"VICTOR BABEȘ" UNIVERSITY OF MEDICINE AND PHARMACY TIMIȘOARA

FACULTY OF DENTISTRY

DEPARTMENT OF RESTORATIVE DENTISTRY AND ENDODONTICS

DOCTORAL THESIS

THERMAL EFFECTS ON THE EXTERNAL ROOT SURFACE DURING ROOT CANAL PREPARATION AND WARM INJECTABLE GUTTA-PERCHA OBTURATION:

AN INTEGRATED EXPERIMENTAL AND CLINICAL INVESTIGATION

— SUMMARY —

PhD Candidate:
Mihai Paven

Scientific Coordinator:
Prof. Univ. Dr. Roxana Oancea

TIMIȘOARA

2026

SPECIAL PART

ETHICS

All experimental work reported in this thesis was conducted in accordance with the ethical principles governing biomedical research involving human-derived material, and in particular with the Declaration of Helsinki. The two laboratory investigations of the Special Part used extracted human teeth obtained from routine clinical extractions performed for reasons entirely unrelated to the research; at no point were teeth removed for the purpose of the study, and the specimens were anonymised immediately after collection so that no information capable of identifying the individuals from whom they originated was retained or linked to the experimental data.

The first study, concerned with temperature variations during root canal preparation, was carried out at the Faculty of Dentistry of the “Victor Babeș” University of Medicine and Pharmacy Timișoara. It received the approval of the Institutional Review Board of the Emergency County Hospital of Timișoara, recorded under approval number 122 of 4 June 2017. Informed consent was obtained from all individuals whose extracted teeth were used, and the experimental protocol respected the conditions of that approval throughout.

The second study, concerned with temperature variations during warm injectable gutta-percha obturation, was approved by the Scientific Research Ethics Committee of the “Victor Babeș” University of Medicine and Pharmacy Timișoara under approval number 19 of 22 March 2024, subsequently revised and updated in 2026 to align with the final doctoral protocol. As in the first study, the teeth were obtained from routine dental extractions performed for clinical reasons independent of the research, written informed consent for the research use of the extracted teeth was secured before collection, and every specimen was anonymised before inclusion in the experiment.

Across both investigations, the handling and storage of the biological material followed accepted laboratory practice: specimens were kept hydrated in distilled water or physiological saline to preserve the integrity of the dentine, and they were processed exclusively within the controlled environment of the research centres of the Faculty of Dentistry. No identifiable patient data were used at any stage of data collection, analysis, or interpretation, the authors declared no conflicts of interest, and the article-processing charges were met by the “Victor Babeș” University of Medicine and Pharmacy Timișoara. These measures together ensured that the work met the ethical standards required of contemporary dental research while protecting the dignity and anonymity of the individuals from whom the biological material was derived.

STUDY 1 — A COMPARATIVE STUDY OF TEMPERATURE VARIATIONS IN INCISOR ROOT SURFACES DURING ROOT CANAL PREPARATION USING VARIOUS ROTARY SYSTEMS AND IRRIGATION PROTOCOLS

Background and aims

Endodontic therapy is one of the cornerstone procedures of conservative dentistry, and its central purpose is the eradication of microbial infection from the canal space while the natural tooth is preserved within the dental arch. The predictability of root canal treatment depends largely on how thoroughly the operator is able to clean and shape the endodontic space, and contemporary practice relies increasingly on engine-driven rotary instrumentation to accomplish this task efficiently. Although these instruments have transformed the speed and reproducibility of canal preparation, the mechanical work they perform against the dentinal walls is inevitably accompanied by frictional heat, and this heat may be conducted outward to the periradicular tissues that envelop the root.

The biological structures most vulnerable to heat injury during endodontic treatment lie outside the canal rather than within it: the periodontal ligament, the cementoblasts of the root surface and the osteoblasts of the adjacent alveolar bone. Heat liberated within the canal must traverse the full thickness of the dentinal wall before it can reach these cells, so the temperature ultimately experienced at the outer surface is the quantity that best predicts the likelihood of tissue damage. The classical reference value derived from the work of Eriksson and Albrektsson — a sustained increase of approximately 10 °C above body temperature — has long served as the practical threshold separating safe from potentially injurious heating, and it provided the benchmark against which the present study judged thermal risk.

Two clinical levers complicate this picture. Different rotary and reciprocating systems generate different quantities of frictional heat as a consequence of their taper, cross-sectional geometry and kinematics, and the warming of sodium hypochlorite, while it enhances tissue dissolution and antimicrobial activity, introduces an additional and independent source of thermal energy. Because the periodontal tissues integrate these inputs over the duration of the procedure, the combined effect of mechanical shaping and heated irrigation is potentially more hazardous than either acting alone. The study was therefore framed around a null hypothesis stating that, on the external root surface, there would be no statistically significant difference in temperature change attributable either to the rotary system selected or to the temperature of the irrigant employed; the corresponding aim was to quantify, on extracted human teeth, the temperature changes occurring on the outer root wall during shaping with four contemporary rotary systems and during irrigation with sodium hypochlorite delivered at two temperatures.

