontico che mostra evasione cellulare evitando la fagocitosi dei leucociti polimorfonucleati in vivo [29-31] attraverso un meccanismo di coesione collettiva [32]. *E. faecalis* e *Candida* possono invece rimanere sequestrati all'interno del sistema canalare. I microrganismi coinvolti nella patologia persistente devono possedere proprietà che consentano loro di entrare e stabilirsi nel canale, sopravvivere ai trattamenti antimicrobici e indurre o mantenere la parodontite apicale.

La sopravvivenza o meno dei batteri al trattamento dipende dalla loro capacità di trincerarsi, oppure di sopportare l'assenza di sostanze nutritive. È stato osservato che *E. faecalis* possiede l'abilità di resistere a lunghi periodi di carestia, il che rappresenta una proprietà cruciale per la sua sopravvivenza [32-35]. La parodontite apicale è un processo dinamico che coinvolge l'interazione tra ospite e microrganismi viventi, in cui i batteri devono disporre di substrati alimentari per la crescita. In un canale ben trattato endodonticamente in cui il tessuto necrotico pulpare è stato rimosso e non vi è comunicazione con la cavità orale, quindi non vi è possibilità di influsso di sostanze nutritive esogene, il nutrimento può venire solo da un trasudato di fluido periapicale, con composizione simile al siero. La capacità di alcune specie di degradare il contenuto del siero e delle molecole del tessuto (es. collagene) coincide con l'abilità di evitare le difese dell'ospite e di indurre una risposta infiammatoria [36]. L'abilità di utilizzare come substrato energetico il collagene contenuto all'interno della dentina può essere di vitale importanza e vi sono evidenze che *E. faecalis* abbia tale proprietà [37-38].

Mentre la presenza di infezione al momento del trattamento può influire negativamente sull'esito dello stesso, la semplice presenza di un patogeno endodontico non è di per sé sufficiente per causare la persistenza della malattia, ma è necessario che siano presenti diverse condizioni. La persistenza della malattia post-trattamento coinvolge molti fattori microbici ed ambientali. I microrganismi devono possedere l'abilità di sopravvivere ai trattamenti antimicrobici e si richiedono caratteristiche di "persistenza" come la capacità di sopportare periodi di carestia e l'abilità di utilizzare substrati provenienti dal trasudato periapicale come fonte di nutrimento. La localizzazione dei microbi all'interno del sistema canalare è cruciale per l'accesso ai nutrienti. Essi devono situarsi vicino al forame apicale (o accessorio) ed avere una via libera di comunicazione per lo scambio di fluidi, molecole, e per poter causare infiammazione del tessuto periapicale. Mantenere l'infiammazione significa conservare la possibilità di ricevere nutrimento attraverso il trasudato periapicale.

Nel loro insieme, queste caratteristiche dei microrganismi e le opportunità di localizzarsi in posizioni favorevoli determinano la capacità dei “sopravvissuti” di perpetuare la parodontite apicale post-trattamento.

1.7 - INDICAZIONI E CONTROINDICAZIONI ALLA TERAPIA ENDODONTICA

Secondo Schilder tutti i denti possono essere trattati endodonticamente con successo, l'unica controindicazione è rappresentata dalla malattia parodontale avanzata.

Lo scopo ultimo della nostra terapia è quello di sigillare tutte le porte di uscita della patologia, indipendentemente dall'approccio che vogliamo utilizzare, attraverso la diga e la cavità d'accesso o sollevando un lembo chirurgico per sigillare chirurgicamente quel sistema canalare qualora non fosse aggredibile per via ortograde.

1.8 - FASI DEL TRATTAMENTO ENDODONTICO

Il trattamento endodontico prevede le seguenti fasi di lavoro:

- 1) Diagnosi
- 2) Piano di trattamento
- 3) Anestesia
- 4) Pre-trattamento
- 5) Isolamento del campo operatorio
- 6) Cavità d'accesso
- 7) Sagomatura del canale
- 8) Detersione del canale
- 9) Otturazione del canale
- 10) Sigillo coronale

1.9 - CAVITA' D'ACCESSO

Dopo un'accurata diagnosi, eseguita attraverso esame obiettivo, test pulpari e indagini radiologiche, si procede alla definizione di un piano di trattamento, seguita dall'anestesia, il pretrattamento endodontico e l'isolamento del campo operatorio con diga di gomma.

A questo punto si può procedere con la cavità d'accesso. L'apertura della camera pulpare deve essere eseguita correttamente per poter poi localizzare facilmente i canali radicolari, detergerli, sagomarli, disinfettarli e infine otturarli nelle tre dimensioni.

Secondo Castellucci i requisiti della cavità d'accesso sono:

- 1) Rimozione di tutto il contenuto camerale
- 2) Visione diretta e completa del pavimento camerale e degli imbocchi canalari
- 3) Facile introduzione degli strumenti canalari negli imbocchi dei canali radicolari
- 4) Accesso rettilineo al terzo apicale del canale, sia per gli strumenti per la sagomatura che a quelli per l'otturazione
- 5) Supporto stabile all'otturazione provvisoria
- 6) Quattro pareti

Nella preparazione della cavità d'accesso si riconoscono tre fasi, valide per ogni dente da trattare: penetrazione, allargamento e rifinitura.

1.10 - SAGOMATURA DEL SISTEMA DEI CANALI RADICOLARI

La sagomatura dei canali radicolari è l'obiettivo primario del trattamento endodontico, poiché determina l'efficacia di tutte le procedure successive, ampliando in modo controllato uno o più canali radicolari principali; solo così si potrà avviare la detersione del sistema canalare e, ulteriore requisito indispensabile, sarà possibile ottenere una chiusura tridimensionale dello spazio endodontico con un materiale termoplastico e un cemento sigillante. Le difficoltà maggiori, in tutti i processi menzionati, sono strettamente correlate con le complessità anatomiche intrinseche del sistema endodontico stesso, il quale, per sua natura, presenta morfologie naturali come canali laterali, accessori, diramazioni, delta apicali e una grande quantità di altre anomalie [39-43].

La sola alesatura meccanica, come è noto, non è sufficiente a offrire un'adeguata pulizia finale, poiché gli strumenti, per quanto tecnicamente evoluti, non riescono a entrare in contatto con tutte le pareti del canale per asportare interamente il materiale nocivo in esso contenuto. La sagomatura rimane, a tutt'oggi, un momento estremamente importante del trattamento canalare, in quanto, in assenza di una strumentazione adeguata, gli irriganti avranno maggiore difficoltà a raggiungere il terzo apicale, determinando quindi una detersione insufficiente. Peraltro, una sagomatura eccessivamente invasiva potrebbe causare l'insorgenza di altre problematiche, come l'indebolimento della radice stessa con conseguente predisposizione alla frattura dell'elemento trattato [44-46].

La sagomatura, inoltre, è una parte fondamentale per il processo di riempimento tridimensionale dello spazio endodontico, condizione indispensabile per il mantenimento nel tempo dello stato di disinfezione e controllo della carica batterica residua del comparto anatomico endodontico: in assenza di una corretta morfologia conferita dal processo di

alesatura al canale radicolare in senso lato, le procedure di otturazione si riveleranno complesse e, in definitiva, poco efficaci nel perseguire l'obiettivo sopra citato, vanificando quindi tutta l'operazione del trattamento canalare in particolare e, più in generale, la salute e la permanenza dell'elemento dentale nell'arcata del paziente. Un fattore secondario, ma che ha rilevanza ai fini del risultato primario, è l'esperienza clinica dell'operatore, sia nelle fasi di pianificazione sia in quelle terapeutiche [47-50].

Il processo di ampliamento dello spazio endodontico ha avuto, nel corso degli anni, una rapida e importante evoluzione ed è stato oggetto di numerose revisioni. Già negli anni Trenta il fatto che il canale radicolare dovesse essere svuotato in progressione dalle parti più coronali verso le parti più apicali era parte del sapere odontoiatrico, a questo si era giunti per ragionamenti intuitivi, tipici di una disciplina che da troppo poco tempo era divenuta scienza. I requisiti per la corretta sagomatura dei canali radicolari sono stati però descritti e codificati con completezza da Schilder nel 1974. Schilder teorizzò alcuni concetti per realizzare un protocollo strumentale, basato sul massimo controllo in tutti i passaggi della tecnica, che potesse essere applicato in tutte le situazioni cliniche [51, 52].

Requisiti meccanici della sagomatura secondo Schilder:

- Mantenere l'anatomia iniziale, fattore chiave per ottenere il successo a lungo termine del trattamento endodontico.
- Sviluppare una sagomatura tronco-conica continua, come requisito fondamentale necessario per la successiva fase di riempimento tridimensionale dello spazio endodontico: infatti, con la tecnica di Schilder, per l'otturazione canalare si utilizza un cono di guttaperca con un sottile strato di cemento sigillante; il cono, reso plastico dall'apporto di calore, viene compattato con i pluggers, ottenendo una scomposizione delle forze verticali applicate in forze laterali che, sfruttando le caratteristiche idrauliche della guttaperca, resa plastica, e del cemento, permettono il riempimento tridimensionale dello spazio vuoto ottenuto con la sagomatura e la detersione; la tecnica offre il giusto controllo solo se la cavità è tronco-conica continua, priva di gradini e di irregolarità.
- Creare una preparazione più piccola apicalmente: la sagomatura, per essere funzionale alla tecnica, deve risultare, in ogni suo diametro trasverso, più piccola apicalmente per raggiungere una naturale forma di contenimento in senso apicale, pur considerando che i canali, come i denti, sono entità tridimensionali che non possono essere completamente standardizzati.
- Mantenere forma e dimensione del forame apicale per ottenere la migliore sagomatura possibile, utilizzando strumenti adeguati di dimensioni via via crescenti, cercando di

comprendere la reale anatomia del forame apicale ed effettuando costantemente un'adeguata precurvatura degli strumenti, che devono interagire con il delicato settore del forame, la cui forma e posizione saranno mantenute solo con il controllo continuo della pervietà apicale.

- Mantenere il forame più piccolo possibile è un obiettivo necessario per offrire all'operatore un'otturazione più semplice; si cercherà di misurare, per quanto possibile, la dimensione del forame per poi sviluppare una sagomatura che permetta tutte le operazioni necessarie per completare la disinfezione e l'otturazione tridimensionale; risulta quindi evidente che un forame troppo piccolo non è adeguato alle necessità, mentre allargare un forame già praticabile non è necessario.

Obiettivi biologici della sagomatura secondo Schilder:

- Contenere la strumentazione all'interno del canale: non è necessario, infatti, sagomare il canale oltre la sua lunghezza, così come non è necessario allargare il forame qualora esso sia già praticabile. Vi è un'unica eccezione: portare uno strumento sottile oltre la lunghezza di lavoro per mantenere la pervietà del forame apicale.
- Evitare di spingere oltre il forame il materiale prodotto dalla sagomatura o già presente all'interno del canale, che può essere causa di infiammazione postoperatoria o di riacutizzazione dell'infezione; sarà quindi opportuno cercare di rimuovere dal canale il materiale presente all'interno, mantenendolo in sospensione con un'adeguata irrigazione, ed evitare di spingerlo meccanicamente oltre il forame.
- Rimuovere tutto il tessuto pulpare per ridurre il rischio di lasciare all'interno del canale materiale infetto o suscettibile di colonizzazione batterica in un tempo successivo.
- Detergere e sagomare i canali nella stessa seduta per evitare successive infezioni dei canali stessi.
- Creare uno spazio adeguato a contenere l'eventuale essudato per ridurre l'incidenza di dolori legati alla compressione diretta sui tessuti di sostegno del dente.

1.11 - DETERSIONE DEL SISTEMA DEI CANALI RADICOLARI

Scopo della detersione è quello di rimuovere dall'interno del sistema dei canali radiolari tutto il materiale intracanalare, sia esso di origine pulpare, vitale o necrotico, sia esso costituito da microrganismi. La rimozione del tessuto pulpare necrotico e dei microrganismi avviene esclusivamente grazie all'azione delle soluzioni irriganti.

Secondo Castellucci le soluzioni irriganti in Endodonzia devono rispondere a precisi

requisiti:

- devono avere la proprietà di digerire le sostanze proteiche e quindi di sciogliere i tessuti necrotici
- devono avere una bassa tensione superficiale, per raggiungere il delta apicale e tutte le zone non raggiungibili dagli strumenti
- devono avere proprietà germicide e antibatteriche
- devono essere non tossiche e non irritanti per i tessuti periapicali
- devono mantenere sospesi i residui dentinali
- devono fornire una lubrificazione agli strumenti canalari
- devono prevenire il discolorimento del dente e anzi eventualmente schiarirlo
- devono essere relativamente innocue per il paziente e per l'operatore
- devono essere facilmente reperibili e poco costose

Non esistono irriganti che possiedano tutte le caratteristiche desiderabili senza avere anche caratteristiche negative; la soluzione irrigante oggi universalmente più usata e che risponde più delle altre a tutti requisiti sopra citati è l'ipoclorito di sodio (NaClO).

Gli irriganti possono essere divisi in irriganti con azione antibatterica e in irriganti con azione decalcificante. Per questo motivo, generalmente, i regimi di irrigazione si basano su irriganti ad azione antibatterica (come NaClO) per una fase iniziale, accoppiati a irriganti ad azione decalcificante (come EDTA) per una fase intermedia, durante la quale si liberano le pareti canalari dallo smear layer prodotto dagli strumenti di sagomatura, e una fase finale in cui gli irriganti antibatterici possono essere usati con varie tecniche di potenziamento per riuscire a penetrare in profondità nei recessi anatomici dell'endodonto. L'uso corretto di una combinazione di irriganti e di tecniche di potenziamento contribuisce a una detersione quanto più possibile ottimale.

Esistono in commercio diversi tipi di irriganti:

- **Ipoclorito di sodio**

L'ipoclorito di sodio è l'irrigante più comunemente usato; si dissocia in acqua in ioni Na^+ e OCl^- , stabilendo un equilibrio con l'acido ipocloroso (HClO). A pH neutro o acido, la forma predominante è HClO , responsabile dell'attività antibatterica. NaClO viene comunemente usato a concentrazioni che variano tra lo 0,5 e il 5,5% [53]. Unico tra gli irriganti comunemente usati, NaClO riesce a dissolvere sia i residui pulpari necrotici sia (in minor misura) i residui pulpari vitali nonché il collagene dentinale, ma non la componente inorganica dello smear layer.

La concentrazione minima antibatterica efficace di NaClO è influenzata dalla presenza di materiale organico; negli esperimenti in vitro è efficace anche a concentrazioni di 0,5% [54] anche se con tempi prolungati; tuttavia, in vivo, la presenza di essudato, residui pulpari e batterici indebolisce e consuma NaClO [55, 56]. E' quindi importante un continuo ricambio per permettere un'adeguata efficacia di NaClO. Se invece si considera l'azione sul biofilm, è estremamente importante che NaClO sia usato ad alte concentrazioni (5,25-6%) [57]. La temperatura influenza positivamente l'azione antibatterica e litica di NaClO, per cui si consiglia di riscaldare NaClO a 50-60°C [58]. I punti critici di NaClO sono l'odore, la tossicità e l'inefficacia a rimuovere lo smear layer, cioè le componenti inorganiche. Anche la scarsa efficacia antibatterica di NaClO in vivo (per la presenza di particolarità anatomiche quali istmi, anastomosi, fins, recessi, nonché per la presenza di essudato e residui organici pulpari) spinge a ricercare qualche metodica per aumentarne l'efficacia in situazioni cliniche.

- **Clorexidina**

La clorexidina digluconata è un irritante endodontico con buone capacità antibatteriche [59]. Per essere efficace in ambito endodontico deve essere impegnata alla concentrazione del 2%. A differenza di NaClO non ha nessun tipo di attività di dissoluzione né sui tessuti [60] né nel biofilm [57], e quindi non può essere impiegata in sostituzione di esso. Come l'ipoclorito, è influenzata dalla presenza di residui organici all'interno del sistema dei canali radicolari.

- **EDTA**

Per eliminare i residui inorganici non rimossi da NaClO, la soluzione più comunemente usata è una soluzione a pH 7 di EDTA (acido etilendiaminotetracetico). L' EDTA non ha proprietà antibatteriche, ma rimuove esclusivamente lo strato di smear layer depositato dall'azione meccanica degli strumenti rendendo di nuovo accessibili ai disinfettanti le pareti dei canali. L'uso raccomandato di EDTA è un lavaggio di 1-3 minuti alla fine della fase di strumentazione e dopo l'uso di NaClO [53]. Bisogna tener presente che l'uso di EDTA insieme a NaClO non è possibile, in quanto l'EDTA, essendo chelante, riduce immediatamente la quantità di cloro disponibile, risultando in una perdita di efficacia di NaClO [61]. L'uso di NaClO dopo la rimozione della porzione inorganica dello smear layer può produrre erosione dentinale [62], il cui significato clinico è ancora da chiarire.

- **Acido citrico**

Tra le varie sostanze acide impiegate, l'acido citrico è quella che provoca un allargamento minore dei tubuli. Sia a concentrazioni del 10% che dell'1%, risulta più efficace come agente

decalcificante rispetto all'EDTA al 17% [63].

- **Nuovi irriganti**

Come accennato in precedenza, NaClO ed EDTA presentano dei limiti: la dentina esercita un effetto tampone neutralizzando dopo pochi secondi l'azione degli irriganti [55], la complessa anatomia endodontica spesso non permette la penetrazione degli irriganti negli spazi negativi del sistema dei canali radicolari; inoltre NaClO, reagendo con il tessuto pulpare, produce gas che può rimanere intrappolato come una bolla all'interno dello spazio canalare impedendo un ricambio dell'irrigante nel terzo apicale. Infine, l'EDTA, se miscelato con NaClO, ne neutralizza l'azione. Non si devono dimenticare le possibili reazioni avverse dovute all'incauto utilizzo di NaClO e la possibile erosione peritubulare, anche se di quest'ultima si ignora al momento il reale impatto clinico. I nuovi irriganti possono avere le seguenti caratteristiche:

- essere meno “tossici”, ovvero non costituire un reale pericolo in caso di fuoriuscita oltre apice: fanno parte di questa categoria le acque ozonate e le soluzioni attivate elettrochimicamente (ECA) [64];
- avere una spiccata azione antibiotica, possibilmente prolungata nel tempo: fanno parte di questa categoria gli irriganti che contengono derivati delle tetracicline;
- ad alcuni irriganti “classici” viene aggiunto un tensioattivo per facilitarne la penetrazione verso apicale: fanno parte di questa categoria prodotti formati da NaOCl con tensioattivo e EDTA con tensioattivo.

Esistono inoltre composti di varie sostanze proposti come unico irrigante al termine delle manovre di detersione e sagomatura e prima dell'otturazione canalare; queste soluzioni dovrebbero rimuovere lo smear layer e contemporaneamente disinfettare lo spazio endodontico: a tutt'oggi questi prodotti sono conosciuti come BioPure MTAD (Dentsply Tulsa Dental Specialties, Tulsa, OK), Tetraclean (Ogna Laboratori Farmaceutici, Milano, Italia) (che contengono un tensioattivo, un derivato della tetraciclina e un demineralizzante) e Qmix (Dentsply Tulsa Dental Specialties, Tulsa, OK) (che contiene un agente demineralizzante e clorexidina in percentuale del 2%).

I problemi da risolvere per ottenere una completa detersione dell'endodonto sono molteplici: da un lato la complessità anatomica del sistema dei canali radicolari e la presenza dei tubuli dentinali favoriscono enormemente la superficie colonizzabile dai batteri. La formazione di smear layer durante la fase di sagomatura impedisce un adeguato contatto tra gli agenti irriganti e gli agenti patogeni, inoltre la presenza di biofilm batterici, particolarmente

resistenti all'azione degli irriganti rende questo compito ulteriormente più difficile. Bisogna infine ricordare che la sicurezza durante l'uso (soprattutto quando si irriga con NaClO) non sempre è semplice da rispettare. Il regime di irrigazione alternata tra agente chelante e NaClO, pur possedendo le caratteristiche necessarie per una completa detersione dello spazio endodontico, non garantisce un livello di pulizia ottimale, in particolare nel terzo apicale [65, 66] e può provocare effetti indesiderati come l'erosione peritubulare. La ricerca è particolarmente attenta nel tentare di migliorare la qualità della detersione canalare, per garantire la completa rimozione del tessuto pulpare e dei microrganismi nello spazio endodontico. Per questo motivo la ricerca si è indirizzata verso lo sviluppo di nuovi irriganti, di sistemi che migliorino il ricambio e la penetrazione dell'irrigante all'interno dello spazio canalare, di nuove modalità per l'attivazione dell'irrigante, dalla semplice agitazione della soluzione fino all'adozione di sistematiche che uniscono alcune tra le strategie sopra descritte. I fattori chiave responsabili dell'efficacia di una soluzione irrigante all'interno del sistema canalare sono pochi. Prima di tutto è bene chiarire che qualsiasi soluzione, per espletare la sua funzione, deve venire a contatto sia con i tessuti sui quali deve agire sia sui microrganismi da agire. Inoltre, gli angusti spazi del sistema canalare non permettono di avere grandi quantità di soluzione irrigante all'interno dei canali; considerando poi l'effetto tampone della tampone della dentina e dei tessuti che reagiscono con l'irrigante, risulta abbastanza evidente che un ricambio frequente, se non continuo, dell'irrigante consenta di ottenere migliori risultati. Un grande miglioramento dell'azione degli irriganti si può ottenere amplificando la capacità di reazione della soluzione, ovvero la peculiarità di liberare il principio consentendo di ottenere risultati migliori in minor tempo. Infine, un fattore direttamente collegato alla capacità di detersione dello spazio canalare è quello fisico determinato dall'effetto meccanico dell'irrigante canalare sulla superficie canalare: la cosiddetta tensione tangenziale (shear stress), la forza che il flusso dell'irrigante esercita sulle pareti.

Le siringhe utilizzate per l'irrigazione non dovrebbero avere capacità superiore a 5 mL perché non si eserciti troppa pressione durante i lavaggi al fine di evitare fuoriuscite accidentali di NaClO nel periapice. Esse dovrebbero avere l'attacco tipo Luer, che non permette lo sgancio accidentale dell'ago e evita, quindi, che NaClO possa macchiare i vestiti del paziente o causare irritazione agli occhi o al viso.

Gli aghi per irrigazione endodontica si sono ridotti notevolmente di dimensioni; oggi si preferisce usare aghi 27 G (diametro 0,42 mm) o, meglio, aghi 30 G (diametro 0,31 mm). È infatti noto che il ricambio dell'irrigante viene attuato solo poco oltre la punta dell'ago [53,

67] e quindi è da preferire un ago che penetri il più vicino possibile all'apice, senza però aumentare i rischi di fuoriuscita di NaClO; per questo motivo sono stati realizzati diversi puntali da irrigazione.

Il flusso e il ricambio degli irriganti all'interno del sistema dei canali radicolari possono essere studiati tramite l'utilizzo di additivi radiopachi o fluorescenti, che non alterino le proprietà fisiche dell'irrigante studiato [68].

Per studiare la dinamica del ricambio degli irriganti si ricorre anche a studi di simulazione del flusso intracanalare (CFD, Computational Fluid Dynamics) [69].

È stato dimostrato che il ricambio nella parte apicale (che è anche la parte più importante per il successo a lungo termine del trattamento) è estremamente limitato. Solo con l'ausilio di mezzi di agitazione è possibile ottenere un sufficiente ricambio di irrigante nella parte apicale.

1.12 - ATTIVAZIONE DEGLI IRRIGANTI

Riscaldamento

Il più comune tra i sistemi di potenziamento dell'azione di NaClO è il riscaldamento della soluzione, che può avvenire all'esterno dell'elemento dentale, in appositi contenitori o riscaldando le siringhe, oppure all'interno del dente, mediante l'utilizzo di portatori di calore (gli stessi utilizzati per la compattazione a caldo della guttaperca) o mediante inserti ultrasonici.

La temperatura aumenta la reaction rate di NaClO, influenzando positivamente la capacità di dissoluzione dei tessuti organici e l'azione antibatterica di NaClO, per cui si consiglia di riscaldare NaClO a 50-60 °C [58].

Agitazione manuale

Un metodo estremamente semplice per implementare l'attività degli agenti irriganti consiste nell'introdurre all'interno del canale un cono di guttaperca che ben si adatta alla forma del canale e muoverlo con movimenti di su e giù dell'ampiezza di 2-3 mm: questo movimento permette un efficace effetto idrodinamico e la penetrazione dell'irrigante [70, 71]; questo tipo di agitazione è estremamente economica e semplice da effettuare, prevede idealmente circa 100 movimenti di su e giù in 30 secondi.

In alternativa possono essere utilizzati strumenti manuali mossi passivamente nel canale, finger spreader o carrier.

È importante ricordare che questa metodica agisce solo sul ricambio dell'irrigante all'interno del sistema canalare, ma non potenzia l'effetto intrinseco dell'irrigante; in altre parole, non migliora la reaction rate ma solo il contatto.

Inoltre, questo metodo ha la capacità di ridurre al minimo l'effetto vapor lock, in quanto lo spazio che in precedenza era occupato dall'aria viene occupato dal cono di guttaperca, che porta con sé un velo di irrigante fino alla lunghezza di lavoro [72].

Ultrasuoni

Le lime ultrasoniche sono state introdotte in endodonzia nel 1957 da Richman [73] per sagomare e detergere i canali, ma fu Martin, nel 1980, a disegnare un'unità ultrasonica utilizzabile per l'endodonzia [74].

Attualmente sono descritte in letteratura due diverse metodiche di irrigazione ultrasonica:

- *PUI (Passive Ultrasonic Irrigation)*: attivazione e potenziamento degli irriganti che non prevede il contatto della lima ultrasonica con le pareti canalari: da questa caratteristica deriva la definizione di passiva. Per questa metodica sono stati studiati appositi inserti di forme diverse, ma con la comune caratteristica di essere privi di angolo di taglio, così da ridurre la possibilità di eventuali alterazioni della forma del canale in caso di accidentale contatto dell'inserto con le pareti canalari. È una tecnica in due fasi poiché l'irrigante viene introdotto con una siringa e successivamente viene attivato con l'uso di inserti ultrasonici. Secondo Ahmad et al. [75] in questa tecnica l'inserto ultrasonico, vibrando, produce uno streaming acustico che genera uno shear stress sufficiente a dislocare i detriti nei canali strumentati: questo si tradurrebbe in una migliore pulizia delle pareti canalari [76-78]. Gli inserti, vibrando liberi all'interno del canale a frequenze comprese tra 25 e 30 khz (le frequenze inferiori ai 20 kHz producono vibrazioni soniche e non ultrasoniche) generano uno streaming acustico che crea microcavitazione; i piccoli vuoti che si producono, implodendo, creano a loro volta un'intensa agitazione della soluzione all'interno dello spazio canalare migliorando la rimozione dei detriti sia organici sia inorganici [77, 79-83] e la penetrazione intratubulare a livello del terzo apicale [84]. L'attivazione mediante PUI permette, inoltre, un aumento della temperatura dell'irrigante [85-87] e un incremento della reaction rate [88]. Tutto questo si traduce in una maggiore capacità di detersione, una migliore attività antibatterica [89-94] e una più potente azione di dissoluzione dei tessuti [95, 96]. Il limite principale di questa tecnica riguarda la passività: non è infatti semplice far lavorare l'inserto passivamente i canali stretti e curvi; in caso di contatto dell'inserto si verifica una perdita di efficacia in quanto la vibrazione viene inibita in quel punto. Infine, si attendono studi che indichino le tempistiche migliori per questa tecnica: al momento 3 cicli di 20 secondi è il protocollo maggiormente

consigliato [97].

- *UNI (Ultrasonic Needle Irrigation)*: attivazione dell'irrigante da parte dell'inserito ultrasonico è contemporanea all'irrigazione. Introdotta da Nusstein [98], questa tecnica prevede la fuoriuscita dell'irrigante da un ago di diametro 25 G che, contemporaneamente, vibra a frequenze ultrasoniche. In questo modo si accoppiano i vantaggi degli ultrasuoni con un ricambio continuo dell'irrigante. Questa metodica consente di ottenere un buon livello di pulizia sia nel canale principale sia negli istmi [99, 100] ed è molto efficace nell'abbattimento della carica batterica [101]. i vantaggi di questa tecnica sono: un ricambio migliore, un buon shear stress, un aumento della reaction rate, ma c'è il rischio di estrusione dell'irrigante oltre apice. Per questo motivo bisogna evitare di avvicinare la punta dell'ago a una distanza inferiore a 5 mm dall'apice soprattutto in elementi dentali con il diametro del forame apicale superiore ai 60-70 ISO.

Sistemi sonici

I sistemi sonici sono un sistema di agitazione dell'irrigante efficace; introdotti da Tronstad per l'endodonzia nel 1985 [102], hanno fornito risultati incoraggianti per quanto riguarda la disinfezione dei canali radicolari [103].

Le ampie oscillazioni degli inserti, se liberi di muoversi nel canale, producono un movimento della soluzione irrigante che ha come conseguenza un livello di detersione migliore rispetto all'irrigazione tradizionale con la sola siringa [82]. Bisogna però precisare che la maggiore potenza dei sistemi ultrasonici rimuove più efficacemente i detriti dentali rispetto ai meno potenti sistemi sonici [104-106]; le due metodiche non sarebbero invece differenti per quello che riguarda la detersione dei detriti dentali qualora si prolunghino i tempi di utilizzo [82]. Questa metodica non migliora la reaction rate di NaClO: inoltre gli inserti, in particolare nel terzo apicale, possono perdere di efficacia quando costretti all'interno del sistema canalare perché la vibrazione sonica, producendo movimenti dell'inserito di maggiore ampiezza, avrebbe minore potenza rispetto alla vibrazione ultrasonica.

I due strumenti maggiormente utilizzati per questa metodica sono i file rispisonic (Medidenta International Inc, Woodside, NY) su manipolo 1500 Micro-Mega, Besançon, France e l'endoactivator (Dentsply Tulsa Dental Specialties, Tulsa, OK).

Irrigazione a pressione negativa

Prima di descrivere la metodica dell'irrigazione a pressione negativa è opportuno fare una breve descrizione del fenomeno noto come vapor lock.

Il fenomeno del vapor lock consiste nella formazione di una bolla d'aria o di gas all'interno

di un sistema chiuso: questa bolla ostacola la penetrazione del liquido irrigante e impedisce fenomeni di osmosi o soluzione, isola pertanto completamente la porzione canalare a valle della bolla impedendo il ricambio dell'irrigante nel tratto più delicato, il terzo apicale.

La creazione di questa bolla può avvenire, oltre che per un'eventuale iniezione accidentale di aria nel canale, anche per l'azione della soluzione irrigante che, reagendo con i tessuti, libera ossigeno. La rimozione di questa bolla, se in profondità, può essere complessa, vista la difficoltà di raggiungere con la punta di un ago per irrigazione il limite apicale; in aggiunta, posizionando l'ago da irrigazione in queste zone del canale radicolare e il rischio di far estrudere l'irrigante oltre apice se si posizionasse la punta a ridosso del forame apicale.

Negli ultimi anni sono state quindi proposte metodiche che, partendo da un'intuizione di Lussi [107], assicurano la penetrazione dell'irrigante all'interno dello spazio endodontico per pressione negativa. Queste avrebbero l'indubbio vantaggio, riguardo alla sicurezza, di non iniettare in profondità NaClO; per contro, esiste la necessità assoluta di portare la cannula aspirante esattamente all'apice. Con i sistemi a pressione positiva non si ha l'assoluta predicibilità del limite apicale raggiunto dalla soluzione irrigante, per contro, con i sistemi a pressione negativa si ha il controllo, ma anche la consapevolezza, che l'irrigante arriverà esattamente dove arriva il termine della cannula aspirante e non oltre.

Per questa sistematica, nominata EndoVac (Smart Endodontics; Discus dental, Culver City, CA) sono state create cannule microscopiche con un diametro di 0,32 mm (pari a 32 ISO) corredate di 12 fori per l'aspirazione; per posizionarle in apice è necessario che i canali abbiano un diametro apicale almeno uguale a 35 ISO e con conicità almeno .04, in modo da avere la possibilità di portare la microcannula in apice e lasciare spazio sufficiente per permettere all'irrigante di defluire.

Con questo sistema di aspirazione endocanalare la quantità di irrigante che può estrudere dall'apice è limitata [108]; inoltre, sia il livello di detersione nel terzo apicale [109] sia il livello di pulizia degli istmi nei molari inferiori [110] risultano nettamente superiori rispetto a quella raggiungibile con le tradizionali metodiche a pressione positiva.

Anche l'azione antibatterica è migliore rispetto all'irrigazione tradizionale con siringa e ago [111]. La tecnica a pressione negativa raggiunge questi risultati assicurando un flusso continuo di soluzione irrigante e uno shear stress lungo le pareti del canale; non ha invece alcun effetto sulla temperatura e sulla reaction rate dell'irrigante.

L'obbligatorietà di preparazioni apicali di diametro superiore alla misura minima della cannula (32 ISO) può rendere questa tecnica in alcune circostanze molto laboriosa.

Sistemi combinati

Esistono sistemi di attivazione misti, nei quali si cerca di sommare le caratteristiche positive delle diverse metodiche descritte: per esempio, siringhe con ago sonico a pressione positiva, sistemi in cui l'aspirazione intracanalare avviene tramite cannule che vibrano a frequenze soniche e ultrasoniche e così via.

Con l'eccezione del sistema RinsEndo (Dürr Dental, Bietigheim, Germany), che è stato oggetto di alcune ricerche [112, 113], per molte di queste metodiche mancano, al momento, dati sufficienti per esprimere opinioni che abbiano un supporto scientifico valido.

Fotoattivazione

L'utilizzo del laser in endodonzia è stato proposto nel corso degli anni per migliorare il livello di detersione e disinfezione dello spazio endodontico [114]. Alcune limitazioni emerse riguardavano: la difficoltà di far agire il raggio laser lungo tutta la superficie canalare (difficoltà dovuta all'emissione unidirezionale del laser) [115] e la possibilità di alterare, mediante un eccessivo surriscaldamento, la struttura superficiale delle pareti canalari [116, 117].

Esistono molteplici tipologie di laser e metodiche di attivazione degli irriganti, tra queste le principali sono: l'irrigazione laser attivata (LAI, Laser Activated Irrigation) e la tecnica PIPS (Photon Induced Photoacoustic Streaming).

L'irrigazione laser attivata (LAI, Laser Activated Irrigation) è stata introdotta recentemente come un efficiente metodo di attivazione delle soluzioni irriganti [118, 119]. Il meccanismo di azione consiste in un'azione di microcavitazione e successiva implosione dovuta al rapido assorbimento dell'energia del laser [120]. Questa metodica è risultata efficiente nella rimozione dello smear layer ma può provocare l'estrusione della soluzione irrigante oltre apice [119]. Questa tecnica agisce creando turbolenza quindi, ricambio e shear stress, aumentando, inoltre, sia la temperatura sia la reaction rate di NaClO. Infatti, dopo attivazione laser, NaClO mantiene una maggiore reaction rate per circa 5 minuti [88]. Sembra quindi un'ottima tecnica, con alcuni limiti dovuti all'elevato costo delle macchine e ai rischi di estrusione apicale dell'irrigante.

Questi stessi difetti sono riscontrabili nella tecnica PIPS, descritta da DiVito nel 2009. La tecnica utilizza un laser Er:Yag a potenza subablattiva e con modalità pulsata, ovvero con un'emissione di luce intermittente e non continua. Grazie a uno speciale disegno della punta, si creano all'interno dell'irrigante onde fotoacustiche estremamente efficaci nella rimozione dei detriti e dello smear layer.

Inoltre, esistono tecniche di attivazione tramite luce di soluzioni irriganti che abbiano un recettore specifico (di solito un colorante) per una determinata lunghezza d'onda. Se da un

lato questa metodica è efficace come azione antibatterica [121] ed è virtualmente non tossica [122, 123], è però indaginosa per la necessità di eliminare completamente il colorante introdotto.

