

James L. Gutmann, D.D.S.

Professor and Director
Graduate Endodontic Programs
Baylor College of Dentistry
Dallas, Texas 75246, U.S.A.

Correspondence:
James L. Gutmann, Professor
3302 Gaston Ave.
Dallas, Texas 75246, U.S.A.

Challenges to the Future of Endodontics

ABSTRACT

The future of endodontics is highly dependent on pursuing a sound biological basis on which diagnostic and treatment decisions are made. Techniques and materials which can support this approach to contemporary and futuristic modes of practice must be developed and must ensure that empiricism is minimized in the rendering of quality endodontic treatment.

Key words: Pulp biology. Endodontic materials and techniques. Research.

INTRODUCTION

Throughout the world, there has been a significant increase in the amount of root canal treatment performed over the last 5 to 10 years. Dental practitioners have enhanced their endodontic skills and patients have been eager to maintain their teeth. Likewise employers have increased employee work benefits by supplying greater levels of diverse dental insurance coverage and the opportunity to seek the necessary dental care.

Concomitant with expanded endodontic services has been the development of new technologies and techniques designed to enhance the quality and efficiency of the care rendered. While some of these advances have been positive, many have turned out to be nothing more than gimmicks or magical cures which do not address the quality or biological basis for treatment. There remains many unmet challenges in endodontics many unanswered questions, along with many questionable techniques and purporters thereof, who practice contemporary endodontics on a purely empirical basis, and claim it to be the apotheosis of quality dental care.

Over sixty years ago, James Roy Blayney succinctly identified the need to pursue something greater than just the "magic cure" or the "novel technique", and to focus on the biological basis of treatment.

"Whenever a pulp is removed and the canal

treated and filled in a manner that is compatible with or favorable to a physiologic reaction, we may expect a satisfactory percentage of success. Also, whenever treatment is carried on in such a way as to antagonize biologic processes of repair, we will continue to have many failures. As we see the question it does not materially matter if an operator uses one style of an instrument, while another prefers a broach of a different pattern, provided each will do the task for which it was designed. The crying need is not a new technic, a new drug or the like, but a better and more keen appreciation of the processes by which nature repairs traumatic injury or overcomes an infectious process." (1)... "I believe society will be better served if the rank and file of the profession will place pulp-canal therapy on a biologic basis." (2).

This same exhortation was recently echoed by Hubert N. Newman (3) in 1992; "We cannot say that the age of dental surgery is passing and the age of dental medicine is about to begin. But we must be aware that the it is becoming increasingly unacceptable to rely upon empiricism in dental treatment..." Therefore, it becomes exceedingly important for all involved in the delivery of endodontic care to cast off the reliance on empiricism and to begin to think in terms of sound rationales for diagnosis and treatment, sound rationales for using techniques or materials which are questionable, and sound rationales for the development of new endodontic concepts which transcend the present boundaries of usage. This challenge requires a concerted effort on the part of dental industry, university teaching programs, research programs, and clinical practice to adequately meet the vision established for the future of endodontics.

BIOLOGICAL CONSIDERATIONS

Much of the future direction in endodontics, and restorative dentistry as well, will be based on a more thorough understanding of the biology of the pulp and periradicular tissues and their pathophysiology in the presence of irritational stimuli. The dental pulp is composed of loose connective tissue, blood vessels, nerves, ground substance, fibroblasts, odontoblasts, and mesen-

chymal cells. As a mature organ, its primary functions are to generate sensory neural activities which give rise to pain sensations in response to irritational stimuli, and to elaborate reparative dentin as a protective response. The ability of the pulp to perform these functions in a consistent manner is predicated on the integrity of its haemodynamic processes which provide nutrients and oxygen to the cellular and tissue components and remove the waste products of metabolism. Thus, as indicated by Kim (4), the understanding of pulpal haemodynamics and their regulation is crucial to understanding the character of the pulp as a living and functioning entity. This is especially true as it relates to the understanding of pulpal inflammation due to caries, restorative procedures, vital pulp therapy, trauma and periodontal disease.

Scanning electron microscopic structural studies by Takahashi and coworkers (5), have delineated a profound difference in the coronal and apical pulpal vasculature. These findings characterized the nature of the pulpal microvasculature in the odontoblastic layer, the adjacent cell-free and cell-rich zones, and in the center of the pulp, and served as additional support for the studies of Kim (6) on the microcirculation of the dental pulp in disease and health. Further studies (7-8) have correlated this information with various physiological techniques and have shown that there is a close relationship between sensory nerve activity (pain) and the microcirculation of the pulp. This has led to the development of laser Doppler flowmetry which is now being used to assess the status of the pulpal vasculature in diagnostic situations. However, these areas of investigation and application are open avenues for continued research, as there are many unanswered questions relative to the precise role of the pulpal microvasculature in both a healthy and an aberrant pathophysiological state. Expedited research is essential in this area as the future of quality endodontic treatment demands enhanced diagnostic methodologies.

Once the protective barriers of enamel and cementum are altered by restorative procedures, trauma or caries, and the dentin is

James L. Gutmann, D.D.S.
Autore invitato

Professore e Direttore
dei Programmi Post-Laurea di Endodonzia
Baylor College of Dentistry
Dallas, Texas 75246, U.S.A.

Corrispondenza:
Prof. James L. Gutmann
3302 Gaston Ave.
Dallas, Texas 75246, U.S.A.