Materials and methods

Sixty extracted human maxillary incisors, each possessing a fully formed apex, were assembled for this in vitro study. Specimens were admitted only if visual inspection and radiographic screening confirmed the absence of root caries, cracks, resorptive lesions and any sign of prior endodontic intervention, and they were kept submerged in distilled water until required so as to

avoid dehydration of the dentinal structure. Maxillary incisors were chosen deliberately, because their comparatively consistent external dimensions reduce the anatomical noise that might otherwise confound a thermal comparison and because they typically present a single canal, which makes them especially well suited to a standardized instrumentation protocol.

Coronal access was established with high-speed diamond burs under continuous water cooling. Working length was defined by advancing a size 10 K-file along the canal until its tip became just visible at the apical foramen and then withdrawing the reference point by 1 mm; to eliminate variability arising from differing crown heights, every specimen was trimmed to a uniform working length of 17 mm. Each tooth was seated vertically within a silicone impression material, which reproduced the damping effect of the periodontal ligament and provided a stable handle during shaping and thermal imaging.

The teeth were apportioned equally into four groups of fifteen by computer-generated randomisation, each group corresponding to one rotary system: ProTaper Next, a continuously rotating system with comparatively large, variable tapers; Reciproc Blue, a single-file reciprocating instrument of heat-treated alloy; WaveOne Gold, a reciprocating system of gold metallurgy; and TruNatomy, a minimally invasive system designed for conservative dentine removal. Each system was operated by a single operator according to the manufacturer's specifications, and irrigation between instruments used 5.25% sodium hypochlorite to standardise cleaning and disinfection.

Temperature changes on the external mesial root surface were recorded with a FLIR E60bx thermal imaging camera held at a fixed distance, baseline readings being taken before instrumentation and the maximum temperature in the coronal, middle and apical thirds being noted continuously during preparation. After instrumentation, irrigation was performed with sodium hypochlorite both at room temperature and heated to 60 °C, and the resulting temperature changes were recorded in the same manner. To characterise the anatomical substrate, cone-beam computed tomography was performed before and after instrumentation with the Carestream CS 9600 unit at a slice thickness of 90 µm, allowing the residual mesial dentine thickness and canal diameter to be measured at all three levels. All statistical procedures were conducted in IBM SPSS Statistics version 26: one-way ANOVA compared temperature changes among the four groups, post-hoc Tukey tests localised pairwise differences, and Pearson correlation quantified the association between dentine thickness and temperature rise, with significance set at $p < 0.05$.

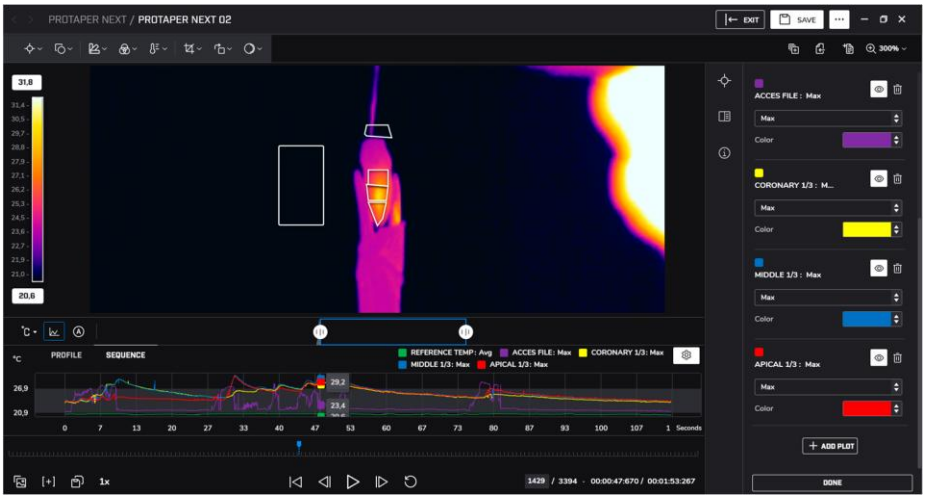


Figure 1. *Representative thermographic recording obtained during canal preparation with the ProTaper Next system, the rotary system that produced the highest external root-surface temperature increase.* **[101]**

Results

Residual dentine thickness differed significantly among the four systems at every root level ($p < 0.001$). ProTaper Next exhibited the greatest mean thickness, measuring 1.61 mm coronally, 1.34 mm in the middle third and 1.02 mm apically, whereas TruNatomy consistently displayed the thinnest walls, at 1.10 mm, 0.95 mm and 0.75 mm respectively; the Reciproc Blue and WaveOne Gold groups occupied intermediate positions. Because dentine behaves as an insulating barrier, the thinner walls characteristic of the TruNatomy specimens would be expected to permit a larger proportion of the internally generated heat to reach the external surface, a consideration that recurs throughout the interpretation of the thermal data.

Temperature elevation during instrumentation again differed significantly among the groups throughout ($p < 0.001$). ProTaper Next produced the largest mean increases, reaching 5.0 °C coronally and tapering to 3.0 °C apically, a gradient that mirrors the greater frictional load borne by the wider coronal portion of the instrument. TruNatomy generated the smallest elevations, averaging 2.5 °C coronally, 1.8 °C in the middle third and 1.2 °C apically, with Reciproc Blue and WaveOne Gold occupying an intermediate range. The coronal-to-apical decline observed in every group is plausibly explained by the natural tapering of the canal, which reduces instrument contact and friction as the apex is approached.