1.13 - OTTURAZIONE TRIDIMENSIONALE DEL SISTEMA DEI CANALI RADICOLARI

È universalmente riconosciuto come la completa sterilizzazione di un canale radicolare infetto sia molto difficile se non impossibile da raggiungere, così come la completa rimozione di tutti i residui pulpari. I microrganismi restano così isolati all'interno del sistema dei canali radicolari, magari all'interno di tubuli dentinali rimasti infetti più in profondità rispetto al livello della parete dentinale sagomata. Non possono quindi essere raggiunti dall'attività fagocitaria delle difese dell'organismo, mentre la presenza di residui pulpari necrotici unitamente all'essudato che vi si accumula può servire come “pabulum” e contribuire al mantenimento della loro vitalità.

Se però il sistema dei canali radicolari verrà completamente otturato nelle sue tre dimensioni, tutti gli eventuali microrganismi residui resteranno intrappolati all'interno dei tubuli dentinali fra il cemento radicolare da una parte e il materiale da otturazione dall'altra, senza alcuna possibilità di sopravvivenza.

Appare pertanto essenziale il fatto che il sistema canalare debba essere ben sigillato nelle sue tre dimensioni, per mettere il dente al riparo dal rischio dell'infiltrazione apicale, per batteri rimasti in porzioni non riempite (otturazioni corte) e dal rischio dell'infiltrazione coronale in caso di perdita di sigillo coronale e reinfezione dell'intero sistema.

Schilder ha sottolineato come l'importante in Endodonzia sia l'eliminazione degli irritanti dal sistema dei canali radicolari, ottenuta attraverso la detersione, sagomatura, disinfezione meccanica ed otturazione totale dell'endodonto. “In ultima analisi” egli afferma “è il sigillo del complesso sistema dei canali radicolari ed il suo isolamento dal legamento parodontale e dall'osso che assicura la salute dell'apparato di sostegno del dente contro le tossine ed i prodotti metabolici di disfacimento di origine endodontica”. “Lo scopo ultimo dell'Endodonzia è pertanto quello di eliminare tutto il sistema dei canali radicolari come se estraessimo il dente”.

1.14 - BIBLIOGRAFIA

[1] American association of endodontists; “quality assurance guidelines” 1987

- [2] Marsh PD. Are dental diseases examples of ecological catastrophes? *Microbiology* 2003;149:279-294
- [3] Kantz WE, Henry CA. Isolation and classification of anaerobic bacteria from intact pulp chambers of non-vital teeth in man. *Archs Oral Biol* 1974;19:91-96
- [4] Wittgow WC, Jr., Sabiston CB, Jr. Microorganisms from pulpal chambers of intact teeth with necrotic pulps. *J Endod* 1975;1:168-171
- [5] Sundqvist G. Taxonomy, ecology, and pathogenicity of the root canal flora. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1994;78:522- 530
- [6] Siqueira JF Jr, Rôças IN. Exploiting molecular methods to explore endodontic infections: part 2 – Redefining the endodontic microbiota. *J Endod* 2005;31:488-498
- [7] Carlsson J. Microbiology of plaque associated periodontal disease. In: Lindhe J, ed. *Textbook of clinical periodontology*. Copenhagen: Munksgaard, 1990:129-152
- [8] Sundqvist G. Associations between microbial species in dental root canal infections. *Oral Microbiol Immunol* 1992;7:257-262
- [9] Sundqvist G. Ecology of the root canal flora. *J Endod* 1992;18:427-430
- [10] Gomes BP, Drucker DB, Lilley JD. Positive and negative associations between bacterial species in dental root canals. *Microbios* 1994;80:231-243
- [11] Lana MA, Ribeiro-Sobrinho AP, Stehling R, et al. Microorganisms isolated from root canals presenting necrotic pulp and their drug susceptibility in vitro. *Oral Microbiol Immunol* 2001;16:100-105
- [12] Peters LB, Wesselink PR, van Winkelhoff AJ. Combinations of bacterial species in endodontic infections. *Int Endod J* 2002;35:698-702
- [13] Nair PNR. Light and electron microscopic studies of root canal flora and periapical lesions. *J Endod* 1987;13:29-39
- [14] Costerton JW, Stewart PS. Biofilms and device-related infections. In: Nataro JP, Blaser MJ, Cunningham-Rundles S, eds. *Persistent bacterial infections*. Washington, DC: ASM Press, 2000:423-439
- [15] Costerton W, Veeh R, Shirtliff M, Pasmore M, Post C, Ehrlich G. The application of biofilm science to the study and control of chronic bacterial infections. *J Clin Invest* 2003;112:1466- 1477
- [16] Abdullah M, Ng YL, Gulabivala K, Moles DR, Spratt DA. Susceptibilities of two *Enterococcus faecalis* phenotypes to root canal medications. *J Endod* 2005;31:30-36
- [17] Nair PNR. On the causes of persistent apical periodontitis: a review. *Int Endod J* 2006;39:249-81
- [18] Molander A, Reit C, Dahlén G, Kvist T. Microbiological status of root-filled teeth with

apical periodontitis. *Int Endod J* 1998;31:1-7

[19] Sundqvist G, Figdor D, Persson S, Sjögren U. Microbiologic analysis of teeth with failed endodontic treatment and the outcome of conservative re-treatment. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 1998;85:86-93

[20] Möller ÅJR. Microbiological examination of root canals and periapical tissues of human teeth. Methodological studies. *Odontol Tidsk* 1966;74:Suppl: 1-380

[21] Peciuliene V, Balciuniene I, Eriksen HM, Haapasalo M. Isolation of *Enterococcus faecalis* in previously root-filled canals in a Lithuanian population. *J Endod* 2000;26:593-595

[22] Hancock HH, Sigurdsson A, Trope M, Moiseiwitsch J. Bacteria isolated after unsuccessful endodontic treatment in a North American population. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2001;91:579-586

[23] Peciuliene V, Reynaud AH, Balciuniene I, Haapasalo M. Isolation of yeasts and enteric bacteria in root-filled teeth with chronic apical periodontitis. *Int Endod J* 2001;34:429-434

[24] Siqueira JF, Jr., Rôças IN. Polymerase chain reaction-based analysis of microorganisms associated with failed endodontic treatment. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2004;97:85-94

[25] Pinheiro ET, Gomes BP, Ferraz CC, Sousa EL, Teixeira FB, Souza-Filho FJ. Microorganisms from canals of root-filled teeth with periapical lesions. *Int Endod J* 2003;36:1-11

[26] Cheung GS, Ho MW. Microbial flora of root canal-treated teeth associated with asymptomatic periapical radiolucent lesions. *Oral Microbiol Immunol* 2001;16:332-337

[27] Nataro JP, Blaser MJ, Cunningham-Rundles S. Persistent bacterial infections: commensalism gone awry or adaptive niche? In: Nataro JP, Blaser MJ, Cunningham-Rundles S, eds. *Persistent bacterial infections*. Washington, DC: ASM Press, 2000: 3-10

[28] Figdor D. Microbial aetiology of endodontic treatment failure and pathogenic properties of selected species. Umeå University Odontological Dissertations No. 79. Umeå: Umeå University, Sweden, 2002. PhD thesis

[29] Brown JR, von Lichtenberg F. Experimental actinomycosis in mice. *Arch Path* 1970;90:391-402

[30] Figdor D, Sjögren U, Sörlin S, Sundqvist G, Nair PNR. Pathogenicity of *Actinomyces israelii* and *Arachnia propionica*: experimental infection in guinea pigs and phagocytosis and intracellular killing by human polymorphonuclear leukocytes in vitro. *Oral Microbiol Immunol* 1992;7:129-136 [31] Sumita M, Hoshino E, Iwaku M. Experimental actinomycosis in mice induced by alginate gel particles containing *Actinomyces israelii*. *Endod Dent*

Traumatol 1998;14:137-143

- [32] Giard JC, Hartke A, Flahaut S, Benachour A, Boutibonnes P, Auffray Y. Starvation-induced multiresistance in *Enterococcus faecalis* JH2-2. *Curr Microbiol* 1996;32:264-271
- [33] Wendt C, Wiesenthal B, Dietz E, Ruden H. Survival of vancomycin-resistant and vancomycin-susceptible enterococci on dry surfaces. *J Clin Microbiol* 1998;36:3734-3736
- [34] Figdor D, Davies JK, Sundqvist G. Starvation survival, growth and recovery of *Enterococcus faecalis* in human serum. *Oral Microbiol Immunol* 2003;18:234-239
- [35] Sedgley CM, Lennan SL, Appelbe OK. Survival of *Enterococcus faecalis* in root canals ex vivo. *Int Endod J* 2005;38:735-742
- [36] Jansen H-J. The periodontal microflora as a protein-dependent anaerobic degradation system. Nijmegen: University of Nijmegen, The Netherlands, 1996
- [37] Love RM. *Enterococcus faecalis*—a mechanism for its role in endodontic failure. *Int Endo J* 2001;34:399-405
- [38] Hubble TS, Hatton JF, Nallapareddy SR, Murray BE, Gillespie MJ. Influence of *Enterococcus faecalis* proteases and the collagen-binding protein, Ace, on adhesion to dentin. *Oral Microbiol Immunol* 2003;18:121-126
- [39] Ingle JI, Newton CW, West JD et al. Obturation of the radicular space. In: Ingle JI, Bakland LK, editors. *Endodontics*. 5Th ed. Hamilton, Ontario: BC Decker; 2002. p. 571-668
- [40] Venturi M, Prati C, Capelli G et al. A preliminary analysis of the morphology of lateral canals after root canal filling using a tooth-clearing technique. *Int Endod J* 2003; 36:54-63
- [41] Wu Mk, Wesselink PR. Endodontic leakage studies reconsidered. Part I. Methodology, application and relevance. *Int Endod J* 1993; 26:37-43
- [42] Dummer PM, McGinn JH, Rees DG. The position and topography of the apical canal constriction and apical foramen. *Int Endod J* 1984; 17:192-8
- [43] Nekoofar MH, Ghandi MM, Hayes SJ, Dummer PMH. The fundamental operating principles of electronic root canal length measurement devices. *Int Endod J* 2006; 39:595-609
- [44] Ricucci D, Langeland K. Apical limit of root canal instrumentation and obturation, part 2. A histological study. *Int Endod J* 1998; 31:394-409
- [45] Schilder H. Filling the root canal in three dimensions. *Dent Clin North Am* 1967; 11:723-44
- [46] American Association of Endodontists. *Glossary of terms used in endodontics*. 4Th ed. Chicago (IL): American Association Endodontists; 1984. p.10
- [47] Mayne JR, Shapiro S, Abramson II. An evaluation of standardized gutta-percha points.

- I. Reliability and validity of standardization. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1971; 31:250-7
- [48] Goldberg F, Gurfinkel J, Spielberg C. Microscopic study of standardized gutta-percha points. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1979; 47:275-6
- [49] Venturi M, Di Lenarda R, Breschi L. An ex vivo comparison of three different gutta-percha cones when compacted at different temperatures: rheological considerations in relation to the filling of lateral canals. *Int Endod J* 2006; 39:648-56
- [50] Tagger M, Greenberg B, Sela G. Interaction between sealers and gutta-percha cones. *J Endod* 2003; 29:835-7
- [51] Morfis AS. Vertical root fractures. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1990; 69:631-5
- [52] Hatton JF, Ferrillo PJ Jr, Wagner G, Stewart GP. The effect of condensation pressure on the apical seal. *J Endod* 1988; 14:305-8
- [53] Zehnder M. Root canal irrigants. *J Endod* 2006; 32:389-98
- [54] Radcliffe CE, Potouridou L, Qureshi R et al. Antimicrobial activity of varying concentrations of sodium hypochlorite on the endodontic microorganisms *Actinomyces israelii*, *A. naeslundii*, *Candida albicans* and *Enterococcus faecalis*. *Int Endod J* 2004; 37:438-46
- [55] Haapasalo HK, Siren EK, Waltimo TM et al. Inactivation of local root canal medicaments by dentine: an in vitro study. *Int Endod J* 2000; 33:126-31
- [56] Haapasalo M, Qian W, Portenier I et al. Effects of dentin on the antimicrobial properties of endodontic medicaments. *J Endod* 2007; 33:917-25
- [57] Clegg MS, Vertucci FJ, Walker C et al. The effect of exposure to irrigant solutions on apical dentin biofilms in vitro. *J Endod* 2006; 32:434-7
- [58] Sirtes G, Waltimo T, Schaetzle M et al. The effects of temperature on sodium hypochlorite short-term stability, pulp dissolution capacity, and antimicrobial efficacy. *J Endod* 2005; 31:669-71
- [59] Jeansonne MJ, White RR. A comparison of 2.0% chlorhexidine gluconate and 5.25% sodium hypochlorite as antimicrobial endodontic irrigants. *J Endod* 1994; 20:276-8
- [60] Naenni N, Thoma K, Zehnder M. Soft tissue dissolution capacity of currently used and potential endodontic irrigants. *J Endod* 2004; 30:785-7
- [61] Zehnder M, Schmidlin P, Sener B et al. Chelation in root canal therapy reconsidered. *J Endod* 2005; 31:817-20
- [62] Niu W, Yoshioka T, Kobayashi C et al. A scanning electron microscopic study of dentinal erosion by final irrigation with EDTA and NaOCl solutions. *Int Endod J* 2002; 35:934-9

- [63] Machado-Silveiro LF, Gonzalez-Lopez S, Gonzalez-Rodriguez MP. Decalcification of root canal dentine by citric acid, EDTA and sodium citrate. *Int Endod J* 2004; 37:365-9
- [64] Solovyeva AM, Dummer PM. Cleaning effectiveness of root canal irrigation with electrochemically activated anolyte and catholyte solutions: a pilot study. *Int Endod J* 2000; 26:6-10
- [65] Peters OA, Barbakow F. Effects of irrigation on debris and smear layer on canal walls prepared by two rotary techniques: a scanning electron microscopic study. *J Endod* 2000; 26:6-10
- [66] Foschi F, Nucci C, Montebugnoli L et al. SEM evaluation of canal wall dentine following use of Mtwo and ProTaper NiTi rotary instruments. *Int Endod J* 2004; 37:832-9
- [67] Boutsoukis C, Lambrianidis T, Kastrinakis E. Irrigant flow within a prepared root canal using various flow rates: a Computational Fluid Dynamics study. *Int Endod J* 2009;42:144-55
- [68] Salzgeber RM, Brilliant JD. An in vivo evaluation of the penetration of an irrigating solution in root canals. *J Endod* 1977; 3:394-8
- [69] Boutsoukis C, Verhaagen B, Versluis M et al. Evaluation of irrigant flow in the root canal using different needle types by an unsteady computational fluid dynamics model. *J Endod* 2010; 36:875-9
- [70] Machtou P. Irrigation investigation in endodontics. Paris: Paris VII University; 1980
- [71] Caron G. Cleaning efficiency of the apical millimeters of curved canals using three different modalities of irrigant activation: an SEM study. Paris: Paris VII University; 2007
- [72] Gu LS, Kim JR, Ling J et al. Review of contemporary irrigant agitation techniques and devices. *J Endod* 2009; 35:791-804
- [73] Richman R. the use of ultrasonics in root canal therapy and root resection. *Med Dent J* 1957; 12:12-8
- [74] Martin H, Cunningham WT, Norris JP et al. Ultrasonic versus hand filling of dentin: a quantitative study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1980; 49:79-81
- [75] Ahmad M, Pitt Ford TJ, Crum LA. Ultrasonic debridement of root canals: acoustic streaming and its possible role. *J Endod* 1987; 13:490-9
- [76] Krell KV, Johnson RJ. Irrigation patterns of ultrasonic endodontic files. Part II. Diamond-coated files. *J Endod* 1988; 14:535-7
- [77] Krell KV, Johnson RJ, Madison S. Irrigation patterns during ultrasonic canal instrumentation. Part I. K-type files. *J Endod* 1988; 14:65-8
- [78] Baumgartner JC, Cuenin PR. Efficacy of several concentrations of sodium hypochlorite for root canal irrigation. *J Endod* 1992; 18:605-12

- [79] Martin H, Cunningham WT, Norris JP. A quantitative comparison of the ability of diamond and K-type files to remove dentin. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1980; 50:566-8
- [80] Weller RN, Brady JM, Bernier WE. Efficacy of ultrasonic cleaning. *J Endod* 1980; 6:740-3
- [81] Teplitzky PE, Chenail BL, Mack B et al. Endodontic irrigation – a comparison of endosonic and syringe delivery systems. *Int Endod J* 1987; 20:233-41
- [82] Jensen SA, Walker TI, Hutter JW et al. Comparison of the cleaning efficacy of passive sonic activation and passive ultrasonic activation after hand instrumentation in molar root canals. *J Endod* 1999; 25:735-8
- [83] Lee SJ, Wu MK, Wesselink PR. The effectiveness of syringe irrigation and ultrasonics to remove debris from simulated irregularities within prepared root canal walls. *Int Endod J* 2004; 37:672-8
- [84] Paragliola R, Franco V, Fabiani C et al. Final rinse optimization: influence of different agitation protocols. *J Endod* 2010;36:282-5
- [85] Ahmad M. Measurements of temperature generated by ultrasonic file in vitro. *Endod Dent Traumatol* 1990;6:230-1
- [86] Al-Jadaa A, Paqué F, Attin T et al. Necrotic pulp tissue dissolution by passive ultrasonic irrigation in simulated accessory canals impact of canal location and angulation. *Int Endod J* 2009;42:59-65
- [87] Zeltner M, Peters OA, Paqué F. Temperature changes during ultrasonic irrigation with different inserts and modes of activation. *J Endod* 2009;35:573-7
- [88] Macedo BG, Wesselink PR, Zacchero F et al. Reaction rate of NaOCl in contact with bovine dentine: effect of activation, exposure time, concentration and pH. *Int Endod J* 2010;43:1108-15
- [89] Cunningham WT, Martin H, Pelleu GB Jr et al. A comparison of antimicrobial effectiveness of endosonic and hand root canal therapy. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1982;54:238-41
- [90] Sjogren U, Sundqvist G. Bacteriologic evaluation of ultrasonic root canal instrumentation. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 1987;63:366-70
- [91] Abbott PV, Heijkoop PS, Cardaci SC et al. An SEM study of the effects of different irrigation sequences and ultrasonics. *Int Endod J* 1991;24:308-16
- [92] Briseno BM, Wirth R, Hamm G et al. Efficacy of different irrigation methods and concentrations of root canal irrigation solutions of bacteria in the root canal. *Endod Dent*

Traumatol 1992;8:6-11

[93] Huque J, Kota K, Yamaga M et al. Bacterial eradication from root dentine by ultrasonic irrigation with sodium hypochlorite. *Int Endod J* 1998;31:242-50

[94] Mayer BE, Peters OA, Barbakow F. Effects of rotary instruments and ultrasonic irrigation on debris and smear layer scores: a scanning electron microscopic study. *Int Endod J* 2002;35:582-9

[95] Moorer WR, Wesselink PR. Factors promoting the tissue dissolving capability of sodium hypochlorite. *Int Endod J* 1982;215:187-96

[96] Cheung GS, Stock CJ. In vitro cleaning ability of root canal irrigants with and without endosonics. *Int Endod J* 1982;26:334-43

[97] Van der Sluis LW, Verslius M, Wu MK et al. Passive ultrasonic irrigation of the root canal: a review of the literature. *Int Endod J* 2007;40:415-26

[98] Nusstein J. Ultrasonic dental device. Washington DC: U.S. Patent: 2005, pp. 6,948,935

[99] Gutarts R, Nusstein J, Reader A et al. In vivo debridement efficacy of ultrasonic irrigation following hand-rotary instrumentation in human mandibular molars. *J Endod* 2005;31:166-70

[100] Burleson A, Nusstein J, Reader A et al. The in vivo evaluation of hand/rotary/ultrasound instrumentation in necrotic, human mandibular molars. *J Endod* 2007;33:782-7

[101] Carver K, Nusstein, Reader A et al. In vivo antibacterial efficacy of ultrasound after hand and rotary instrumentation in human mandibular molars. *J Endod* 2007;33:1038-43

[102] Tronstad L, Barnett F, Schwartzben L et al. Effectiveness and safety of a sonic vibratory endodontic instrument. *Endod Dent Traumatol* 1985;1:69-76

[103] Pitt WG. Removal of oral biofilm by sonic phenomena. *Am J Dent* 2005;18:345-52

[104] Stamos DE, Sadeghi EM, Haasch GC et al. An in vitro comparison study to quantitate the debridement ability of hand, sonic, and ultrasonic instrumentation. *J Endod* 1987;13:434-40

[105] Sabins RA, Johnson JD, Hellstein JW. A comparison of the cleaning efficacy of short-term sonic and ultrasonic passive irrigation after hand instrumentation in molar root canals. *J Endod* 2003;29:674-8

[106] Jiang LM, Verhaagen B, Versluis M et al. Evaluation of a sonic device designed to activate irrigant in the root canal. *J Endod* 2010;36:143-6

[107] Lussi A, Nussbächer U, Grosrey J. A novel noninstrumented technique for cleansing the root canal system. *J Endod* 1993;19:549-53

[108] Fukumoto Y, Kikuchi I, Yoshioka T et al. An ex vivo evaluation of a new root canal

- irrigation technique with intracanal aspiration. *Int Endod J* 2006;39:93-9
- [109] Nielsen BA, Craig Baumgartner J. Comparison of the EndoVac system to needle irrigation of root canals. *J Endod* 2007;33:611-5
- [110] Susin L, Liu Y, Yoon JC et al. Canal and isthmus debridement efficacies of two irrigant agitation techniques in a closed system. *Int Endod J* 2010;43:1077-90
- [111] Hockett JL, Dommisch JK, Johnson JD et al. Antimicrobial efficacy of two irrigation techniques in tapered and nontapered canal preparations: an in vitro study. *J Endod* 2008;34:1374-7
- [112] Hauser V, Braun A, Frentsen M. Penetration depth of a dye marker into dentine using a novel hydrodynamic system (RinsEndo). *Int Endod J* 2007;40:644-52
- [113] McGill S, Gulabivala K, Mordan N et al. The efficacy of dynamic irrigation using a commercially available system (RinsEndo) determined by removal of a collagen “bio-molecular film” from an ex vivo model. *Int Endod J* 2008;41:602-8
- [114] Kimura Y, Wilder-Smith P, Matsumoto K. Lasers in endodontics: a review. *Int Endod J* 2000;33:173-85
- [115] De Moor RJ, Meire M, Goharkhay K et al. Efficacy of ultrasonic versus laser-activated irrigation to remove artificially placed dentin debris plugs. *J Endod* 2010;36:1580-3
- [116] Yamazaki R, Goya C, Yu DG et al. Effects of erbium, chromium: YSGG laser irradiation on root canal walls: a scanning electron microscopic and thermographic study. *J Endod* 2001;27:9-12
- [117] Kimura Y, Yonaga K, Yokoyama K et al. Root surface temperature increase during Er:YAG laser irradiation of root canals. *J Endod* 2002;28:76-8
- [118] George R, Meyers IA, Walsh LJ. Laser activation of endodontic irrigants with improved conical laser fiber tips for removing smear layer in the apical third of the root canal. *J Endod* 2008;34:1524-7
- [119] George R, Walsh LJ. Apical extrusion of root canal irrigants when using Er:YAG and Er,Cr:YSGG lasers with optical fibers: an in vitro dye study. *J Endod* 2008; 34:706-8
- [120] Blanken J, Verdaasdonk R. Cavitation as a working mechanism of the Er, Cr:YSGG laser in endodontics: a visualization study. *J Oral Laser Appl* 2007; 7:97-106
- [121] Fimple JL, Fontana CR, Foschi F et al. Photodynamic treatment of endodontic polymicrobial infection in vitro. *J Endod* 2008; 34:728-34
- [122] George S, Kishen A. Advanced noninvasive light-activated disinfection: assesment of citotoxicity on fibroblast versus antimicrobial activity against *Enterococcus faecalis*. *J Endod* 2007; 33:599-602
- [123] Pagonis TC, Chen J, Fontana CR et al. Nanoparticle-based endodontic antimicrobial

2. FISICA DEI LASER

2.1 - CENNI STORICI

L. A. S. E. R. è l'acronimo di *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, vale a dire amplificazione della luce mediante l'emissione stimolata di radiazione.

La storia dello sviluppo del laser inizia dagli studi di M. Planck, relativi alla fisica del corpo nero (1901), e da quelli teorici di A. Einstein (1916), sull'emissione stimolata delle radiazioni (studi compresi nella sua teoria quantistica dell'emissione e dell'assorbimento, per la quale ricevette il premio Nobel nel 1917).

Già nel 1954 Townes, Gordon e Zeiger (Columbia University, New York), e indipendentemente Basov e Prokhorov (Lebedev Institute, Mosca), riuscirono a realizzare i primi amplificatori per microonde basati sul processo di emissione stimolata, che furono chiamati MASER (*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Ciò che permise ai gruppi di far prevalere l'emissione stimolata sull'assorbimento fu la cosiddetta "inversione di popolazione", cioè la preparazione delle molecole in modo che siano praticamente tutte in uno stato eccitato anziché in quello fondamentale. Il mezzo attivo in cui i due gruppi di ricerca riuscirono a creare l'inversione di popolazione fu l'ammoniaca: le poche molecole eccitate venivano estratte elettrostaticamente da un fascio molecolare e accumulate all'interno di una cavità risonante. In questo modo, una diseccitazione spontanea emetteva radiazione che provocava la diseccitazione stimolata delle molecole vicine, innescando un processo a valanga che portava in brevissimo tempo alla diseccitazione globale del mezzo, con l'emissione di un intenso lampo di microonde praticamente monocromatiche. Particolarità della radiazione prodotta era la coerenza: infatti il processo di emissione stimolata garantisce una relazione ben definita tra la fase della luce stimolante e quella emessa (i fotoni sono esattamente in fase). Dopo la diseccitazione l'ammoniaca si trovava per definizione nello stato fondamentale; cessava quindi la condizione indispensabile per avere l'emissione stimolata.

In questo modo non era possibile ottenere radiazione continua, ma solo impulsi. Per queste ricerche Basov, Prokhorov e Townes ricevettero il Nobel per la Fisica nel 1964. Naturalmente era auspicabile un'emissione continua di microonde: serviva un sistema in grado di mantenere nel tempo l'inversione di popolazione, cioè un mezzo con molti livelli

eccitati accessibili e un meccanismo che li ripopolasse in continuazione. Furono Masov, Kikuchi, Lambe e Terhune a presentare un maser a stato solido che generava radiazione continua. Grazie ad un'idea di Bloembergen (*Physical Review*, 1956) era possibile ripopolare in continuazione gli stati elettronici eccitati, ottenendo radiazione continua.

La prima idea di un LASER vale a dire di un maser in grado di operare nella regione visibile dello spettro elettromagnetico (la parola laser è infatti un acronimo simile a maser, dove il termine *Microwave* è sostituito da *Light*), fu pubblicata nel 1958 sulla rivista americana *Physical Review* in un articolo a firma di Townes e Schawlow. La costruzione di un laser funzionante, tuttavia, non fu immediata.

Fu solo nel 1960 che Theodor Maiman dei Laboratori di Ricerca della Hughes Corporation (USA) riuscì a realizzare il primo laser. Si trattava di un laser impulsato ottenuto sfruttando un cilindro di rubino posto fra due specchi. Il pompaggio era di tipo ottico e veniva realizzato mediante un intenso flash luminoso generato con una lampada a scarica di forma elicoidale posta attorno alla barra di rubino. Come nei primi maser, la diseccitazione per emissione spontanea di un fotone innescava il processo di emissione stimolata e la conseguente generazione di un impulso luminoso ulteriormente amplificato dalla risonanza ottica fra i due specchi. Il primo laser in grado di produrre una emissione continua di luce (anziché singoli impulsi) fu realizzato verso la fine del 1960 da Ali Javan, William Bennet e Donald Herriot. I tre ricercatori dei Laboratori Bell (USA) realizzarono un dispositivo che sfruttava come mezzo attivo una miscela di due gas nobili: l'Elio e il Neon (per questo motivo il laser prese il nome di laser HeNe). Anche il funzionamento era radicalmente diverso dal dispositivo precedentemente sviluppato da Maiman. L'eccitazione del mezzo attivo, infatti, era realizzata mediante una scarica elettrica (anziché un lampo luminoso) e sfruttava un processo detto "trasferimento risonante di eccitazione" basato sul trasferimento di energia mediante urti fra molecole di tipo diverso. Questi livelli, infine, sono soggetti al fenomeno di diseccitazione per emissione stimolata e conseguentemente generano un'emissione di radiazione coerente mediante decadimento su altri due livelli di energia inferiore.

Dopo il laser a gas, una pietra miliare fu segnata dai dispositivi a semiconduttore, presentati nel 1962 da quattro gruppi indipendenti guidati da Hall (General Electric Research Development Center, Schenectady, New York), Nathan (IBM Research Laboratory, Yorktown Heights, New York), Holonyak (General Electric Syracuse, New York) e Rediker (MIT Lincoln Laboratory, Lexington Massachusetts). Si trattava di giunzioni p-n (*strato p*: eccedenza di lacune; *strato n*: eccesso di elettroni) all'arseniuro di gallio, che generavano radiazione coerente nell'infrarosso quando percorse da correnti elevate. Il funzionamento di

questo tipo di dispositivi (diodi laser), essendo sostanzialmente dei diodi, è radicalmente diverso dagli altri laser, sebbene ovviamente sia sempre basato sul processo descritto da Einstein. In condizioni normali gli elettroni del mezzo si trovano praticamente tutti nella banda di valenza, e la banda di conduzione è quasi vuota; in queste condizioni il materiale è un cattivo conduttore. Sottoponendolo ad un'intensa eccitazione elettrica è possibile però innescare la produzione di coppie lacuna-elettrone, facendo salire in banda di conduzione molti elettroni, svuotando quindi la banda di valenza, fenomeno che rappresenta proprio un'inversione di popolazione. A questo punto alcuni elettroni ricadono spontaneamente nella banda di valenza per ricombinarsi con delle lacune, emettendo quanti di energia pari al salto energetico tra le bande; tale radiazione stimola la diseccitazione di altri elettroni, innescando la valanga di diseccitazione stimolata che produce la radiazione coerente. Laser di questo tipo sono più compatti e consumano meno dei modelli a gas, ma ovviamente non possono raggiungere le loro potenze.

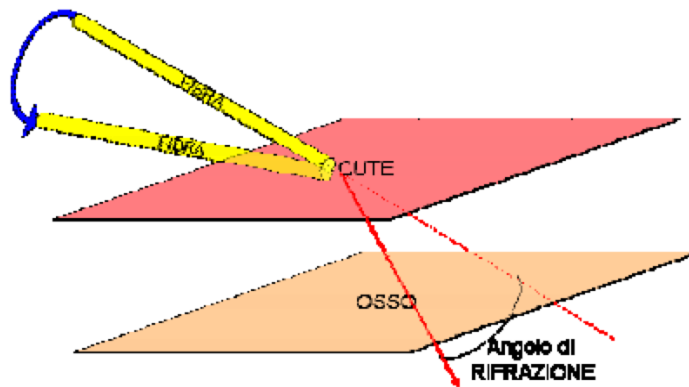
Sin dal 1962 si iniziò ad utilizzare il laser in oculistica per fotocoagulare le retinopatie. Nel 1971 Weichmann e Johnsonn eseguirono con un laser a CO₂ la prima applicazione in endodonzia, cercando di realizzare un sigillo apicale radicolare. Nel 1972 Weichmann iniziò gli studi sull'impiego in odontoiatria del laser al Neodimio (Nd: YAG).

2.2 - PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO

Il principio di funzionamento dell'apparecchiatura laser consiste nel produrre un fascio collimato di fotoni (luce), molto omogeneo in lunghezza d'onda e di potenza perfettamente controllabile, generato come amplificazione di un input di fotoni, che ne stimolano l'emissione. I laser sono classificati, e trovano il loro campo d'applicazione, sulla base della lunghezza d'onda del raggio di fotoni emesso (che spesso non si tratta di luce visibile dall'occhio umano).

L'applicazione medica sfrutta la proprietà dei vari tessuti biologici di assorbire in modo diverso le varie lunghezze d'onda e quindi di subire azioni specifiche.

La struttura biologica, che in modo selettivo assorbe l'energia convogliata dal fascio emesso dal laser, può persino essere distrutta, lasciando intatti gli altri tessuti circostanti. In generale i raggi con lunghezza d'onda appartenente allo spettro della luce visibile sono assorbiti dai pigmenti presenti nell'emoglobina e nella melanina, mentre quelli a lunghezza d'onda maggiore (infrarosso) sono assorbiti sia dall'acqua sia dai cristalli dell'idrossiapatite (la frazione mineralizzata dell'osso).



È la rapidissima evaporazione dell'acqua (sempre presente in ogni tipo di tessuto, da quelli molli alla dentina ed allo smalto) che produce la distruzione del tessuto irradiato.

I vantaggi e le buone prestazioni ottenibili sono funzioni strettamente dipendenti dalle interazioni tra le proprietà fisiche dei tessuti e le caratteristiche della lunghezza d'onda del fascio di luce emesso dal laser. La sua azione di tipo fototermico (energia luminosa che si converte in calore secondo meccanismi differenti), comporta effetti differenti sull'acqua contenuta nei vari tessuti, sui pigmenti (melanina, emoglobina ecc.) e sull'idrossiapatite.

Inoltre, non bisogna dimenticare che questi meccanismi, (sebbene seguano tipologie d'azione ben distinte), spesso sono tra loro combinati, con una compresenza di meccanismi sovrapposti, dove uno prevale sugli altri; ignorarlo può condurre a risultati assolutamente difforni da quelli desiderati dall'operatore e assai spiacevoli per il paziente.

Ne consegue che un solo tipo di laser non può lavorare in modo ideale sia sui tessuti duri, sia su quelli molli: alcuni sistemi laser possono operare indipendentemente su entrambi, mentre altri limitano il loro intervento ai molli, altri ancora si presentano sufficientemente "bivalenti" (ma pur sempre con marcate predisposizioni a prestazioni particolari).

Deve quindi essere chiaro, che il termine laser indica un gruppo di strumenti che possono essere assai differenti tra loro, principalmente per la lunghezza d'onda del fascio di luce emessa, ma anche in funzione delle potenze che sono in grado di fornire, nonché dei differenti accessori che consentono le specifiche prestazioni.

2.3 - PRINCIPI FISICI DI FUNZIONAMENTO DELL'APPARECCHIO LASER

Il modello nucleare dell'atomo di Bohr (1913), indica che ogni atomo si può ritenere costituito da un nucleo attorno al quale ruota un certo numero di elettroni, occupanti delle orbite caratteristiche in funzione del livello energetico posseduto dall'atomo. Quando gli elettroni occupano le orbite più vicine al nucleo, l'atomo si trova al suo "stato fondamentale".

Quando gli elettroni occupano orbite di diametro maggiore, per una qualunque assunzione energetica, l'atomo si trova in uno "stato eccitato".

L'incremento dell'orbita si produce perché aumenta l'energia cinetica di rotazione degli elettroni. È sempre possibile per gli elettroni tornare su orbite più interne semplicemente riducendo l'energia posseduta (emissione fotonica). Pertanto, si possono produrre spontaneamente i fenomeni di:

- *Assorbimento*: quando una radiazione elettromagnetica, incidente sull'atomo allo stato fondamentale, lo porta al livello eccitato cedendogli energia.
- *Emissione*: quando l'atomo passa dal livello eccitato a quello fondamentale, tramite emissione d'energia dall'atomo verso l'esterno, sotto la forma di radiazione elettromagnetica.

La teoria quantistica suggerisce che l'energia emessa/assorbita in questi passaggi, chiamati *transizioni*, è ripartita in aggregati di dosi indivisibili detti *quanti* e, nel caso specifico della luce, *fotoni*. Il fotone ha una natura ondulatoria, quindi è emesso con una lunghezza d'onda, in funzione della sua energia (dipendente della differenza tra il livello raggiunto dallo stato "eccitato" rispetto a quello "fondamentale" dell'atomo emettitore).

Oltre ai meccanismi spontanei descritti è possibile produrre un altro fenomeno, quello dell'*emissione indotta o stimolata*. Quest'ultimo si produce negli atomi eccitati che sono colpiti da fotoni aventi un contenuto energetico pari alla differenza dei possibili livelli energetici nell'atomo stesso, in questo caso l'atomo emette un fotone per poi ridursi al livello energetico inferiore conseguente. Il primo fotone, dopo l'urto, continua il suo cammino e ripete il fenomeno ad ogni successiva collisione, generando ulteriori fotoni con lunghezze d'onda e fase identiche a quella del fotone incidente.