Lavoro originale

Una Sfida al Futuro dell'Endodonzia

RIASSUNTO

Il futuro dell'Endodonzia è strettamente legato alla ricerca di una base biologica sulla quale basare le decisioni riguardanti la diagnosi e il trattamento. È importante lo sviluppo di tecniche e materiali che sostengono questo approccio verso modi d'operazione contemporanei e futuristici, e devono garantire un trattamento endodontico qualitativo con un minimo di empirismo.

Parole chiave: Biologia della polpa. Materiali e tecniche endodontiche. Ricerca.

INTRODUZIONE

Durante gli ultimi 5-10 anni, in tutto il mondo, c'è stato un significativo aumento dei trattamenti endodontici. Gli odontoiatri hanno migliorato le loro capacità endodontiche e i pazienti sono più entusiasti di mantenere i loro denti. Similmente sono migliorate le condizioni di lavoro aumentando i premi delle assicurazioni a vari livelli per quanto concerne i problemi odontoiatrici e offrendo maggiori opportunità di cercare la necessaria assistenza dentistica.

Concomitante a più ampi servizi endodontici è stato lo sviluppo di nuove tecnologie e tecniche intese a migliorare la qualità e l'efficacia del servizio. Mentre alcuni di questi progressi sono stati positivi, altri si sono dimostrati poco più che espedienti, oppure cure magiche che non hanno niente a che vedere con la qualità o una base biologica del trattamento. Rimangono nel campo dell'Endodonzia molte sfide non affrontate, molti quesiti senza risposta, insieme a tante tecniche dubbie i cui sostenitori esercitano la professione su una base puramente empirica e affermano che sono l'apoteosi di una cura di qualità.

Oltre sessant'anni fa, James Roy Blayney ha succintamente espresso l'esigenza di ricercare qualcosa di più importante di una "cura magica" o una "tecnica di attualità", e di concentrare l'attenzione su un trattamento che avesse una base biologica.

"Quando la polpa viene rimossa e il canale trattato e otturato in maniera compatibile con, o favorevole a, una reazione fisiologica, ci si può aspettare una soddisfacente percentuale di successo. E ogni qualvolta il trattamento viene fatto in modo da inibire i processi biologici di riparazione, continueranno gli insuccessi. Secondo il nostro punto di vista, non ha importanza se un operatore usa uno strumento mentre un altro ne preferisce uno diverso, purché ognuno faccia il lavoro per il quale fu disegnato. Il disperato bisogno non è una nuova tecnica, un nuovo farmaco o altre cose del genere, ma una migliore e più approfondita stima dei processi attraverso i quali la natura ripara traumi o supera un'infezione." (1)... "Io credo che la società sarà meglio servita se gli odontoiatri collocheranno la terapia canalare su una base biologica." (2).

Recentemente ha fatto eco a questo incitamento Hubert N. Newman (3) nel 1992: "Non possiamo dire che l'era della chirurgia dentale stia passando e che stia iniziando l'era della medicina dentale. Ma dobbiamo renderci conto che è sempre più inaccettabile dipendere dall'empirismo nel trattamento dei denti..." Quindi è importante che tutte le persone impegnate nel campo dell'Endodonzia rinuncino alla fiducia nell'empirismo e inizino a pensare in termini di ragioni fondamentali per la diagnosi e il trattamento, ragioni fondamentali verso l'uso di materiali e tecniche dubbie e ragioni fondamentali verso lo sviluppo di nuovi concetti endodontici che trascendono i limiti attuali sull'uso. Questa sfida richiede uno sforzo particolare da parte dell'industria odontoiatrica, dei programmi di insegnamento universitario, dei programmi di ricerca e della pratica clinica per andare incontro in modo adeguato al futuro dell'Endodonzia.

CONSIDERAZIONI BIOLOGICHE

Una grande parte delle direttive future dell'Endodonzia, e anche dell'Odontoiatria restaurativa, sarà basata su una più profonda conoscenza della biologia della polpa e del tessuto periradicolare e la loro patofisiologia in presenza di stimoli irritanti. La polpa dentale è composta di tessuto connettivo molle, vasi sanguigni, nervi, sostanze di

fondo, fibroblasti, odontoblasti, e cellule mesenchimali. Come organo maturo, le sue funzioni primarie sono di generare attività neurali sensorie che danno sensazioni di dolore in seguito a stimoli irritanti, e di elaborare dentina riparativa come risposta protettiva. La capacità della polpa di compiere queste funzioni in maniera costante è fondata nell'integrità dei suoi processi emodinamici che forniscono nutrimento e ossigeno ai componenti cellulari e di tessuto e rimuovono le scorie del metabolismo. Perciò, come Kim (4) ha indicato, capire l'emodinamica pulpale e come si regola è indispensabile per capire il carattere della polpa come entità viva e funzionante. Questa è particolarmente importante in relazione a infiammazione pulpale dovuta a carie, a tecniche restaurative, ad una terapia della polpa vitale, a trauma e a malattia parodontale.

Studi strutturali al microscopio elettronico fatti da Takahashi e colleghi (5) hanno sottolineato una grande differenza tra la vascolarizzazione pulpale coronale e apicale. Queste constatazioni hanno caratterizzato la natura della microvascolarizzazione pulpale nello strato odontoblastico, nelle adiacenti zone cell-free e cell-rich e al centro della polpa, e servono come ulteriore supporto agli studi di Kim (6) sulla microcircolazione della polpa dentale, in condizioni di malattia e di salute.