Pairwise comparison confirmed that the gap between ProTaper Next and TruNatomy was the most pronounced, with mean differences extending from 1.8 °C apically to 2.5 °C coronally and remaining highly significant at every level ($p < 0.001$). The contrast between ProTaper Next and Reciproc Blue was more modest (0.5–0.8 °C) yet still significant, and that between ProTaper Next and WaveOne Gold slightly larger (0.8–1.2 °C). The two reciprocating systems did not differ significantly from one another, implying that they share a broadly similar thermal signature.

Irrigation contributed a substantial further thermal load. In every group the heated irrigant produced a significantly larger temperature rise than its room-temperature counterpart ($p < 0.001$). ProTaper Next again recorded the highest value, with a mean elevation of 6.0 °C

under heated irrigation against 1.5 °C at room temperature, while TruNatomy registered the smallest increases under both conditions. The increment contributed by heated sodium hypochlorite was therefore of the same order as, and in some groups exceeded, the heat of instrumentation itself, so that warming the irrigant emerged as an especially powerful determinant of the cumulative thermal load.

The relationship between dentine thickness and temperature rise was formalised by Pearson correlation. Negative coefficients were obtained at every level, confirming an inverse association in which thinner walls correspond to larger external temperature increases; the strongest correlation was found apically ($r = -0.85$, $p < 0.001$), with the middle ($r = -0.82$) and coronal ($r = -0.78$) thirds marginally weaker but still strong and highly significant. Canal diameter, in marked contrast, exhibited essentially no relationship with temperature change, the coefficients hovering close to zero and failing to attain significance at any level — a finding which indicates that it is the residual wall, not the width of the lumen, that governs how much heat reaches the periodontal tissue.

Finally, the maximum increases produced during instrumentation and heated irrigation were combined for each system and compared with the 10 °C reference threshold. ProTaper Next recorded the highest combined increase, 12.6 °C, clearly surpassing the threshold; Reciproc Blue also exceeded it at 10.5 °C; WaveOne Gold approached it at 9.5 °C; and TruNatomy remained comfortably below it at 6.5 °C. The ranking established during instrumentation was thus preserved when heated irrigation was superimposed, the two contributions reinforcing rather than cancelling one another, which lends confidence to the conclusion that the design characteristics of the rotary system exert a consistent influence across the whole procedure.

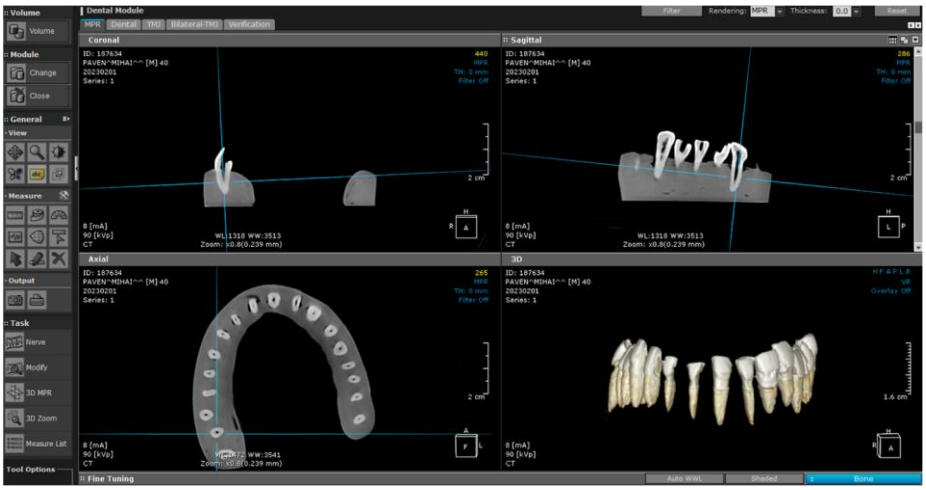


Figure 2. *Representative cone-beam computed tomography reconstruction used to quantify residual dentin thickness and canal diameter at the three root levels.* **[101]**

Discussion and conclusions

The data demonstrate clearly that both the instrumentation system and the temperature of the irrigant exert a significant influence on external root-surface temperature, with consequences that bear directly on periodontal health. ProTaper Next produced the largest thermal elevations during shaping, a result readily reconciled with its continuous rotational motion and large tapers, both of

which increase frictional heat, whereas the minimally invasive geometry of TruNatomy generated the smallest. The strong inverse correlations linking dentine thickness to temperature rise reinforce the conception of dentine as a protective insulating layer; where the wall is thin, and particularly in the apical third, a greater quantity of heat escapes to the outer surface and the danger of thermal damage grows accordingly.

The observation that canal diameter showed essentially no relationship with external temperature, while dentine thickness showed a strong one, carries a reassuring clinical corollary: the operator need not fear that enlarging a canal will in itself raise the thermal risk, provided that the enlargement does not thin the residual wall below the protective minimum. The consistency of the coronal-to-apical gradient across all four systems further reveals that the apical third, although it received the least heat in absolute terms, was also the region with the thinnest wall and the highest correlation between thickness and temperature; it is therefore simultaneously the coolest and the most vulnerable region, so that a comparatively modest amount of heat reaching a very thin apical wall may pose as great a hazard as a larger amount reaching a robust coronal one.