In pratica la radiazione incidente, per il fatto di colpire un atomo eccitato, anziché essere semplicemente assorbita induce un processo d'emissione di un fotone.

Il principio di funzionamento del L.A.S.E.R. si basa proprio sul fenomeno dell'emissione di energia, stimolata da fotoni, da parte degli atomi eccitati. L'eccitazione dell'atomo si ottiene facendogli assorbire un fotone di frequenza, che lo porta dallo stato fondamentale ad un livello energetico superiore: $E = \nu \cdot h$ (h è la costante di Planck).

Tale stato è però instabile e l'atomo tende a tornare allo stato fondamentale, tramite l'emissione spontanea di un fotone il cui contenuto di energia è pari a quella necessaria per raggiungere lo stato eccitato.

La conseguenza del ripetersi di tale evento è la creazione di un fascio intensificato

(amplificato) di fotoni, di identica lunghezza d'onda, con le oscillazioni tutte perfettamente concordi.

Tale fascio di luce è detto coerente mentre il meccanismo che lo genera è definito *emissione stimolata*. Il procedimento è applicabile ad ogni forma di radiazioni elettromagnetiche essendo sufficiente sostituire ai fotoni dei quanti d'energia di lunghezza d'onda diversa.

L'aspetto operativo pratico, fondamentale per produrre un'amplificazione, è la necessità di avere sostanze con abbondanza d'atomi a stati energetici elevati, mentre nelle normali condizioni d'equilibrio termico prevalgono invece gli atomi allo stato fondamentale.

Quindi, in natura, il fenomeno dell'assorbimento dei fotoni è prevalente su quello dell'emissione stimolata.

Per tale motivo bisogna procedere alla "*inversione della popolazione*", che consiste nel realizzare la prevalenza degli stati energetici elevati su quello fondamentale. Ciò si ottiene prima selezionando opportune sostanze bersaglio e poi portandole a valori energetici superiori, mediante radiazioni eccitatrici (tecnica del "*pompaggio*"). Per mezzo dell'inversione della popolazione la situazione che si ottiene è assolutamente instabile ed in caso di cessazione del pompaggio si ristabilisce immediatamente l'equilibrio termodinamico (prossimo allo stato fondamentale).

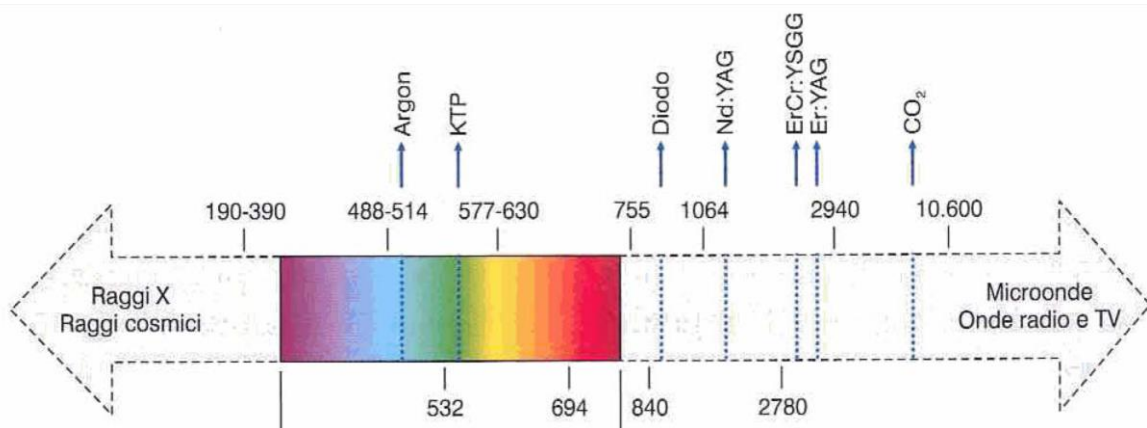
Una volta effettuata l'inversione di popolazione, ogni fotone incidente sul materiale origina un secondo fotone. Quando una parte di questi fotoni è rimessa in ciclo, il guadagno conseguente è elevatissimo e con un piccolo segnale iniziale si ottiene un'uscita molto elevata.

La retroazione dei fotoni avviene in quella che è denominata "*cavità risonante*" del laser, costituita da un contenitore con pareti riflettenti e da una piccola uscita per l'estrazione mirata dei fotoni. La geometria e le dimensioni della scatola (interferometro di Fabry-Perot) sono fondamentali in quanto le onde riflesse si devono sommare in fase con l'onda incidente (il lato della scatola deve essere un multiplo esatto della lunghezza d'onda λ della radiazione).

Da quanto detto si è detto è chiaro che il laser trasforma l'energia d'alimentazione in una forma specifica di radiazione elettromagnetica coerente, non necessariamente limitata al solo spettro del visibile.

Lo spettro dei colori, dal viola al rosso, e quindi della luce visibile all'occhio umano, comprende lunghezze d'onda che vanno dai 400 ai 700 nm. Lunghezze d'onda inferiori ai 400 nm danno origine a quella parte dello spettro, "ultravioletto", che si pone prima dei colori percepibili dall'occhio umano; esse sono le radiazioni ionizzanti (raggi X) ed i raggi cosmici. Oltre il campo del visibile (lunghezze d'onda superiori ai 700 nm), vi è l'area degli

“infrarossi”, che si estende fino alle microonde e alle onde utilizzate per le telecomunicazioni (radiazioni non ionizzanti).



Riassumendo si può affermare che l'unico parametro che differenzia le radiazioni elettromagnetiche è la loro lunghezza d'onda; la distinzione in classi specifiche è condotta principalmente in base al settore delle loro utilizzazioni.

2.4 - PARAMETRI CHE CARATTERIZZANO E DESCRIVONO LE ONDE ELETTRROMAGNETICHE

La lunghezza d'onda è definita come lo spazio percorso dall'onda nella direzione della propagazione nel tempo necessario a compiere una completa pulsazione (in altre parole, lo spazio che intercorre tra due massimi). Le onde che oscillano più lentamente sono quelle a maggior lunghezza d'onda e viceversa. L'unità di misura di λ è il metro, ma spesso conviene utilizzare i suoi sottomultipli come il “micron” (μm), ed il “nanometro” (nm).

Energia → È comunemente la capacità di compiere un lavoro. L'unità di misura è il Joule.

Frequenza → Indica il numero delle ripetizioni (oscillazioni) nell'unità di tempo (secondo), sviluppate dalla forma d'onda in esame; tale grandezza ha come unità di misura l'Hertz (Hz) ed è indicata con il simbolo ν .

Intensità → Indica il rapporto tra la potenza emessa e l'area che riceve energia. Viene calcolata con la formula W/cm^2 . L'intensità può variare secondo la superficie.

Potenza → Secondo la definizione classica della fisica (lavoro fatto nell'unità di tempo), esprime la quantità d'energia trasferita nell'unità di tempo (secondo) dalla radiazione

elettromagnetica; la sua unità di misura è il Watt (W). Ricordando che l'energia si misura in Joule (J), ne segue che 1 W rappresenta il trasferimento di 1 J per secondo.

Fluenza → Termine assai diffuso anche se “densità d'energia” è certamente preferibile, che vuole esprimere il concetto di trasferimento dell'energia sull'unità d'area (1 cm²) investita dalla radiazione. L'unità di misura sarà quindi lo J/cm².

Velocità → Rappresenta lo spazio percorso dall'onda nel tempo di un secondo (indipendentemente dalla frequenza dell'onda V è sempre eguale alla velocità di: 300.000 km/s).

2.5 – PROPRIETA' FONDAMENTALI DELLA LUCE LASER

Coerenza → Trasmissione dell'energia su un'unica lunghezza d'onda (o frequenza) con perfetta concordanza di fase tra tutte le onde emesse.

Collimazione o direzione → È conseguenza della propagazione del raggio laser in un'unica direzione, con piccolissimo raggio di divergenza (detta larghezza del fascio laser).

Pulsazione → Le radiazioni del laser possono essere emesse costituendo un fascio costante nel tempo oppure modulate secondo impulsi alternati da pause.

Durata variabile dell'impulso → Ottenuta mediante la modulazione del raggio eseguita con particolari tecniche. Per conoscere la caratteristica della pulsazione occorre definire la *durata dell'impulso* (dell'ordine dei microsecondi o meno), cioè la frazione di tempo in cui si emette energia, e la *frequenza di ripetizione dell'impulso* (espressa in Herz) intesa come numero delle volte che, in 1 sec, si produce l'emissione pulsata. Si fa riflettere sul fatto che la semplice conoscenza della pulsazione non consente (attraverso il periodo) di definire la durata dell'impulso, che occorre invece definire in maniera specifica.

Monocromaticità → Poiché la luce laser è trasmessa su un'unica caratteristica lunghezza d'onda, nel caso sia stimolata nello spettro del visibile avrà una ben definita qualità cromatica e non potrà essere scomposta nell'attraversamento di prismi ottici. L'espressione è utilizzata anche nel caso di lunghezza d'onda non appartenente al visibile (il termine equivalente è monofrequenza).

Come già precedentemente detto, l'unico parametro che differenzia le radiazioni elettromagnetiche è rappresentato dalla lunghezza d'onda: la distinzione in classi specifiche è condotta principalmente in base al settore di utilizzo.

Nel caso dell'emissione pulsata, la potenza media nell'unità di tempo (in Watt), si dovrà calcolare come il prodotto dell'energia totale veicolata in un singolo impulso (in Joule) moltiplicata per la frequenza d'emissione (in Hertz). Si può anche definire una potenza di picco, dividendo l'energia dell'impulso per la durata temporale dell'impulso stesso. Nei laser pulsati è molto importante la durata dell'impulso perché è inversamente proporzionale alla potenza di picco.

L'uso del laser pulsato è associato alla necessità di evitare il pericolo del danno termico, reso possibile dalla generazione di elevate temperature da parte del laser stesso e fonte di rischio nella pratica clinica.

Il laser produce il suo effetto sulle cellule dei tessuti biologici quando l'energia emessa è assorbita dall'acqua contenuta nei tessuti stessi.

Il rilascio dell'energia determina l'istantanea vaporizzazione dell'acqua all'interno delle cellule, generando vapore in pressione capace di distruggere le strutture ormai disidratate. Contemporaneamente avviene anche la trasmissione di calore attorno alla zona direttamente irradiata, per il meccanismo della conduttività termica del tessuto (ad esempio lo smalto irradiato può raggiungere temperature comprese tra 200°-1000° C).

Di conseguenza, dovendo trasferire una certa quantità di energia ai tessuti in lavoro, in contemporanea viene trasferita ai tessuti circostanti una certa ed indesiderata quantità di calore, che è funzione diretta della durata temporale della somministrazione di lavoro.

Si può minimizzare tale l'effetto termico impiegando un laser capace di emettere impulsi di breve durata e di elevata potenza di picco; più dannoso sarebbe il ricorso a impulsi di bassa potenza e di lunga durata per somministrare la stessa quantità d'energia, come ampiamente dimostrato dalla ricerca.

2.6 – ELEMENTI COSTITUTIVI DEI SISTEMI LASER

L'architettura di un sistema laser fa riferimento ad un numero modesto di elementi fondamentali:

- mezzo attivo
- cavità di risonanza (o cavità di risonanza ottica)
- sistema di pompaggio (sorgente d'energia)

Il MEZZO ATTIVO è il materiale, ossia il complesso di atomi/molecole che, portato dallo stato fondamentale a quello eccitato, produce l'emissione di energia. Lo stato di aggregazione fisica di tale materiale è utilizzato come termine di distinzione per la denominazione dei differenti tipi di laser commerciali: in funzione della natura del mezzo attivo impiegato si distinguono *laser allo stato solido*, *liquido* e *gassoso*, nonché *a semiconduttori* e *ad elettroni liberi*.

Laser allo stato solido → Il supporto del mezzo attivo è costituito da barrette di vetro, o da monocristalli puri, che sono drogati con atomi di elementi attivi (in generale metalli di transizione delle terre rare: Neodimio, Erblio, Cromo, Olmio, Titanio, cioè i veri emettitori della luce laser). Esempi tipici di laser appartenenti a tale categoria sono:

- *Rubino* → (quello storico di Maiman), a luce rossa con $\lambda = 694,3$ nm
- *Neodimio-YAG* → barretta di granato d'Ittrio e Alluminio drogato al Neodimio, caratterizzato da $\lambda = 1064$ nm (appartenente allo spettro dell'infrarosso $\lambda > 700$ nm)
- *Erblio-YAG* → barretta di granato d'Ittrio e Alluminio drogato all'Erblio, caratterizzato da $\lambda = 2940$ nm (appartiene allo spettro dell'infrarosso).

Il pompaggio è di tipo ottico, mediante lampada a largo spettro.

Possono essere raggiunte potenze di emissione molto elevate, specialmente ricorrendo alla tecnica pulsata, però i rendimenti si mantengono molto bassi (non superando mai il 10%).

Laser allo stato liquido → Concettualmente si differenzia dal precedente solamente perché il supporto degli elementi attivi è costituito da un liquido e non da un solido.

Come mezzo attivo vengono utilizzati un colorante organico disciolto in acqua od alcool, (i più comuni sono Rodamina 6G, Curarina e Xantene), oppure derivati di terre rare. Agendo sul livello di diluizione del colorante è possibile ottenere una vasta banda di lunghezze d'onda; questo attribuisce gran flessibilità a tale famiglia di laser.

Il pompaggio è di tipo ottico: lampada o raggio Laser.

Questo tipo di laser è caratterizzato da emissione su banda larga e sviluppa potenza limitata; la sua efficienza non giunge allo 0,1%.

Laser allo stato gassoso → Il mezzo attivo può essere costituito da un singolo gas come da una miscela. Le soluzioni costruttive più comuni ricorrono a miscele d'Elio e Neon (He-Ne) (valori di $\lambda = 3390; 1152$ e $632,8$ nm, dall'infrarosso al rosso visibile), in cui l'elemento attivo è il Ne, al quale gli atomi dell'He trasferiscono l'energia che hanno assorbito subendo scariche elettriche; oppure ad Anidride Carbonica ed Argon (CO₂-Ar), oppure ancora ad

Anidride Carbonica (specie laser attiva) con Azoto ed Elio. Si ricorre a contenitori cavi, che fungono da serbatoi per le miscele gassose, dotati agli estremi di elettrodi utilizzati per generare le scariche elettriche con cui sono eccitati gli atomi del gas. Il vantaggio dei laser a gas è quello di poter operare in continuità per lunghi periodi.

Laser a semiconduttori o a Diodi → Il mezzo attivo consiste in strati di materiale semiconduttore di differente natura (simili a quelli impiegati nei transistori); tra i più utilizzati si ricorda il Gallio-Arsenico, “drogato” con atomi d’Alluminio.

I semiconduttori sono delle strutture che presentano al loro interno zone a differenti livelli energetici, dette “bande”; la banda di valenza (banda riempita) ha il livello energetico più elevato e la banda di conduzione (banda vuota) uno inferiore e per l’agitazione termica degli elettroni possono passare dalla banda di valenza a quella di conduzione. Il passaggio provoca delle lacune (mancanza di cariche elettriche) nella banda di valenza, che si comportano come portatori di cariche positive.

Il meccanismo tipico del laser, assorbimento ed emissioni di fotoni, è quindi realizzato nel diodo con l’interazione elettrone-lacuna e l’emissione è appunto funzione della presenza di un numero elevato di elettroni nella banda di conduzione e di un numero elevato di lacune nella banda di valenza.

I laser a semiconduttori o a diodi raggiungono rendimenti elevati (efficienza media del 65%) e sono quelli dalle dimensioni più ridotte, ma non possono fornire potenze elevate.

Quest’ultima caratteristica, sebbene limitativa in molte applicazioni industriali, non è assolutamente pregiudizievole per l’uso in campo medico.

La CAVITÀ DI RISONANZA OTTICA, di cui si è già accennato, realizza l’amplificazione del segnale.

Questo avviene grazie a due specchi parabolici, di cui uno, a riflessione totale (100%), ha il compito di selezionare i fotoni che si dirigono nella stessa direzione, ed un secondo, a riflessione parziale (95%), consente l’emissione del raggio laser attraverso una feritoia sottilissima. La riflessione parziale del secondo specchio crea una cavità ottica risonante e i raggi riflessi amplificano i raggi emessi dalla sorgente laser. Affinché i raggi risultino in concordanza di fase, è indispensabile che la distanza tra i due specchi sia un multiplo esatto della lunghezza d’onda dell’emissione dei fotoni.

La presenza della camera ottica attribuisce al raggio laser le proprietà della coerenza spaziale e della collimazione, descritte precedentemente. Grazie a queste due ultime proprietà, la radianza di una sorgente laser è sempre elevata anche se la potenza radiante è modesta (un

laser He-Ne di potenza pari 0.001 W ha una radianza 100 volte superiore a quella della superficie del globo solare).

La SORGENTE DI ENERGIA ha il compito di eccitare gli atomi del mezzo attivo aumentandone il livello d'energia, stimolandoli fino a creare un sistema metastabile per il verificarsi dell'inversione di popolazione, prima descritta.

Tra le sorgenti d'energia d'uso più comune vanno ricordate:

- *Lampade flash allo Xenon*: particolarmente utilizzate nel laser allo stato solido e liquido. Consentono l'emissione su banda continua di frequenze che possono essere selezionate introducendo nella cavità ottica un reticolo di diffrazione. Per questo vengono anche detti anche "laser accordabili"
- *Scariche elettriche ad alto voltaggio, ottenute tra elettrodi*: sono tipiche del laser a gas. Nel laser He-Ne la scarica elettrica produce la ionizzazione dell'Elio che, per fenomeni di collisione tra le particelle, trasferisce l'eccitazione al Neon. Il principio di provocare l'eccitazione indiretta, attraverso la ionizzazione primaria dell'Elio, è utilizzato anche per ottenere il raggio laser partendo da diversi vapori metallici. L'effetto più potente, tramite l'eccitazione diretta con scariche elettriche, si ottiene nel laser a CO₂
- *Sistema "gas-dinamico"*: applicabile solo ai laser a gas, consiste in una combustione dei gas seguita da un'espansione dei prodotti di combustione fino a velocità supersonica
- *Sistema "chimico"*: applicabile sempre solo al laser a gas, prevede reazioni chimiche tra le varie miscele gassose
- *Altro laser, o serie di più laser impiegati in cascata.*

2.7 – MODALITA' DI EMISSIONE DELLA LUCE LASER

Le modalità di emissione della luce laser sono assai varie e si differenziano in base all'utilizzo a cui è destinato l'apparecchio stesso.

Nell'odontoiatria sono impiegate praticamente tutte le forme d'emissione, comprendendo quella "continua", "pulsata" e "superpulsata".

Modalità continua

Trova la massima diffusione nell'ambito delle applicazioni chirurgiche e si caratterizza per la possibilità di fornire un'emissione della radiazione laser continua e costante; trova la massima diffusione, come modalità d'emissione, nei Laser a semiconduttore. Questo tipo d'emissione consente di realizzare nella pratica un vero e proprio bisturi ottico che, guidato

da mani esperte, è in grado di eseguire tutti gli interventi tipici della piccola chirurgia delle mucose orali, con la massima sensazione di comfort per il paziente.

Modalità pulsata e superpulsata

Entrambe le modalità, tipiche del laser allo stato solido (Nd:YAG; Er:YAG) e gassoso CO₂, sono costituite da sequenze d'impulsi di brevissima durata: millisecondi nella modalità pulsata fino a nanosecondi in quella superpulsata potendo raggiungere picchi d'energia emessa molto elevati ogni singolo impulso.

La durata così breve dell'impulso consente di eseguire piccoli interventi di chirurgia spesso senza l'anestesia; questo perché le pulsazioni del laser (che costituiscono degli stimoli) sono di durata inferiore ai tempi necessari per lo sviluppo della percezione da parte dei recettori nervosi sensoriali.

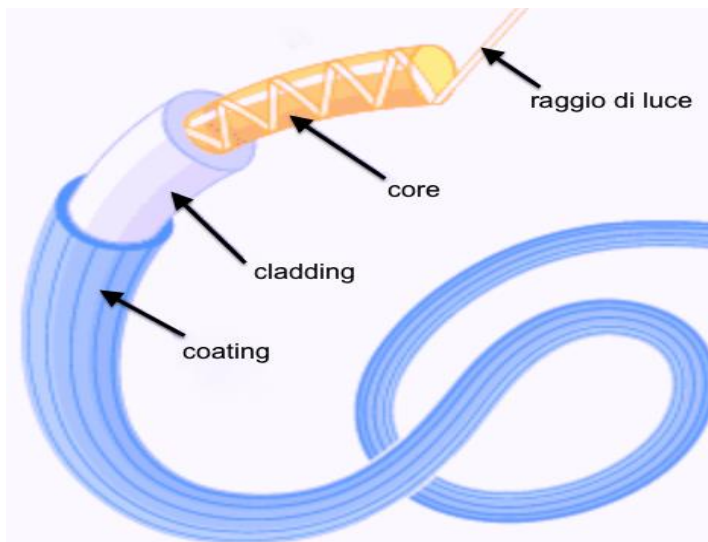
2.8 – SISTEMI DI CONDUZIONE DELLA LUCE LASER

Dopo la sua generazione la luce laser deve essere condotta dall'esterno dell'apparecchio fino al punto d'utilizzo pratico. Questa funzione può essere ottenuta con tecniche differenti, tra le quali ricorderemo sinteticamente le *fibre ottiche* (usate in particolare nei laser a diodi e Nd:YAG), le *fibre cave* ed i *bracci articolati*.

Per quanto riguarda le applicazioni del laser in odontoiatria, è importante notare che lo sviluppo dei sistemi di conduzione delle radiazioni rispetto a quello relativo ai sistemi di generazione delle stesse, non è stato meno importante. Basti pensare alle problematiche per raggiungere, in completa sicurezza, i siti più reconditi che si prospettano nella pratica operativa. Senza lo sviluppo di tali attrezzature, l'impiego del laser all'interno del cavo orale sarebbe stato impossibile.

Fibre ottiche

La singola fibra ottica è costituita da un'anima (*core*), in materiale dielettrico ad altissimo indice di rifrazione, dotato d'elevata flessibilità. L'anima è rivestita da una guaina (*cladding*) in materiale refrattario e a più basso indice di rifrazione, per minimizzare la dispersione della luce laser nel conduttore. Esiste infine un terzo strato esterno (*coating*), che protegge la fibra ottica vera e propria; viene realizzato in materiali plastici vari, ed ha il compito di creare una barriera di protezione contro le offese, principalmente di natura meccanica, provenienti dall'esterno.



Fibra ottica (modificata da Encyclopedia Britannica 2006)

Il raggio di luce che penetra nell'anima, quando l'angolo d'incidenza rispetto all'asse del conduttore non è superiore ad un definito valore critico, è totalmente riflesso dalla superficie di separazione creata dall'interfaccia tra anima e guaina di rivestimento. Il fenomeno avviene con rendimenti elevatissimi, quindi con perdite energetiche molto modeste, durante tutta la trasmissione.

La curvatura assunta dalle fibre lungo i percorsi tortuosi non impedisce la trasmissione della luce, viceversa influisce sul valore dell'angolo d'incidenza e quindi sul rendimento complessivo della trasmissione di energia. In ogni caso per mantenere il rendimento elevato è sufficiente realizzare le curve con ampi raggi. La luce riflessa sull'interfaccia anima-guaina di rivestimento (core-clad) penetra all'interno del rivestimento, per una profondità pari a mezza lunghezza d'onda della luce trasmessa, e questo condiziona la geometria della guaina (non potendo lo spessore essere inferiore a tale dimensione). Ne segue che, per data lunghezza d'onda trasmessa, si deve mantenere costante lo spessore del rivestimento al variare della sezione dell'anima (e quindi della fibra ottica in genere). Di fatto la riduzione della sezione dell'anima porta ad un minor trasporto di luce, ma a conduttori più flessibili.

Il diametro delle fibre ottiche, impiegate nei laser di utilizzo in odontoiatria, è generalmente compreso nell'intervallo dimensionale di 200÷600 μm . Riducendo il diametro della fibra può aumentare la fluensa (energia per unità di superficie), ma nel frattempo aumenta anche la fragilità della fibra.

La lunghezza di una fibra ottica è variabile e compresa nell'intervallo di 1,5÷4 m, permettendo così ogni soluzione di ergonomia soddisfacente e consentendo un sufficiente allontanamento della fonte luminosa dal sito dove si deve intervenire con la luce laser. Le fibre ottiche possono ridursi a semplici terminali, chiamati tip, delle dimensioni simili a

quelle delle frese da turbina, come per esempio nel laser Er:Yag.

2.9 – REGOLE PRATICHE PER L'UTILIZZO

L'efficienza di un qualunque sistema laser dipende in modo imprescindibile dalla qualità del mezzo di trasporto della radiazione generata dal laser stesso.

Questo costringe a rispettare una serie di regole pratiche d'utilizzo del sistema di fibre ottiche per raggiungere i risultati desiderati.

Controllo dello spot

Si deve verificare che lo spot della luce laser sia di forma perfettamente circolare e d'intensità uniforme, utilizzando il colore della luce guida (generalmente un *led* di colore rosso della lunghezza d'onda di 632,8nm, laser He-Ne e potenza non superiore a 5mW) che serve a indirizzare il fascio laser invisibile (infrarosso) sul bersaglio desiderato.

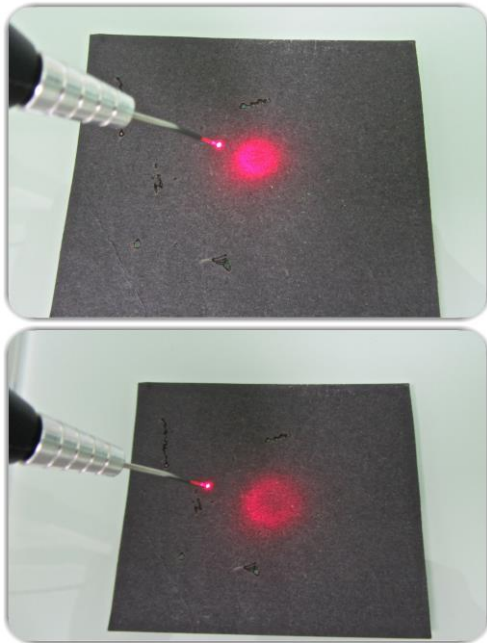
Qualità e regolarità dello spot sono indici strettamente correlati al fatto che la fibra non disperda l'energia inviandola in direzioni indesiderate.

Una fibra ottica tagliata correttamente emana una luce guida pressoché rotonda. Per il taglio delle fibre sono utilizzati particolari strumenti come forbici con inserti di ceramica e taglierini d'acciaio.



Attivazione

L'attivazione della fibra permette una maggiore efficienza di taglio e concentrazione della potenza. Si ottiene azionando la fibra per 1 secondo su di una superficie colorata congruente alla lunghezza d'onda utilizzata (per esempio, le cartine da articolazione blu scuro o un cartoncino nero).



Pulitura

Il terminale deve essere sempre accuratamente pulito, non solo alla fine dell'uso, ma anche durante l'esecuzione di ogni intervento, al fine di garantire la massima accuratezza possibile del taglio.

Controllo dello strumentario

L'uso e il maneggio dello strumentario devono essere impostati nel rispetto della massima cura e cautela, al fine d'evitare danneggiamenti accidentali della fibra ottica. Le conseguenze che ne derivano sono alterazioni nella conduzione della luce (distorsioni e rifrazioni anomale), a cui si associano perdite di potenza e d'azione terapeutica dello strumento.

3. INTERAZIONE LASER- TESSUTO

Il meccanismo veramente condizionante è costituito dalle *proprietà ottiche del bersaglio rapportate alla lunghezza d'onda del raggio incidente*; perciò, il raggio laser può essere soggetto, in gradi differenti, a fenomeni di *assorbimento, riflessione, diffusione, rifrazione e*

trasmissione.

Assorbimento

È il fenomeno associato all'operatività e all'efficacia terapeutica del raggio laser, poiché definisce l'entità degli effetti termici trasferiti nei tessuti "irradiati".

Riflessione

Il tessuto bersaglio, "illuminato" dal laser, può riflettere una parte del raggio incidente. Quando il fenomeno è modesto si parla di riflessione parziale; diversamente, quando è presente una mancanza di affinità fra il raggio e la superficie bersaglio, si può quasi giungere ad una totale dispersione dell'energia incidente per fenomeni di riflessione. Al fine di proteggere operatore, paziente ed assistente dalla riflessione accidentale del raggio, (per esempio quando si è in prossimità di restauri metallici), è sempre obbligatorio l'uso di specifici occhiali di protezione.

Rifrazione

Tale fenomeno avviene quando un raggio attraversa due mezzi fisici a densità differente e determina una dispersione dell'energia luminosa all'interno delle masse irradiate; in tal modo si ottiene una diminuzione dell'attività energetica con conseguente limitazione dell'effetto termico locale. Anche se in termini fisici questo effetto può essere di entità trascurabile, è consigliata l'inclinazione della fibra affinché il raggio incidente sia più parallelo possibile al tessuto bersaglio per evitare che l'effetto del raggio rifratto vada a surriscaldare i tessuti sottostanti sensibili (come il tessuto osseo).

Diffusione

Rappresenta un effetto sempre presente anche se non ricercato perché non controllabile. In alcuni casi la diffusione dell'energia all'interno dei tessuti può essere utile per ottenere un'emostasi locale. La concentrazione energetica è dovuta in particolar modo alla presenza di cromofori endogeni, quali i vasi sanguigni contenenti emoglobina e i granuli di melanina.

Trasmissione

Quando si realizza tale fenomeno non si può avere un effetto chirurgico sul tessuto superficiale attraversato ma l'azione viene trasferita in zone più profonde. L'effetto profondo può essere graduato dal livello della lesione dei tessuti fino ad un'azione terapeutica, senza coinvolgimento dei tessuti superficiali. Il fenomeno descritto diviene prezioso per agire "al

di là” di quei tessuti che è utile mantenere integri.

3.1 - EFFETTI BIOLOGICI DEI LASER

Nel caso dei tessuti biologici l’energia del laser verrà assorbita dai tessuti e convertita in calore. A seconda dei diversi parametri l’energia potrà determinare riscaldamento, coagulazione, asportazione ed incisione del tessuto tramite la sua vaporizzazione. Tali parametri comprendono: la lunghezza d’onda della luce emessa, la potenza, la modalità di emissione della luce laser, la durata della pulsazione, il rapporto energia/pulsazione, la densità dell’energia, la durata d’esposizione, il picco di potenza della pulsazione, l’angolazione della punta sulla superficie e le proprietà ottiche del tessuto.

Nella pratica odontoiatrica sono essenzialmente impiegati i laser che operano utilizzando i tipici effetti di tipo chirurgico: *fototermico*, *fotoplasmatico/fotodistruttivo* e *fotochimico*.

Effetto fototermico

L’energia della radiazione elettromagnetica è repentinamente trasformata in calore, il quale provoca incremento locale della temperatura, fino alla necrosi cellulare e al fenomeno della vaporizzazione tessutale.

Temperatura in C°	Effetto	Caratteristiche
40°-42°	Ipertermia	Reversibile
45°-50°:	Edema	Denaturazione degli enzimi
70°-80°	Coagulazione	Coagulazione irreversibile
90°-100°	Vaporizzazione	Ebollizione, necrosi
300°	Carbonizzazione	Essiccamento, carbonizzazione
500°	Incandescenza	Vaporizzazione dei solidi

Effetto fotoplasmatico/fotodistruttivo

La struttura intima di tessuti è distrutta da un’onda d’urto (impulsi della durata di nanosecondi o anche meno), dovuta alla generazione di campi elettromagnetici di intensità tale da spezzare i legami elettrici intercellulari.

Effetto fotochimico

In questo caso i fotoni si comportano come reagenti chimici che, assorbiti dagli svariati tipi di cromofori, partecipano a una reazione stechiometrica con eccitazione di una particolare

molecola (per esempio, emoglobina, melanina, etc.) con effetti differenti a seconda della natura delle molecole. Il risultato finale è riassumibile in un'ablazione dei tessuti, derivante dalla rottura diretta dei legami intercellulari prodotta dalla ionizzazione d'atomi e molecole. Andando più nello specifico sui vari tessuti di cui è composto il parodonto, le loro proprietà ottiche sono dipendenti da fattori quali pigmentazioni, contenuto di acqua e contenuto minerale.

L'osso è considerato il classico tessuto composto: è formato per il 67% da minerali inorganici e dal 33% da collagene e proteine.

Viceversa, la gengiva è formata da tessuto connettivo con varia densità di fibre collagene immerse in una matrice extracellulare ed un alto contenuto d'acqua (70%); inoltre la gengiva presenta frequentemente una pigmentazione melanica.

Ogni lunghezza d'onda della luce laser viene assorbita in misura maggiore o minore dai diversi componenti sopra citati.

Ad esempio, il laser a CO₂ (λ 10,600 nm) ha un alto coefficiente di assorbimento nell'acqua e di conseguenza è adatto per la chirurgia dei tessuti molli, mentre attualmente l'applicazione clinica sui tessuti mineralizzati non presenta solide basi scientifiche.

I laser Nd:YAG (λ 1,064 nm) e a Diodi (λ compresa tra 800 e 950 nm) presentano un coefficiente di assorbimento nell'acqua inferiore rispetto al Laser a CO₂ ma contemporaneamente è elevato l'assorbimento nei tessuti pigmentati.

Nei laser Er,Cr:YSGG e Er:YAG, (rispettivamente di λ 2,780 nm e λ 2,904 nm), l'assorbimento è elevato sia nell'acqua che nell'idrossiapatite.

Riassumendo, i vantaggi e le buone prestazioni ottenibili con il laser sono funzioni strettamente dipendenti dalle interazioni tra le proprietà fisiche dei tessuti e le caratteristiche della lunghezza d'onda del fascio di luce emesso dal laser.

Ne segue che un solo tipo di laser non può lavorare in modo ideale sia sui tessuti duri, sia su quelli molli.

Data la diversità delle lunghezze d'onda disponibili, il clinico dovrebbe per prima cosa determinare gli obiettivi clinici del trattamento, e poi scegliere la tecnologia migliore per arrivare a tali scopi.

LASER PIU' UTILIZZATI IN ODONTOIATRIA			
TIPO	MEZZO ATTIVO	LUNGHEZZA D'ONDA (nm)	SPETTRO
LASER ALLO STATO SOLIDO			
Nd:YAG	barra di granato d'ittrio e alluminio drogata all'erbio	1064	Infrarosso
Er:YAG	barra di granato d'ittrio e alluminio drogata al neodimio	1940	Infrarosso
ErCr:YSGG	barra di granato d'ittrio,scandio e gallio drogata all'erbio cromo	2780	Infrarosso
LASER ALLO STATO GASSOSO			
CO ₂	anidride carbonica	10.600	Infrarosso
LASER A SEMICONDUITTORE			
Diodi	gallio-arsenico drogato all'alluminio	810/980	Infrarosso

3.2 - BIBLIOGRAFIA

Barone M, Benedicenti S, Crippa. Laser a diodi in odontoiatria. Milano: Edi.Ermes, 2008

Benedicenti A. Manuale di laserterapia del cavo orale. Rimini: Maggioli, 1982

Harbison JP, Nahory R.E. Lasers - Harnessing the Atom's Light. New York: W.H. Freeman Company, 1997

Maiman TH. Stimulated optical radiation in ruby. Nature 1960; 187: 4493-494

Moritz A. Oral laser application. Berlin: Quintessence Verlags-GmbH, 2006, 258-277

Vasta A. I laser terapeutici. Roma: Marrapese, 1998

Zingoni E, Tognazzi F, Zingoni A. Fisica bio-medica. Bologna: Zanichelli, 1998

Renon CE. Lasers in dentistry. Dent Update, 1989 Nov, 16:9, 371-2

Sulewski JG. Historical survey of laser dentistry. Dent Clin North Am. 2000 Oct;44(4):717-

52 Gáspár L. Laser in contemporary dentistry. Fogorv Sz, 1992 Nov, 85:11, 343-53

Clarkson DM. Lasers in dentistry. Dent Update, 1992 Apr, 19:3, 115-6, 118

4. LASER IN ODONTOIATRIA

A partire delle ricerche di Maiman, la tecnologia laser ha conosciuto largo utilizzo nel campo medico. L'utilizzo sapiente delle caratteristiche e dei parametri che regolano l'emissione

della luce ha permesso infatti al laser di divenire sempre più il gold standard per molte terapie. Usando una combinazione lunghezza d'onda, del suo impulso e della sua potenza il laser, infatti, può avere effetti ablativi più o meno profondi, effetti fotochimici, fototermici e fotobiomodulanti a seconda del tessuto bersaglio irradiato dalla luce.