Ulteriori studi (7,8) hanno messo in correlazione queste informazioni con varie tecniche fisiologiche e hanno mostrato che esiste uno stretto rapporto tra l'attività dei nervi sensoriali (dolori) e la microcircolazione della polpa. Questo ha portato allo sviluppo della "flussometria doppler" che ora viene usata per calcolare lo stato della vascolarizzazione pulpale in situazioni diagnostiche. Tuttavia, queste aree di studio e di applicazione sono limitate alla ricerca, in quanto esistono ancora molti quesiti senza relative risposte al ruolo preciso della microvascolarizzazione pulpale sia in uno stato di salute che in uno stato patofisiologico aberrante. Una sollecitata ricerca è essenziale in quest'area perché il futuro di un trattamento endodontico di qualità richiederà metodologie diagnostiche più accurate.

Una volta che le barriere protettive di smalto e cemento vengono alterate da tecniche

exposed, the pulp undergoes a wide variety of changes. In recent years there has been a refocus on the effects of bacteria and their products on the dental pulp. When these substances are applied to exposed dentin, inflammation is produced. However, most studies have focused on responses produced by specific organisms. Unfortunately, this type of investigation does not represent a true clinical situation, where a large number of varied organisms are involved and each bacterial species may produce a variety of different inflammatory inducing agents both during growth and disintegration. Likewise bacterial sampling and identification also poses problems in the determination of the exact relationship between bacteria and pulpal sequelae. Many of these difficulties focus on microleakage in restorative dentistry and endodontics and the ability to test for the presence of bacteria and to correlate the findings with the extent and nature of pulpal and/or periradicular inflammation. This is especially true with the recent identification of significant anaerobic bacteria and their implication in disease processes of the pulp, periradicular tissues, and reinfection of the root canal system. Regardless of these concerns, it has been established that both restorative materials and root canal filling materials can and do exhibit microleakage-hence the perfect pathway for bacterial ingress (Fig. 1). Therefore, not only is the profession of dentistry faced with the improvement of restorative materials, but also the techniques used in their placement. Concomitantly, it is faced with identifying the nature of the bacteria that have the capability of penetrating restorative margins and root canal and root-end filling materials, in addition to their combined pathological mechanisms. Only then can the inflammatory processes initiated by these entities be understood. In this scenario an experimental pulpal and/or root canal model could be designed in which defined bacterial combinations can be studied for specific factors, such as virulence, the interplay of growth factors, toxin production, enzyme elaboration, and toxic metabolic end products. Once developed, this model could serve as a screening mechanism for restorative materials, endo-

dontic materials, and techniques to place such. One such model has been developed, albeit in its crudest form, which has identified the nature of leakage and the recoverable presence of specific bacteria which have migrated through the obturated root canal system (9). However, more clinically relevant parameters must be integrated into these model systems if data is to be of significance. Findings from these investigations can have a significant impact on treatment modalities because of the greater understanding of the pathophysiological processes which are taking place in the pulp or periradicular tissues, in addition to identifying the shortcomings of materials and placement techniques.

Finally, the identification of immunoglobulins in periapical lesions by Naidorf (10) in 1975, the confirmation of immune components in normal and inflamed human dental pulps by Pulver and coworkers (11) in 1977, and the identification of pulpal immunoglobulins to oral microorganisms by Falkler (12) in 1987, have opened the doorway to immunological investigation in pulpal biology and endodontic research. It is because of the unique site of the pulp and associated periradicular tissues that many conventional immunological investigative techniques cannot be used to study the changes that occur during injury and inflammation. Likewise, because of the unpredictability of pulpal and periradicular tissue responses to injury, no universally accepted model is available to evaluate a reproducible inflammatory state. However, with the application of radioimmunodiffusion techniques, immunofluorescence techniques, immunoenzymatic techniques, and enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) techniques a greater understanding of the pulpal and periradicular inflammatory process can be achieved which may lead to the development of an *in vitro/in vivo* model for future research.

As can be seen, the biology and physiology of the dental pulp and surrounding tissues, comprise a complex set of variables for which normal and pathological responses remain to be clearly defined. Until these issues can be addressed and identified, it will be very difficult to move forward with



Fig. 1A - Palatal root from extracted maxillary first molar made transparent through demineralization and dehydration. Note coronal leakage along the gutta-percha filling material. Original magnification 9X.
Fig. 1A - Radice palatale di un primo molare mascellare estratto resa trasparente con la demineralizzazione e la disidratazione. Notare la perdita coronale lungo la gutta-perca. Ingrandimento originale 9X.

significant advances in restorative dentistry and endodontics materials and techniques.

ENDODONTIC MATERIALS

Endodontic materials comprise a multitude of various substances from obturation or filling materials, to sealer/cements, pulp capping materials, root-end filling materials, irrigants, and antimicrobial materials. All materials used in endodontic procedures must undergo multiple evaluative tests, such as cell culture, implantation, and usage tests (13-14). When using these tests, there are a broad range of characteristics which must be considered, such as toxicity, tissue injury, mutagenicity and carcinogenicity. Guidelines for the use of these tests to assess material properties have been published by the American Dental Association (15) and the Federation Dentaire Internationale (16). While the application of *in vitro* test methods can provide a certain amount of material with limited parameters of extrapolation, the use of *in vivo* testing can help to identify the complex interactions between the material and the host tissue. Therefore, the use of a battery of tests designed to give as complete a spectrum of information as possible on a new material is warranted before wholesale distribution and widespread patient use occurs. Presently, very few new materials have been developed for use in endodontic the-



Fig. 1B - Proximal view of buccal root from the same tooth. Root previously had apical resection and amalgam root-end filling. Note extensive leakage pattern along the gutta-percha to the depth of the apical amalgam (and presumably beyond?). Coronal restoration exhibited significant marginal defects including recurrent decay. Original magnification 9X.