These observations sit comfortably within the wider literature, which has repeatedly shown that heat generation, instrument metallurgy and cooling strategy are tightly interrelated and that cooled irrigants and prepared access cavities markedly limit temperature elevation. In vivo recordings of canal-wall temperature during the stages preceding fibre-post cementation, materials studies of the phase transformation of heat-treated nickel-titanium files, and comparisons of shaping ability in double-curvature canals all converge on the same message: the thermal environment shapes not only the response of the surrounding tissue but also the mechanical performance of the instrument itself. The practical lesson is that the clinician exerts genuine control over the thermal cost of canal preparation through choices made routinely and at no additional expense: the selection of a minimally invasive, smaller-taper system in a thermally vulnerable tooth, the deliberate moderation of irrigant temperature where the dentine wall is thin, and a pre-operative appreciation of dentine thickness informed by radiographic or tomographic assessment. The contrast between the two extremes of the present sample was not marginal; it amounted to a difference of more than two degrees in the coronal third, a margin that may decide whether the cumulative thermal load of a procedure remains below or rises above the threshold of injury.

Several constraints temper these results. The work was performed in vitro on extracted teeth, an arrangement that cannot reproduce the buffering effect of blood flow and tissue perfusion in the living tooth; the sample, although statistically adequate, comprised a single tooth type whose anatomy may not represent that of molars or premolars; and the absence of any longitudinal dimension means that the long-term biological consequences of the temperature increases observed here could not be assessed. Within these boundaries, it can be concluded that different rotary instrumentation systems generate distinctly different degrees of temperature increase on the external root surface, that ProTaper Next consistently produced the greatest thermal elevation and TruNatomy the least, that heated sodium hypochlorite raised external temperatures appreciably and in certain specimens pushed the combined increase past the critical 10 °C threshold, and that a consistent inverse relationship between dentine thickness and temperature rise confirms that thinner walls are more readily penetrated by heat. Clinicians should therefore select their instrumentation and irrigation protocols with care, particularly when treating incisors,

favouring minimally invasive systems and controlled irrigant temperatures in order to safeguard periodontal health.

STUDY 2 — TEMPERATURE VARIATIONS ON THE EXTERNAL ROOT SURFACE DURING WARM INJECTABLE GUTTA-PERCHA OBTURATION AT DIFFERENT THERMO-PLASTICIZATION SETTINGS: AN IN VITRO STUDY

Background and aims

It is a long-established tenet of the endodontic literature that a great many dental procedures liberate heat capable of harming the dental pulp and the periodontal structures that surround the root. The thermal behaviour of canal preparation, irrigation and obturation has become a recognised field of inquiry in its own right, precisely because crossing certain temperature thresholds can precipitate irreversible tissue injury, including necrosis of bone and destruction of the periodontal ligament. The success of endodontic treatment hinges on the achievement of a complete, three-dimensional and hermetic seal of the canal system once chemomechanical debridement has been concluded, and among the obturation techniques available the warm gutta-percha injection methods have gained considerable popularity for their capacity to conform to intricate canal anatomy, to improve the density of the fill and to reduce the incidence of voids.

These techniques require gutta-percha to be heated to temperatures in the region of 160 °C to 200 °C, or higher, so that the softened material can flow into lateral canals, isthmuses and other irregularities that cold lateral condensation is generally unable to fill adequately. From a clinical perspective the heating of the external root surface is of real importance, because the cells of the periodontal ligament, the cementum and the neighbouring alveolar bone may all be exposed to heat conducted through dentine during obturation. The magnitude of this risk is not dictated by the device preset alone; it emerges from the interaction of temperature, the duration of exposure, the thickness of the residual dentine, the morphology of the root and the presence of any anatomical defect or resorptive lesion.

The specific scientific gap addressed by this study concerns the absence of quantitative data on whether the different thermoplasticization presets of the Woodpecker FI-G/FI-P system give rise to clinically meaningful differences in external root-surface temperature, and on whether the nominal presets displayed by the device correspond to the temperatures actually delivered at the working endpoints of the instruments. The null hypothesis held that the 180 °C and 230 °C settings would not produce significant differences in external root-surface temperature at the coronal, middle or apical thirds, and that the measured device output would not differ materially from the manufacturer’s stated presets. The investigation was therefore conceived as two complementary arms sharing a single title: a tooth-based study evaluating external root-surface temperature during obturation at 180 °C and 230 °C, and a device-based study measuring the actual temperatures produced by the FI-G gun and the FI-P heated pluggers across the available presets.

Materials and methods

The first arm used twenty extracted single-rooted human permanent teeth and a comparative design with two groups defined by the FI-G injection temperature: Group A at 180 °C and Group B at 230 °C, ten specimens each. Strict inclusion criteria ensured sample homogeneity: teeth

were required to be permanent, single-rooted, with fully formed apices and straight roots of similar dimensions, while multi-rooted teeth, open apices, calcified canals, pronounced curvature, atypical anatomy and structural defects were excluded. Each specimen was sectioned to a standardised length of 18 mm with a diamond disc under water cooling, allowing the external surface to be divided into three equal 6 mm thirds, and was stored in physiological saline to maintain hydration.