In odontoiatria il laser viene utilizzato secondo diverse modalità a seconda dei protocolli da effettuare: con tali tecnologie il professionista può infatti intervenire sia su tessuto molle che su tessuto duro, decontaminando il sito ed effettuando ablazioni selettive mantenendo l'approccio minimamente invasivo. In conservativa e nella chirurgia ossea lo strumento più indicato è senza dubbio un laser avente come mezzo attivo l'*erbio*, in grado grazie alla sua selettività di operare in maniera atraumatica e senza contatto. Nell'operatività quotidiana legata alla chirurgia del tessuto molle il medico è supportato dal *laser a diodo*, che sfrutta la selettività con la molecola di emoglobina per effettuare operazioni con taglio esangue sfruttando allo stesso tempo il potere biostimolante della luce laser.

Grazie a queste caratteristiche, la possibilità di operare attraverso uno strumento indolore e dagli indubbi benefici clinici e operativi è sempre più richiesta. In questa ottica la strumentazione laser si inserisce all'interno dell'agenda del professionista come coadiuvante alla terapia tradizionale per ottenere il miglior risultato medico e di cura e gestione post-operatoria del paziente.

4.1 - LASER A DIODO

APPLICAZIONI IN ENDODONZIA

- **Decontaminazione canalare**: l'obiettivo del trattamento endodontico consiste nel rimuovere completamente il tessuto infetto, affinché il canale radicolare preparato sia il più possibile privo di batteri. L'effetto battericida del laser è efficace nel canale radicolare, nel delta apicale e nei tubuli dentinali fino a 500 micron di profondità, favorendo la guarigione di lesioni periapicali in tempi assai più brevi rispetto ai trattamenti convenzionali.
- **Incisione della polpa**:
 - **Pulpectomia**: la pulpectomia è un intervento da praticare nel caso il tessuto pulpare sia compromesso in maniera irreversibile. Nel trattamento convenzionale si ha l'asportazione pulpare e l'alesatura dei canali. Si può allora effettuare la chiusura dei canali con guttaperca. Si termina l'intervento otturando la cavità d'accesso. Con il laser invece, si eseguono la decontaminazione del canale per tutta la sua lunghezza, l'emostasi delle fibre pulpari residue dei canali laterali e principali e si aumenta la durezza delle pareti canalari. Rispetto alle

metodologie tradizionali si riscontrano pareti canalari più pulite, senza residui organici; si ottiene un miglior sigillo dopo l'otturazione canalare.

- Pulpotomia: si tratta di una pulpectomia parziale con l'exeresi della sola polpa camerale. Il paziente riferisce sensibilità al caldo, al freddo e al dolce. Il dolore, inoltre, si accentua in posizione supina e qualche volta è impossibile per il paziente individuare il dente affetto. Tale situazione può evolvere con la morte della polpa e infine con un granuloma o ascesso. L'asportazione della polpa con una terapia canalare laser assistita risulta essere meno dolorosa e definitiva: i batteri vengono eliminati e in alcuni casi non è neppure necessario una terapia farmacologica coadiuvante. Il suo sicuro effetto emostatico permette di ottenere in tempi rapidi un buon prosciugamento della camera pulpare.
- Apicectomia: l'apicectomia è indicata per quei casi in cui c'è ostruzione del canale, naturale o artificiale (uno strumento canalare o un perno non rimovibile). In presenza di un granuloma e di un canale non pervio (non raggiungibile dagli strumenti canalari), si ricorre a questo intervento che comunque è invasivo e debilitante per il paziente (il dente perde lunghezza e durata). L'intervento di apicectomia si effettua per il trattamento delle complicanze di un dente a polpa necrotica, ascessi e granulomi, ma solo nel caso in cui il trattamento o il trattamento o il ritrattamento endodontico (ortograde) non sia praticabile. Consiste nella rimozione chirurgica dell'apice radicolare di un dente e dei tessuti molli circostanti affetti da condizioni patologiche. In presenza di un granuloma dentale è necessario intervenire perché l'affezione non può andare incontro a guarigione né spontanea, né in seguito a terapia farmacologica. Essendoci alla base un processo infettivo risulta quindi consigliabile utilizzare il laser per le sue proprietà battericide.

APPLICAZIONI IN PARODONTOLOGIA

Nel corso dell'ultimo decennio si è fortemente studiata l'applicazione del laser a diodo nella parodontologia e nell'applicazione di protocolli di igiene orale: i risultati confermano come questa tecnica unitamente agli strumenti tradizionali porti ad un maggiore successo della terapia. La parodontite è una malattia causata da infezioni o infiammazioni del parodonto, colpisce tre persone su cinque e, una volta che si è instaurata, è molto difficile che regredisca spontaneamente: solo l'intervento di un dentista specializzato porta al suo controllo e alla sua remissione. L'obiettivo che si deve raggiungere è quello di ottenere lo stato di buona salute gengivale, la riparazione dell'osso alveolare e il ripristino nella forma e nella funzione della mucosa. I batteri anaerobici gram-negativo sono la causa più comune che provoca parodontite cronica nei soggetti adulti. Il trattamento ha inizio con la cura delle superfici radicolari con l'eliminazione di eventuali concrezioni e di cemento infetto, al fine di

consentire un riattacco connettivale non infiammato. Anche in questa fase il laser è coadiuvante nella rimozione delle concrezioni, poiché indebolisce il legame tartaro-radice grazie ad un effetto fotochimico.

- Analgesia laser: nella cura parodontale è sempre consigliato un primo passaggio con il laser per sfruttarne gli effetti analgesici; il laser, infatti, inverte la pompa sodio-potassio della membrana cellulare per 30 minuti. In tal modo sarà possibile operare con altri strumenti senza recare fastidio al paziente.
- Decontaminazione tasca: grazie al suo effetto decontaminante il laser a diodo ci permette un'ampia e rapida decontaminazione della tasca gengivale. Il trattamento Laser parodontale è minimamente invasivo e ben accettato dal paziente. Un solco gengivale normale è profondo 2/3 mm circa. La placca batterica che si deposita nel solco, se non viene rimossa, provoca infiammazione e distruzione di questo attacco che per difendersi migra più in basso. Il solco gengivale si approfondisce realizzando una formazione patologica che prende il nome di tasca parodontale. Qui annidata, la placca si arricchisce di germi che sopravvivono in assenza di ossigeno e provocano danni alle strutture di sostegno della radice del dente. Con il laser risulta più semplice e meno invasivo per il paziente penetrare nella tasca gengivale. L'intervento consiste nell'irradiare la zona da decontaminare ed eliminare batteri e germi che si sono annidati all'interno della sacca ed innescare una disinflammazione della zona trattata. Il tutto in assenza di anestesia. Saranno necessarie 3/5 sedute al fine di ottenere una decontaminazione totale ed una completa "chiusura" della tasca grazie all'effetto di biostimolazione del laser. Può essere inoltre eseguito da igienisti dentali professionali dato il basso livello di potenza necessario.
- Biostimolazione gengiva: l'altro effetto fondamentale del laser è il suo potere biostimolante. Defocalizzando il fascio laser con gli opportuni puntali, è possibile somministrare a tessuti sottoposti a chirurgia una quantità di energia tale da stimolare i processi metabolici con conseguente rigenerazione tissutale.
- Recessione gengivale: nel caso di recessione gengivale il doppio effetto decontaminante e biostimolante porterà i tessuti molli a riacquistare la loro forma fisiologica, nel quadro di una terapia di igiene completa.

APPLICAZIONI IN CHIRURGIA

In campo chirurgico il laser è del tutto paragonabile al comune bisturi, presentando però delle caratteristiche ineguagliabili come emostasi, decontaminazione del sito operatorio, biostimolazione e analgesia. Con una buona conoscenza delle caratteristiche del laser è possibile utilizzarlo per svariate applicazioni, operando con un campo libero dal sangue,

garantendo un'ottima visibilità. L'effetto emostatico è notevole e non reca danno ai tessuti circostanti.

La lunghezza d'onda 980nm del laser a diodo viene facilmente assorbito dalle sostanze scure come emoglobina e melanina, oltre all'acqua presente nel tessuto, determinando una notevole capacità di taglio.

Il laser, rispetto alla lama fredda del bisturi offre dei vantaggi indiscutibili:

- il bisturi incide in maniera precisa, ma non possiede la proprietà battericida o coagulante del laser;
- rispetto l'elettrobisturi è evidente la mancata fascicolazione del tessuto muscolare, che crea retrazione tissutale;
- il risultato di un intervento effettuato con il laser è prevedibile, infatti, in guarigione non si verifica ritenzione tissutale;
- l'azione antisettica e biostimolante del laser riduce l'uso di farmaci postoperatori e riduce notevolmente i tempi di guarigione.

Le caratteristiche distintive del laser a diodo applicato alla chirurgia sono:

- la precisione nel taglio dei tessuti molli senza che vengano alterati in alcun modo le situazioni ossee;
- la capacità di coagulazione lascia il campo operatorio "esangue" anche in pazienti affetti da problematiche di coagulazione o sottoposti a terapia anticoagulante;
- minor necessità di anestetici;
- minor traumaticità sia per i tessuti trattati che per quelli circostanti;
- minor dolore post-operatorio;
- minor edema post-operatorio;
- assenza di trazione dei tessuti in fase di guarigione;
- migliore estetica dei tessuti in fase post-operatoria;
- guarigione migliore per seconda intenzione;
- minor uso di trattamenti farmacologici post-operatori.

Grazie alla mancanza di ritenzione del tessuto in fase di guarigione, il laser diventa indispensabile per le operazioni di "rimodellamento" del tessuto molle orale, dove sia obbligatorio l'intervento chirurgico per riposizionare correttamente o asportare parti del tessuto.

- Tessuto granulomatoso, fibrotico e normale: non tutti i tipi di tessuto molle sono uguali, per questo è stato sviluppato un sofisticato sistema di modulazione degli impulsi laser TOP (Tissue Optimized Pulse). Sono stati creati dei protocolli specifici per tessuti molli con

aspetto granulomatoso, fibrotico o normale: la potenza complessiva e la durata dell'impulso vengono modulati in modo tale da permettere di agire selettivamente, dando al tessuto il corretto tempo di rilassamento termico (tempo necessario ai tessuti di smaltire il calore in eccesso). Ogni tipo di tessuto infatti interagisce diversamente a contatto con il laser, data la diversa quantità emoglobina e melanina presente. Ad esempio, un tessuto fibrotico quindi scarsamente vascolarizzato richiederà più energia per la vaporizzazione, ma somministrando l'energia con impulsi brevissimi sarà possibile evitare la formazione di necrosi, grazie al corretto tempo di rilassamento termico tra un impulso e l'altro.

- Coagulazione: le proprietà emostatiche del laser permettono di utilizzare questa tecnologia per controllare emorragie intra/postoperatorie. Una delle proprietà del laser a diodi è quella di indurre un'immediata cicatrizzazione evitando l'insorgere di piccole emorragie che invece si verificano impiegando le tecniche tradizionali. In questi casi si procede con la pulizia della ferita e la rimozione dell'eccesso di sangue, seguito da una serie di passaggi con il laser a diretto contatto della ferita. Questa procedura può essere utile in qualsiasi intervento dove risulti necessaria la pulizia del campo visivo e dove il processo naturale di coagulazione sia lento o insufficiente.
- Ascesso: l'ascesso è un processo suppurativo che si sviluppa intorno al dente, secondo la localizzazione. Si distingue in ascesso periapicale (pus intorno all'apice radicolare) ed ascesso parodontale (pus all'interno dei tessuti parodontali). Incidere un ascesso significa creare una fistola artificiale per far defluire il materiale purulento. A confronto con le tecniche tradizionali di drenaggio di un ascesso, l'utilizzo del laser a diodo permette un intervento decisamente meno doloroso per il paziente.

Diminuendo l'energia, o utilizzando un anestetico topico, è possibile controllare l'insorgenza di dolore nel corso dell'operazione. Il sanguinamento è minimo, per cui si può inserire un drenaggio senza compressione. Il problema di ristagno dovuto da garze per tamponare l'emorragia viene dunque eliminato. Il raggio laser con il suo potere antisettico evita il manifestarsi di infezioni post-operatorie.

- Solco preimpronta: il rilevamento dell'impronta è un momento tecnico di estrema importanza che fa parte dell'iter procedurale che porterà alla realizzazione di un manufatto protesico congruo, duraturo nel tempo e funzionale. Le impronte devono rispecchiare perfettamente la situazione tissutale e dentale del cavo orale del paziente.

Nell'ambito protesico il laser viene utilizzato per il taglio, il rimodellamento dei tessuti gengivali e mucose, senza che venga interessato dai trattamenti il tessuto osseo di sostegno degli elementi sia naturali che implantari, e per le sue proprietà emostatiche.

- Gingivectomia: per gengivectomia s'intende l'asportazione chirurgica del tessuto gengivale fatta a livello dell'attacco epiteliale per la creazione di una nuova gengiva marginale. Questa procedura è utilizzata per eliminare le tasche gengivali o parodontali, per accedere ed effettuare interventi chirurgici ai tessuti parodontali altrimenti irraggiungibili, o per raggiungere l'interno della tasca per facilitare la rimozione del tartaro. Con il laser si limitano i traumi al paziente poiché si favorisce la cicatrizzazione durante la vaporizzazione del tessuto, non vi è sanguinamento. L'anestesia non è sempre necessaria: qualora il paziente avverta dolore è possibile applicare un gel anestetico topico, oltre al trattamento di analgesia laser prima dell'intervento.
- Frenulotomia: il frenulo è un fascio di tessuto muscolare e fibroso rivestito da mucosa che si estende dalla mucosa alveolare alla linea di giunzione muco-gengivale (frenulo vestibolare) e dalla faccia ventrale della lingua al pavimento della bocca (frenulo linguale). Eseguire un intervento di frenulotomia significa praticare una rimozione parziale del frenulo o il suo riposizionamento. Questo intervento si esegue per facilitare la stabilità delle posizioni dentali o per alleviare la trazione esercitata verso il basso sulla lingua (frenulo linguale) da un frenulo corto linguale. Solitamente questo intervento viene eseguito su pazienti molto giovani e, proprio per questo, utilizzare il laser è la scelta più idonea. Il paziente che si sottopone all'intervento non sente dolore, ma se si desidera maggiore sicurezza si può applicare un gel anestetico sulla superficie del frenulo. Il tessuto irradiato viene vaporizzato all'istante mentre il campo operatorio è libero dal sangue (questo aspetto migliora anche la collaborazione dello stesso paziente). Il recupero post-operatorio è semplice e veloce senza l'applicazione di punti di sutura.
- Granuloma: il granuloma è l'esito di un'infezione e conseguente morte della polpa presente nel dente. Consiste in una massa di tessuto infetto (definito granulomatoso) di qualche millimetro di diametro, dalla forma tondeggiante, visibile radiograficamente all'apice della radice spesso asintomatica ma talvolta dolente alla masticazione. Il granuloma apicale è un'infezione batterica localizzata nella mandibola o nel mascellare superiore. Questa infezione nelle radiografie si presenta come una area radiotrasparente. Generalmente la causa di questo processo è dovuta ad una carie del dente che non viene curata in tempo, per cui i batteri continuano indisturbati il loro cammino verso la polpa del dente. Una volta arrivati alla polpa danno luogo alla cosiddetta pulpite, che nella forma acuta può portare ad un ascesso (di solito determinando il caratteristico gonfiore) oppure può cronicizzare determinando il granuloma. I granulomi sono responsabili d'infezioni focali e di ascessi dentali. Chiaramente questa infezione batterica cronica determina una risposta immunitaria da parte dell'organismo senza che questo però riesca a vincere l'infezione, in quanto i batteri

si trovano indisturbati all'interno della radice del dente e da lì fuoriescono continuamente nell'osso attraverso l'apice del dente. Per decontaminare la zona, il laser è lo strumento più indicato: la pulisce eliminando i batteri che risiedono nella parte interna del dente.

- Fibroma: utilizzare il laser come strumento di taglio permette la rimozione e l'asportazione di parti di tessuto e quindi anche di neoformazioni, sia di natura benigna che maligna. A seconda del tipo di intervento può essere richiesto una successiva gengivoplastica.
- Fibroma: i fibromi sono presenti principalmente nella zona del piano buccale e devono essere asportati se aumentano di dimensione o recano disturbo al paziente. Viene eseguito un intervento di escissione con laser 980 nm a basse potenze.
- Epulide: l'epulide è un tumore reattivo del parodonto scatenato da stimoli infiammatori dovuti a una scarsa igiene orale. La terapia consiste nell'eliminazione dello stimolo infiammatorio, seguito dall'escissione del tumore.
- Iperplasia: questa operazione chirurgica è spesso associata ad interventi di gengivectomia: si asporta il tessuto in eccesso senza sanguinamento e si rimodella il tessuto gengivale perché si ricostruisca la corretta morfologia dell'apparato parodontale. Con il laser a diodi e in presenza di un'ampiezza biologica sufficiente, è possibile modellare il profilo gengivale in modo che risulti perfettamente nella norma, con conseguente miglioramento estetico e facilitazione dell'igiene domiciliare.
- Fistola: è un'anormale apertura del tessuto gengivale attraverso la quale drena un ascesso periapicale. L'operazione si esegue tramite la tecnica di coagulazione intraluminale. Si irradia il condotto ed inizia un processo di coagulazione prima interna e poi esterna.

APPLICAZIONI IN IMPLANTOLOGIA

L'implantologia beneficia di alcune applicazioni laser soprattutto in merito alla risoluzione di casi di perimucosite o perimplantite. I laser a diodi rappresentano al momento, uno strumento idoneo per la seconda fase chirurgica o di rientro e per il trattamento delle perimucositi e delle perimplantiti in combinazione con le tecniche di rigenerazione guidata.

- Scopertura impianti: nell'implantologia vengono spesso utilizzati sistemi implantari a due fasi. Nell'ambito della seconda fase chirurgica occorre valutare in che misura sia il caso di ricorrere a interventi estesi di plastica del lembo per eseguire un incremento della mucosa cheratinizzata. In questo contesto il laser può essere impiegato con successo per una disepitelizzazione minimamente invasiva o per il rimodellamento delle parti molli. Nelle regioni non rilevanti per l'estetica si espongono di norma gli impianti col laser a diodi. Il vantaggio rispetto al bisturi è l'assenza di sanguinamento e la possibilità di cercare la vite di copertura tramite una piccola incisione che poi, dopo l'esatta localizzazione, viene

ampliata secondo la necessità. Questa tecnica si può applicare anche nella regione degli incisivi se è presente uno spessore sufficiente di gengiva aderente. Se si sceglie di operare soltanto col laser, è possibile prendere anche l'impronta durante questa seconda fase, poiché i tessuti molli di copertura rimangono praticamente inalterati e la contrazione post-operatoria è poco rilevante.

- Perimplantiti: le perimplantiti sono processi infiammatori dei tessuti molli e duri che determinano rapidamente la perdita progressiva del supporto osseo, associata sempre a sanguinamento (sintomo assente nelle perdite ossee da sovraccarico) e spesso a suppurazione. Sono caratterizzate dalla perdita ossea progressiva a livello implantare che si verifica ad osteointegrazione avvenuta e che supera i limiti di riassorbimento osseo considerati normali per gli impianti; le perimplantiti sono la maggiore causa di perdita degli impianti stessi. La causa principale di questa infiammazione è la presenza di batteri; la placca batterica colonizza la superficie delle fixture e determina la sofferenza, l'infiammazione e il graduale riassorbimento dei tessuti. Le sue dimostrate capacità di non alterare la superficie degli impianti, la peculiarità di decontaminare profondamente, di far regredire il processo infiammatorio e quella di favorire ed accelerare il processo di guarigione (effetto biostimolante), rendono il dispositivo laser uno strumento quasi indispensabile.

APPLICAZIONI IN TERAPIA

La terapia è uno dei campi che tradizionalmente riserva al laser un posto di grande importanza ed efficacia in quanto vengono sfruttate le proprietà antinfiammatorie e antidolorifiche che la luce emessa da questa componente presenta. La terapia laser a bassa intensità è conosciuta generalmente in ambito clinico con i termini di LLLT (Low Level Laser Therapy) o LILT (Low Intensity Laser Therapy) in quanto questa applicazione viene compiuta con basse potenze medie (da qualche decina di mW a circa 1 W, per la maggior parte della letteratura mondiale). È stato sperimentalmente dimostrato che gli effetti di queste dosi di energia da parte di laser operanti nello spettro degli infrarossi, si traducono in un incremento di ATP che globalmente provocano un aumento del metabolismo cellulare e di sintesi del collagene nei fibroblasti; stimolazione della formazione di DNA e RNA; effetti locali sul sistema immunitario; neoangiogenesi e attività leucocitaria aumentata; neurostimolazione ed altri effetti biologici.

- Herpes labialis: l'herpes labiale è una malattia virale causata generalmente dal virus herpes simplex 1. Nello stadio embrionale si manifesta un senso di fastidio e di prurito seguito dalla formazione di vescicolette sierose nella zona delle labbra. Allo stadio terminale si crea una crosticina (solitamente dopo alcuni giorni) che indica la fase di cicatrizzazione della ferita.

Utilizzare il laser per la sua capacità decontaminanti e stimolanti dei tessuti accelera la guarigione nel paziente e diminuisce il fastidio che questa patologia crea. È particolarmente importante iniziare il trattamento durante la fase dei prodromi o al primo apparire delle lesioni. La vescicola viene irradiata per alcuni minuti senza che sia necessario somministrare alcun anestetico. Dopo 24 ore, il controllo mostra una formazione di un'escara secca. Il risanamento completo della lesione si attesta dopo tre giorni circa dall'inizio della terapia.

- Afta: l'afta è una lesione bianca o grigiastra, rotondeggiante e circondata da un alone rossastro le cui dimensioni possono variare da uno a dieci millimetri. Compiono in genere sulla mucosa gengivale o buccale. Frequentemente questa erosione della mucosa orale tende ad evolversi, per infiammazione, diventando una piccola ulcera biancastra che procura dolore e bruciore soprattutto quando si mangiano cibi caldi, piccanti, salati o acidi. I tempi di guarigione spontanea sono di circa 10/15 giorni. Con il trattamento laser diminuiamo l'infiammazione e il dolore del paziente e acceleriamo il processo di guarigione che avviene dopo circa 4 giorni. Il laser può essere usato anche a contatto con la lesione purché questo sia leggero e di breve durata. In caso di necessità si può ripetere il trattamento dopo 48 ore.
- Cheilite angolare: la cheilite è un'infiammazione che solitamente si localizza agli angoli delle labbra. Alcune delle sue cause sono: somministrazione di farmaci antibiotici, stress, allergia e candidosi. Si manifesta con intenso prurito, desquamazione delle labbra, creazione di piccoli taglietti doloranti e fastidiosi e formazione di crosticine purulente. Il trattamento laser consiste nell'irradiare la zona interessata da cheilite cercando di colpire anche le zone immediatamente limitrofe in questo modo si distruggono i batteri che rimangono latenti sotto la superficie. Per un miglioramento definitivo si suggerisce la ripetizione del trattamento ogni 3 giorni per due settimane.
- Ipersensibilità: il problema della sensibilità dei denti è molto comune. Solitamente si cura con l'applicazione di agenti desensibilizzanti, sia professionali che domestici, in grado di occludere o sigillare i tubuli dentinali. Gel a base di fluoruro di sodio, NaF è il prodotto più comune, il cui meccanismo si basa sulla precipitazione di fluoruro di calcio insolubile all'interno dei tubuli. Poiché il materiale precipitato non aderisce direttamente ai tubuli, con il passare del tempo l'effetto benefico svanisce a causa dell'ambiente aggressivo del cavo orale. È stato dimostrato in molti studi clinici che l'uso combinato di gel al fluoruro e irraggiamento laser procura maggiori benefici e prolunga nel tempo l'effetto desensibilizzante: l'energia emessa dal laser provoca un effetto di “melting” o fusione della componente inorganica della dentina, sigillando le aperture dei tubuli, e coagula i fluidi al loro interno.

- Terapia ATM: il termine ATM indica il sistema dell'articolazione temporo-mandibolare; in questo sistema di muscoli, legamenti e nervi combinati assieme, ci permette di masticare, parlare, respirare e inghiottire. I disturbi in questa zona provocano forti dolori che spesso procurano difficoltà della masticazione, dolori facciali, flessioni anormali del collo e del cranio. Queste sindromi vengono trattate farmacologicamente con antinfiammatori o antidolorifici. Il trattamento con il laser riduce la sensazione di dolore provocando sollievo immediato al paziente.
- Biostimolazione - Manipolo onda piana: l'effetto della biostimolazione si ottiene utilizzando un fascio luminoso non focalizzato a bassa densità di energia; in tal modo l'energia luminosa viene assorbita dai tessuti, stimolando i processi metabolici e inducendo la rigenerazione tissutale. Tali effetti sono indotti dall'azione termica e fotochimica dell'energia luminosa laser. La terapia di biostimolazione si effettua irradiando la zona interessata con la luce laser a bassissima intensità (milliwatt) con manipoli o puntali idonei. A basse potenze non si verificano alterazioni macroscopiche all'interno o in prossimità del tessuto, ma si procura sollievo al paziente dolorante desensibilizzando la zona sofferente e producendo un calore generalizzato. Molti studi attestano la guarigione più efficiente di ferite cutanee, l'aumento di vascolarizzazione locale e il rimedio al dolore.
- Analgesia laser: l'effetto analgesico e antinfiammatorio del laser può essere sfruttato per effettuare una terapia antalgica non farmacologica nelle aree dolenti del cavo orale, procurando sollievo al paziente in poche sedute.

APPLICAZIONI IN COSMETICA

- Sbiancamento: lo sbiancamento dentale con il laser è il mezzo più rapido ed efficace per ottenere denti bianchi. L'azione sbiancante è indotta da un processo di ossidazione. Un gel contenente H₂O₂, (perossido di idrogeno), viene steso sulla superficie di ogni dente e attivato dalla luce laser tramite un apposito manipolo che defocalizza il raggio. Grazie a questa attivazione il perossido innesca il rilascio di ossigeno che opera la scissione dei doppi legami dei pigmenti presenti nei denti, decolorandoli. L'uso del laser per "attivare" il perossido di idrogeno velocizza radicalmente i tempi di applicazione, limitando la seduta dello sbiancamento a circa 30 min. A protezione delle gengive si applicano dighe fotopolimerizzabili che hanno il compito di impedire al perossido di idrogeno, disposto sugli elementi dentali della parte vestibolare, di andare a diretto contatto con la gengiva evitando così la sua infiammazione.
- Gummy Smile: l'eccesso di tessuto gengivale, detto spesso gummy smile, è un altro importante intervento di natura prettamente estetica. Con il laser è possibile modellare il profilo

gingivale in modo che risulti perfettamente nella norma, con conseguente miglioramento estetico, senza dolore e sanguinamento.

- Emangioma: gli emangiomi sono spesso fastidiosi e antiestetici, tendono facilmente ad assumere dimensioni molto grandi. Quando presenti attorno al cavo orale (guance, lingua, labbro) possono rappresentare un problema anche funzionale quando interferiscono con la masticazione potendo essere traumatizzati dai denti e sanguinare copiosamente. Le comuni proposte terapeutiche si basano su interventi chirurgici invasivi che provocano emorragie e richiedono punti di sutura. Bastano pochi minuti di irraggiamento laser per provocare la fotocoagulazione dei globuli rossi. La lesione diventerà biancastra e guarirà completamente nel giro di qualche settimana.
- Depigmentazione: con il laser è possibile effettuare la rimozione di macchie sulle gengive insorte naturalmente o causate dalla presenza di amalgama o altre sostanze pigmentate. L'effetto ablativo e coagulante del laser consente la rimozione delle macchie senza provocare eccessivo dolore o sanguinamento.

APPLICAZIONI IN CONSERVATIVA

Il laser trova utilità nella sigillatura dei solchi, poiché effettua una decontaminazione delle superfici occlusali nella fase di preparazione della sigillatura, aumentandone l'efficacia e la durata nel tempo. Analogamente, prima di chiudere una cavità con i compositi è opportuno un passaggio con il laser per una pulizia accurata e decontaminazione efficace.

4.2 - LASER AD ERBIO

DENTE

- Rimozione carie; preparazione cavità I-V; rimozione dentina

L'elevata potenza di picco del consente di lavorare altrettanto velocemente, ma con numerosi vantaggi rispetto alla comune turbina in conservativa. Non solo l'assenza di vibrazioni e di contatto risultano più tollerabili ai pazienti: il taglio con il laser evita la formazione di fratture che indeboliscono la struttura del dente. Inoltre, poiché il tessuto carioso contiene più acqua della dentina (25% rispetto al 20%), è possibile agire selettivamente nella rimozione dosando opportunamente l'energia, senza causare danni alle cellule pulpari. Secondo i principi dell'Odontoiatria Minimamente Invasiva è necessario rimuovere lo strato di dentina infetta e contemporaneamente conservare lo strato di quella affetta poiché conserva ancora la potenzialità di remineralizzarsi. La massima conservazione dei tessuti è un fattore particolarmente importante quando si tratta di denti decidui, aventi uno spessore inferiore, o

denti permanenti da poco erotti su cui non è ancora depositata la dentina secondaria. Una fresa generalmente ha un diametro maggiore di 1,5 mm mentre il manipolo del laser ad erbio può lavorare su una superficie inferiore al millimetro: questo consente una maggiore precisione e conservazione dei tessuti adiacenti. Inoltre, la capacità battericida del laser consente di decontaminare lo strato di dentina affetta, riducendo il rischio di future complicazioni. Il laser ad erbio è anche in grado di rimuovere materiale di riempimento preesistente proprio grazie alla selettività.

- Rimozione smalto; mordenzatura; sigillatura dei solchi; ricostruzioni

Rispetto ai metodi tradizionali di mordenzatura che prevedono l'uso di acidi, il laser permette di preparare lo smalto in modo ottimale e controllabile per interventi di odontoiatria estetica quali la preparazione di faccette (veneers), l'applicazione di brackets, nella sigillatura dei solchi o ricostruzioni. La sua utilità in ortodonzia è evidente soprattutto se il paziente è pediatrico o scarsamente collaborante: il laser ad erbio consente non solo di applicare i brackets su denti scarsamente erotti o trattenuti, come spesso avviene in presenza di ipertrofia e iperplasia gengivale legata all'uso di farmaci ed aggravata da una scarsa igiene orale, ma anche di trattare il tessuto gengivale che circonda i canini ritenuti, asportare il tessuto ridondante che viene creato dalla chiusura degli spazi interdentali, creare opercoli a livello dei secondi molari, rimuovere del tessuto ipertrofico causato da scarsa igiene orale e per il trattamento delle lesioni aftose causate dai dispositivi ortodontici.

- Desensibilizzazione, sigillatura dei solchi senza mordenzatura e compositi, erosione dentale

I pazienti che soffrono di sensibilità dentinale solitamente hanno un numero maggiore di tubuli dentinali aperti e di maggiore diametro. Rispetto al solo trattamento al fluoro, la combinazione con l'irraggiamento laser risulta estremamente efficace nel trattamento della sensibilità dei colletti e monconi. Osservando al SEM la superficie dentinale trattata con il laser a distanza di quattro e sei mesi, è possibile osservare i tubuli dentinali ancora sigillati poiché l'energia opportunamente dosata del laser favorisce la remineralizzazione dentale e la chiusura dei canalicoli. Di indubbia utilità risulta anche per effettuare una sigillatura dei solchi senza alcuna mordenzatura e uso di compositi, grazie alla capacità del laser ad erbio di vetrificare la cavità della pavimentazione dentinale. Nel caso di erosione dentale dopo un passaggio con il laser ad erbio i denti risulteranno più resistenti all'attacco acido.

- Endodonzia, direct pulp capping

In endodonzia il laser ad erbio si rivela un prezioso alleato per la detersione dello smear layer dalle pareti dentinali, nella rimozione del biofilm batterico e nella decontaminazione canale grazie all'effetto fotoacustico generato dal laser in modalità onda quadra. L'elevata potenza di picco e l'affinità del laser ad erbio per l'acqua creano questo fenomeno nella

soluzione irrigante. Il laser provoca un'onda acustica all'interno della soluzione, che si propaga tridimensionalmente all'interno dei canali radicolari, anche i più inaccessibili. L'effetto termico è trascurabile ma la pulizia e la decontaminazione risultano estremamente efficaci.

TESSUTO OSSEO

- Chirurgia ossea; rialzo di seno; split crest preparazione sito implantare; apicectomia

Il laser ad erbio si presenta come uno strumento di avanguardia indispensabile nell'esecuzione di interventi complessi che coinvolgono l'osso quali preparazione del sito implantare, rialzo del seno e split crest. Il laser ad Erbio può intervenire sui tessuti duri del cavo orale in modo semplice e con minor trauma creando un lembo di accesso gengivale ed un taglio osseo in modo rapido e preciso con margini della breccia ossea più accurati rispetto a quelli ottenuti tramite strumenti rotanti. Il laser ha proprietà battericide e mantiene invariata la temperatura del tessuto bersaglio grazie allo spray d'acqua ed all'istantanea vaporizzazione dell'acqua contenuta nei tessuti. Questo meccanismo garantisce il rispetto delle proprietà biologiche dell'osso residuo, senza creazione di necrosi o denaturazione della matrice proteica.

TESSUTO MOLLE

La chirurgia dei tessuti molli con il laser ad erbio risulta particolarmente indicata non solo per la velocità e la precisione del taglio; la capacità di controllare il sanguinamento permette un'ottima visibilità del campo operatorio e velocizza i tempi di guarigione post-operatori.

- Gengivectomia, gengivoplastica, allungamento corona, curettage, opercolectomia, scopertura impianti

Il laser ad erbio viene usato per incidere la gengiva per scopi di ricostruzione, cosmetica, parodontali o altro. L'ablazione progressiva strato dopo strato dei tessuti porta ad una maggiore velocità di guarigione con minor dolore: spesso non è necessaria l'anestesia grazie alla tecnologia pulsata, la superficialità d'azione, e lo scarso effetto termico del laser ad erbio. Nel caso di un intervento preprotetico quale l'allungamento di corona, con il laser è possibile vaporizzare il lembo e asportare perfettamente tutta la parte attorno all'osso senza intaccare l'osso stesso. Nella maggior parte dei casi non occorre l'anestesia e, nell'utilizzo, si consiglia di partire con basse potenze per poi alzarle gradualmente a seconda della necessità. L'opercolectomia consiste nell'asportazione di una porzione di gengiva che si trova generalmente su di un dente del giudizio in eruzione. Tradizionalmente si utilizza il bisturi

ma, con il laser, oltre a ridurre il gonfiore post-operatorio, si opera con minor dolore del paziente. Allo stesso modo per la scopertura di impianti il laser risulterà uno strumento di indubbia utilità. La mancanza di interazione tra la lunghezza d'onda di 2940nm e la superficie implantare e l'assenza di incremento termico, permettono l'uso del laser ad erbio in prossimità dell'impianto consentendo sia la decontaminazione che il trattamento dei tessuti perimplantari in totale sicurezza.