Fig. 1B - Veduta prossimale della radice vestibolare dello stesso dente: ha subito precedentemente una resezione apicale e una otturazione nell'apice radicolare con l'amalgama. Notare la grande perdita lungo la gutta-percha fino all'amalgama apicale (e forse anche oltre?). La restaurazione coronale mostrava difetti marginali significativi, inclusa carie ricorrente. Ingrandimento originale 9X.

restaurative, da trauma o da carie, e la dentina viene esposta, la polpa subisce una grande varietà di cambiamenti. Negli anni passati c'è stato un ritorno di interesse sugli effetti dei batteri e i loro prodotti sulla polpa dentale. Quando queste sostanze vengono in contatto con la dentina esposta, insorge un'inflammatione. La maggior parte degli studi, però, si sono concentrati sulle reazioni a specifici organismi.

Purtroppo, questo tipo di ricerca non rappresenta una reale situazione clinica in cui sono coinvolti un gran numero di organismi e ciascuna specie batterica può produrre una varietà di agenti che provocano l'inflammatione sia durante la crescita che durante la disintegrazione. Similmente, la raccolta e l'identificazione dei batteri pongono problemi nel determinare l'esatto rapporto che esiste tra batteri e sequele pulpari. Molte di queste difficoltà riguardano le microfessure che avvengono negli interventi restaurativi e endodontici e nella capacità di fare dei test per scoprire la presenza di batteri e di correlare le scoperte alla gravità e

alla natura dell'inflammatione pulpare e/o periradicolare. Ciò è particolarmente vero per quanto concerne la recente identificazione di batteri anaerobici significativi e la loro implicazione nei processi di malattia pulpare, dei tessuti periradicolari e della rinfezione del sistema canalare. Non tenendo conto di queste preoccupazioni, è stato stabilito che sia i materiali restaurativi che quelli per l'otturazione canalare possono dar luogo a microfessure garantendo la via d'ingresso per i batteri (Fig. 1). Quindi, non solo la professione odontoiatrica si trova a dover migliorare i materiali restaurativi, ma anche le tecniche impegnate nella loro collocazione. In concomitanza, deve poter identificare la natura di quei batteri che sono in grado di penetrare i margini restaurativi e i materiali di otturazione canalare oltre all'insieme dei loro meccanismi patologici. Soltanto allora si potranno capire i processi di inflammatione iniziati da queste entità. In questo scenario si potrebbe creare un modello sperimentale della polpa e/o canale radicolare sul quale potrebbero essere studiati vari aspetti specifici dei batteri come la virulenza, l'interazione dei fattori di crescita, la produzione delle tossine, l'elaborazione degli enzimi, e i prodotti finali del metabolismo. Una volta sviluppato, questo modello potrebbe servire come meccanismo di selezione (screening) per i materiali restaurativi, i materiali endodontici e le tecniche per la collocazione degli stessi. Un tale modello è già stato creato, sebbene in modo primitivo, e ha identificato la natura delle fessure e la presenza di batteri che sono migrati attraverso il sistema canalare otturato (9). Tuttavia, devono essere integrati in questi modelli dei parametri clinicamente più rilevanti perché i risultati abbiano un significato più attendibile. Le conclusioni di queste ricerche possono aver un impatto significativo sulle modalità di trattamento per una maggior conoscenza dei processi patofisiologici che avvengono nella polpa o nel tessuto periradicolare, oltre che all'identificazione delle lacune dei materiali e delle tecniche di collocamento.

Infine, l'identificazione di immunoglobuline nelle lesioni periapicali da parte di Naidorf (10) nel 1975, la conferma di componenti immuni nella polpa umana normale e in-

fiammata da parte di Pulver e coll. (11) nel 1977, e l'identificazione di immunoglobuline pulpari di micro-organismi orali da parte di Falkler (12) nel 1987, hanno aperto la strada allo studio immunologico nella biologia pulpare e nella ricerca endodontica. È proprio a causa del sito, unico nel suo genere, della polpa e del tessuto periradicolare che molte tecniche investigative convenzionali immunologiche non possono essere usate per studiare i cambiamenti che avvengono durante un trauma e un'inflammatione. Similmente, causa la imprevedibilità delle reazioni ad un trauma della polpa e del tessuto periradicolare, non esiste nessun modello accettabile per valutare uno stato infiammatorio riproducibile. Tuttavia, una più profonda conoscenza dei processi infiammatori pulpari e periradicolari può essere raggiunta con l'applicazione di tecniche di radioimmunodiffusione, tecniche di immunofluorescenza, tecniche immunoenzimatiche e tecniche di "enzyme-linked immunosorbent assay" (ELISA), e può portare allo sviluppo di un modello *in vivo/in vitro* per future ricerche.

Come si può vedere, la biologia e la fisiologia della polpa dentale e del circostante tessuto includono un complesso insieme di variabili per i quali rimangono da definire con chiarezza le reazioni normali e patologiche. Finché questi aspetti non possono essere affrontati e identificati, sarà molto difficile fare progressi significativi per quanto riguarda i materiali e le tecniche restaurative e endodontiche.