All twenty teeth were mechanically prepared with the ProTaper Next nickel-titanium rotary system following the manufacturer's sequence, sodium hypochlorite being used as the irrigant, with a final rinse of 17% EDTA and physiological saline before the canals were dried with sterile paper points. Obturation was performed with the Woodpecker FI-G injectable gutta-percha system fitted with the E23G injection cannula; for thermal standardisation no sealer was used, so that the experiment isolated the temperature effect of the thermoplasticized gutta-percha and device setting. The cannula was inserted to approximately 3 mm short of the working length and withdrawn at a constant rate while gutta-percha was injected, each specimen receiving a single ten-second injection cycle, and the device was allowed to return to the selected preset before each specimen was obturated.

Temperature was recorded in real time with the built-in thermovision camera of a Blackview BV8900 smartphone equipped with a FLIR Lepton 3.5 sensor. In the first arm, temperature was recorded at the coronal, middle and apical thirds of the external surface together with the ambient temperature, the highest value visible within each predefined region during the injection cycle being recorded. In the second arm, direct thermal measurements were made on the FI-G gun at three standardised locations — main body, base of the heating tip and tip apex — across all four presets (150 °C, 180 °C, 200 °C and 230 °C), and on the FI-P heated pluggers (models 5506 and 5508) at the tip, middle third and base under the same conditions.

Descriptive statistics were computed for every measurement, and one-way ANOVA compared the two groups at each root third with significance set at $\alpha = 0.05$. The Mann–Whitney U test served as a non-parametric alternative for the thermal-gradient comparisons, Pearson correlation coefficients evaluated linear relationships between root thirds within each group, and Cohen's d effect sizes with 95% confidence intervals expressed the magnitude of the differences independently of sample size, classified as small, medium or large. The coefficient of variation and the CV ratio (Group B divided by Group A) gauged measurement reproducibility and inter-specimen variability. Because acquisition and region-of-interest extraction were performed by a single calibrated operator, formal inter-operator reliability testing was not applicable, and reproducibility was conveyed instead through the coefficient of variation.

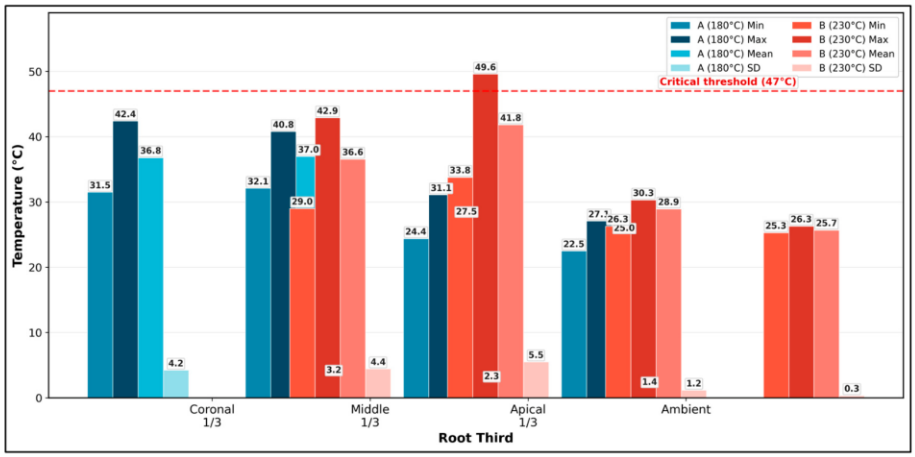


Figure 3. *Temperature distribution by root third and experimental group, showing minimum, maximum, mean and standard deviation; the dashed red line marks the critical 47 °C threshold.* **[105]**

Results

In Group A, obturated at 180 °C, coronal temperatures ranged from 31.5 °C to 42.4 °C, the middle third from 32.1 °C to 40.8 °C, and the apical third returned consistently lower readings between 24.4 °C and 31.1 °C. In Group B, obturated at 230 °C, the middle third produced the single highest measurement of the entire experiment, 49.6 °C in specimen B7, which was the only value to surpass the critical 47 °C threshold; three specimens within the Group B middle third exceeded that threshold, representing 30% of the group. Ambient temperatures remained stable in both groups, confirming consistent environmental conditions throughout.

The descriptive analysis revealed an instructive pattern. In Group A the coronal and middle means were almost identical (36.79 ± 4.25 °C versus 36.99 ± 3.21 °C), implying a uniform distribution of heat between these regions, while the apical third fell substantially to 27.49 ± 2.25 °C. In Group B the middle third displayed the highest mean (41.84 ± 5.52 °C), exceeding the coronal mean (36.56 ± 4.45 °C) by 5.28 °C — a gradient reversal that did not appear in Group A — and the standard deviation of this region was the largest of any, pointing to greater variability most plausibly attributable to differences in residual dentine thickness and canal morphology.

The ANOVA results were region-specific. The coronal comparison yielded $F = 0.014$ ($p = 0.907$), denoting no significant difference; the middle third, however, returned $F = 5.770$ and a significant p-value of 0.027, confirming that the 230 °C setting generated significantly higher middle-third temperatures; and the apical comparison was borderline ($F = 3.269$, $p = 0.087$). A global comparison would therefore have masked the localised thermal risk concentrated in the middle third.