- Chirurgia, rimozione fibroma, frenulotomia, rimozione lesioni orali, vestiboloplastica

Il frenulo è un fascio di tessuto muscolare e fibroso rivestito da mucosa che si estende dalla mucosa alveolare alla linea di giunzione muco-gengivale (frenulo vestibolare) e dalla faccia ventrale della lingua al pavimento della bocca (frenulo linguale). Eseguire un intervento di frenulotomia significa praticare una rimozione parziale del frenulo o il suo riposizionamento. Solitamente questo intervento viene eseguito su pazienti molto giovani e, proprio per questo, utilizzare il laser è la scelta più idonea. Il paziente che si sottopone all'intervento non sente dolore, ma se si desidera maggiore sicurezza si può applicare un gel anestetico sulla superficie del frenulo. Il tessuto irradiato viene vaporizzato all'istante mentre il campo operatorio è libero dal sangue (questo aspetto migliora anche la collaborazione dello stesso paziente). Il recupero post-operatorio è semplice e veloce senza l'applicazione di punti di sutura.

- Lesioni erpetiche

Il laser ad erbio si rivela molto utile anche per la cura delle lesioni erpetiche. Dopo pochi secondi di irraggiamento il dolore scompare e la guarigione della lesione diventa rapida grazie all'effetto decontaminante sulla superficie trattata.

- Rimozione macchie amalgama, depigmentazione

L'eccessiva pigmentazione delle gengive, naturalmente presente o indotta dalla presenza di materiali quali vecchie otturazioni, può essere notevolmente migliorata con l'ausilio del laser ad erbio. I melanociti residui e altri pigmenti presenti nella gengiva vengono eliminati dal laser tramite ablazione e la gengiva guarisce velocemente.

4.3 – BIBLIOGRAFIA

Doctor Smile, Lambda S.P.A.

5. NORME DI SICUREZZA

5.1 - NORME GENERALI

1. L'impiego di Laser Chirurgici è consentito ai soli operatori qualificati, che abbiano ricevuto una formazione specifica in merito alla Sicurezza Laser e alla particolare applicazione clinica.
2. Il personale medico autorizzato all'impiego del Laser, nonché il personale autorizzato ad assistere durante l'intervento, deve essere registrato in un apposito registro.
3. Il personale autorizzato, presente nell'Ambulatorio – classificato Zona Laser Controllata durante l'uso del Laser – deve:
 - essere al corrente della natura dei rischi connessi,
 - avere familiarità con le istruzioni di funzionamento fornite dal costruttore,
 - assicurarsi che siano rispettate le condizioni per la propria sicurezza.
4. L'Operatore del Laser (il medico) deve assicurarsi che il personale sia perfettamente addestrato per uno svolgimento sicuro dei propri compiti ed è responsabile per la sicurezza di eventuali visitatori presenti.
5. Quando il Laser è in funzione il personale presente in Sala deve essere ridotto al minimo necessario e deve indossare gli occhiali di protezione prescritti (ad eccezione del solo operatore quando utilizza un microscopio già opportunamente filtrato) e vestiario in cotone pesante o, in alternativa, in materiale ignifugo.
6. Il Laser non deve essere messo in funzione se non quando diretto verso la zona del paziente da trattare, o verso un assorbitore di fascio, o un misuratore di potenza.
7. Gli strumenti chirurgici utilizzati nei trattamenti laser devono avere un trattamento superficiale antiriflesso (es. strumenti anodizzati neri o satinati).
8. L'utilizzo di gas nella chirurgia laser in cavità corporee chiuse può condurre a rischio di embolia nel paziente. Il rischio può essere ridotto utilizzando diossido di carbonio o in alternativa un fluido.
9. Nella Zona Laser Controllata e in particolare in prossimità del campo operatorio – prima dell'impiego del laser – è necessario provvedere a che le superfici riflettenti eventualmente presenti (per es. carrelli di servizio in acciaio o vassoio del riunito), che potrebbero accidentalmente intercettare il fascio laser generando riflessioni pericolose, siano opportunamente ricoperte con teli in cotone pesante.
10. Non si devono utilizzare contemporaneamente più sistemi laser nella stessa Sala.

11. In caso di sospetto guasto o malfunzionamento del Laser, sospendere l'utilizzo dell'apparecchiatura e avvisare l'Addetto Sicurezza Laser e/o il Servizio Di Prevenzione e Protezione.
12. In caso di infortunio e/o incidente, rivolgersi al Pronto Soccorso ed avvisare il Medico Competente ed il Servizio di Prevenzione e Protezione.

5.2 – PROCEDURA OPERATIVA

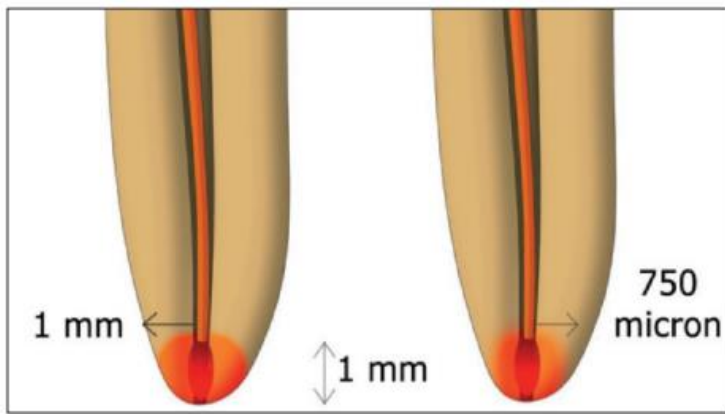
1. Prima dell'impiego del Laser effettuare i seguenti interventi/controlli ambientali al fine di predisporre le condizioni di sicurezza minime necessarie:
 - a) ricoprire le strutture riflettenti con teli in cotone pesante;
 - b) chiudere la porta di accesso all'Ambulatorio;
 - c) verificare che non siano utilizzati materiali (es. disinfettanti) o gas medicali infiammabili,
 - d) verificare che si stiano disponibili strumenti chirurgici con trattamento superficiale antiriflesso (es. strumenti anodizzati neri);
 - e) predisporre una soluzione di acqua sterile (es. soluzione salina) per irrorare ed estinguere prontamente eventuali focolai nel campo operatorio;
 - f) se l'intervento lo richiede, predisporre l'impiego del sistema di estrazione dei fumi prodotti dalla vaporizzazione del tessuto;
 - g) provvedere a indossare gli occhiali di protezione prescritti e a proteggere gli occhi del paziente (utilizzando occhiali protettivi idonei o in alternativa spugne o garze bagnate).
 - h) se disponibile, attivare la segnalazione luminosa installata sull'ingresso della Zona Laser Controllata (segnale di avvertimento di laser in funzione).
2. Dopo aver verificato la corretta installazione di tutti i dispositivi ausiliari collegati al laser, girare il comando a chiave in posizione "ON" ed eseguire sull'apparecchio laser la procedura di test raccomandata dal costruttore verificandone il corretto funzionamento.
3. Prima di ogni intervento laser, controllare accuratamente l'integrità della fibra e delle sue connessioni. Maneggiare con cura le fibre ottiche evitando di piegarle o attorcigliarle eccessivamente.
4. Prima di ogni intervento laser, controllare accuratamente l'integrità della fibra, del manipolo/puntale e delle sue connessioni.
5. Impostare i parametri di funzionamento del laser (potenza, etc.) idonei all'applicazione, avvisare gli operatori presenti in Sala che il trattamento sta per iniziare, e quindi procedere all'attivazione del fascio laser utilizzando il comando a pedale.
6. Per una breve pausa nel trattamento premere il pulsante di attesa "Stand-By" per disattivare il comando a pedale e prevenire eventuali emissioni accidentali.

7. Quando non utilizzato, il laser deve essere protetto da un uso non autorizzato. Pertanto, è necessario chiudere l'interruttore a chiave per bloccarne il funzionamento, riponendo la stessa in un luogo sicuro.
8. Rispettare le procedure di sterilizzazione, taglio, accoppiamento e corretto utilizzo delle fibre ottiche impiegate, conformemente a quanto indicato nel manuale d'uso del rispettivo Laser che deve essere sempre disponibile per la consultazione.

6. LASER IN ENDODONZIA

La tecnologia laser è stata introdotta nei primi anni sessanta⁹, e in endodonzia la possibilità di decontaminare i canali radicolari grazie a energie molto concentrate si è iniziata ad investigare dal 1970¹⁰. Solo l'introduzione di fibre ottiche sottili e flessibili ha reso però possibile un'efficace penetrazione della luce nel terzo apicale. Differenti sono le lunghezze d'onda che si sono dimostrate efficaci nel ridurre notevolmente la carica batterica nei canali infetti ed importanti studi hanno avvalorato “in vitro” questi risultati¹¹. I laser a diodi (da 810 nm a 980 nm) e il Nd:YAG (1064 nm) che appartengono alla regione del “*near infrared*” dello spettro elettromagnetico della luce, hanno un'interazione prevalentemente per diffusione nei tessuti molli, più in profondità opera il laser Nd:YAG (fino a 4-5 mm), più superficialmente quelli a diodi (fino a 3 mm). La loro luce viene elettivamente assorbita dall'emoglobina, ossiemoglobina e melanina. In endodonzia rappresentano ad oggi il miglior sistema di decontaminazione, grazie alla loro capacità di penetrare in profondità dentro i tubuli dentinali corrispondente fino a 750 micron per i laser a diodi e fino a 1 mm il Nd:YAG¹¹ e per l'affinità di queste lunghezze d'onda con i batteri che vengono così distrutti per effetto fototermico¹².

Schoop et al. nel 2004 hanno dimostrato su modello sperimentale come i laser diffondano la propria energia in profondità nella parete dentinale, dimostrandosi fisicamente più efficaci dei tradizionali sistemi irriganti chimici nel decontaminare le pareti dentinali in profondità¹¹. Il laser Nd:YAG (1064 nm) ha mostrato una riduzione batterica dell' 85% a 1 mm, mentre il laser a diodi 810 nm del 63% a 750 micron e inferiore per il diodo 980 nm.



Differenti penetrazioni in dentina di laser Nd:YAG e diodi 810-980 nm.

Questa spiccata e differente penetrazione è dovuta alla scarsa e diversa affinità di queste lunghezze d'onda per i tessuti duri e per la tipica capacità di diffusione non uniforme che permette alla luce di raggiungere e distruggere per effetto termico i batteri anche in profondità.

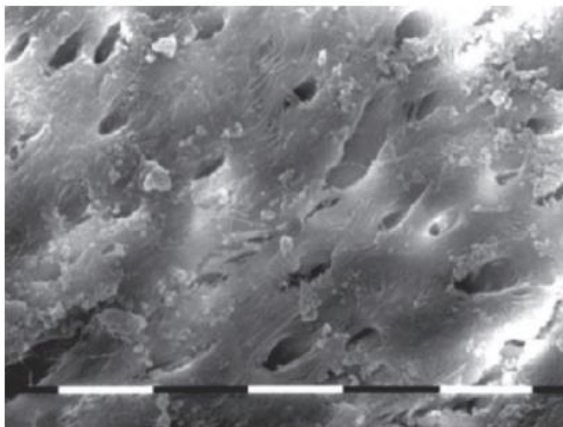


Immagine al SEM di dentina radicolare trattata con laser a diodi 810 nm utilizzato con potenza 2,5 W in modalità pulsata 50/50 10 msec (4 cicli x 5 sec) con irrigazione di EDTA.

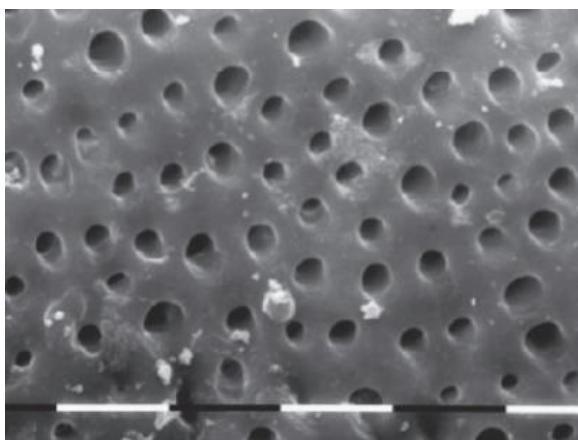


Immagine al SEM di dentina radicolare trattata con laser a diodi 810 nm utilizzato con potenza 2,5 W in modalità pulsata 50/50 10 msec (4 cicli x 5 sec) alternando irrigazione con ipoclorito sodio 5.5% e 17% EDTA.

Molti altri studi microbiologici hanno confermato la forte azione battericida dei laser a diodi e Nd:YAG, con decontaminazione fino al 100% della carica batterica nel canale principale¹³⁻

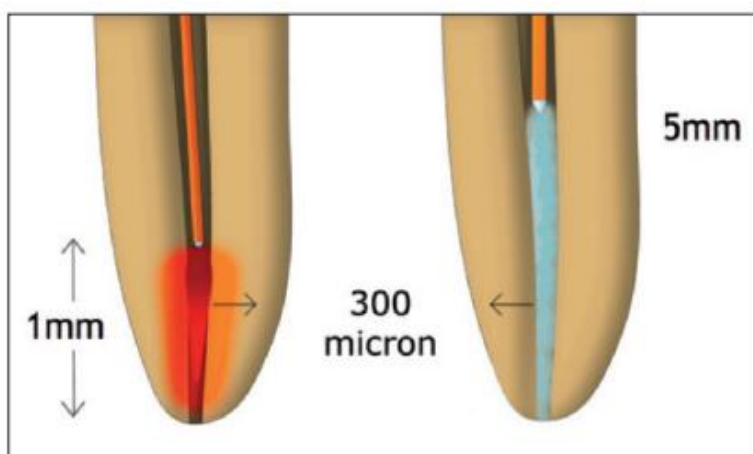
Uno studio in vitro di Benedicenti et al. ha riportato come l'utilizzo di un laser a diodi 810 nm associato all'uso di irriganti chimici chelanti come acido citrico ed EDTA porti a una riduzione pressoché assoluta della carica batterica (99,9%) di *Enterococcus Faecalis* dal sistema endodontico¹⁷.

I laser Erbium (2780 nm e 2940 nm) appartengono alla regione del “*medium infrared*”, la loro luce è prevalentemente assorbita superficialmente nel tessuto molle tra 100 e 300 micron e fino a 300-400 micron nelle pareti dentinali^{11,18}; il cromoforo bersaglio è l'acqua, per questo il loro utilizzo in odontoiatria è esteso dai tessuti molli a quelli duri, per il contenuto in acqua di mucosa, gengiva dentina e tessuto cariato che vengono vaporizzati per effetto termico.

Quando utilizzati in soluzione acquosa, l'esplosione delle molecole d'acqua genera anche un certo grado di effetto fotomeccanico che partecipa al processo ablativo e di detersione¹⁹⁻²¹.

Laser a Erbium con impulsi di durata molto corta (inferiore a 150 microsecondi) permettono con l'utilizzo di energie molto basse (meno di 50 mJ) il raggiungimento di potenze di picco assai elevate. L'utilizzo di energia minimamente ablativa riduce gli indesiderati effetti termici a vantaggio di fenomeni di esplosione delle molecole d'acqua (cromoforo bersaglio), con successiva produzione di effetti fotomeccanici e fotoacustici (*shock wave*) delle soluzioni irriganti introdotte nel lume canalare, sulle pareti dentinali. Questi effetti sono risultati estremamente efficaci nell'azione di detersione dello smear layer dalle pareti dentinali, nella rimozione del biofilm batterico e nella decontaminazione canalare²²⁻²⁵.

La decontaminazione tridimensionale del sistema endodontico eseguita con i laser Erbium non è ancora comparabile a quella dei laser *near infrared*. L'energia termica sviluppata da questi laser è infatti assorbita prevalentemente in superficie (elevata affinità per i tessuti dentali ricchi d'acqua), dove esercitano il più elevato potere battericida su *E. Coli*, Gram- ed *E. Faecalis* Gram+; a 1,5 W Moritz et al. (1999) hanno ottenuto un'eradicazione quasi totale, del 99,64% di questi batteri²⁶; questi sistemi non sono però in grado di esercitare effetto battericida in profondità nei canali laterali, raggiungendo i 300 micron di profondità, nello spessore della parete radicolare¹¹.



Differenti applicazioni di punte endodontiche tradizionali per laser a erbio e nuove punte PIPS.

Ulteriori studi (2007) hanno investigato l'efficacia dell'Er, Cr:YSGG laser nella decontaminazione di canali tradizionalmente preparati; utilizzando bassa potenza (0,5 W 10 Hz 50 mJ con 20% air/water spray) non si è ottenuta l'eradicazione completa dei batteri²³, mentre i risultati migliori per Er:YAG si sono ottenuti con una riduzione del 77% a 1 W e del 96% a 1,5W¹⁵.

Un nuovo filone di ricerca (2006) ha investigato l'efficacia del laser Erbium nella rimozione del biofilm batterico a livello apicale²⁸ e un recente studio in vitro (2008) ha ulteriormente validato la capacità del laser Er:YAG di rimuovere un biofilm endodontico formato da numerose specie batteriche (*Actinomyces Naeslundii*, *Enterococcus Faecalis*, *Lactobacillus Casei*, *Propionibacterium Acnes*, *Fusobacterium Nucleatum*, *Porphyromonas Gingivalis*, *Prevotella Nigrescens*), con considerevole riduzione delle cellule batteriche e disgregazione del biofilm, a eccezione di quello formato da *L. Casei*²⁹.

I laser Erbium hanno utilizzato punte “*end firing*”, cioè con emissione frontale alla parte terminale della punta, e hanno dimostrato una scarsa penetrazione laterale nella parete dentinale. Nuove punte a emissione radiale sono state proposte nel 2007 per il laser Er, Cr:YSGG. Gordon et al.³⁰ e Schoop et al.^{31,32} hanno studiato gli effetti morfologici e decontaminanti di questo nuovo sistema. I primi hanno utilizzato una punta da 200 micron a emissione radiale, a 20 Hz con spray aria/acqua (34% e 28%) e a secco, a 10 mJ e 20 mJ, 20 Hz (0,2 W e 0,4 W rispettivamente); i tempi di irradiazione erano variabili da 15 secondi sino a 2 minuti.

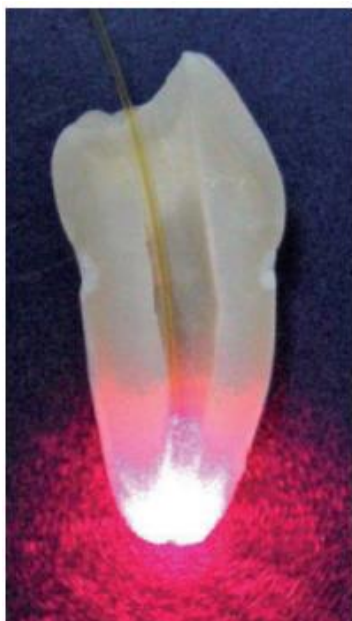
Il massimo potere battericida si è ottenuto alla massima potenza (0,4 W), con il tempo di esposizione più lungo e nella modalità senz'acqua, con un'eradicazione del 99,71% mediante effetto battericida; il minimo tempo di irradiazione di 15 s alla potenza più bassa (0,2 W) ha ottenuto il 94,7%³⁰. I secondi hanno utilizzato una punta da 300 micron di diametro a due

differenti parametri di emissione, 1W e 1,5 W, 20 Hz, irradiando 5 volte per 5 secondi con un tempo di raffreddamento di 20 secondi ogni passaggio. Il livello di decontaminazione ottenuto è stato significativamente elevato senza importanti differenze tra 1 W e 1,5 W, con rialzo termico contenuto tra 2,7° C e 3,2° C³¹. Lo stesso gruppo di Vienna ha studiato anche i parametri 0,6 W e 0,9 W che producevano un rialzo termico molto contenuto rispettivamente di 1,3° C e 1,6° C, mantenendo un elevato effetto battericida su E. Coli ed E. Faecalis³².

L'effetto termico dei laser, utilizzato per l'effetto battericida, deve essere controllato per evitare danni sulle pareti dentinali: l'irradiazione a parametri corretti produce, infatti, oltre alla vaporizzazione dello smear layer (solo i *medium infrared laser*) e della struttura organica dentinale (fibre collagene) anche aspetti di fusione superficiale più o meno marcati a seconda della lunghezza d'onda (*near e medium infrared laser*). I soli laser Erbium producono anche fenomeni ablativi superficiali della dentina, più prevalenti nelle aree intertubulari più ricche in acqua che in quelle peritubulari più mineralizzate. I danni termici quando si utilizzano parametri o modalità di utilizzo scorretti, si manifestano con estese aree di fusione (*melting*), di ricristallizzazione della matrice minerale (*bubble*), con microfratture superficiali con segni di carbonizzazione radicolare interna ed esterna.

Decontaminazione con near infrared laser

La decontaminazione canalare laser-assistita eseguita con laser *near infrared* richiede che i canali vengano preparati in maniera tradizionale (preparazione apicale con strumenti ISO 25/30) non avendo questa lunghezza d'onda nessuna affinità e quindi capacità ablativa sui tessuti duri. L'irradiazione viene eseguita come passaggio finale per decontaminare il sistema endodontico prima dell'otturazione. La fibra ottica di 200 micron precedentemente attivata su una superficie scura è inserita a 1 mm dalla lunghezza di lavoro e azionata con movimento elicoidale in direzione apico-coronale per 5-10 secondi, avendo cura di non indugiare all'apice per più di 1 secondo.



Fibra del laser a diodi 810 nm nel canale radicolare.

I parametri di utilizzo del laser a diodi 810 nm sono: 2,5 W di potenza in modalità pulsata con 10 ms di azione e 10 ms di pausa. Per il diodo 980 nm le potenze vanno ridotte a 1,5 W di potenza e 15 Hz di frequenza. Dopo aver eseguito per 3 volte la decontaminazione con il canale “a bagno” di ipoclorito, si irriga con acido citrico al 10% o EDTA al 17% e si esegue nuovamente la decontaminazione laser. Al lavaggio di ipoclorito ne segue un'ulteriore di ipoclorito e un successivo passaggio per tre volte con laser alla potenza e secondo i tempi precedentemente descritti.

Decontaminazione con medium infrared laser

Considerata la scarsa efficienza nella preparazione e sagomatura canalare, anche l'utilizzo dei laser Erbium per la decontaminazione in endodonzia prevede una preparazione canalare eseguita con tecnica tradizionale, con canali preparati all'apice con strumenti ISO 25-30; il passaggio finale con il laser è reso possibile grazie all'utilizzo di punte lunghe e sottili (200 e 320 micron), disponibili per alcune apparecchiature Erbium, in grado di raggiungere facilmente la lunghezza di lavoro (1 mm dall'apice). Anche in questo caso la tecnica tradizionale prevede un movimento elicoidale di retrazione della punta (in 5-10 secondi), da ripetersi 3-4 volte a seconda dei protocolli, alternando l'irradiazione all'irrigazione con i comuni prodotti chimici, eseguendo la procedura in un canale bagnato (ipoclorito di sodio e/o EDTA); lo spray integrato va mantenuto chiuso.

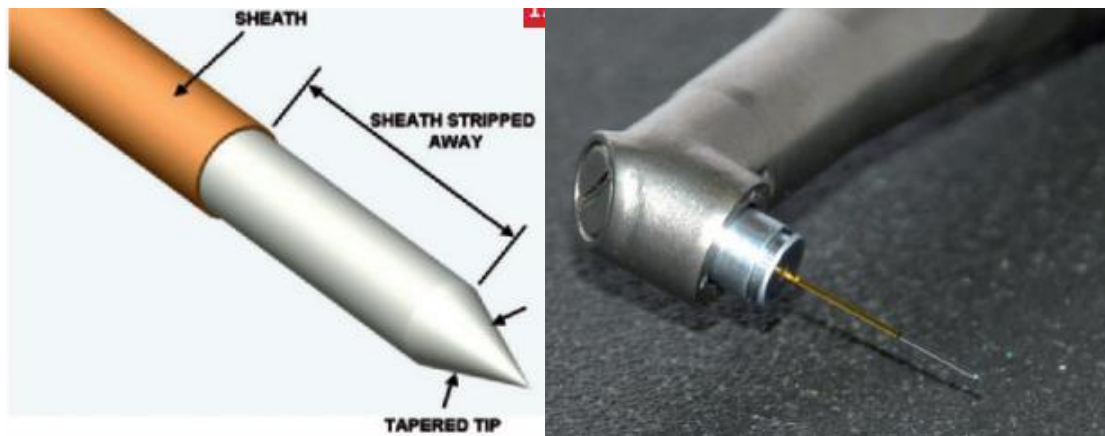
I parametri oggi accettati e utilizzati per laser Er:YAG sono: potenza 1,125 W, energia 75 mJ e frequenza 15 Hz mentre per i laser Er, Cr:YSGG sono: potenza 1,5 W, energia 75 mJ,

frequenza 20 Hz.

Recentemente è stato introdotto per i laser Er:YAG una nuova metodica che è quella presentata in questa tesi. La tecnica Photon Initiated Photoacoustic Streaming (PIPS) prevede l'utilizzo del laser Erbium (Fidelis III AT/HT-Lightwalker ST-E/AT Fotona, Lubiana, Slovenia) e della sua interazione con le soluzioni irriganti (17% EDTA o 5,5% NaOCl). La tecnica si propone con un meccanismo diverso rispetto ai precedenti; essa sfrutta esclusivamente i fenomeni fotoacustici e fotomeccanici che risultano dall'utilizzo di energia minimamente ablativa di 20 mJ a 15 Hz, con impulsi di soli 50 microsecondi.

A fronte di una potenza media di soli 0,3 W, ogni impulso interagisce con le molecole d'acqua con una potenza di picco di 400 W, in grado di creare esplosione e successivo “*shock waves*” con formazione di un forte flusso di fluidi all'interno del canale, senza generare gli indesiderati effetti termici; questi, misurati con termocoppie sulla superficie radicolare, sono risultati essere 1,2°C e 1,5°C rispettivamente a 20 e 40 secondi. Questa sistemica, per la minima energia applicata e la ridotta potenza sviluppata può essere considerata più una tecnica di irrigazione canalare che una procedura d'irradiazione laser.

Gli effetti fisici (fototermici) indesiderati vengono ridotti o annullati, mentre sono implementati gli effetti chimici (decontaminante e/o detergente) propri dei vari irriganti utilizzati che vengono spinti nel sistema endodontico tridimensionalmente, con maggiore efficacia. Altro considerevole vantaggio deriva dall'inserimento della tip in camera pulpare all'imbocco canalare, senza avere problemi nell'inserimento delle punte a 5 mm o a 1 mm dall'apice come previsto per le altre tecniche. Vengono utilizzate punte di nuovo disegno di 12 millimetri di lunghezza, di 300-400 micron di diametro, con terminale “*radial firing*”; i 4 mm finali sono liberati dalla pellicola di rivestimento in modo tale da permettere una maggior emissione laterale di energia, rispetto a quella frontale; questa modalità di emissione porta a un miglior utilizzo dell'energia laser che a soglia minimamente ablativa eroga una potenza di picco molto elevata per ogni singolo pulse (400 W), producendo così “*shock wave*” sugli irriganti, con un effetto fotoacustico e fotomeccanico importante sulla parete dentinale²⁵. La tecnica PIPS utilizza i seguenti parametri: energia 20 mJ, 15 pps, con impulso di 50 microsecondi e la specifica punta da 400 micron (lunga 14 mm) a emissione laterale, privata della guaina esterna negli ultimi 4 mm (*tapered and stripped tip*).



Punte endodontiche per tecnica PIPS.

Il protocollo prevede un'irrigazione/irradiazione con ipoclorito di sodio al 5,5% con tecnica PIPS, per 20 secondi, dopo ogni strumentazione canalare e passaggio finale con irrigazione/irradiazione con EDTA al 17% per 20 secondi prima dell'otturazione.

Il continuo miglioramento delle tecnologie sta portando a un'evoluzione dell'interazione laser con il tessuto bersaglio, a interazione laser-irrigante -tessuto (come in questa tecnica) con diminuzione degli effetti fisici indesiderati (termici) e aumentata perfusione ed efficacia degli effetti chimici (decontaminanti e chelanti) degli irriganti canalari.

6.1 - BIBLIOGRAFIA

1. Moritz A, Schoop U, Kluger W, Jakolitsch S, Sperr W. Laser in endodontology. Journal of Oral Laser Applications 2001;2:87-97.
2. Ricucci D, Siqueira JF Jr. Fate of the tissue in lateral canals and apical ramifications in response to pathologic conditions and treatment procedures. J Endod 2010 Jan;36(1):1-15.
3. Nagaoka S et al. Bacterial invasion into dentinal tubules of human vital and non vital teeth. J Endod 1995;21:70-73.
4. Ramachandran PN. Light and electron microscopic studies of root canal flora and periapical lesions. J Endod 1987;13:29-39.
5. Shovelton DS. The presence and distribution of microorganisms within non vital teeth. Br Dent J 1964;117:101-107.
6. Meryon SD et al. Penetration of dentine by three oral bacteria in vitro and their associated cytotoxicity. Int Endo J 1990;23:196-202.
7. Berutti E et al. Penetration ability of different irrigants into dentinal tubules. J Endod 1997;23:725-727.

8. Ghoddusi J, Rohani A, Rashed T, Ghaziani P, Akbari M. An evaluation of microbial leakage after using MTAD as a final irrigation. *JOE* 2007;vol 33,2:173-6.
9. Maiman TH. Stimulated optical radiation in ruby. *Nature* 1960;187:4493-494.
10. Weichmman JA. Laser use in endodontics. *Oral Surgery* 1972;31:416-20.
11. Schoop U, Kluger W, Moritz A, Nedjelik N, Georgopoulos A, Sperr W. Bactericidal effect of different laser systems in the deep layers of dentin. *Lasers Surg Med* 2004;35(2):111-6.
12. Moritz A. *Oral Laser Application*. Berlin: Quintessence Verlags-GmbH, 2006, 258-277.
13. Moritz A, Gutknecht N, Goharkhay K, Schoop U, Wernisch J, Sperr W. In vitro irradiation of infected root canals with a diode laser: results of microbiologic, infrared spectrometric, and stain penetration examinations. *Quintessence Int* 1997, Mar;28(3):205-9.
14. Schoop U, Kluger W, Dervisbegovic S, Goharkhay K, Wernisch J, Georgopoulos A, Sperr W, Moritz A. Innovative wavelengths in endodontic treatment. *Lasers Surg Med* 2006 Jul;38(6):624-30.
15. Wang QQ, Zhang CF, Yin XZ. Evaluation of the bactericidal effect of Er,Cr:YSGG, and Nd:YAG lasers in experimentally infected root canals. *J Endod* 2007 Jul;33(7):830-2. Epub 2007 May 7.
16. de Souza EB, Cai S, Simionato MR, Lage-Marques JL. High-power diode laser in the disinfection in depth of the root canal dentin. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2008 Jul;106(1):e68-72.
17. Benedicenti S, Cassanelli C, Signore A, Ravera G, Angiero F. Decontamination of root canals with the gallium-aluminum-arsenide laser: an in vitro study. *Photomed Laser Surg* 2008 Aug;26(4):367-70.
18. Hibst R, Stock K, Gall R, Keller U. Controlled tooth surface heating and sterilization by Er:YAG laser radiation. *Proc. SPIE*; vol. 2922:119-1261.
19. RizoIU IM, DeShazer GL. New laser-matter interaction concept to enhance hard tissue cutting efficiency. *Laser Tissue*. San Josè, California: Interaction V, Vol. 2134A, 309-317, 1994.
20. Meister J, Franzen R, Forner K, Grebe H, Stanzel S, Lampert F, Apel C. Influence of the water content in dental enamel and dentin on ablation with erbium YAG and erbium YSGG lasers. *J Biomed Opt* 2006 May-Jun;11(3):34030.
21. Chen Z, Bogaerts A, Vertes A. Phase explosion in atmospheric pressure infrared laser ablation from water-rich targets. *App Phys Letters* 2006;89,041503:1-3.

22. De Moor RJ, Meire M, Goharkhay K, Moritz A, Vanobbergen J. Efficacy of ultrasonic versus laser-activated irrigation to remove artificially placed dentin debris plugs. *J Endod* 2010 Sep;36(9):1580-3.
23. de Groot SD, Verhaagen B, Versluis M, Wu MK, Wesselink PR, van der Sluis LW. Laser activated irrigation within root canals: cleaning efficacy and flow visualization. *Int Endod J* 2009 Dec;42(12):1077-83.
24. Hmud R, Kahler WA, George R, Walsh LJ. Cavitation effects in aqueous endodontic irrigants generated by near-infrared lasers. *J Endod* 2010 Feb;36(2):275-8. Epub 2009 Dec 4.
25. DiVito E, Peters OA, Olivi G. Effectiveness of the Erbium:YAG laser and new design radial and stripped tips in removing the smear layer after root canal instrumentation. *Lasers Med Sci* 2010 Dec 1.
26. Moritz A, Schoop U, Goharkhay K, Jakolitsch S, Kluger W, Wernisch J, Sperr W. The bactericidal effect of Nd:YAG, Ho:YAG, and Er:YAG laser irradiation in the root canal: an in vitro comparison. *J Clin Laser Med Surg* 1999;17(4):161-4.
27. Eldeniz AU, Ozer F, Hadimli HH, Erganis O. Bactericidal efficacy of Er,Cr:YSGG laser irradiation against *Enterococcus faecalis* compared with NaOCl irrigation: an ex vivo pilot study. *Int Endod J* 2007 Feb;40(2):112-9.
28. Araki AT, Ibraki Y, Kawakami T, Lage-Marques JL. Er:Yag laser irradiation of the microbiological apical biofilm. *Braz Dent J* 2006;17(4):296-9.
29. Noiri Y, Katsumoto T, Azakami H, Ebisu S. Effects of Er:YAG laser irradiation on biofilm-forming bacteria associated with endodontic pathogens in vitro. *J Endod* 2008 Jul;34(7):826-9. Epub 2008 May 22.
30. Gordon W, Atabakhsh VA, Meza F, Doms A, Nissan R, RizoIU I, Stevens RH. The antimicrobial efficacy of the erbium, chromium:yttrium-scandium-gallium-garnet laser with radial emitting tips on root canal dentin walls infected with *Enterococcus faecalis*. *J Am Dent Assoc* 2007 Jul;138(7):992-1002.
31. Schoop U, Goharkhay K, Klimscha J, Zagler M, Wernisch J, Georgopoulos A, Sperr W, Moritz A. The use of the erbium, chromium:yttrium-scandium-gallium-garnet laser in endodontic treatment: the results of an in vitro study. *J Am Dent Assoc* 2007 Jul;138(7):949-55.
32. Schoop U, Barylyak A, Goharkhay K, Beer F, Wernisch J, Georgopoulos A, Sperr W, Moritz A. The impact of an erbium, chromium:yttrium-scandium-gallium-garnet laser with radial-firing tips on endodontic treatment. *Lasers Med Sci* 2007 Nov 20 [Epub ahead of print].

33. Sjogren U et al. Factors affecting the long term results of endodontics treatment. J Endodon 1990; 16:498-504.
34. Kerekes K, Tronstad L. Long term results of endodontic treatment performed with a standardized technique. J Endod 1979; 5:83-90.
35. Kreisler M et al. Efficacy of NaOCl/H₂O₂ irrigation and GaAlAs laser decontamination of root canals in vitro. Lasers in surgery and Medicine 2003; 32:189-196.

7. REVISIONE DELLA LETTERATURA

7.1 - METODOLOGIA DI RICERCA DELLA LETTERATURA

Fonti di dati e strategia di ricerca

La revisione è stata eseguita come stabilito dai protocolli Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analyses (PRISMA)²¹.

La domanda di ricerca strutturata è stata sviluppata utilizzando la struttura PICO (population, intervention, comparison, and outcome): PIPS e Er:YAG LAI: (I) hanno prestazioni migliori (O) rispetto ad altri metodi di irrigazione (C) in esperimenti in vitro basati su campioni di denti estratti (P)? Una ricerca completa della letteratura è stata condotta su PubMed (MEDLINE), Ovid (MEDLINE), Web of Science (tutti i database), SCOPUS e la biblioteca Cochrane dal 2008 al 2018.

La strategia di ricerca utilizzata per esplorare il database è stata la seguente: (((((((Photon induced photoacoustic streaming) OR Photon initiated photoacoustic streaming) OR Laser activated irrigation) OR Er: YAG laser) OR Sodium hypochlorite irrigation) OR Irrigation solution) OR Photoacoustic streaming) OR Hypochlorite sodium Er YAG).