MATERIALI ENDODONTICI

I materiali endodontici comprendono una grandissima varietà di sostanze tra materiali da otturazione, cementi, materiali per l'incappucciamento pulpare, materiali per chiusure retrograde, irriganti e materiali antimicrobici. Tutti i materiali usati nelle tecniche endodontiche devono essere sottoposti a molteplici prove di valutazione, come per esempio, culture cellulari, impianti e test pratici sull'uso (13,14). Quando si fanno questi test, occorre tenere in considerazione una larga gamma di caratteristiche come la tossicità, il danno tissutale, la mutagenicità e la cancerogenicità. È stata pubblicata dall'American Dental Association (15)

rapy. However, this may be somewhat fortuitous because there still is a paucity of information available concerning the use of materials which have been used for decades, including calcium hydroxide and zinc oxide-eugenol (ZOE). While these materials have provided varying levels of success when used as capping agents, root canal sealers, and most recently as a root-end filling material (ZOE), their properties are far short from the ideal when considering the ultimate goal of endodontic therapy as not only being tooth retention, but also complete healing of the pulp and/or periradicular tissues. To take this concept one step further, in order to identify materials for use in endodontic therapy (which includes non surgical and surgical treatment), that will achieve this ultimate goal, the characteristics of these materials must be defined in light of what is known and what is ideal. Therefore, research in this area must be directed to the development of materials which possess the following properties or characteristics.

1. They must possess antimicrobial properties.
2. Rather than just being biocompatible, they must be bioinductive to the formation of new tissue. In the case of the pulp it must be hard tissue; in the periradicular region it must be both a hard and soft tissue response.
3. The materials must adhere to tooth structure (primarily dentin) and be impervious to moisture and microleakage from both the oral environment and the periradicular tissues.
4. The materials must be resistant to fluid contamination during placement and set, or they must use and incorporate the available fluids in their setting reaction.
5. A slight expansion upon set would be ideal, however, shrinkage is unacceptable.
6. The materials must not induce any cellular aberration in the host, and ideally should not result in any long term chronic inflammatory response.
7. The materials should not be affected by the presence of a smear layer, as a complete removal of this layer is very difficult.
8. Dentinal tubules, as well as the apical foramen, accessory and lateral communication, and the coronal orifice of the root canal



Fig. 2A - Extensive network of thermoplastic gutta-percha plugs created during condensation of the material in the middle third of the root into patent dentinal tubules in the absence of a smear layer. Original magnification 66X.

Fig. 2A - Un'estesa rete di zuffi di gutta-perca termoplastica formati durante la condensazione del materiale nel terzo medio della radice dentro i tubuli dentinali in assenza dello strato di fango dentinale. Ingrandimento originale 66X.

system must be capable of being hermetically sealed. Therefore, the material must be able to flow into the intricacies of the prepared root canal system and/or be condensed into such (Fig. 2).

9. Clinical parameters and handling characteristics of the material must be user friendly.

10. The materials should not be developed as a substitute for thorough removal of tissue debris and bacterial contaminants.

The continued use of phenolic or formalin-based antimicrobial agents in the root canal system during treatment should be eliminated, as most often they are used as a panacea for poor root canal debridement. Research should continue in the development of enhanced root canal irrigants, which can not only debride and dissolve the tissue remnants, but can also dissolve the smear layer and condition the dentine for an adhesive root canal filling material. Efforts should also be directed at pulpal preservation, as endodontic therapy must include a focus on wound healing in the pulp as well as the periradicular tissues. The development of *in vitro* models with *in vivo* applicability are essential to explore futuristic advances in endodontic materials research.

ENDODONTIC TECHNIQUES

As with endodontic materials, very few new innovative techniques have been developed which have had a major impact on the practice of endodontics. To put them in perspective, a brief listing is indicated.

1. **Electronic apex locators**; these have somewhat eliminated the need for excessive radiographic exposure, however, they are not foolproof. Their continued use is antici-

pated. Radiographs, however, still provide a wealth of information not available with these devices.

2. **Fiber optics**; these have been a boon to endodontics in both diagnosis and treatment. However, their usefulness has defined parameters and ends therein.

3. **Sonic and ultrasonic systems**; these instruments have assisted the operator in achieving a greater degree of canal cleanliness, with some ease in preparation in the middle and coronal thirds of the canal. To date however, their use and acceptance is limited, and further research is necessary as well as enhanced technological improvements before there is a general acceptance of their purported benefits.

4. **Obturation systems**; there have been, and continues to be, a plethora of obturation devices and techniques on the market. These primarily consist of thermoplasticized gutta-percha systems or applications. To date none have been able to demonstrate the routine achievement of a hermetic seal in the root canal, with varying degrees of microleakage and adaptability evident (Fig. 3). While the concept appears valid, the technology is lacking because of material shortcomings.

5. **Radiographic techniques**; the most important advancement in this area may be radiovisiography. While exceedingly promising, costs and equipment are burdensome at present. Further research and development is essential in this area.

6. The biggest area of development which may provide potential important advances for endodontic application in the future is in the area of **lasers**. Their use in canal sterilization, preparation, and obturation has been



Fig. 2B - Discrete gutta-percha plugs condensed into patent dentinal tubules in the apical third of the canal in the absence of a smear layer. Original magnification 1500X.