The device arm disclosed marked discrepancies between preset and actual temperatures. At the 150 °C preset the FI-G tip base reached only 70.4 °C and the tip apex 35.4 °C, whereas at the 230 °C preset the tip base reached 150.0 °C and the tip apex only 51.3 °C; even at the highest nominal setting the active terminal segment recorded values far below the programmed temperature, while the main body remained comparatively stable, indicative of effective insulation. Both FI-P plugger models produced substantial tip temperatures rising in proportion to the preset,

reaching a maximum of 120.0 °C at the 230 °C preset, while the middle third and base remained within an approximate 30–40 °C interval, demonstrating a steep and highly localised gradient concentrated at the working end. Read together with the tooth-based arm, these data help to explain why root-surface temperatures remained well beneath the nominal presets and yet clinically relevant hot spots could still appear in the middle third when the 230 °C mode was used.

The clinical-safety analysis indicated that in Group A no specimen exceeded 47 °C in any root third, the maximum being 42.4 °C at the coronal level, while in Group B the three middle-third specimens that surpassed 47 °C again represented 30% of the group. The mean rise in the Group B middle third was +4.84 °C above body temperature, below the 10 °C mean-increase reference, yet the single maximum of 49.6 °C corresponded to a 12.6 °C rise, exceeding that reference and signalling a meaningful localised risk where the dentine walls are thin.

The intra-root gradient analysis quantified this phenomenon. The coronal-to-middle gradient was negligible in Group A (−0.20 ± 2.16 °C) but substantially negative in Group B (−5.28 ± 5.67 °C), a difference significant by the Mann–Whitney U test ($U = 77.0$, $p = 0.045$) and implying that at 230 °C the gutta-percha retains sufficient thermal energy to create a paradoxical temperature peak deeper within the canal. Pearson correlation exposed fundamentally different patterns of thermal coupling: in Group A a strong, highly significant positive correlation linked the coronal and middle thirds ($r = 0.869$, $p = 0.001$), consistent with a predictable monotonic decay, whereas in Group B all correlations were weaker and non-significant, suggesting that at the higher setting thermal behaviour becomes non-linear and unpredictable, governed more by local anatomical factors than by an orderly proximal-to-distal decay of heat. The effect-size analysis confirmed the robustness of these findings: the middle third yielded a large effect ($d = 1.074$, 95% CI [0.137, 2.012]) and the coronal-to-middle gradient reversal the largest of all ($d = −1.185$, 95% CI [−2.135, −0.235]), both with confidence intervals excluding zero, while the coefficient of variation showed that the 230 °C setting amplified middle-third inter-specimen variability by 52%.

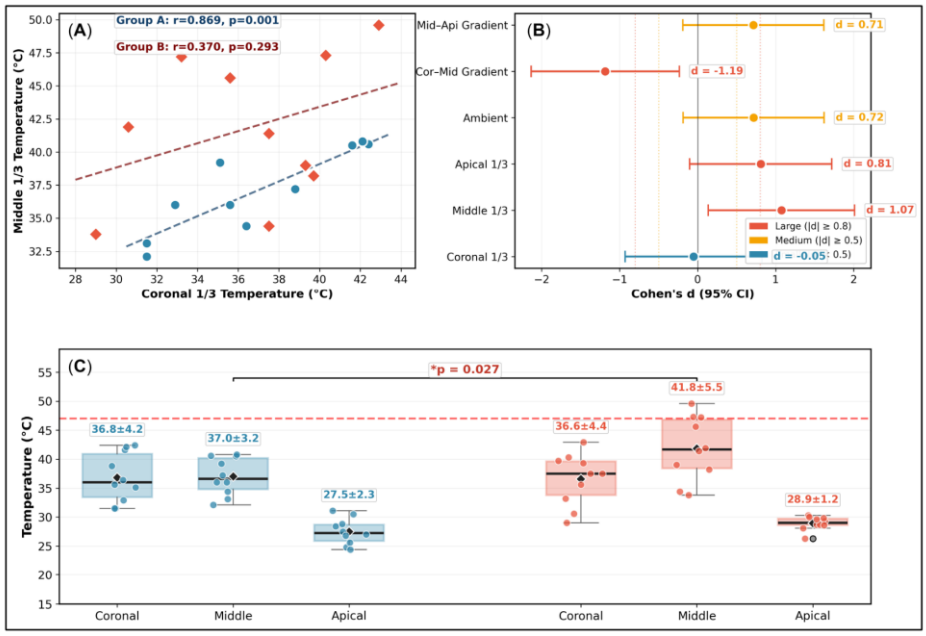


Figure 4. *Multi-panel statistical analysis. (A) Scatter plot with Pearson correlation and regression lines. (B) Forest plot of Cohen's d effect sizes with 95% CI. (C) Box-and-jitter plot with significance bracket; * = statistically significant.* **[105]**

Discussion and conclusions

The principal contribution of this work lies in its integration of two complementary thermal studies conducted on a single obturation platform. The tooth-based arm established that the 230 °C injection setting produced significantly higher temperatures in the middle third, with no significant differences in the coronal or apical thirds, and exposed a gradient reversal in which the middle third was paradoxically hotter than the coronal third — the largest effect size in the entire study. The device arm strengthened the interpretation by demonstrating that the FI-G and FI-P devices do not deliver their nominal preset uniformly to the clinically relevant endpoints but instead exhibit pronounced attenuation together with localised concentration of heat. Read jointly, the two arms suggest that the external root-surface response reflects both the preset chosen and the non-linear manner in which thermal energy passes from the obturation instruments into dentine and gutta-percha.