Gli articoli che risultavano dalla strategia di ricerca di cui sopra sono stati prima controllati in base al titolo e all'abstract. Nel secondo screening, gli articoli interi sono stati letti, e gli articoli sono stati esclusi in base a criteri di esclusione predeterminati.

Screening e selezione degli studi

I titoli identificati dalle ricerche sono stati prima vagliati. Se il titolo indicava una possibile

inclusione, è stato valutato l'abstract. In caso di dubbio, è stato letto il testo completo dell'articolo.

Dopo la valutazione degli abstract, sono stati identificati gli articoli considerati idonei per la revisione, e sono stati valutati tutti gli articoli a testo completo.

Gli studi sono stati selezionati per l'inclusione se soddisfacevano tutti i seguenti criteri: uno studio sull'irrigazione endodontica, uno studio sulla tecnica LAI e uno studio sulla PIPS.

I criteri di esclusione di questa revisione sono stati i seguenti:

1. Studio su un blocco di plastica che simula il sistema dei canali radicolari;
2. Studio sui denti non umani;
3. Studio su un laser Er:YAG senza utilizzare tecniche PIPS o LAI;
4. Studio sui laser Er,Cr:YSGG, a diodi e al neodimio senza confronto con un laser Er:YAG;
5. Articolo non in inglese.

Estrazione dei dati

Per quanto riguarda l'estrazione dei dati degli studi inclusi è stato utilizzato un modulo di estrazione dei dati progettato per riassumere ogni studio.

Sono state registrate le seguenti variabili: informazioni sull'autore, anno di pubblicazione, tipo di denti, tipo di laser, numero di denti impiegati, master file apicale, tipo di punta del laser, impostazioni del laser, tempo di attivazione e concentrazione delle soluzioni irriganti. Ogni studio è stato analizzato in termini di similarità in modo da poter eseguire una metanalisi.

Tuttavia, una metanalisi non è stata indicata a causa della considerevole eterogeneità metodologica. Piuttosto, è stata intrapresa un'analisi descrittiva dei risultati dei singoli studi.

Valutazione della qualità (rischio di bias)

La qualità di ogni studio selezionato è stata valutata in base ai seguenti criteri:

1. Il calcolo di un'adeguata dimensione del campione è stato eseguito prima di iniziare gli esperimenti?
2. Le preparazioni dei denti sono state eseguite da un solo operatore?
3. La procedura di preparazione dei denti era standardizzata?
4. I denti sono stati divisi a caso in gruppi?
5. La procedura di irrigazione è stata eseguita da un solo operatore?
6. Sono stati usati gli stessi irriganti nei gruppi di controllo e nei gruppi di prova?
7. È stata riportata l'esperienza dell'operatore sulle tecniche PIPS e LAI?
8. Le analisi sono state eseguite da valutatori in cieco rispetto ai gruppi?

Dopo aver raccolto questi elementi, gli studi sono stati classificati con un alto, moderato o basso rischio di bias. Gli studi che non sono riusciti a riportare cinque o più degli elementi elencati sopra sono stati classificati ad alto rischio, gli studi che non sono riusciti a riportare tre o quattro elementi sono stati classificati a rischio moderato, e gli studi che non sono riusciti a riportare due elementi o meno sono stati classificati a basso rischio.

7.2 - RISULTATI

Il database PubMed ha prodotto 343 citazioni nel primo processo di screening (revisione del titolo e dell'abstract); 218 articoli sono stati selezionati secondo i criteri di esclusione, e 125 articoli sono stati sottoposti alla revisione del testo completo per la valutazione dell'ammissibilità con 66 articoli aggiuntivi esclusi durante questo processo. Il risultato finale è stato l'inclusione di 59 articoli per questa revisione (figura 1).

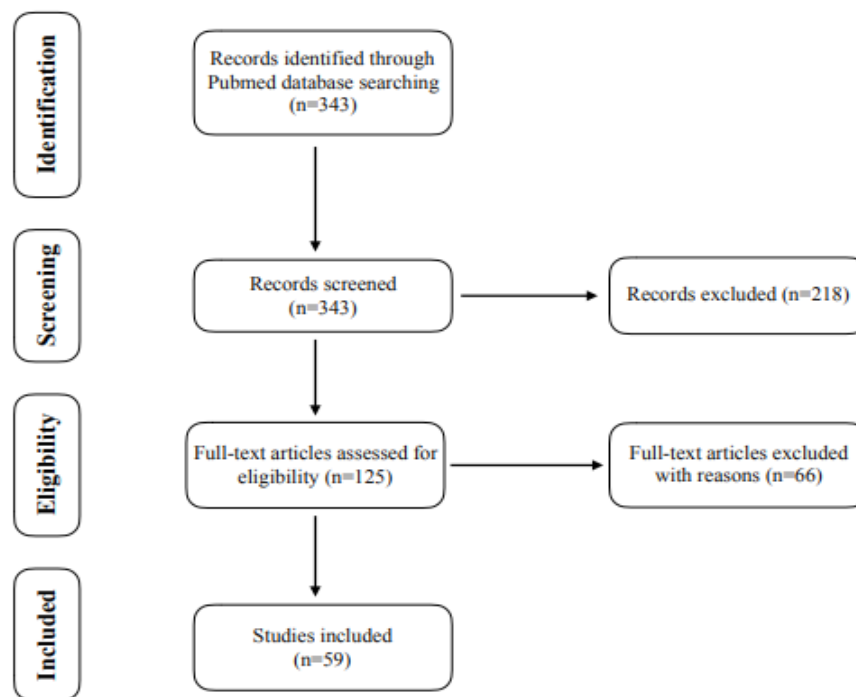


Figure 1. Articles Selection Flow Chart.

Risultati e interessi

I 59 articoli inclusi in questa revisione sono stati pubblicati tra il 2008 e il 2018. I denti utilizzati negli studi sono denti umani monoradicolarati estratti che sono generalmente decoronati per avere la stessa lunghezza di lavoro. Sono stati strumentati da diversi sistemi di file e in particolare sono stati preparati per ogni studio, includendo la creazione di irregolarità intracanalari artificiali, l'incubazione di microrganismi, il taglio a metà e così via.

Hanno ricevuto diversi protocolli di irrigazione prima di essere analizzati con la microscopia ottica, confocale o elettronica.

Per valutare i risultati di questi articoli, sono stati stabiliti i criteri di analisi per questa revisione come segue:

1. Disinfezione del canale radicolare e rimozione dei detriti
2. Rimozione del fango dentinale
3. Medicazione del canale radicolare e rimozione del cemento
4. Forza di adesione del cemento resinoso
5. Penetrazione dei tubuli dentinali
6. Estrusione apicale

Rischio di bias

Tutti i 59 studi inclusi sono stati valutati per il rischio di bias (Tabella 1), e solo 4 (7%) hanno mostrato un basso rischio di bias; 10 (17%) avevano un rischio alto. La maggior parte degli studi, 45 (76%), aveva un rischio medio.

Table 1. Quality of Assessment of Reviewed Articles

	Sample size calculation	Single operator in teeth preparation	Teeth preparation standardization	Teeth randomization	Single operator in teeth irrigation	Same irrigants for control and test groups	Operator experience	Blinding of the evaluator	Classification
George et al, 2008 (75)	N	N	Y	Y	N	Y	N	N	High
George et al, 2008 (60)	N	N	N	N	N	Y	N	N	High
de Groot et al, 2009 (22)	N	N	Y	N	N	Y	N	Y	High
De Moor et al, 2010 (23)	N	N	Y	Y	N	Y	N	N	High
DiVito et al, 2011 (20)	N	N	Y	Y	N	N	N	N	High
Peters et al, 2011 (31)	N	N	Y	N	N	Y	N	N	High
DiVito et al, 2012 (19)	N	N	Y	Y	N	N	N	Y	High
Jaramillo et al, 2012 (41)	N	N	Y	N	N	Y	N	N	High
Pedullà et al, 2012 (42)	N	N	Y	Y	N	Y	N	N	High
Sahar-Heft et al, 2013 (50)	N	N	Y	Y	N	Y	N	N	High
Zhu et al, 2013 (43)	N	N	Y	N	N	Y	N	Y	High
Al Shahrani et al, 2014 (33)	N	N	Y	N	N	Y	N	N	High
Arslan et al, 2014 (24)	N	N	Y	N	N	Y	N	Y	High
Guidotti et al, 2014 (54)	N	N	Y	N	N	N	N	Y	High
Mathew et al, 2014 (45)	N	N	Y	Y	N	Y	N	N	High
Olivi et al, 2014 (34)	N	N	Y	Y	N	Y	N	N	High
Sathe et al, 2014 (49)	N	N	Y	N	N	Y	N	N	High
Akcay et al, 2015 (65)	N	N	Y	Y	N	Y	N	N	High
Akyuz Ekim et al, 2015 (52)	N	N	N	N	N	Y	N	Y	High
Akyuz Ekim et al, 2015 (66)	N	N	Y	N	N	Y	N	N	High
Arslan et al, 2015 (63)	N	N	Y	Y	N	Y	N	N	High
Arslan et al, 2015 (67)	N	N	Y	Y	N	Y	N	N	High
Arslan et al, 2015 (81)	N	N	Y	Y	N	Y	N	N	High
Deleu et al, 2015 (25)	N	N	N	N	N	Y	N	Y	High
Li et al, 2015 (61)	N	N	Y	N	N	Y	N	N	High
Neelakantan et al, 2015 (35)	N	N	Y	Y	Y	Y	Y	N	Moderate
Sahar-Heft et al, 2015 (50)	N	N	Y	Y	N	Y	N	N	High
Yost et al, 2015 (72)	N	N	Y	N	N	Y	N	N	High
Balié et al, 2016 (44)	N	N	Y	Y	N	Y	N	N	High

Table 1. Continued

	Sample size calculation	Single operator in teeth preparation	Teeth preparation standardization	Teeth randomization	Single operator in teeth irrigation	Same irrigants for control and test groups	Operator experience	Blinding of the evaluator	Classification
Akcay et al, 2016 (69)	N	N	Y	Y	N	Y	N	N	High
Arslan et al, 2016 (55)	N	N	Y	Y	N	Y	N	N	High
Ayranci et al, 2016 (51)	N	N	Y	Y	N	Y	N	N	High
Azim et al, 2016 (37)	N	N	Y	N	N	Y	Y	N	High
Cheng et al, 2016 (38)	N	N	N	N	N	Y	N	N	High
Jaramillo et al, 2016 (36)	N	N	Y	Y	N	Y	N	N	High
Keles et al, 2016 (30)	N	N	Y	Y	N	Y	N	N	High
Lloyd et al, 2016 (64)	N	N	Y	Y	N	Y	N	Y	Moderate
Miletic et al, 2016 (70)	N	N	Y	N	N	Y	N	N	High
Nasher et al, 2016 (59)	N	N	N	N	N	Y	N	Y	High
Vangala et al, 2016 (71)	N	N	N	Y	N	N	N	N	High
Akcay et al, 2017 (68)	N	N	Y	N	N	Y	N	N	High
Cheng et al, 2017 (40)	N	N	Y	Y	N	Y	N	N	High
Cheng et al, 2017 (46)	N	N	Y	Y	N	Y	N	N	High
Gokturk et al, 2017 (62)	N	N	Y	Y	N	Y	N	Y	Moderate
Golob et al, 2017 (48)	N	N	Y	N	N	N	N	N	High
Kamacı et al, 2017 (57)	N	N	Y	Y	N	Y	N	Y	Moderate
Kasić et al, 2017 (47)	N	N	Y	Y	N	Y	N	N	High
Mancini et al, 2017 (56)	N	N	Y	Y	N	Y	N	Y	Moderate
Ozsés Ozkaya et al, 2017 (39)	N	N	Y	Y	N	Y	N	Y	Moderate
Suman et al, 2017 (57)	N	N	Y	Y	N	Y	N	Y	Moderate
Turkel et al, 2017 (26)	N	N	Y	Y	N	Y	N	Y	Moderate
Verstraeten et al, 2017 (28)	N	N	Y	Y	N	Y	N	N	High
Arslan et al, 2018 (74)	Y	N	Y	Y	N	Y	N	N	Moderate
Azim et al, 2018 (73)	N	N	Y	N	N	Y	Y	N	High
Gorus et al, 2018 (53)	N	N	Y	Y	N	Y	N	N	High
Ozbay et al, 2018 (58)	N	N	Y	N	N	Y	N	N	High
Passalidou et al, 2018 (29)	N	N	Y	Y	N	Y	N	N	High

Y, reported in the article; N, not reported in the article.

Rimozione dei detriti

Ci sono stati 11 studi che hanno discusso la rimozione dei detriti. Quattro di essi hanno concluso che LAI era più efficace di altri metodi nella rimozione dei detriti di dentina dai canali radicolari. Tutti e quattro gli studi hanno trovato che le tecniche PIPS e LAI sono significativamente più efficienti per eliminare i detriti rispetto alla sola irrigazione convenzionale con siringa (CSI). Tre studi hanno anche concluso che le tecniche PIPS e LAI rimuovono significativamente più detriti dentinali apicali rispetto all'irrigazione ultrasonica passiva (PUI)²²⁻²⁴. Arslan et al²⁴ hanno dimostrato che PIPS è significativamente più efficiente di EndoActivator.

Gli autori degli altri sette studi non hanno trovato un'efficacia di debridement significativamente maggiore di PIPS rispetto a Er: YAG LAI o altre tecniche. Hanno concluso che non vi è alcuna differenza tra la tecnica LAI e/o i gruppi PIPS e PUI²⁵, EndoVac²⁶, irrigazione attivata dagli ultrasuoni (UAI)²⁷⁻²⁹, irrigazione attivata manualmente (MAI), o CSI^{26,27}. Due articoli hanno riportato che la LAI con un laser Er: YAG ha eliminato significativamente più detriti rispetto alla PIPS (Tabella 2)^{25, 30}.

Disinfezione dei canali

Diciotto studi hanno affrontato la disinfezione canalare. Due terzi di essi (11/18) hanno concluso che PIPS aveva un'elevata efficacia di uccisione batterica, significativamente più efficace di CSI³¹⁻⁴⁰.

Questo è stato anche più efficace di diverse altre tecniche di attivazione, tra cui PUI^{31, 35}, irradiazione Nd: YAG³⁹, EndoActivator, e XP-endo Finisher file³⁷. Uno studio ha trovato che la PIPS accoppiata al 6% di NaOCl ha inibito il 100% di *E. faecalis*, ma non l'ha confrontata con altre tecniche⁴¹.

Altri sette studi non hanno mostrato alcun miglioramento significativo nell'eradicazione batterica in seguito all'attivazione con PIPS. I risultati sono stati testati e confrontati con CSI⁴²⁻⁴⁴, irradiazione laser a diodi⁴⁵, PUI⁴⁴, UAI⁴⁶, e Er,Cr:YSGG LAI⁴⁷. Uno studio ha variato le impostazioni del laser e la concentrazione di NaOCl e ha concluso che la decontaminazione era efficiente solo con il 5% di NaOCl e nessun protocollo di irrigazione diverso da PIPS⁴⁸ (Tabella 2).

Table 2. Descriptive Data Related to Disinfection and Debris Removal Effect

Author/Year	Study Objects	Number of Teeth	MAF	Laser Tip	Laser Settings (Pulse Energy, Repetition Rate, Power, Pulse Widths)	Activation Time	NaOCl	Main Findings
de Groot ²² (2009)	LAI, PUI, CI	60	35/0.06	280 µm, 30 mm	100 mj, n/a, n/a, n/a	50 s	2%	LAI removed more debris than CI
De Moor ²³ (2010)	LAI, PUI, CI	100	40/0.06	200 µm, n/a	75 mj, 20 Hz, n/a, n/a	20 s	2.5%	LAI removed more debris than CI
Peters ¹¹ (2011)	PIPS, PUI, CI	70	20/0.07	400 µm, 21 mm	50 mj, 10 Hz, n/a, n/a	30 s	6%	PIPS killed <i>E. faecalis</i> most effectively
Jaramillo ⁴¹ (2012)	PIPS	24	20/0.07	400 µm, 14 mm	20 mj, 15 Hz, 0.3 W, 50 µs	20 s	6%	PIPS inhibited 100% the development of <i>E. faecalis</i>
Pedullà ⁴² (2012)	PIPS, CI	148	25/0.06	400 µm, 12 mm	20 mj, 15 Hz, n/a, 50 µs	30 s	5%	No difference in bacterial reduction between groups
Sahar-Helil ⁴³ (2013)	LAI (Er:YAG), CI	60	30/0.09	0.4 µm, n/a	500 mj, 12 Hz, n/a, n/a	4x15 s CHX, 4x15 s EDTA	2% CHX, 17% EDTA	LAI killed more <i>E. faecalis</i> than CI
Zhu ⁴³ (2013)	PIPS, CI	48	40/0.06	400 µm, 12 mm	20 mj, 15 Hz, 0.3 W, 50 µs	60 s	3%	No difference in bacterial reduction between groups
Al Shahrani ¹³ (2014)	PIPS, CI	60	25/0.08	600 µm, 9 mm	20 mj, 15 Hz, 0.3 W, 50 µs	90 s	6%	PIPS killed more <i>E. faecalis</i> than CI
Arslan ⁴⁴ (2014)	PIPS, SI, UAI, CI	48	40/0.06	300 µm, 14 mm	20 mj, 15 Hz, 0.3 W, 50 µs	60 s	1%	PIPS removed debris most effectively
Mathew ⁴⁵ (2014)	PIPS, SI, diode laser, CI	130	20/0.07	200 µm, n/a	75 mj, 20 Hz, n/a, n/a	60 s NaOCl + 60 s EDTA	5% NaOCl, 17% EDTA	Diode laser killed <i>E. faecalis</i> most effectively
Olivi ⁴⁴ (2014)	PIPS, CI	26	25/0.06	600 µm, 9 mm	20 mj, 15 Hz, 0.3 W, 50 µs	60 s	5%	PIPS inhibited 100% the development of <i>E. faecalis</i> , unlike CI
Deleu ³³ (2015)	PIPS, LAI, PUI, CI, MAI, diode laser	25	30/0.06	PIPS, LAI: 300 µm, 14 mm	PIPS: 40 mj, 20 Hz, n/a, 50 µs LAI: 60 mj, 20 Hz, n/a, 50 µs	20 s	2.5%	LAI performed similar to PUI and more effectively than the rest in debris removal
Neelakantan ³³ (2015)	PIPS, UAI, diode laser, CI	280	25/0.06	400 µm, 21 mm	50 mj, 10 Hz, n/a, 50 ms	30 s, 60 s, 90 s	3%, 6%	PIPS performed similarly to the diode laser, both killed more <i>E. faecalis</i> than the rest
Balić ⁴⁴ (2016)	PIPS, SI, CI	91	30/0.07	600 µm, n/a	20 mj, 15 Hz, n/a, 50 µs	60 s	2.5%, Qmix	No difference in bacterial reduction between groups
Lloyd ⁴⁴ (2016)	PIPS, CI	14	30/0.06	600 µm, 9 mm	20 mj, 15 Hz, 0.3 W, n/a	240 s	6%	PIPS removed more debris than CI
Jaramillo ⁴⁶ (2016)	PIPS, CI	48	30/0.09	n/a	n/a	3x30 s	Buffered 0.5%	PIPS killed more <i>E. faecalis</i> than CI
Keleş ³⁹ (2016)	PIPS, Er:YAG, Nd:YAG	42	45/ n/a	300 µm, 14 mm	50 mj, 20 Hz, 1 W, 50 µs	60 s	5%	Er:YAG LAI removed debris most effectively
Azim ¹² (2016)	PIPS, XP Finisher, SI, CI	18	25/0.04	n/a	20 mj, 15 Hz, n/a, n/a	3x30 s	6%	PIPS killed <i>E. faecalis</i> most effectively
Cheng ⁴⁸ (2016)	PIPS, CSI	155	n/a	300 µm, n/a	20 mj, 15 Hz, 0.3/0.5/1 W, 50 µs	20/30 s	5.25%	PIPS killed more <i>E. faecalis</i> than CI
Keleş ³⁹ (2016)	PIPS, LAI (Er:YAG, Nd:YAG), PUI, SAF, CI	90	45/n/a	PIPS: Er:YAG: 300 µm, 14 mm Nd:YAG: 320 µm, n/a	PIPS: 45 mj, 20 Hz, 0.9 W, 50 µs LAI: 50 mj, 20 Hz, 1 W, 50 µs	PIPS, LAI: 3x10 s PUI, SAF: 60 s	5%	All other methods removed more debris than CI. The Er:YAG LAI group had the least amount of residual debris
Ozses Ozkaya ¹ (2017)	PIPS, Nd:YAG, CI	110	50/n/a	PIPS: 400 µm, 14 mm Nd:YAG: 200 µm, n/a	PIPS: 35 mj, 15 Hz, n/a, 50 µs Nd:YAG: n/a, 15 Hz, 1.5 W, n/a	PIPS: 20 s LAI: 4x5 s	1%	PIPS killed more <i>E. faecalis</i> than Nd:YAG when using saline, but similarly when using NaOCl
Cheng ⁴⁸ (2017)	PIPS, UAI, CI	115	40/0.04	300 µm, n/a	20 mj, 25 Hz, 0.5 W, 50 µs	PIPS: 30 s, UI: 60 s	5.25%	PIPS killed more <i>E. faecalis</i> than CI, but similarly to UAI
Kasić ⁴⁷ (2017)	PIPS, LAI (Er,Cr:YSGG), Nd:YAG laser	30	30/0.09	PIPS: 400 µm, 14 mm LAI, Nd:YAG: 200 µm, n/a	PIPS: 20 mj, 15 Hz, 0.3 W, 50 µs LAI: n/a, 15 Hz, 1.25 W, 150 µs Nd:YAG: n/a, 15 Hz, 1.5 W, 100 µs	PIPS: 40 s LAI: n/a	0.9% saline	Er,Cr:YSGG killed <i>E. faecalis</i> most effectively, followed by PIPS
Cheng ⁴⁸ (2017)	PIPS, CI	355	15/0.04 20/0.04 25/0.04 30/0.04 40/0.04	300 µm, n/a	20 mj, 15/25/50 Hz, 0.3/0.5/1 W, 50 µs	20 s, 40 s, 60 s	5.25%	PIPS improved disinfection efficiency of NaOCl at each apical terminal working width
Turkel ²⁶ (2017)	PIPS, ANP, CI	142	40/0.06	300 µm, 14 mm	20 mj, 15 Hz, 0.3 W, 50 µs	30 s	5%	PIPS removed debris similarly to ANP, CI
Kamacı ²⁷ (2017)	PIPS, LAI (diode laser), UAI, CI	75	50/0.05	PIPS: 300 nm, n/a LAI: 200 µm, n/a	PIPS: 20 mj, 15 Hz, 0.3 W, n/a LAI: n/a, n/a, 2 W, n/a	20 s	2.5%	UAI removed more debris than CI. No difference between other groups
Verstraeten ²⁸ (2017)	PIPS, LAI (Er:YAG), UAI	69	30/0.07	PIPS: 400 µm, 14 mm, LAI: 300 µm, 14 mm	PIPS: 20 mj, 20 Hz, n/a, 50 µs LAI: 20 mj, 20 Hz, n/a, 50 µs	3x20 s	2.5%	No difference in debris removal between groups
Golob ⁴⁸ (2017)	PIPS	86	30/0.06	600 µm, 9 mm	10/20 mj, n/a, 0.15/0.3 W, n/a	30 s NaOCl + 30 s EDTA + 2x30 s NaOCl + 30 s water	1%, 3%, 5% NaOCl, 17% EDTA	Decontamination was only efficient when using 5% NaOCl
Passalidou ²⁹ (2018)	LAI (Er:YAG), UAI, MAI, CI	50	25/0.08	400/600 µm, n/a	20 mj, 20 Hz, n/a, 50 µs	3x20 s	2.5%	LAI removed more debris than CI, but similarly to UAI, MAI

CI, conventional irrigation; LAI, laser-activated irrigation; MAF, master apical file; MAI, manual activated irrigation; n/a, not available; ANP, apical negative pressure; PIPS, photon-induced photoacoustic streaming; PUI, passive ultrasonic irrigation; SAF, self-adjusting file; SI, sonic irrigation; UAI, ultrasonically activated irrigation.

Rimozione del fango dentinale

Diciassette studi sono stati inclusi nell'analisi della rimozione dello smear layer. Sette hanno evidenziato una migliore rimozione dello smear layer dopo il trattamento con laser Er:YAG. Gli autori hanno notato che i laser Er:YAG erano significativamente più efficaci di Nd:YAG LAI e MAI⁴⁹, PUI^{50, 51}, laser a diodi⁵², e CSI^{30, 50, 52, 53}. Avevano anche risultati migliori di ANP (EndoVac), Nd:YAG LAI, e file autoregolante (SAF)^{30, 52}, ma questo miglioramento non era statisticamente significativo. L'irrigazione con NaOCl e EDTA attivati dal laser è risultata significativamente migliore rispetto al solo NaOCl attivato, al solo EDTA attivato e al solo EDTA non attivato⁵⁴.

I restanti studi non hanno mostrato alcuna superiorità del laser Er:YAG nella rimozione del fango dentinale dai canali radicolari rispetto ad altre tecniche tra cui EndoActivator^{55, 56}, EndoVac^{26, 56, 57}, LAI (Nd:YAG, Er,Cr: YSGG)⁵⁸, e CSI^{26, 43, 59}. Nonostante questo, tre studi hanno ancora trovato che PIPS era migliore di CSI^{55, 57, 58}. Gli altri hanno testato solo PIPS o LAI e non li hanno confrontati con le altre tecniche^{19, 20, 60} (Tabella 3).

Table 3. Descriptive Data Related to Smear Layer Removal Effect

Author	Study objects	Ni. of teeth	MAF	Laser tip	Laser settings (pulse energy, repetition rate, power, pulse widths)	Activation time	EDTA	Main findings
George ⁴⁹ (2008)	LAI (Er:YAG, Er,Cr:YSGG)	150	50/0.05	Er:YAG, Er,Cr:YSGG: 400 µm, n/a	Er:YAG: 200 mj, 20 Hz, 4 W, n/a Er,Cr:YSGG: 62.5 mj, 20 Hz, 1.25 W, n/a	50 s	15% EDTAC	Conical fibers performed better than plain fibers, no difference between 2 laser systems
DiVito ³⁰ (2011)	PIPS	50	K-file #30 30/0.06	400 µm, 14 mm	20 mj, 10 Hz, 0.2 W, 50 µs	20 s, 40 s	17%	PIPS removed more smear layer with EDTA than with saline and saline alone
DiVito ³⁰ (2012)	PIPS	80	30/0.06	400 µm, 12 mm	20 mj, 15 Hz, 0.3 W, 50 µs	30 s	17%	PIPS removed more smear layer with EDTA than with saline and saline alone
Zhu ⁴³ (2013)	PIPS, CI	48	40/0.06	400 µm, 12 mm	20 mj, 15 Hz, 0.3 W, 50 µs	60 s	PIPS: 3% NaOCl, CI: 3% NaOCl +17% EDTA	PIPS removed the smear layer similarly to CI
Sathe ¹⁹ (2014)	PIPS, LAI (Nd:YAG), MAI	30	30/0.09	PIPS: 400 µm, 12 mm LAI: 200 µm, n/a	PIPS: 40 mj, 20 Hz, n/a, 50 µs LAI: n/a, 15 Hz, 1.5 W, 50 µs	PIPS: n/a LAI: 3x5 s NaOCl, 3x5 s EDTA	17% EDTA 5.25% NaOCl	PIPS removed more smear layer than LAI, MAI
Guidotti ¹⁴ (2014)	LAI, CI	48	30/0.09	300 µm, n/a	50 mj, 20 Hz, 1 W, n/a	3x5 s NaOCl; 3x5 s NaOCl + 3x5 s EDTA; 3x5 s EDTA	2.5% NaOCl 17% EDTA	The LAI with NaOCl+EDTA group gave better results than NaOCl alone activated, EDTA alone activated and EDTA alone non-activated groups
Akyuz Ekim ⁵² (2015)	PIPS, LAI (diode laser, Nd:YAG, Er:YAG), ANP, PUI, CI	80	40/0.06	PIPS, LAI: 300 µm, 17 mm	LAI: diode laser (n/a, 15 Hz, 1.5 W, n/a), Nd:YAG (100 mj, 15 Hz, 1.5 W, n/a), Er:YAG (50 mj, 10 Hz, 0.5 W, n/a) PIPS: 20 mj, 15 Hz, 0.3 W, 50 µs	20 s	17%	PIPS removed more smear layer than CI and the diode laser, similarly to the rest
Sahar-Helift ⁶⁰ (2015)	LAI (Er:YAG), PUI, CI	60	30/0.09	400 µm, 17 mm	50 mj, 10 Hz, 0.5 W, n/a	60 s	17%	LAI removed more smear layer than PUI and CI
Arslan ³⁵ (2016)	PIPS, LAI (Er:YAG), SI, CI	64	40/0.06	LAI: 300 µm, n/a PIPS: 400 µm, n/a	LAI: 50 mj, 20 Hz, 1 W, n/a PIPS: 20 mj, 15 Hz, 0.3 W, n/a	3x20 s	QMIX	PIPS performed similarly to SI, both were better than CI
Ayranci ⁵¹ (2016)	LAI (Er:YAG), PUI	48	40/0.06	300 µm, 14 mm	n/a, n/a, n/a, 50 ms	60 s	17%	LAI removed more smear layer than PUI
Nasher ³⁹ (2016)	PIPS, CI	64	40/n/a	600 µm, 9 mm	20 mj, 50 Hz, 0.3 W, 50 µs	2x30 s	20%	PIPS performed similarly to CI
Keles ³⁰ (2016)	PIPS, LAI (Er:YAG, Nd:YAG), PUI, SAF, CI	90	45/n/a	PIPS, Er:YAG: 300 µm, 14 mm Nd:YAG: 320 µm, n/a	PIPS: 45 mj, 20 Hz, 0.9 W, 50 µs LAI: 50 mj, 20 Hz, 1 W, 50 µs	PIPS, LAI: 3x10 s NaOCl + 3x10 s EDTA PUI, SAF: 60 s EDTA + 60 s NaOCl	5% NaOCl 17% EDTA	All other methods were more effective than CI. The Er:YAG LAI group had the least amount of residual smear layer
Suman ²⁷ (2017)	LAI (Er:YAG), SI, ANP, CI	40	40/0.06	300 µm, n/a	50 mj, 10 Hz, 0.5 W, n/a	LAI: 3x15 s EDTA + 3x15 s NaOCl SI: 60 s EDTA + 60 s NaOCl	5.25% NaOCl 17% EDTA	ANP was significantly more effective than all other groups in the apical third.
Turkel ²⁶ (2017)	PIPS, ANP, CI	142	40/0.06	300 µm, 14 mm	20 mj, 15 Hz, 0.3 W, 50 µs	30 s NaOCl + 30 s EDTA	5% NaOCl 17% EDTA	PIPS performed similarly to ANP and CI
Mancini ³⁶ (2017)	LAI (Er:YAG), PUI, ANP, SI	80	40/0.06	300 µm, 14 mm	60 mj, 20 Hz, n/a, 50 µs	LAI: 4x5 s NaOCl PUI, SI: 60 s NaOCl	5.25% NaOCl	ANP was the most effective at 1 mm from apex; SI was more effective than PUI, LAI at 3, 5, and 8 mm from apex
Gorus ⁵³ (2018)	LAI (Er:YAG), CI	60	30/0.09	n/a	20/40 mj, 15 Hz, 0.3/0.6 W, n/a	LAI: 2x3 s NaOCl SI: 60 s NaOCl	5% NaOCl	LAI removed more smear layer than CI; no difference between parameters
Ozbay ³⁸ (2018)	PIPS, LAI (Nd:YAG, Er,Cr:YSGG), CI	96	40/0.06	PIPS: 300 µm, n/a Nd:YAG: 320 µm, n/a Er,Cr:YSGG: 300 µm, n/a	PIPS: 20 mj, 15 Hz, 0.3 W, n/a Nd:YAG: 60 mj, 15 Hz, 1.5 W, n/a Er,Cr:YSGG: n/a, 20 Hz, 1.5 W, 140 ms	8x5 s distilled water 4x5 s NaOCl + 4x5 s EDTA	2.5% NaOCl 17% EDTA	Lasers were more effective than CI; no difference between laser systems

CI, conventional irrigation; LAI, laser-activated irrigation; MAF, master apical file; n/a, not available; MAI, manual activated irrigation; ANP, apical negative pressure; PIPS, photon-induced photoacoustic streaming; PUI, passive ultrasonic irrigation; SAF, self-adjusting file; SI, sonic irrigation; UAI, ultrasonically activated irrigation.

Medicazione del canale radicolare e rimozione del cemento

Tutti e quattro gli studi che si sono interessati di questo tema hanno osservato che l'uso di Er:YAG con tecnica PIPS o LAI ha migliorato i risultati. LAI o PIPS hanno prodotto risultati simili alla PUI in due studi^{61, 62} e migliori in altri due studi^{63, 64}. Hanno anche dato risultati migliori di EndoActivator^{61, 63}, XP-endo Finisher file, e CanalBrush⁶². Hanno dato risultati migliori di CSI in tutti e quattro gli studi (Tabella 4).

Table 4. Descriptive Data Related to Calcium Hydroxide Removal Effect

Author	Study Objects	No. of Teeth	MAF	Laser Tip	Laser Settings (Pulse Energy, Repetition Rate, Power, Pulse Widths)	Activation Time	Irrigant	Main Findings
Arslan ⁶³ (2015)	PIPS, UAI, SI, CI	48	40/0.06	300 µm, 14 mm	30 mj, 30 Hz, 0.9 W, n/a	PIPS, UAI: 3x20 s SI: 60 s	17% EDTA	PIPS performed most effectively
Li ⁶¹ (2015)	PIPS, UAI, SI, CI	24	25/0.08	300 µm, 14 mm	20 mj, 15 Hz, 0.3 W, n/a	3x20 s	3% NaOCl	PIPS and PUI performed similarly, better than the rest
Lloyd ⁶⁴ (2016)	PIPS, PUI, CI	30	25/0.06	600 µm, 9 mm	20 mj, 15 Hz, n/a, n/a	3x30 s NaOCl + 30 s EDTA	8.25% NaOCl 17% EDTA	PIPS performed most effectively
Gokturk ⁶² (2017)	LAI (Er:YAG), PUI, SI, XP Finisher, CanalBrush, CI (beveled needle, double side-vented needle)	105	40/0.06	ISO 30, 28 mm	100 mj, 10 Hz, 1 W, n/a	LAI, PUI, XP Finisher, CanalBrush: 60 s SI: 120 s	2.5% NaOCl	LAI and PUI performed similarly, better than the rest

CI, conventional irrigation; LAI, laser activated irrigation; MAF, master apical file; n/a, not available; ANP, apical negative pressure; PIPS, photon-induced photoacoustic streaming; PUI, passive ultrasonic irrigation; SI, sonic irrigation; UAI, ultrasonically activated irrigation.

Forza di adesione del cemento per canali radicolari

Sono stati inclusi sette studi qui. Quattro di essi hanno evidenziato una maggiore forza di adesione dei cementi resinosi dopo la PIPS. È stato riportato che PIPS ha dato risultati significativamente migliori rispetto a CSI⁶⁵⁻⁶⁸ e UAI⁶⁷. Ha avuto la stessa efficacia della PUI in due studi⁶⁵⁻⁶⁹ ma migliore in uno studio⁶⁶. In quest'ultimo, PIPS ha superato LAI (Er:YAG, Nd:YAG, laser a diodi), PUI e EndoVac. Tuttavia, gli altri tre studi non hanno evidenziato la migliore penetrazione causata da PIPS rispetto a CSI^{26, 70}, MAI⁷¹, e EndoVac²⁶ (Tabella 5).