Fig. 2B - Zaffi discreti di gutta-percha condensati dentro i tubuli dentinali nel terzo apicale del canale in assenza dello strato di fango dentinale. Ingrandimento originale 1500X.

e dalla Federation Dentaire Internationale (16) una guida per stabilire le proprietà dei vari materiali. Mentre l'applicazione dei metodi di prova *in vitro* può fornire una certa quantità di materiali con limitati parametri di estrapolazione, l'uso dei test *in vivo* può aiutare ad identificare le complesse interazioni tra il materiale e il tessuto. Quindi, è giustificabile una serie di test designati a dare una gamma quanto più possibile completa di informazioni sui nuovi materiali prima di essere commercializzati e impiegati su larga scala.

Attualmente sono stati sviluppati pochissimi nuovi materiali endodontici. Questo è un po' fortuito, perché ci sono poche informazioni riguardo l'utilizzo di materiali in uso da decenni come l'idrossido di calcio e l'ossido di zinco-eugenolo (ZOE). Anche se questi materiali hanno avuto successo a vari livelli come materiali per l'incappucciamento, come sigillanti, e, più recentemente, come materiale per retrograde (ZOE), le loro proprietà sono lontane da quelle ideali considerando l'obiettivo principale dell'Endodonzia non solo il mantenimento del dente ma anche una completa guarigione della polpa e/o tessuto periradiculare. Per portare questo concetto un passo più avanti, e per poter identificare i materiali idonei per la terapia endodontica (che comprende trattamento chirurgico e non) che ci aiuterà a raggiungere questi obiettivi, occorre definire le caratteristiche di questi materiali alla luce di quanto è noto e di quanto è ideale. Quindi, le ricerche in quest'area devono mirare allo sviluppo di materiali che posseggono le seguenti proprietà o caratteristiche:

1. Devono avere proprietà antimicrobiche.
2. Oltre ad essere biocompatibili, devono

essere bio-induttivi alla formazione di nuovo tessuto. Nel caso della polpa deve essere tessuto duro; nell'area periradiculare deve essere tessuto sia duro che molle.

3. I materiali devono aderire alla struttura del dente (in particolare alla dentina) e essere impermeabili all'acqua e alle microinfiltrazioni sia dall'ambiente orale che dai tessuti periradicali.

4. I materiali devono essere resistenti alla contaminazione dai fluidi durante l'inserimento e il fissaggio, o devono sfruttare e incorporare i fluidi nella reazione di fissaggio.

5. Una leggera dilatazione in seguito al fissaggio sarebbe ideale, mentre la contrazione è inaccettabile.

6. I materiali non devono indurre alcuna aberrazione cellulare nella struttura ospitante, e idealmente non ci deve essere una risposta infiammatoria cronica a lungo termine.

7. I materiali non dovrebbero essere influenzati dalla presenza di uno strato di fango dentinale, poiché la totale rimozione di questo strato è molto difficile.

8. I tubuli dentinali, come il forame apicale, la comunicazione accessoria e laterale, e l'apertura coronale del sistema canalare radicolare devono essere sigillati ermeticamente. Quindi, il materiale deve essere in grado di scorrere nelle tortuosità del sistema canalare radicolare e/o essere condensato dentro gli stessi (Fig. 2).

9. L'operatore deve aver confidenza con i parametri clinici e le caratteristiche della manipolazione.

10. I materiali non dovrebbero essere sviluppati come sostituto per una completa rimozione di detriti di tessuto e di contami-

nanti batterici.

Dovrebbe essere eliminato l'uso di agenti antimicrobici a base di fenolo o di formalina durante il trattamento del sistema canalare radicolare perché spesso vengono usati come rimedio universale per una detersione del canale radicolare. Si devono continuare le ricerche per lo sviluppo di migliori irriganti che non solo sono in grado di eliminare e sciogliere i residui tissutali, ma sono anche in grado di dissolvere lo strato di fango dentinale e di condizionare la dentina per ospitare un materiale adesivo nel canale radicolare. Ci vogliono inoltre studi indirizzati verso la conservazione della polpa perché la terapia endodontica deve includere la guarigione di ferite pulpari tanto quanto per il tessuto periradiculare. È essenziale sviluppare modelli *in vitro* con applicazioni *in vivo* per esplorare i progressi delle ricerche sui materiali endodontici.

TECNICHE ENDODONTICHE

Come per i materiali endodontici, si sono sviluppate poche nuove tecniche che hanno avuto un grande impatto sulla pratica endodontica. Per metterle in prospettiva sono elencate qui di seguito:

1. **Localizzatori elettronici dell'apice:** hanno ridotto la necessità di troppe radiografie, tuttavia non sono infallibili. Si continuerà ad usarli in futuro, ma le radiografie forniscono ancora preziose informazioni non disponibili con queste apparecchiature.

2. **Fibre ottiche:** sono state un vantaggio nell'Endodonzia sia per la diagnosi che per il trattamento. Tuttavia, la loro utilità ha parametri definiti e finì in ciò.

3. **Sistemi sonici e ultrasonici:** questi strumenti hanno dato un aiuto all'operatore nel raggiungere un maggior grado di pulizia del canale e facilitano la preparazione del terzo medio e coronale del canale. Ora però, il loro uso e il loro consenso si è ridotto; occorrono ulteriori ricerche e un miglioramento delle tecniche prima che ci sia un riscontro generale dei loro benefici.