The clinical interpretation of these results demands caution. The 47 °C threshold is conventionally cited as a reference for potential periodontal and osseous injury, yet tissue response depends on both temperature and the duration of exposure; a brief transient peak need not exert the same biological effect as sustained heating, and an in vitro thermogram cannot in itself quantify cellular injury. The data should therefore be read as evidence of relative thermal risk between settings rather than as proof of clinical harm or of complete safety. The substantial discrepancy between manufacturer presets and recorded temperatures, with the FI-G tip base reaching 150.0 °C while the tip apex recorded only 51.3 °C, indicates that preset values should not be equated with the temperature experienced throughout the working parts of the system.

The middle-third hot spot observed at 230 °C is biologically plausible but should not be over-interpreted, since heat transfer during warm obturation is influenced by residual dentine thickness, canal diameter, the proximity of the gutta-percha mass to the external surface and the duration of device activation. Because dentine thickness was not measured three-dimensionally, the gradient reversal should be regarded as an experimental observation requiring confirmation in larger samples and across different tooth types. The findings are of greatest relevance to higher-risk clinical situations — teeth with thin root walls, immature apices, extensive canal enlargement, internal or external resorption, root concavities, prior iatrogenic damage or compromised periodontal support — in which even transient middle-third heating assumes greater importance because the reduced dentine thickness diminishes the insulating barrier between the warmed filling material and the periodontal tissues.

Several limitations warrant explicit recognition. The in vitro design did not reproduce the periodontal ligament, the alveolar bone, the blood flow or the adjacent soft tissues that would dissipate heat in vivo; the sample was limited to twenty single-rooted teeth, so that the study was not powered to detect small or moderate differences at every level; anatomical variability could not be entirely eliminated, since dentine thickness and canal cross-section were not quantified by CBCT or micro-CT; all procedures were carried out by a single calibrated operator; and only single-rooted teeth and two injection settings were evaluated. Within these limitations, the 180 °C

setting produced a lower and more predictable external root-surface thermal profile than the 230 °C setting, which generated significantly higher middle-third temperatures and a localised gradient reversal, with three of ten specimens exceeding the 47 °C reference threshold. Direct device measurements confirmed that the manufacturer presets did not correspond to uniform output temperatures at the active endpoints. These findings support the cautious use of higher thermoplasticization settings and suggest that lower settings, shorter activation times and careful control of delivery-tip depth may be preferable in teeth with thin dentine, resorptive defects or compromised root anatomy. Clinicians should therefore weigh the improved flow of gutta-percha afforded by a higher preset against the localised thermal risk it introduces, especially in anatomically compromised teeth where the protective dentine wall is reduced.

UNIVERSITATEA DE MEDICINĂ ȘI FARMACIE „VICTOR BABEȘ” TIMIȘOARA

FACULTATEA DE MEDICINĂ DENTARĂ

DISCIPLINA DE ODONTOTERAPIE RESTAURATOARE ȘI ENDODONȚIE

TEZĂ DE DOCTORAT

EFECTELE TERMICE ASUPRA SUPRAFEȚEI RADICULARE EXTERNE ÎN TIMPUL PREPARĂRII CANALULUI RADICULAR ȘI AL OBTURĂRII CU GUTAPERCĂ INJECTABILĂ CALDĂ:

O INVESTIGAȚIE EXPERIMENTALĂ ȘI CLINICĂ INTEGRATĂ

— REZUMAT —

Doctorand:
Mihai Paven

Conducător științific:
Prof. Univ. Dr. Roxana Oancea

TIMIȘOARA

2026

PARTEA SPECIALĂ

ETICĂ

Întreaga activitate experimentală prezentată în această teză a fost desfășurată în conformitate cu principiile etice care guvernează cercetarea biomedicală ce implică material de origine umană și, în special, cu Declarația de la Helsinki. Cele două investigații de laborator care alcătuiesc Partea Specială au utilizat dinți umanți extrași, obținuți în urma unor extracții clinice de rutină efectuate din motive complet independente de cercetare; în niciun moment dinții nu au fost extrași în scopul studiului, iar specimenele au fost anonimizate imediat după colectare, astfel încât nicio informație care ar putea identifica persoanele de la care proveneau nu a fost păstrată sau asociată cu datele experimentale.

Primul studiu, dedicat variațiilor de temperatură în timpul preparării canalului radicular, a fost realizat la Facultatea de Medicină Dentară a Universității de Medicină și Farmacie „Victor Babeș” din Timișoara. Acesta a primit aprobarea Comisiei de Etică (Institutional Review Board) a Spitalului Clinic Județean de Urgență Timișoara, înregistrată sub numărul de aprobare 122 din 4 iunie 2017. Consimțământul informat a fost obținut de la toți indivizii ale căror dinți extrași au fost utilizați, iar protocolul experimental a respectat în permanență condițiile acelei aprobări.