Table 5. Descriptive Data Related to Resin Sealer Bond Strength

Author	Study Objects	No. of Teeth	MAF	Laser Tip	Laser Settings (Pulse Energy, Repetition Rate, Power, Pulse Widths)	Activation Time	Concentration of Irrigant Solutions	Main Findings
Akçay ⁶⁵ (2015)	PIPS, PUI, SI, CI	72	40/0.06	300 µm, 14 mm	30 mJ, 30 Hz, 0.9 W, n/a	All 30 s EDTA + 30 s NaOCl	2.5% NaOCl 17% EDTA	PIPS and PUI gave similar results, better than the rest
Akyuz Ekim ⁶⁶ (2015)	PIPS, LAI (diode laser, Nd:YAG, Er:YAG), ANP, PUI, CI	32	40/0.06	PIPS, LAI: 300 µm, n/a	LAI: diode laser (n/a, n/a, 1.2 W, n/a), Nd:YAG (100 mJ, 15 Hz, 1.5 W, n/a), Er:YAG (50 mJ, 10 Hz, 0.5 W, 1000 µs), PIPS: 20 mJ, 15 Hz, 0.3 W, 50 µs	PIPS, LAI, PUI: 4x5 s NaOCl + 4x5 s EDTA, ANP: 20 s NaOCl + 20 s EDTA	2.5% NaOCl 17% EDTA	PIPS gave the best result
Arslan ⁶⁷ (2015)	PIPS, UAI, CI	72	40/0.06	400 µm, 14 mm	20 mJ, 15 Hz, 0.3 W, n/a	PIPS: 60 s NaOCl, 60 s EDTA UI: 60 s NaOCl	5% NaOCl 17% EDTA	PIPS with distilled water gave the best result; negative effect of NaOCl and EDTA on bond strength of RelyX U200
Akçay ⁶⁸ (2016)	PIPS, PUI, CI	156	40/0.06	300 µm, 14 mm	30 mJ, 30 Hz, 0.9 W, 100 µs	All 60 s NaOCl	5% NaOCl	PIPS and PUI gave similar results, better than CI
Miletic ⁶⁹ (2016)	PIPS, CI	40	30/0.09	400 µm, 14 mm	20 mJ, 15 Hz, n/a, 50 µs	60 s	17% EDTA	PIPS gave similar result to CI
Vangala ⁷¹ (2016)	PIPS, MAI, CI	30	30/0.09	n/a	40 mJ, 20 Hz, n/a, n/a	PIPS: 40 s EDTA MAI: 60 s EDTA	17% EDTA	PIPS gave similar results to MAI, both were better than CI
Turkel ⁷⁰ (2017)	PIPS, ANP, CI	142	40/0.06	300 µm, 14 mm	20 mJ, 15 Hz, 0.3 W, 50 µs	30 s NaOCl + 30 s EDTA	5% NaOCl 17% EDTA	PIPS gave similar results to the rest

CI, conventional irrigation; MAF, master apical file; MAI, manual activated irrigation; n/a, not available; ANP, apical negative pressure; PIPS, photon-induced photoacoustic streaming; PUI, passive ultrasonic irrigation; UAI, ultrasonically activated irrigation.

Penetrazione dell'irrigante nei tubuli dentinali

È stato trovato solo uno studio⁶⁹ sulla penetrazione dell'irrigante nei tubuli dentinali. Gli autori hanno concluso che PIPS ha portato a un'area di penetrazione significativamente migliore rispetto a PUI, EndoActivator e CSI (Tabella 6).

Table 6. Descriptive Data Related to Irrigant Penetration Into the Dentinal Tubule

Author	Study Objects	Number of Teeth	MAF	Laser Tip	Laser Settings (Pulse Energy, Repetition Rate, Power, Pulse Widths)	Activation Time	Irrigant	Main Findings
Akçay ⁶⁹ (2017)	PIPS, LAI (Er:YAG), PUI, SI, CI	65	40/0.06	PIPS, LAI: 300 µm, 14 mm	PIPS: 30 mJ, 30 Hz, 0.9 W, n/a LAI: 50 mJ, 20 Hz, 1 W, n/a	60 s NaOCl	5% NaOCl	Lasers gave the best results

CI, conventional irrigation; LAI, laser-activated irrigation; MAF, master apical file; n/a, not available; PIPS, photon-induced photoacoustic streaming; PUI, passive ultrasonic irrigation; SI, sonic irrigation.

Estrusione apicale

Tre studi su cinque hanno concluso che PIPS e Er:YAG LAI producono più estrusione di tutti gli altri metodi di irrigazione tranne CSI in uno studio⁷². I sistemi di irrigazione includevano EndoVac, EndoActivator, XP-endo Finisher file e CSI⁷²⁻⁷⁴. I due studi rimanenti hanno concluso che l'attivazione laser ha prodotto quantità di estrusione statisticamente simili a UAI e CSI e più dell'ago con foro laterale^{24, 75} (Tabella 7).

Table 7. Descriptive Data Related to Apical Extrusion Effect

Author	Study Objects	No. of Teeth	MAF	Laser Tip	Laser Settings (Pulse Energy, Repetition Rate, Power, Pulse Widths)	Activation Time	Irrigants	Main Findings
George ²⁵ (2008)	LAI (Er:YAG, Er,Cr:YSGG), CI	16	50/0.05	400 µm, n/a	Er:YAG: 200 mj, n/a, 4 W, 50 ms; Er,Cr:YSGG: 62.5 mj, n/a, 1.25 W, 50 ms	5 s	Dye	The volume of extruded fluid was similar to conventional 25-G needles, but the fluid was distributed further from the apex
Arslan ⁸¹ (2015)	PIPS, UAI, CI	64	30/0.09	300 µm, 14 mm	20 mj, 15 Hz, 0.3 W, 50 µs; 30 mj, 30 Hz, 0.9 W, 50 µs	30 s	1% Na OCl	PIPS at both 0.3 W and 0.9 W resulted in similar solution extrusion to the conventional irrigation or ultrasonic irrigation
Yost ⁷² (2015)	PIPS, ANP, SI, CI	36	35/0.04 55/0.04	600 µm, 9 mm	20 mj, 15 Hz, n/a, 50 µs 10 mj, 15 Hz, n/a, 50 µs	PIPS: 3x30 s SI: 60 s	6% NaOCl	No difference was found between the 10 mj and 20 mj PIPS laser groups. EndoVac demonstrated significantly less potential for apical extrusion than PIPS and Max-i-Probe
Arslan ⁷⁴ (2018)	PIPS, CI	60	25/0.06	300 µm, 14 mm	20 mj, 15 Hz, 0.3 W, 50 µs	20 s	bidistilled water	PIPS activation was associated with significantly more extrusion debris in curved canals compared with no activation
Azim ⁷³ (2018)	PIPS, ANP, XP Finisher, SI, CI	20	40/0.04	n/a	20 mj, 15 Hz, n/a, n/a	3x30 s	3% NaOCl	PIPS extrudes more irrigant than other systems

CI, conventional irrigation; LAI, laser-activated irrigation; MAF, master apical file; n/a, not available; ANP, apical negative pressure; PIPS, photon-induced photoacoustic streaming; SI, sonic irrigation; UAI, ultrasonically activated irrigation.

7.3 - DISCUSSIONE

Le tecniche PIPS e LAI sono descritte in letteratura come un metodo rivoluzionario e potente per attivare l'irrigante. Questi strumenti utilizzano l'effetto fototermico dell'irradiazione diretta così come l'effetto fotoacustico. Il vantaggio principale è quello di superare gli effetti indesiderati della carbonizzazione della dentina del canale radicolare. Gli studi PIPS tendono a sostituire la tecnica LAI. Infatti, 17 dei 55 articoli pubblicati dal 2011 (anno del primo articolo PIPS) riguardano la tecnica LAI.

Questa revisione mostra l'eterogeneità dei protocolli testati: parametri della fibra laser, parametri del laser, concentrazione dell'irrigante, tempo di attivazione e numero di cicli di attivazione. Ci sono anche differenze nella preparazione dei campioni: il tipo di denti, lo stato dei denti (appena estratti o provenienti da una collezione), il protocollo di preparazione dei denti, i metodi di incubazione, i metodi di conteggio dei batteri e i metodi di analisi. Anche altri fattori come l'esperienza degli operatori e le differenze nell'uso dell'irrigante tra i gruppi di prova e di controllo possono influenzare i risultati.

11 dei 18 articoli hanno concluso che il laser Er:YAG ha beneficiato della procedura di attivazione come giudicato dai risultati di disinfezione. Tuttavia, ci sono poche prove in termini di medicina evidence-based perché questi studi erano studi in vitro o ex vivo. I denti erano stati infettati solo da *E. faecalis*, mentre la realtà clinica è un'infezione polimicrobica, anche con funghi. Ad oggi, nessun modello sperimentale in vitro ha riprodotto i biofilm

endodontici⁷⁶. La sua eliminazione tramite la tecnica PIPS o LAI non è mai stata studiata. Inoltre, alcuni studi^{19, 20, 41, 48, 60} hanno esaminato solo la tecnica LAI o PIPS senza confronto con altre tecniche. L'assenza di studi in vivo o clinici riduce il potere scientifico del laser Er:YAG per l'attivazione di soluzioni irriganti. Sono necessari ulteriori studi di ricerca clinica, specialmente studi in vivo, per dimostrare l'efficacia scientifica di queste tecniche e stabilire un livello sufficiente di prova. Un altro fattore da considerare sono le soluzioni irriganti. Sono stati utilizzati tre irriganti principali: NaOCl, EDTA e Qmix. C'è una grande varietà nella concentrazione di NaOCl: 1%, 2%, 2,5%, 3%, 5%, 5,25% e 6%. L' NaOCl al 2,5% risulta essere migliore grazie alla sua maggiore efficienza e alla minore citotossicità⁷⁷. Tuttavia, l'NaOCl al 6% ha dimostrato di essere la soluzione disinfettante più efficace contro un biofilm di *E. faecalis* di 3 settimane⁷⁸. Gli articoli hanno utilizzato diversi tempi di incubazione per valutare l'efficacia dei protocolli di disinfezione di *E. faecalis*: 2 settimane, 3 settimane e 4 settimane. Altri autori hanno riscontrato che il biofilm di *E. faecalis* non era completamente stabilito fino a 3 settimane⁷⁶.

È stato riscontrato consenso solo nei risultati sulla rimozione della medicazione e del cemento; tutti gli studi hanno osservato che l'uso del laser Er:YAG ha migliorato i risultati rispetto ad altri metodi di rimozione. Molti fattori come la variazione delle condizioni del campione, i protocolli di irrigazione e le soluzioni irriganti ostacolano il confronto diretto dei risultati degli studi. La mancanza di prove scientifiche concrete rende difficile trarre conclusioni generali sull'efficacia di PIPS e LAI.

Tuttavia, l'irrigazione è un elemento chiave del successo endodontico. La tecnica PIPS è uno strumento che fa risparmiare tempo ai clinici. Un vantaggio importante di questa tecnica è che l'irrigante viene spinto in tutto il sistema dei canali radicolari.

Non ci sono chiare raccomandazioni in letteratura sui tempi di irrigazione o di attivazione³⁵. La durata dell'applicazione dovrebbe essere la più breve possibile ma con la massima efficienza. Non c'è consenso sul tempo di applicazione. È stata notata un'ampia varietà di tempi di attivazione da 20 secondi a 240 secondi; nessuno degli articoli esaminati ha lavorato per creare un protocollo riproducibile.

Un protocollo clinico completo per il risciacquo finale è stato suggerito per la prima volta nel 2012⁷⁹. Il protocollo prevede tre cicli di 30 secondi di attivazione PIPS con NaOCl seguiti da tre cicli di 30 secondi di spegnimento. Il passo successivo è 30 secondi di irrigazione con PIPS solo con acqua. L'EDTA viene poi utilizzato con PIPS per 30 secondi con PIPS e acqua. Una pubblicazione ha anche testato questa efficacia e ha concluso che questo protocollo era il più efficace rispetto a CSI e PUI⁶⁴.

Anche i vari parametri del laser sono importanti. Meire et al. hanno riferito che una maggiore

energia (40 mJ rispetto a 10 e 20 mJ) accoppiata a 30 Hz di frequenza elimina più detriti canalari. Ci sono onde d'urto fotoacustiche più potenti a potenze più elevate⁸⁰. L'energia utilizzata per la tecnica LAI può arrivare a 500 mJ³² con 4 W di potenza^{60, 75}. Tuttavia, nessun'altra pubblicazione ha riportato tali parametri. Inoltre, articoli pubblicati di recente hanno mostrato che questa tecnica ha utilizzato parametri vicini a quelli di PIPS. L'uso di PIPS all'impostazione 20 mJ/0,3 W è stato riportato come efficace nella rimozione del fango dentinale senza alcun danno al tessuto dentinale¹⁹. Cheng et al. hanno anche testato il laser Er:YAG a 0,3, 0,5 e 1,0 W per 20 o 30 secondi. Hanno concluso che i metodi più efficienti erano l'attivazione con 0,5 e 1,0 W per 30 secondi³⁸. L'attivazione laser a 0,5 W per 30 secondi combinata con NaOCl è l'opzione preferibile a causa della minore potenza di emissione. Inoltre, la tecnica PIPS usata a 10 o 20 mJ e 0,3 o 0,9 W ha prodotto un volume di estrusione apicale simile^{72, 81}.

7.4 - BIBLIOGRAFIA

1. Haapasalo M, Shen Y, Wang Z, Gao Y. Irrigation in endodontics. *Br Dent J.* 2014;216(6):299-303. doi: 10.1038/sj.bdj.2014.204.
2. Kandaswamy D, Venkateshbabu N. Root canal irrigants. *J Conserv Dent.* 2010;13(4):256-264. doi: 10.4103/0972-0707.73378.
3. Peters OA, Laib A, Göhring TN, Barbakow F. Changes in root canal geometry after preparation assessed by highresolution computed tomography. *J Endod.* 2001;27(1):1-6. doi: 10.1097/00004770-200101000-00001.
4. Moorer WR, Wesselink PR. Factors promoting the tissue dissolving capability of sodium hypochlorite. *Int Endod J.* 1982;15(4):187-196. doi: 10.1111/j.1365-2591.1982.tb01277.x.
5. Abbott P V. Medicaments: aids to success in endodontics. Part 1. A review of the literature. *Aust Dent J.* 1990;35(5):438-448. doi: 10.1111/j.1834-7819.1990.tb05427.x.
6. Zehnder M. Root Canal Irrigants. *J Endod.* 2006;32(5):389-398. doi: 10.1016/j.joen.2005.09.014.
7. Mohammadi Z, Shalavi S, Yaripour S, Kinoshita JI, Manabe A, Kobayashi M, et al, Smear layer removing ability of root canal irrigation solutions: a review. *J Contemp Dent Pract.* 2019;20(3):395-402.
8. Loel DA. Use of acid cleanser in endodontic therapy. *J Am Dent Assoc.* 1975;90(1):148-151. doi:10.14219/jada.archive.1975.0010.
9. Yamaguchi M, Yoshida K, Suzuki R, Nakamura H. Root canal irrigation with citric acid solution. *J Endod.* 1996;22(1):27-29. doi: 10.1016/S0099-2399(96)80232-9.
10. Torabinejad M, Handysides R, Khademi AA, Bakland LK. Clinical implications of the

- smear layer in endodontics: A review. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2002;94(6):658-666. doi: 10.1067/moe.2002.128962.
11. Kokkas AB, Boutsoukias AC, Vassiliadis LP, Stavrianos CK. The influence of the smear layer on dentinal tubule penetration depth by three different root canal sealers: An in vitro study. *J Endod.* 2004;30(2):100-102. doi: 10.1097/00004770-200402000-00009.
 12. Rossi-Fedele G, Guastalli AR, Doğramaci EJ, Steier L, De Figueiredo JA. Influence of pH changes on chlorine-containing endodontic irrigating solutions. *Int Endod J.* 2011;44(9):792-799. doi: 10.1111/j.1365-2591.2011.01911.x.
 13. Baumgartner JC, Ibay AC. The chemical reactions of irrigants used for root canal debridement. *J Endod.* 1987;13(2):47-51. doi: 10.1016/S0099-2399(87)80153-X.
 14. Grawehr M, Sener B, Waltimo T, Zehnder M. Interactions of ethylenediamine tetraacetic acid with sodium hypochlorite in aqueous solutions. *Int Endod J.* 2003;36(6):411-417. doi: 10.1046/j.1365-2591.2003.00670.x.
 15. Jiang LM, Lak B, Eijsvogels LM, Wesselink P, van der Sluis LW. Comparison of the cleaning efficacy of different final irrigation techniques. *J Endod.* 2012;38(6):838-841. doi: 10.1016/j.joen.2012.03.002.
 16. Diaci J, Gaspirc B. Comparison of Er:YAG and Er,Cr:YSGG lasers used in dentistry. *J Laser Health Acad.* 2012;2012(1):1-13.
 17. Mir M, Gutknecht N, Poprawe R, Vanweersch L, Lampert F. Visualising the procedures in the influence of water on the ablation of dental hard tissue with erbium:yttriumaluminium-garnet and erbium, chromium:yttriumscandium-gallium-garnet laser pulses. *Lasers Med Sci.* 2009;24(3):365-374. doi: 10.1007/s10103-008-0571-1.
 18. Olivi G, DiVito E. Photoacoustic endodontics using PIPS: experimental background and clinical protocol. *J Laser Health Acad.* 2012;2012(1):22-25.
 19. DiVito E, Peters OA, Olivi G. Effectiveness of the erbium: YAG laser and new design radial and stripped tips in removing the smear layer after root canal instrumentation. *Lasers Med Sci.* 2012;27(2):273-280. doi: 10.1007/s10103-010-0858-x.
 20. DiVito EE, Colonna MP, Olivi G. The Photoacoustic Efficacy of an Er:YAG Laser with Radial and Stripped Tips on Root Canal Dentin Walls: An SEM Evaluation. *J Laser Dent.* 2011;19(1):156-161.
 21. Moher D, Shamseer L, Clarke M, Ghersi D, Liberati A, Petticrew M, et al Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. *Syst Rev.* 2015;4(1):1. doi: 10.1186/2046-4053-4-1.
 22. de Groot SD, Verhaagen B, Versluis M, Wu MK, Wesselink PR, van der Sluis LW. Laser-activated irrigation within root canals: Cleaning efficacy and flow visualization. *Int*

- Endod J. 2009;42(12):1077-1083. doi: 10.1111/j.1365- 2591.2009.01634.x.
23. De Moor RJ, Meire M, Goharkhay K, Moritz A, Vanobbergen J. Efficacy of ultrasonic versus laser-activated irrigation to remove artificially placed dentin debris plugs. *J Endod.* 2010;36(9):1580-1583. doi: 10.1016/j.joen.2010.06.007.
24. Arslan H, Capar ID, Saygili G, Gok T, Akcay M. Effect of photon-initiated photoacoustic streaming on removal of apically placed dentinal debris. *Int Endod J.* 2014;47(11):1072-1077. doi: 10.1111/iej.12251.
25. Deleu E, Meire MA, De Moor RJ. Efficacy of laserbased irrigant activation methods in removing debris from simulated root canal irregularities. *Lasers Med Sci.* 2015;30(2):831-835. doi: 10.1007/s10103-013-1442-y.
26. Turkel E, Onay EO, Ungor M. Comparison of three final irrigation activation techniques: effects on canal cleanness, smear layer removal, and dentinal tubule penetration of two root canal sealers. *Photomed Laser Surg.* 2017;35(12):672- 681. doi: 10.1089/pho.2016.4234.
27. Kamaci A, Aydin B, Erdilek N. The effect of ultrasonically activated irrigation and laser based root canal irrigation methods on debris removal. *Int J Artif Organs.* 2018;41(2):71-75. doi: 10.5301/ijao.5000646.
28. Verstraeten J, Jacquet W, De Moor RJ, Meire MA. Hard tissue debris removal from the mesial root canal system of mandibular molars with ultrasonically and laser-activated irrigation: a micro-computed tomography study. *Lasers Med Sci.* 2017;32(9):1965-1970. doi:10.1007/s10103-017- 2297-4.
29. Passalidou S, Calberson F, De Bruyne M, De Moor R, Meire MA. Debris removal from the mesial root canal system of mandibular molars with laser-activated irrigation. *J Endod.* 2018;44(11):1697-1701. doi:10.1016/j.joen.2018.06.007.
30. Keles A, Kamalak A, Keskin C, Akçay M, Uzun İ. The efficacy of laser, ultrasound and self-adjustable file in removing smear layer debris from oval root canals following retreatment: A scanning electron microscopy study. *Aust Endod J.* 2016;42(3):104-111. doi:10.1111/aej.12145.
31. Peters OA, Bardsley S, Fong J, Pandher G, Divito E. Disinfection of root canals with photon-initiated photoacoustic streaming. *J Endod.* 2011;37(7):1008-1012. doi:10.1016/j.joen.2011.03.016.
32. Sahar-Helft S, Stabholtz A, Moshonov J, Gutkin V, Redenski I, Steinberg D. Effect of Er:YAG laser-activated irrigation solution on *Enterococcus faecalis* biofilm in an ex-vivo root canal model. *Photomed Laser Surg.* 2013;31(7):334-341. doi:10.1089/pho.2012.3445.
33. Al Shahrani M, DiVito E, Hughes CV, Nathanson D, Huang GT. Enhanced removal of *Enterococcus faecalis* biofilms in the root canal using sodium hypochlorite plus

- photoninduced photoacoustic streaming: An in vitro study. *Photomed Laser Surg.* 2014;32(5):260-266. doi:10.1089/pho.2014.3714.
34. Olivi G, DiVito E, Peters O, Kaitsas V, Angiero F, Signore A, et al, Disinfection efficacy of photon-induced photoacoustic streaming on root canals infected with *Enterococcus faecalis*: An ex vivo study. *J Am Dent Assoc.* 2014;145(8):843-848. doi:10.14219/jada.2014.46.
35. Neelakantan P, Cheng CQ, Mohanraj R, Sriraman P, Subbarao C, Sharma S. Antibiofilm activity of three irrigation protocols activated by ultrasonic, diode laser or Er:YAG laser in vitro. *Int Endod J.* 2015;48(6):602-610. doi:10.1111/iej.12354.
36. Jaramillo DE, Aguilar E, Arias A, Ordinola-Zapata R, Aprecio RM, Ibarrola JL. Root canal disinfection comparing conventional irrigation vs photon-induced photoacoustic streaming (PIPS) using a buffered 0.5 % sodium hypochlorite solution. *Evid Based Endod.* 2016;1(1):6. doi:10.1186/s41121-016-0006-6.
37. Azim AA, Aksel H, Zhuang T, Mashtare T, Babu JP, Huang GT. Efficacy of 4 irrigation protocols in killing bacteria colonized in dentinal tubules examined by a novel confocal laser scanning microscope analysis. *J Endod.* 2016;42(6):928-34. doi:10.1016/j.joen.2016.03.009.
38. Cheng X, Chen B, Qiu J, He W, Lv H, Qu T, et al, Bactericidal effect of Er:YAG laser combined with sodium hypochlorite irrigation against *Enterococcus faecalis* deep inside dentinal tubules in experimentally infected root canals. *J Med Microbiol.* 2016;65(2):176-187. doi:10.1099/jmm.0.000205.
39. Ozses Ozkaya B, Gulsahi K, Ungor M, Gocmen JS. A Comparison of Er:YAG laser with photon-initiated photoacoustic streaming, Nd:YAG laser, and conventional irrigation on the eradication of root dentinal tubule infection by *Enterococcus faecalis* Bbiofilms: A Scanning electron microscopy study. *Scanning.* 2017;2017:6215482. doi:10.1155/2017/6215482.
40. Cheng X, Xiang D, He W, Qiu J, Han B, Yu Q, et al, Bactericidal Effect of Er:YAG laser-activated sodium hypochlorite irrigation against biofilms of *Enterococcus faecalis* isolate from canal of root-filled teeth with periapical lesions. *Photomed Laser Surg.* 2017;35(7):386- 392. doi:10.1089/pho.2017.4293.
41. Jaramillo DE, Aprecio RM, Angelov N, Divito E. Efficacy of photon induced photoacoustic streaming (PIPS) on root canals infected with *Enterococcus faecalis*: A pilot study. *Endod Prac.* 2012;5(3):28-32.
42. Pedullà E, Genovese C, Campagna E, Tempera G, Rapisarda E. Decontamination efficacy of photon-initiated photoacoustic streaming (PIPS) of irrigants using lowenergy laser settings: An ex vivo study. *Int Endod J.* 2012;45:865-870. doi:10.1111/j.1365-

2591.2012.02044.x.

43. Zhu X, Yin X, Chang JW, Wang Y, Cheung GS, Zhang C. Comparison of the Antibacterial effect and smear layer removal using photon-initiated photoacoustic streaming aided irrigation versus a conventional irrigation in singlerooted canals: An in vitro study. *Photomed Laser Surg.* 2013;31(8):371-377. doi:10.1089/pho.2013.3515.
44. Balić M, Lucić R, Mehadžić K, Bago I, Anić I, Jakovljević S, et al, The efficacy of photon-initiated photoacoustic streaming and sonic-activated irrigation combined with QMiX solution or sodium hypochlorite against intracanal *E. faecalis* biofilm. *Lasers Med Sci.* 2016;31(2):335-342. doi:10.1007/s10103-015-1864-9.
45. Mathew J, Emil J, Paulaian B, John B, Raja J, Mathew J. Viability and antibacterial efficacy of four root canal disinfection techniques evaluated using confocal laser scanning microscopy. *J Conserv Dent.* 2014;17(5):444-448. doi:10.4103/0972-0707.139833.
46. Cheng X, Tian T, Tian Y, Xiang D, Qiu J, Liu X, et al, Erbium:yttrium aluminum garnet laser-activated sodium hypochlorite irrigation: A promising procedure for minimally invasive Endodontics. *Photomed Laser Surg.* 2017;35(12):695-701. doi:10.1089/pho.2017.4274.
47. Kasić S, Knezović M, Beader N, Gabrić D, Malčić AI, Baraba A. Efficacy of three different lasers on eradication of *Enterococcus faecalis* and *Candida albicans* biofilms in root canal system. *Photomed Laser Surg.* 2017;35(7):372- 377. doi:10.1089/pho.2016.4258.
48. Golob BS, Olivi G, Vrabec M, El Feghali R, Parker S, Benedicenti S. Efficacy of photon-induced photoacoustic streaming in the reduction of *Enterococcus faecalis* within the root canal: Different settings and different sodium hypochlorite concentrations. *J Endod.* 2017;43(10):1730- 1735. doi:10.1016/j.joen.2017.05.019.
49. Sathe S, Hegde V, Jain PA, Ghunawat D. Effectiveness of Er: YAG (PIPS) and Nd: YAG activation on final irrigants for smear layer removal - SEM observation. *J Dent Lasers.* 2014;8(1):8-13. doi:10.4103/0976-2868.134110.
50. Sahar-Helft S, Sarp AS, Stabholtz A, Gutkin V, Redenski I, Steinberg D. Comparison of positive-pressure, passive ultrasonic, and laser-activated irrigations on smear-layer removal from the root canal surface. *Photomed Laser Surg.* 2015;33(3):129-135. doi:10.1089/pho.2014.3788.
51. Ayranci LB, Arslan H, Akcay M, Capar ID, Gok T, Saygili G. Effectiveness of laser-assisted irrigation and passive ultrasonic irrigation techniques on smear layer removal in middle and apical thirds. *Scanning.* 2016;38(2):121-127. doi:10.1002/sca.21247.
52. Akyuz Ekim SN, Erdemir A. Comparison of different irrigation activation techniques on smear layer removal: An in vitro study. *Microsc Res Tech.* 2015;78(3):230-239.

doi:10.1002/jemt.22466.

53. Gorus Z. A comparative evaluation of smear layer removal by using different Er:YAG lasers parameters: an in-vitro scanning electron microscopic study. *Niger J Clin Pract.* 2018;21(12):1602-6.
54. Guidotti R, Merigo E, Fornaini C, Rocca JP, Medioni E, Vescovi P. Er:YAG 2,940-nm laser fiber in endodontic treatment: A help in removing smear layer. *Lasers Med Sci.* 2014;29(1):69-75. doi:10.1007/s10103-012-1217-x.
55. Arslan D, Guneser MB, Dincer AN, Kustarci A, Er K, Siso SH. Comparison of smear layer removal ability of QMix with different activation techniques. *J Endod.* 2016;42(8):1279-1285. doi:10.1016/j.joen.2016.04.022.
56. Mancini M, Cerroni L, Iorio L, Dall'Asta L, Cianconi L. FESEM evaluation of smear layer removal using different irrigant activation methods (EndoActivator, EndoVac, PUI and LAI). An in vitro study. *Clin Oral Investig.* 2018;22(2):993-999. doi:10.1007/s00784-017-2179-y.
57. Suman S, Verma P, Prakash-Tikku A, Bains R, KumarShakya V. A comparative evaluation of smear layer removal using apical negative pressure (EndoVac), sonic irrigation (EndoActivator) and Er:YAG laser -An in vitro SEM study. *J Clin Exp Dent.* 2017;9(8):e981-e987. doi:10.4317/jced.53881.
58. Ozbay Y, Erdemir A. Effect of several laser systems on removal of smear layer with a variety of irrigation solutions. *Microsc Res Tech.* 2018;81(10):1214-1222. doi:10.1002/jemt.23122.
59. Nasher R, Franzen R, Gutknecht N. The effectiveness of the Erbium:Yttrium aluminum garnet PIPS technique in comparison to different chemical solutions in removing the endodontic smear layer. An in vitro profilometric study. *Lasers Med Sci.* 2016;31(9):1871-1882. doi:10.1007/s10103-016-2063-z.
60. George R, Meyers IA, Walsh LJ. Laser activation of endodontic irrigants with improved conical laser fiber tips for removing smear layer in the apical third of the root canal. *J Endod.* 2008;34(12):1524-1527. doi:10.1016/j.joen.2008.08.029.
61. Li D, Jiang S, Yin X, Chang JW, Ke J, Zhang C. Efficacy of needle, ultrasonic, and endoactivator irrigation and photon-induced photoacoustic streaming in removing calcium hydroxide from the main canal and isthmus: An in vitro micro-computed tomography and scanning electron microscopy study. *Photomed Laser Surg.* 2015;33(6):330-337. doi:10.1089/pho.2015.3903.
62. Gokturk H, Ozkocak I, Buyukgebiz F, Demir O. Effectiveness of various irrigation protocols for the removal of calcium hydroxide from artificial standardized grooves. *J Appl*

- Oral Sci. 2017;25(3):290-298. doi: 10.1590/1678- 7757-2016-0414.
63. Arslan H, Akcay M, Capar ID, Saygili G, Gok T, Ertas H. An in vitro comparison of irrigation using photon-initiated photoacoustic streaming, ultrasonic, sonic and needle techniques in removing calcium hydroxide. *Int Endod J.* 2015;48(3):246-251. doi:10.1111/iej.12306.
64. Lloyd A, Navarrete G, Marchesan MA, Clement D. Removal of calcium hydroxide from Weine Type II systems using photon-induced photoacoustic streaming, passive ultrasonic, and needle irrigation: a microcomputed tomography study. *J Appl Oral Sci.* 2016;24(6):543-548. doi:10.1590/1678-775720160234.
65. Akcay M, Arslan H, Mese M, Sahin NN. The effect of photon-initiated photoacoustic streaming, ultrasonically and sonically irrigation techniques on the push-out bond strength of a resin sealer to the root dentin. *Clin Oral Investig.* 2015;19(5):1055-1061. doi:10.1007/s00784-014- 1332-0.
66. Akyuz Ekim SN, Erdemir A. Effect of different irrigant activation protocols on push-out bond strength. *Lasers Med Sci.* 2015;30(8):2143-2149. doi:10.1007/s10103-015- 1772-z.
67. Arslan H, Akcay M, Saygili G, Keski A, MeŞe İT, Gok A, et al, Bond strength of self-adhesive resin cement to root dentin. Comparison of photon-initiated photoacoustic streaming technique with needle and ultrasonic irrigation. *Acta Odontol Scand.* 2015;73(5):348-52. doi:10.3109/00016 357.2014.967717.
68. Akcay M, Arslan H, Mese M, Durmus N, Capar ID. Effect of photon-initiated photoacoustic streaming, passive ultrasonic, and sonic irrigation techniques on dentinal tubule penetration of irrigation solution: a confocal microscopic study. *Clin Oral Investig.* 2017;21(7):2205- 2212. doi:10.1007/s00784-016-2013-y.
69. Akcay M, Arslan H, Durmus N, Mese M, Capar ID. Dentinal tubule penetration of AH Plus, iRoot SP, MTA fillapex, and guttaflow bioseal root canal sealers after different final irrigation procedures: A confocal microscopic study. *Lasers Surg Med.* 2016;48(1):70-76. doi:10.1002/lsm.22446.
70. Miletić I, Chieffi N, Rengo C, Ferrari M, Nathanson D, Baraba A. Effect of photon induced photoacoustic streaming (PIPS) on bond strength to dentine of two root canal filling materials. *Lasers Surg Med.* 2016;48(10):951- 954. doi:10.1002/lsm.22536.
71. Vangala A, Hegde V, Sathe S, Dixit M, Jain P. Effect of irrigating solutions used for postspace treatment on the push-out bond strength of glass fiber posts. *J Conserv Dent.* 2016;19(1):82-6. doi:10.4103/0972-0707.173206.
72. Yost RA, Bergeron BE, Kirkpatrick TC, Roberts MD, Roberts HW, Himel VT, et al, Evaluation of 4 different irrigating systems for apical extrusion of sodium hypochlorite. *J*

- Endod. 2015;41(9):1530-1534. doi:10.1016/j.joen.2015.05.007.
73. Azim AA, Aksel H, Margaret Jefferson M, Huang GT. Comparison of sodium hypochlorite extrusion by five irrigation systems using an artificial root socket model and a quantitative chemical method. *Clin Oral Investig.* 2018;22(2):1055-1061. doi:10.1007/s00784-017-2187-y.
74. Arslan D, Kustarci A. Efficacy of photon-initiated photoacoustic streaming on apically extruded debris with different preparation systems in curved canals. *Int Endod J.* 2018;51(Suppl 1):e65-e72. doi:10.1111/iej.12816.
75. George R, Walsh LJ. Apical extrusion of root canal irrigants when using Er:YAG and Er,Cr:YSGG lasers with optical fibers: An in vitro dye study. *J Endod.* 2008;34(6):706-708. doi:10.1016/j.joen.2008.03.003.
76. Kishen A, Haapasalo M. Biofilm models and methods of biofilm assessment. *Endod Topics.* 2012;22(1):58-78. doi:10.1111/j.1601-1546.2012.00285.x.
77. Marion JJC, Manhães FC, Bajo H, Duque TM. Efficiency of different concentrations of sodium hypochlorite during endodontic treatment. *Dent Press Endod.* 2012;2(4):32-37.
78. Wang Z, Shen Y, Haapasalo M. Effectiveness of endodontic disinfecting solutions against young and old *Enterococcus faecalis* biofilms in dentin canals. *J Endod.* 2012;38(10):1376-1379. doi:10.1016/j.joen.2012.06.035.
79. Koch JD, Jaramillo DE, DiVito E, Peters OA. Irrigant flow during photon-induced photoacoustic streaming (PIPS) using Particle Image Velocimetry (PIV). *Clin Oral Investig.* 2016;20(2):381-386. doi:10.1007/s00784-015-1562-9.
80. De Meyer S, Meire MA, Coenye T, De Moor RJ. Effect of laser-activated irrigation on biofilms in artificial root canals. *Int Endod J.* 2017;50(5):472-479. doi:10.1111/iej.12643.
81. Arslan H, Akcay M, Ertas H, Capar ID, Saygili G, Meşe M. Effect of PIPS technique at different power settings on irrigating solution extrusion. *Lasers Med Sci.* 2015;30(6):1641-1645. doi:10.1007/s10103-014-1633-1.
82. Huiz Peeters H, Suardita K, Mooduto L, Gutknecht N. Extrusion of irrigant in open apex teeth with periapical lesions following laser-activated irrigation and passive ultrasonic irrigation. *Iran Endod J.* 2018;13(2):169-175.

MATERIALI E

METODI

Selezione dei campioni

Sono stati utilizzati ottantasei denti monoradicolarati tra cui incisivi, canini e premolari mascellari; e canini e premolari mandibolari. La superficie radicolare esterna dei denti estratti per ragioni parodontali è stata ripulita con curette da tartaro e tessuti molli parodontali. I denti sono stati conservati in soluzione fisiologica a 4 ° C fino al momento dell'uso.