4. **Sistemi di obturazione:** c'è stata e continua ad esserci un'abbondanza di apparecchiature e tecniche in commercio che consistono principalmente in sistemi per l'inserimento di gutta-percha termoplastificata. Fino ad oggi nessuno di questi sistemi è in grado

proposed, along with the removal of broken instruments and posts (17). Likewise, surgical endodontics, including the cutting of soft and hard tissue, root-end resection and sealing has also been identified as uses for the laser, primarily the Nd:YAG system, with newer systems waiting in the wings. However, present-day laser technology must be significantly enhanced to meet these expectations and in doing so, laser technology may very well be the "new frontier" of endodontics.

Presently, very little has evolved which has significantly advanced the ascribed goals of endodontics for the future. What is even more alarming is that methods of evaluation for these presumed advanced techniques are crude and fail to represent the meaningful gathering of information. For example, dye microleakage tests are used to evaluate a number of clinically advocated techniques. Yet these tests are nothing more than stagnant methods to evaluate a dynamic process, and their information is not only limited but subject to significant misinterpretation. Therefore, along with the development of new endodontic technologies must be the concomitant evolution of evaluative techniques, which will provide the researcher and clinician with meaningful data directed at a course of action compatible with technology and material availability.

Additionally, future directions for endodontic technology should consider the following.

1. The development of delivery systems to manage the materials previously discussed.
2. Three-dimensional radiographic imaging techniques that are computer linked and computer assisted for accuracy and precision. Significant in this area would be the ability to assess the three-dimensional anatomy of the pulpal space prior to and during treatment.
3. The development of diagnostic tools in which a greater accuracy in the status of the pulp can be determined by the clinician. While laser Doppler flowmetry is a step in that direction, the ultimate goal is to be able to establish a reliable pulpal diagnosis of sickness or health and to accurately determine its ability to heal when compromised.



Fig. 3A - Demineralized, dehydrated and cleared mesial roots of mandibular first molars subsequent to obturation and immersion into India ink for 5 months. Canal on left filled with Thermafil with plastic core and sealer; on the right, laterally condensed gutta-percha and sealer. Note extensive canal anastomoses and leakage patterns. Original magnification 9X.

Fig. 3A - Radici mesiali demineralizzate, disidratate di primi molari mandibolari in seguito all'otturazione e all'immersione nella china per cinque mesi. Canale sinistro otturato con Thermafil con anima in plastica; a destra guttapercha condensata lateralmente e con cemento. Notare l'estesa anastomosi del canale e la sequenza delle perdite. Ingrandimento originale 9X.



Fig. 3B - Canal on left, lateral condensation; canal on the right Thermafil with plastic core. Regardless of gutta-percha and sealer adaptation and movement into the anastomosis, leakage is still present in apical areas inaccessible to cleaning, shaping and thorough obturation. Original magnification 9X.

Fig. 3B - Canale sinistro: condensazione laterale; canale destro: Thermafil con anima in plastica. Nonostante l'adattamento e lo spostamento della guttapercha e del cemento dentro l'anastomosi, esistono ancora infiltrazioni in zone apicali inaccessibili alla delesione, alla sagomatura e all'otturazione totale. Ingrandimento originale 9X.

The concept of vital or nonvital is archaic and obsolete.

4. Techniques designed to enhance and simplify canal cleaning and shaping are essential, possibly with the use of laser probes in the canal system.

Challenges to the development of new technologies and materials in endodontics are truly overwhelming, and can only be achieved through continued research and development which is biologically based. How-

ever, there is a serious concern that the critical mass of personnel dedicated to these endeavors is insufficient and dwindling (18-19). Therefore, in addition to the need to develop new materials and techniques, there must be a concerted effort to redirect human resources to this vision to ensure the viability of endodontics and endodontology for the future. Can we meet the challenge.



Fig. 3C - Thermafil with plastic core on the left; laterally condensed gutta-percha on the right. Even though some form of leakage appears inevitable, clinical ramifications of such remain elusive. Original magnification 16X.

Fig. 3C - A sinistra Thermafil con anima in plastica; a destra gutta-percha condensata lateralmente. Appaiono inevitabili alcune zone di infiltrazione, in quanto tali ramificazioni restano non riempite. Ingrandimento originale 16X.

di garantire un sigillo ermetico di routine nel canale radicolare, ma hanno vari gradi di microperdita e di adattabilità (Fig. 3). Mentre il concetto sembra valido, manca la tecnologia a causa di difetti dei materiali.

5. Tecniche radiografiche: la novità più importante in questo campo sarà la radiovisiografia. Promette molto ma attualmente i costi e l'attrezzatura sono gravosi. Sono necessarie ulteriori ricerche in quest'area.

6. Laser: la più vasta area di sviluppo che può portare importanti progressi nell'Endodonzia in futuro è l'area dei laser. È stato proposto il loro uso per la sterilizzazione, la preparazione e l'otturazione del canale insieme alla rimozione di strumenti fratturati e di perni (17). Similmente, rientrano tra gli utilizzi del laser la chirurgia endodontica, compreso il taglio di tessuto duro e molle, la resezione dell'apice radicolare e la sigillatura, in particolare il sistema Nd: YAG, e nuovi sistemi attendono dietro le quinte. Tuttavia, la tecnologia laser di oggi deve svilupparsi

per andare incontro a queste aspettative e con ciò la tecnologia laser si può benissimo considerare la "nuova frontiera" dell'Endodonzia.

Nei tempi recenti si è sviluppato poco di significativo che ha fatto progredire gli obiettivi dell'Endodonzia per il futuro. E ciò che è più allarmante è che i metodi di valutazione per queste nuove tecniche sono primitivi e non rappresentano una significativa raccolta di informazione. Per esempio, i test d'infiltrazione di coloranti vengono usati per valutare diverse tecniche cliniche. Eppure questi test non sono altro che metodi ristagnanti per valutare un processo dinamico, e l'informazione che forniscono non solo è limitata ma anche soggetta a significativi malintesi. Quindi, insieme allo sviluppo di nuove tecnologie endodontiche deve esserci una concomitante evoluzione delle tecniche di valutazione che darà al ricercatore o all'operatore dati importanti che lo indirizzano verso un comportamento com-

patibile con la disponibilità della tecnologia e dei materiali. Inoltre, le direttive future della tecnologia endodontica dovrebbero considerare quanto segue:

1. Lo sviluppo dei sistemi di distribuzione per gestire i materiali menzionati sopra.

2. Tecniche computerizzate per avere immagini radiografiche tridimensionali precise. Significativa in quest'area sarebbe la capacità di misurare l'anatomia tridimensionale dello spazio occupato dalla polpa prima e durante il trattamento.

3. Lo sviluppo degli strumenti diagnostici con i quali l'operatore può determinare con maggior precisione lo stato della polpa. Mentre la flussimetria doppler è un passo in quella direzione, l'obiettivo finale è di essere in grado di fare una diagnosi affidabile della polpa malata o sana e di determinare con esattezza la sua capacità di guarire quando compromessa. Il concetto di vitale o non vitale è arcaico e obsoleto.

4. È essenziale sviluppare tecniche designate a migliorare e semplificare la detersione e la sagomatura del canale, possibilmente con l'uso di sonde laser dentro il sistema canale.

Le sfide allo sviluppo di nuove tecnologie e di nuovi materiali nell'Endodonzia sono sconvolgenti e possono essere raggiunte solo attraverso continue ricerche su basi biologiche. Tuttavia, una seria preoccupazione riguarda il numero insufficiente e in diminuzione (18,19) di persone dedite a questi sforzi. Ne consegue che, oltre alla necessità di sviluppare nuovi materiali e nuove tecniche, occorre uno sforzo per indirizzare le risorse umane verso questa visione per assicurare la sopravvivenza dell'Endodonzia e della Endodontologia in futuro. Siamo in grado di accettare la sfida?

Adattamento di Matteo Capelli

REFERENCES

- 1 - Blayney JR. What teeth should be extracted: a report based upon further studies of root-canal therapy. *J Amer Dent Assoc* 1928; 15: 1217-1221
- 2 - Blayney JR. Fundamentals governing pulp-canal therapy. *Dent Cosmos* 1932; 74: 635-653
- 3 - Newman HN. Focal infection revisited - the dentist as physician. *J Dent Res* 1992; 71: 1854
- 4 - Kim S. Microcirculation in the Dental Pulp. In: *Experimental Endodontics*, Spangberg LSW, ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, Inc. 1990: 51-76
- 5 - Takahashi K, Kishi Y, Kim S. A scanning electron microscopic study of the blood vessels of dog pulp using corrosion resin casts. *J Endod* 1982; 8: 131-135
- 6 - Kim S. Microcirculation of the dental pulp in health and disease. *J Endod* 1985; 11: 465-471
- 7 - Gazelius B, Edwall B, Olgart L, Sundberg JM, Hokfelt T, Fischer JA. Vasodilatory effects and coexistence of calcitonin gene-related peptide (CGRP) and substance P in sensory nerves of cat pulp. *Acta Physiol Scand* 1987; 130: 30-40
- 8 - Liu MT, Park DA, Markowitz KL, Bilotto B, Dorscher-KIM J, Kim S. Effects of vasoactive agents on pulpal blood flow measured by laser Doppler velocimetry. *J Dent Res* 1988; 67: 215 Abstr #820
- 9 - Torabinejad M, Borasmy U, Kettering JD. *In vitro* bacterial penetration of coronal unsealed endodontically treated teeth. *J Endod* 1990; 16: 566-569
- 10 - Naidorf U. Immunoglobulins in periapical granulomas: a preliminary report. *J Endod* 1975; 1: 15-18
- 11 - Pulver WH, Taubman MA, Smith DJ. Immune components in normal and inflamed human dental pulp. *Arch Oral Biol* 1977; 22: 103-111
- 12 - Falkler WA, Martin SA, Toiba M, Siegel MA, Mackler BF. Reaction of pulpal immunoglobulins to oral microorganisms by an enzyme-linked immunosorbent assay. *J Endod* 1987; 13: 260-266
- 13 - Langeland K. Correlation of screening tests to usage tests. *J Endod* 1978; 4: 300-303
- 14 - Tronstad L, Wennberg A, Hasselgren G. Screening tests for dental materials. *J Endod* 1978; 4: 304-307
- 15 - American Dental Association. Biological evaluation of dental materials. 1982, Document #41
- 16 - Federation Dentaire Internationale. Recommended standard practices for the biological evaluation of dental materials. *Int Dent J* 1980; 30: 140-188
- 17 - Levy G. A new laser for endodontic and hard tissue applications. *Dent Today* 1991; 10(2): 36-39
- 18 - Gutmann JL. Endodontic educators - endodontic departments. Has the death knell sounded? *Communiqué - Amm Assoc Endod* 1991; 9: 8-10
- 19 - Glickman GN. Guest editorial: educational goals and research directions in endodontics. *J Dent Res* 1992; 71: 79