Preparazione del canale radicolare

La cavità d'accesso è stata preparata utilizzando frese diamantate coniche montate su di un manipolo ad alta velocità con raffreddamento ad acqua, e rifinita con un dispositivo ad ultrasuoni -START X no. 1 e 3 (Dentsply, Germania) sotto controllo del microscopio (Zeiss, Germania). È stato eseguito il glide-path alla lunghezza di lavoro utilizzando ISO 10 C-PILOT File (VDW) in acciaio inossidabile. I canali radicolari sono stati preparati con RECIPROC R25 e la preparazione apicale è stata completata manualmente utilizzando K-Reamers ISO 30/06 (VDW). Si è provveduto ad una abbondante irrigazione con NaOCl al 3% durante la preparazione e con acqua distillata sterile durante il lavaggio finale.

Infezione batterica del canale radicolare

Tre denti selezionati in modo casuale non sono stati infettati e sono serviti come gruppo di controllo negativo (Tabella 1). I canali radicolari dei restanti 83 denti sono stati asciugati utilizzando coni di carta sterili. I loro forami apicali sono stati sigillati con il sistema adesivo a due fasi FL-Bond II e il composito Beautiful Flow Plus F00 (SHOFU INC., Giappone). L'intera superficie esterna della radice di ciascun dente è stata isolata con due strati di smalto per unghie per prevenire l'infiltrazione batterica lateralmente e apicalmente. È stata utilizzata una coltura pura di *E. faecalis* vancomicina-resistente, proveniente da un'unica colonia e cresciuta in brodo per infusione cervello-cuore. Usando una micropipetta, i canali

radicolari sono stati inoculati con 10 μL di una sospensione batterica (circa 5×10^8 unità formanti colonie (CFU) per millilitro). I campioni sono stati incubati singolarmente in provette per quattro settimane a 37 ° C e ogni 24 ore veniva provvista una sospensione batterica fresca. Dopo l'incubazione, sono stati prelevati 10 μL di liquido di sospensione dal canale radicolare utilizzando la micropipetta e diluiti in serie in 0,9 mL di soluzione fisiologica. Per enumerare i batteri, aliquote da 0,1 μl di diluizioni appropriate di ciascun campione sono state distribuite su piastre di agar Columbia integrate con vancomicina (40 mg per litro). La conseguente incubazione è durata 24 ore a 37 ° C e sotto atmosfera con il 5% di anidride carbonica. Il limite di rilevamento per la crescita batterica era approssimativamente 10^2 CFU / mL di fluido di campionamento. Tre degli 83 denti infetti sono stati selezionati in modo casuale per essere gruppo di controllo positivi e non sono stati trattati. I restanti 80 denti sono stati divisi in 9 gruppi (Tabella 1).

Disinfezione canalare

La disinfezione è stata eseguita con LAI_{s.l.} a diverse impostazioni di potenza e concentrazioni di NaOCl (Tabella 1). Sono stati utilizzati due laser Erbium YAG (Er: YAG) (2.940 nm) seguendo un protocollo PIPS modificato (20). Una punta PIPS brevettata (600/9) è stata posizionata all'interno della camera pulpare e mantenuta ferma. Durante l'attivazione del laser, la punta è stata immersa in un irrigante che è stato applicato continuamente con una siringa (ago 27G luer lock con doppio sfiato laterale). La disinfezione PIPS è stata eseguita utilizzando due differenti impostazioni di potenza mentre l'acqua e l'aria sul sistema laser erano spente. I dettagli del trattamento effettuato sono raccolti nella Tabella 1. Il protocollo di irrigazione modificato era il seguente: (I.) 3 mL di NaOCl, attivazione PIPS 30 sec, tempo di riposo 60 sec; (II.) 3 mL di EDTA (acido etilendiamminotetraacetico) al 17% , attivazione PIPS 30 sec, riposo 60 sec; (III.) 2 cicli di 3 mL di NaOCl, attivazione PIPS 30 sec, riposo di 60 secondi tra ogni ciclo; (IV.) 3 mL di acqua sterile, attivazione PIPS 30 sec. Per la massima efficacia del campionamento, i campioni sono stati sigillati con Parafilm e agitati per 10 secondi (MSE Clinomixer). Dopo aver introdotto una soluzione di Ringer sterile nel canale radicolare, sono stati ottenuti aliquote da 10 μL di soluzione dal canale radicolare di ciascun campione e la conta batterica è stata eseguita immediatamente.

Valutazione di un'ulteriore crescita batterica

Dopo l'irrigazione e la conta batterica, tutti i campioni sono stati incubati per 48 ore a 37 ° C e in atmosfera con il 5% di anidride carbonica. Successivamente, sono state ottenute aliquote da 10 μL di soluzione come prima ed è stata eseguita una nuova conta batterica.

Microscopia elettronica a scansione (SEM)

Le analisi SEM sono state utilizzate per determinare la presenza di infezione batterica nelle sezioni trasversali del canale e la penetrazione batterica all'interno dei tubuli dentinali. Per la preparazione del campione, i canali radicolari sono stati asciugati per 24 ore a 21 ° C, sezionati longitudinalmente utilizzando un disco di carbonio senza acqua nebulizzata per formare la linea guida, e divisi in due metà con un martelletto. Dopo l'asciugatura per 24 ore a 21 ° C, sono stati rivestiti a spruzzo con l'oro. Utilizzando il SEM (Vega3_TESCAN) è stata esaminata l'intera area del canale radicolare (1–8 mm dall'apice) in ciascun campione.

Analisi statistica

La conta batterica in CFU è stata misurata utilizzando calcoli logaritmici per adeguarsi alla distribuzione normale. Sono state eseguite analisi statistiche utilizzando il software SPSS (v.14.0 per Windows). È stato utilizzato il test unidirezionale ANOVA per misure ripetute per verificare le differenze statistiche nelle variabili normalmente distribuite. I test di Sheffe a posteriori sono stati utilizzati quando sono stati confrontati due o più punti di dati medi. I dati sono stati riassunti come media, a seconda della variabile. Un p-value (bilaterale) di 0,05 è stato considerato statisticamente significativo.

Tabella 1: Elenco dei denti analizzati e delle condizioni di trattamento

Gruppo campione	Numero di denti	Infezione (S/N)	Trattamento (S/N)	Energia Laser (mJ)	Media potenza (W)	NaOCl (%)	Tipo di laser*
Denti infetti							
A	6	SI	SI	20	0,30	5	Laser 1
B	8	SI	SI	20	0,30	3	Laser 1
C	6	SI	SI	20	0,30	1	Laser 1
D	10	SI	SI	20	0,30	5	Laser 2
E	10	SI	SI	20	0,30	3	Laser 2
F	10	SI	SI	20	0,30	1	Laser 2
G	10	SI	SI	10	0,15	5	Laser 2
H	10	SI	SI	10	0,15	3	Laser 2
I	10	SI	SI	10	0,15	1	Laser 2
Gruppo di controllo positivo	3	SI	NO	-	-	-	-
Gruppo di controllo negativo	3	NO	NO	-	-	-	-
Somma	86	-	-	-	-	-	-

*Sono stati utilizzati due modelli di laser: Laser 1 (AT Fidelis), in cui l'energia può essere ridotta sino a 20mJ; e Laser 2 (Light Walker), dove l'energia può essere ridotta fino a 10 mJ. In tutti i casi la frequenza è stata impostata su 15 Hz e la durata dell'impulso su 50 µsec

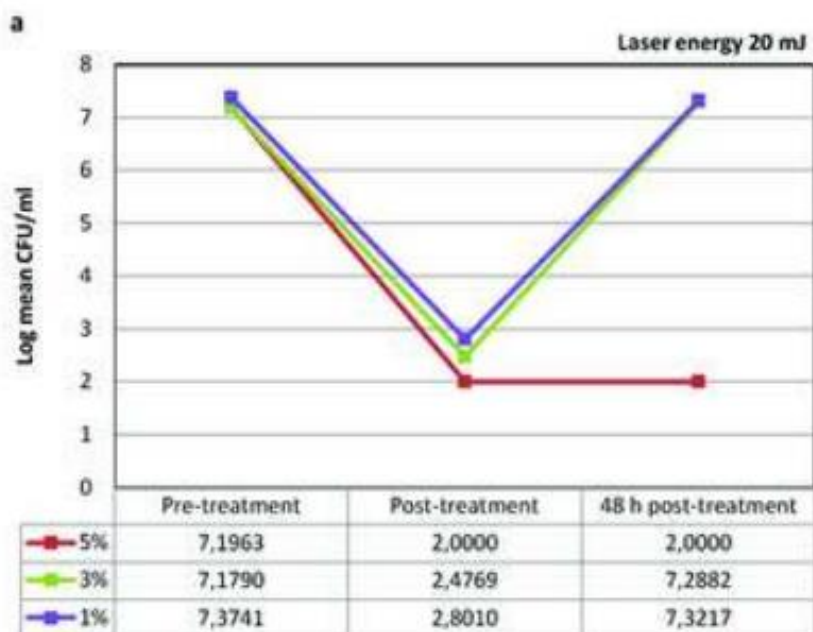
Tabella 2: Risultati medi di CFU/ml per 9 gruppi sperimentali

Gruppo campione	Numero di denti	Energia Laser (mJ)	NaOCl (%)	Unità formanti colonie (CFU)/mL			Prima e dopo	p-value
				Pre-trattamento	Post-trattamento	48 ore dopo il trattamento		
A	6	20	5	$1,9 \times 10^7$	$< 1,0 \times 10^2$	$< 1,0 \times 10^2$	0,0012	0,0012
B	8	20	3	$1,9 \times 10^7$	$9,0 \times 10^2$	$2,9 \times 10^7$	0,0000	0,7004
C	6	20	1	$4,0 \times 10^7$	$4,0 \times 10^3$	$4,4 \times 10^7$	0,0011	0,8760
D	10	20	5	$1,3 \times 10^7$	$< 1,0 \times 10^2$	$< 1,0 \times 10^2$	0,0000	0,0000
E	10	20	3	$1,2 \times 10^7$	$< 1,0 \times 10^2$	$1,3 \times 10^7$	0,0000	0,9149
F	10	20	1	$1,4 \times 10^7$	$< 1,0 \times 10^2$	$1,0 \times 10^7$	0,0001	0,3657
G	10	10	5	$1,3 \times 10^7$	$< 1,0 \times 10^2$	$< 1,0 \times 10^2$	0,0000	0,0000
H	10	10	3	$2,7 \times 10^7$	$< 1,0 \times 10^2$	$1,3 \times 10^7$	0,0123	0,1851
I	10	10	1	$1,8 \times 10^7$	$< 1,0 \times 10^2$	$9,0 \times 10^5$	0,0002	0,0924

RISULTATI

Risultati dell'analisi statistica

È stata utilizzata l'analisi della varianza per valutare la decontaminazione del canale radicolare dopo il trattamento con diverse concentrazioni di NaOCl e diverse impostazioni di potenza secondo il protocollo PIPS modificato. Le misurazioni sono state eseguite prima, immediatamente dopo e 48 ore dopo il trattamento (Tabella 2). Differenze statisticamente significative nelle conte batteriche (p-value inferiore a 0,05) sono state ottenute prima e subito dopo il trattamento per tutti i gruppi campioni, indipendentemente dalla concentrazione di NaOCl e dall'energia laser applicata. Prima e 48 ore dopo il trattamento, è stata notata una differenza statisticamente significativa solo nei gruppi A, D e G dove è stato utilizzato NaOCl al 5%. Nei gruppi trattati con l'1 % e il 3 % di NaOCl, i batteri sono ricresciuti 48 ore dopo la procedura, indipendentemente dalla potenza laser applicata. Un'analisi a posteriori ha confermato che la decontaminazione è efficace e duratura solo quando si utilizza NaOCl al 5 % (Figura 1).



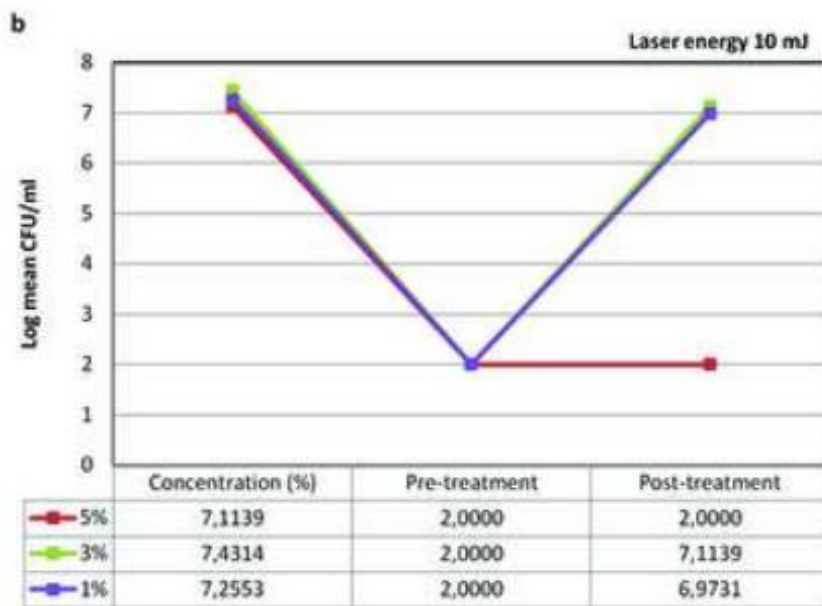


Figura 1 (a-b). Variazione della procedura di decontaminazione con il tempo, a diverse impostazioni di potenza laser e diverse concentrazioni di NaOCl, utilizzate durante la procedura di irrigazione PIPS modificata.

Risultati della microscopia elettronica a scansione

Con l'esame al SEM, è stata esaminata l'area da 1 a 8 mm dall'apice. Nei campioni di controllo negativi, sono stati osservati resti di detriti, fango dentinale senza batteri e alcuni tubuli dentinali aperti (Figura 2a). I campioni del controllo positivo hanno mostrato uno spesso biofilm di *E. faecalis*. I tubuli dentinali erano occlusi da fango dentinale (Figura 2b) e numerosi batteri *E. faecalis* colonizzavano i tubuli dentinali (Figura 2c). Dopo l'uso di NaOCl e EDTA al 17%, il fango dentinale, i detriti e i batteri erano assenti e i tubuli dentinali aperti erano esposti. I risultati del trattamento con diverse concentrazioni di NaOCl sono mostrati nella Figura 2. La decontaminazione è stata efficace solo con l'uso di NaOCl al 5 %.

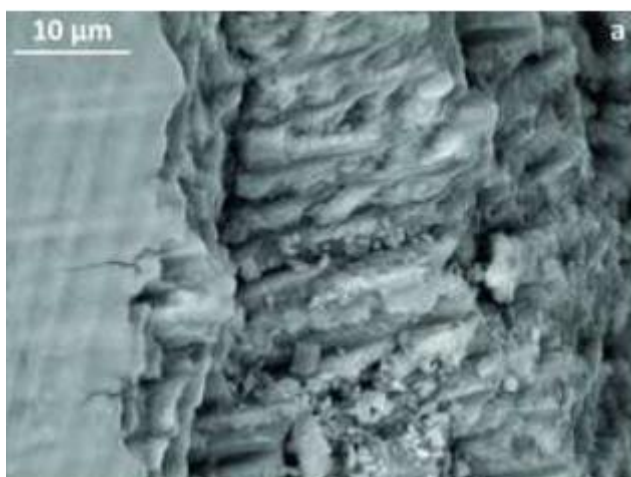


Figura 2a. Immagine al SEM: il gruppo di controllo negativo dopo 3 giorni di sterilizzazione con NaOCl al 5% mostra detriti, fango dentinale e alcuni tubuli dentinali aperti senza batteri (ingrandimento 5.110×).



Figura 2b. Immagine al SEM: gruppo positivo dopo 4 settimane di incubazione con E. faecalis. Fango dentinale che occlude i tubuli dentinali, infettati dai batteri (ingrandimento 7.920×).

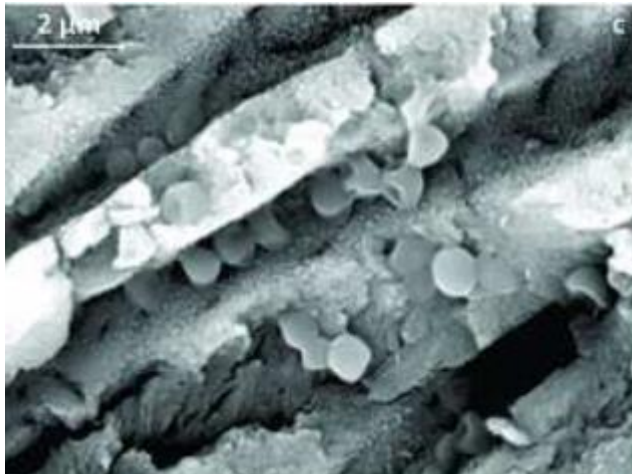


Figura 2c. Immagine al SEM: alta concentrazione di E. faecalis che colonizza le pareti dentinali dei tubuli (ingrandimento 24.400×).



Figura 2d. Immagine al SEM: trattamento con EDTA al 17 % e NaOCl al 1 %. Sono presenti tubuli dentinali aperti e puliti con pochi resti di detriti (ingrandimento 2.400×).

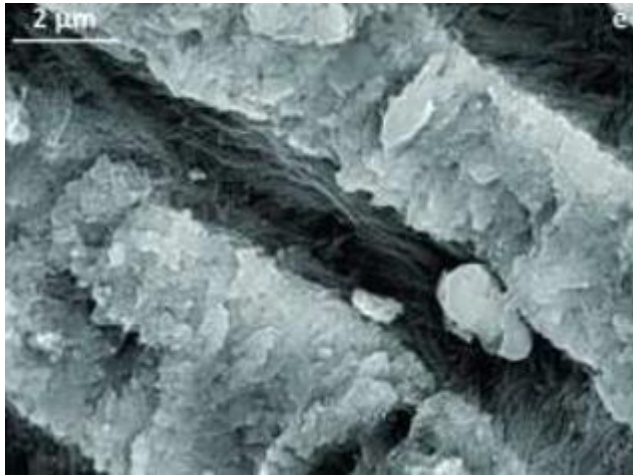


Figura 2e. Immagine al SEM: trattamento con EDTA al 17% e NaOCl al 3%. L'alto ingrandimento mostra chiaramente i tubuli dentinali con fibre di collagene senza batteri (ingrandimento 22.800×).

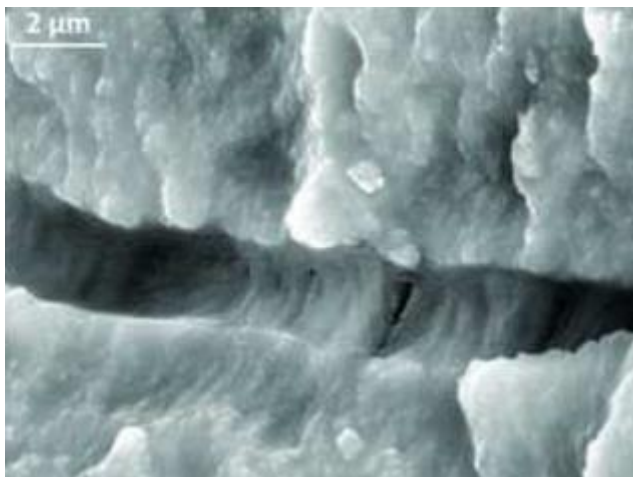


Figura 2f. Immagine al SEM: trattamento con EDTA al 17 % e NaOCl al 5 %. Sezione longitudinale lungo un tubulo dentinale pulito e privo di batteri (ingrandimento 20.900×).

DISCUSSIONE

I denti utilizzati nell'esperimento sono stati incubati con *E. faecalis*, che è il batterio isolato più comunemente collegato al fallimento del trattamento endodontico (21-23). Il tempo di incubazione, fattore importante per lo sviluppo del biofilm, è stato fissato a quattro settimane. Durante la prima ora, i batteri sono per lo più planctonici. Durante le prime due settimane, i batteri del biofilm sono sensibili a NaOCl (1 %), clorexidina (CHX; 2 %) e iodio (0,2/0,4 %); dopo tre settimane diventano molto resistenti agli stessi agenti (24).

Nella terapia endodontica, la combinazione di irriganti a base di NaOCl e EDTA è quella più comunemente utilizzata. Entrambi indeboliscono la dentina attraverso la dissoluzione dei suoi componenti organici e inorganici. Il modulo elastico e la resistenza alla flessione della dentina dipendono dalla concentrazione di NaOCl e dal tempo di esposizione (5 % NaOCl a 37 °C - riduzione della metà in 1 ora (25); 3 % NaOCl - riduzione significativa solo dopo 2 ore (26)). È stato utilizzato il 3 % di NaOCl durante la preparazione del canale - il tempo di strumentazione e irrigazione si allunga per i denti con più di un canale radicolare. Per l'irrigazione finale, la differenza statisticamente significativa nella riduzione di *E. faecalis* tramite PIPS, prima e 48 ore dopo il trattamento, è stata ottenuta solo utilizzando NaOCl al 5%.

La sequenza classica di irrigazione finale per la tecnica PIPS è la seguente: 3x NaOCl, seguito da un ciclo di acqua distillata e si termina con EDTA. Ogni ciclo attivo di agitazione/attivazione per 30 secondi è seguito da una fase di riposo di 30 secondi che consente all'irrigante di reagire. La sequenza più efficace di irriganti utilizzata è riportata come segue:

- I. NaOCl al 5,25% durante la strumentazione,
- II. EDTA al 17% durante l'irrigazione finale e di nuovo 5,25% NaOCl (27-29).

Quando l'ultimo irrigante della sequenza è l'EDTA, il collagene viene esposto sulla superficie del lume canalare (28, 30). L'*E. faecalis* rimasto all'interno dei tubuli dentinali si lega successivamente al collagene e causa il fallimento del trattamento endodontico (31, 32). In questo studio, è stata dimostrata l'efficacia di una sequenza modificata di irriganti durante il lavaggio finale e la fase di riposo è stata prolungata a un minuto. Dopo 1 minuto di irrigazione con EDTA al 17%, il fango dentinale è stato completamente rimosso, i tubuli dentinali si sono aperti e si è osservato solo un effetto leggermente erosivo dell'EDTA nella zona dentinale peritubulare e intertubulare (33). Il tempo totale di esposizione di 6 minuti,

durante l'uso sequenziale di EDTA e NaOCl, è troppo breve per influenzare le proprietà meccaniche della dentina (34). L'applicazione di EDTA prima di NaOCl consente la pulizia della superficie dentinale e l'apertura dei tubuli dentinali come evidenziato dalle immagini al SEM. Pertanto, la penetrazione di NaOCl nei tubuli dentinali e la distruzione di *E. faecalis* è più probabile.

L'acqua è il componente principale di NaOCl e dell'EDTA e il principale cromoforo per il laser a lunghezza d'onda di 2.940 nm (35). L'effetto battericida di PIPS con attivazione continua di NaOCl si basa su diversi effetti:

- I. aumento della velocità di reazione del NaOCl (36);
- II. flusso tridimensionale del fluido con una migliore penetrazione dell'irrigante nei tubuli dentinali (37, 38);
- III. fenomeni di onda d'urto che causano la lisi cellulare e la rottura meccanica dei detriti e del fango dentinale (39). L'effetto termico primario dell'energia laser assorbita dall'acqua porta al surriscaldamento dell'irrigante fino al punto di ebollizione e alla formazione di bolle di vapore. Le dimensioni e il ciclo di vita delle bolle (esplosione e successiva implosione) dipendono dall'energia applicata (40, 41). L'energia della bolla è proporzionale al volume della bolla alla sua dimensione massima e viene convertita in energia meccanica del mezzo liquido (42, 43). L'energia del collasso della bolla (implosione) si concentra in breve tempo in un piccolo volume, causando la cavitazione (44).

L'espulsione dell'irrigante attraverso il forame apicale durante l'irrigazione del canale radicolare con NaOCl, può causare complicazioni, poiché il NaOCl è tossico per i tessuti vitali (45). L'estrusione dell'irrigante avviene a causa dell'alta pressione in combinazione con ampi forami apicali.

I risultati dimostrano che la riduzione dei batteri nel canale radicolare durante l'irrigazione con PIPS era uguale quando si utilizzano 10 o 20 mJ, con NaOCl al 5%.

CONCLUSIONI

Sulla base dei risultati ottenuti e del confronto con la letteratura pubblicata, vengono tratte le seguenti conclusioni:

1. Durante la strumentazione si raccomanda l'irrigazione con NaOCl al 3% per evitare l'indebolimento della dentina e l'erosione superficiale delle superfici dentinali.
2. Per aumentare l'efficacia del trattamento, si propone di modificare la sequenza di irrigazione finale del protocollo PIPS:
 - I. EDTA al 17% per la rimozione della parte mineralizzata del fango dentinale e per l'apertura dei tubuli dentinali per l'irrigante;
 - II. 3 x di NaOCl al 5% per la riduzione dei microrganismi nei tubuli dentinali e la denaturazione del collagene, che è importante per il legame batterico, compreso *E. faecalis*;
 - III. acqua distillata per l'inattivazione dell'ossigeno prima dell'otturazione, per evitare l'interazione chimica del cemento con l'ossigeno.
3. Per aumentare la sicurezza del trattamento, l'energia del laser è stata ridotta da 20 a 10 mJ, senza diminuire l'efficacia del trattamento PIPS per la riduzione di *E. faecalis*.

BIBLIOGRAFIA

1. Costerton JV, Lewandowski Z, Caldwell DE, Korber DR, M L-SH. Microbial Biofilms. Annual Review of Microbiology. 1995;49(1):711-45.
2. Costerton JW, Stewart PS, Greenberg EP. Bacterial Biofilms: A Common Cause of Persistent Infections. Science. 1999;284(5418):1318-22.
3. Gilbert P, Das J, Foley I. Biofilm susceptibility to antimicrobials. Advances in dental research. 1997;11(1):160-7.
4. Hall-Stoodley L, Stoodley P. Evolving concepts in biofilm infections. Cellular microbiology. 2009;11(7):1034-43.
5. Hoiby N, Bjarsholt T, Givskov M, Molin S, Ciofu O. Antibiotic resistance of bacterial biofilms. International journal of antimicrobial agents. 2010;35(4):322-32.
6. Stewart PS. Biophysics of biofilm infection. Pathogens and disease. 2014;70(3):212-8.
7. Lewis K. Riddle of biofilm resistance. Antimicrobial agents and chemotherapy. 2001;45(4):999-1007.
8. Peters OA. Current Challenges and Concepts in the Preparation of Root Canal Systems: A Review. Journal of endodontics. 2004;30(8):559-67.

9. Liu R, Kaiwar A, Shemesh H, Wesselink PR, Hou B, Wu M-K. Incidence of Apical Root Cracks and Apical Dentinal Detachments after Canal Preparation with Hand and Rotary Files at Different Instrumentation Lengths. *Journal of endodontics*. 2013;39(1):129-32.
10. Paqué F, Laib A, Gautschi H, Zehnder M. Hard-Tissue Debris Accumulation Analysis by High-Resolution Computed Tomography Scans. *Journal of endodontics*. 2009;35(7):1044-7.
11. Şen BH, Wesselink PR, Türkün M. The smear layer: a phenomenon in root canal therapy. *International Endodontic Journal*. 1995;28(3):141-8.
12. Akkayan B. An in vitro study evaluating the effect of ferrule length on fracture resistance of endodontically treated teeth restored with fiber-reinforced and zirconia dowel systems. *The Journal of prosthetic dentistry*. 2004;92(2):155-62.
13. Kutesa-Mutebi A, Osman YI. Effect of the ferrule on fracture resistance of teeth restored with prefabricated posts and composite cores. *African Health Sciences*. 2004;4(2):131-5.
14. Stankiewicz NR, Wilson PR. The ferrule effect: a literature review. *International Endodontic Journal*. 2002;35(7):575-81.
15. Tan PLB, Aquilino SA, Gratton DG, Stanford CM, Tan SC, Johnson WT, et al. In vitro fracture resistance of endodontically treated central incisors with varying ferrule heights and configurations. *Journal of Prosthetic Dentistry*. 2005;93(4):331-6.
16. Lin S, Liu Q, Peng Q, Lin M, Zhan Z, Zhang X. The ablation threshold of Er:YAG laser and Er,Cr:YSGG laser in dental dentin. *Scientific Research and Essays*. 2010;5(16):2128-35.
17. Majaron B, Lukac M, Sustercic D, Funduk N, Skaleric U. Threshold and efficiency analysis in Er:YAG laser ablation of hard dental tissue. *SPIE Proceedings - Lasers and Optics in Dentistry: Ablation Techniques* 1996;2922:233-42.
18. Arslan H, Capar ID, Saygili G, Gok T, Akcay M. Effect of photon-initiated photoacoustic streaming on removal of apically placed dentinal debris. *International Endodontic Journal*. 2014;47(11):1072-7.
19. DiVito E, Lloyd A. ER:YAG laser for 3-dimensional debridement of canal systems: use of photon-induced photoacoustic streaming. *Dentistry today*. 2012;31(11):122, 4-7.
20. Olivi G, DiVito E, Peters O, Kaitsas V, Angiero F, Signore A, et al. Disinfection efficacy of photon-induced photoacoustic streaming on root canals infected with *Enterococcus faecalis*. *The Journal of the American Dental Association*. 2014;145(8):843-8.
21. Kayaoglu G, Orstavik D. Virulence factors of *Enterococcus faecalis*: relationship to endodontic disease. *Critical reviews in oral biology and medicine : an official publication of the American Association of Oral Biologists*. 2004;15(5):308-20.

22. Meire MA, De Prijck K, Coenye T, Nelis HJ, De Moor RJG. Effectiveness of different laser systems to kill *Enterococcus faecalis* in aqueous suspension and in an infected tooth model. *International Endodontic Journal*. 2009;42(4):351-9.
23. Noetzel J, Nonhoff J, Bitter K, Wagner J, Neumann K, Kielbassa AM. Efficacy of calcium hydroxide, Er:YAG laser or gaseous ozone against *Enterococcus faecalis* in root canals. *American journal of dentistry*. 2009;22(1):14-8.
24. Stojicic S, Shen Y, Haapasalo M. Effect of the source of biofilm bacteria, level of biofilm maturation, and type of disinfecting agent on the susceptibility of biofilm bacteria to antibacterial agents. *Journal of endodontics*. 2013;39(4):473-7.
25. Marending M, Luder HU, Brunner TJ, Knecht S, Stark WJ, Zehnder M. Effect of sodium hypochlorite on human root dentine – mechanical, chemical and structural evaluation. *International Endodontic Journal*. 2007;40(10):786-93.
26. Sim TPC, Knowles JC, Ng YL, Shelton J, Gulabivala K. Effect of sodium hypochlorite on mechanical properties of dentine and tooth surface strain. *International Endodontic Journal*. 2001;34(2):120-32.
27. Baumgartner JC, Mader CL. A scanning electron microscopic evaluation of four root canal irrigation regimens. *Journal of endodontics*. 1987;13(4):147-57.
28. Goldman M, Goldman LB, Cavaleri R, Bogis J, Sun Lin P. The efficacy of several endodontic irrigating solutions: a scanning electron microscopic study: part 2. *Journal of endodontics*. 1982;8(11):487-92.
29. Yamada RS, Armas A, Goldman M, Lin PS. A scanning electron microscopic comparison of a high volume final flush with several irrigating solutions: Part 3. *Journal of endodontics*. 1983;9(4):137-42.
30. Niu W, Yoshioka T, Kobayashi C, Suda H. A scanning electron microscopic study of dentinal erosion by final irrigation with EDTA and NaOCl solutions. *International Endodontic Journal*. 2002;35(11):934-9.
31. Hubble TS, Hatton JF, Nallapareddy SR, Murray BE, Gillespie MJ. Influence of *Enterococcus faecalis* proteases and the collagen-binding protein, Ace, on adhesion to dentin. *Oral microbiology and immunology*. 2003;18(2):121-6.
32. Love RM. *Enterococcus faecalis* – a mechanism for its role in endodontic failure. *International Endodontic Journal*. 2001;34(5):399-405.
33. Çalt S, Serper A. Time-Dependent Effects of EDTA on Dentin Structures. *Journal of endodontics*. 2002;28(1):17-9.
34. Marending M, Paqué F, Fischer J, Zehnder M. Impact of Irrigant Sequence on Mechanical Properties of Human Root Dentin. *Journal of endodontics*. 2007;33(11):1325-8.

35. Meire MA, Poelman D, De Moor RJ. Optical properties of root canal irrigants in the 300-3,000-nm wavelength region. *Lasers in medical science*. 2014;29(5):1557-62.
36. Macedo RG, Wesselink PR, Zaccheo F, Fanali D, Van Der Sluis LW. Reaction rate of NaOCl in contact with bovine dentine: effect of activation, exposure time, concentration and pH. *Int Endod J*. 2010;43(12):1108-15.
37. Jaramillo DE, Aprecio RM, Angelov N, DiVito E, McClammy TV. Efficacy of photon induced photoacoustic streaming (PIPS) on root canals infected with *Enterococcus faecalis*: a pilot study. *Endodontic Practice*. 2012;5(3):28-32.
38. Zehnder M. Root canal irrigants. *Journal of endodontics*. 2006;32(5):389-98.
39. Pedullà E, Genovese C, Campagna E, Tempera G, Rapisarda E. Decontamination efficacy of photon-initiated photoacoustic streaming (PIPS) of irrigants using low-energy laser settings: an ex vivo study. *International Endodontic Journal*. 2012;45(9):865-70.
40. Blanken J, De Moor RJ, Meire M, Verdaasdonk R. Laser induced explosive vapor and cavitation resulting in effective irrigation of the root canal. Part 1: a visualization study. *Lasers in surgery and medicine*. 2009;41(7):514-9.
41. De Groot SD, Verhaagen B, Versluis M, Wu MK, Wesselink PR, Van Der Sluis LWM. Laser-activated irrigation within root canals: cleaning efficacy and flow visualization. *International Endodontic Journal*. 2009;42(12):1077-83.
42. Gregorcic P, Jamsek M, Lukac M, Jezersek M. Synchronized delivery of Er:YAG-laser-pulse energy during oscillations of vapor bubbles *Journal of the Laser and Health Academy*. 2014;2014(1):14-9.
43. Gregorcic P, Jezersek M, Mozina J. Optodynamic energy-conversion efficiency during an Er:YAG-laser-pulse delivery into a liquid through different fiber-tip geometries. *J Biomed Opt*. 2012;17(7):075006.
44. Blanken JW, Verdaasdonk RM. Cavitation as a working mechanism of the Er,Cr:YSGG laser in endodontics: a visualization study. *J Oral Laser Appl*. 2007;7:97-706.
45. Pashley EL, Birdsong NL, Bowman K, Pashley DH. Cytotoxic effects of NaOCl on vital tissue. *Journal of endodontics*. 1985;11(12):525-8.

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio, innanzitutto, il Professor Stefano Benedicenti, mio relatore, per avermi dato la possibilità di realizzare la mia tesi di laurea e per avermi seguito in questo percorso.

Ringrazio il Professor Francesco Maria Manconi, mio co-relatore, per la competenza e la disponibilità dimostrata.

Un ringraziamento speciale a tutta la mia famiglia, in particolare a mia madre Alessandra, mio padre Arturo e mia sorella Chiara per avermi incoraggiato e spronato continuamente in questi anni, trasmettendomi la serenità necessaria per andare avanti.

Ringrazio, ancora, mio padre, mio zio Massimo, e i miei cugini Luca e Marco per avermi trasmesso la passione per questa professione.

Ringrazio Asia per aver sognato con me questo momento, accompagnandomi al raggiungimento di tale obiettivo. Grazie per il supporto e la fiducia trasmessa fin dall'inizio.

Ringrazio gli amici di P&P per aver alimentato in me l'ambizione di traguardi importanti, per il continuo incoraggiamento e per i momenti di spensieratezza passati insieme.

Infine, ringrazio i miei amici e compagni di studio Giulia, Khaled, Paola, Rawad, Stefano e Valerio per aver reso divertente e stimolante il tempo trascorso durante questo lungo percorso di studi.