Al doilea studiu, dedicat variațiilor de temperatură în timpul obturării cu gutapercă injectabilă caldă, a fost aprobat de Comitetul de Etică a Cercetării Științifice al Universității de Medicină și Farmacie „Victor Babeș” din Timișoara, sub numărul de aprobare 19 din 22 martie 2024, revizuit și actualizat ulterior în 2026 pentru a se alinia cu protocolul doctoral final . Ca și în primul studiu, dinții au fost obținuți în urma unor extracții dentare de rutină efectuate din motive clinice independente de cercetare, consimțământul informat scris pentru utilizarea în cercetare a dinților extrași a fost obținut înainte de colectare, iar fiecare specimen a fost anonimizat înainte de includerea în experiment.

În ambele investigații, manipularea și depozitarea materialului biologic au respectat buna practică de laborator: specimenele au fost menținute hidratate în apă distilată sau ser fiziologic pentru a păstra integritatea dentinei și au fost prelucrate exclusiv în mediul controlat al centrelor de cercetare ale Facultății de Medicină Dentară. Nicio dată care să permită identificarea pacienților nu a fost utilizată în vreo etapă a colectării, analizei sau interpretării datelor, autorii nu au declarat conflicte de interese, iar taxele de procesare a articolelor au fost suportate de Universitatea de Medicină și Farmacie „Victor Babeș” din Timișoara. Aceste măsuri, luate împreună, au asigurat că activitatea experimentală a respectat standardele etice cerute cercetării dentare contemporane, protejând totodată demnitatea și anonimatul persoanelor de la care a provenit materialul biologic.

STUDIUL 1 — STUDIU COMPARATIV AL VARIAȚIILOR DE TEMPERATURĂ LA SUPRAFAȚA RADICULARĂ A INCISIVILOR ÎN TIMPUL PREPARĂRII CANALULUI RADICULAR CU DIFERITE SISTEME ROTATIVE ȘI PROTOCOALE DE IRIGARE

Context și obiective

Terapia endodontică este una dintre procedurile fundamentale ale stomatologiei conservatoare, iar scopul ei central este eradicarea infecției microbiene din spațiul canalar, cu păstrarea dintelui natural pe arcada dentară. Predictibilitatea tratamentului endodontic depinde în mare măsură de cât de temeinic reușește operatorul să curețe și să modeleze spațiul endodontic, iar practica contemporană se bazează tot mai mult pe instrumentarea rotativă acționată mecanic pentru a realiza eficient această sarcină. Deși aceste instrumente au transformat viteza și reproductibilitatea preparării canalului, lucrul mecanic pe care îl exercită asupra pereților dentinari este inevitabil însoțit de căldură de fricțiune, iar această căldură poate fi condusă spre exterior, către țesuturile periradiculare care înconjoară rădăcina.

Structurile biologice cele mai vulnerabile la leziunile termice în timpul tratamentului endodontic se află în afara canalului, nu în interiorul acestuia: ligamentul parodontal, cementoblastele de la suprafața radiculară și osteoblastele osului alveolar adiacent. Căldura eliberată în interiorul canalului trebuie să traverseze întreaga grosime a peretelui dentinar înainte de a ajunge la aceste celule, astfel încât temperatura resimțită în cele din urmă la suprafața externă este mărimea care prezice cel mai bine probabilitatea unei leziuni tisulare. Valoarea de referință clasică, derivată din lucrările lui Eriksson și Albrektsson — o creștere susținută de aproximativ 10 °C peste temperatura corpului — a servit mult timp drept pragul practic care separă încălzirea sigură de cea potențial vătămătoare și a constituit reperul față de care prezentul studiu a evaluat riscul termic.

Două pârghii clinice complică această imagine. Diferitele sisteme rotative și reciproce generează cantități diferite de căldură de fricțiune, ca o consecință a conicității, a geometriei secțiunii transversale și a cinematicii lor, iar încălzirea hipocloritului de sodiu, deși amplifică dizolvarea țesutului și activitatea antimicrobiană, introduce o sursă suplimentară și independentă de energie termică. Deoarece țesuturile parodontale integrează aceste contribuții pe durata procedurii, efectul combinat al modelării mecanice și al irigării încălzite este potențial mai periculos decât oricare dintre ele luată separat. Studiul a fost așadar construit în jurul unei ipoteze nule conform căreia, la suprafața radiculară externă, nu ar exista nicio diferență semnificativă statistic a variației de temperatură atribuibilă fie sistemului rotativ ales, fie temperaturii irigantului folosit; obiectivul corespunzător a fost cuantificarea, pe dinți umani extrași, a variațiilor de temperatură care apar la peretele radicular extern în timpul modelării cu patru sisteme rotative contemporane și în timpul irigării cu hipoclorit de sodiu la două temperaturi.

Materiale și metode

Șaizeci de incisivi maxilari umani extrași, fiecare având un apex complet format, au fost reuniți pentru acest studiu in vitro. Specimenele au fost admise numai dacă inspecția vizuală și examinarea radiografică au confirmat absența cariilor radiculare, a fisurilor, a leziunilor de

resorbție și a oricărui semn de tratament endodontic anterior, și au fost păstrate scufundate în apă distilată până la utilizare, pentru a evita deshidratarea structurii dentinare. Incisivii maxilari au fost aleși în mod deliberat, deoarece dimensiunile lor externe relativ constante reduc variațilitatea anatomică ce ar putea altfel afecta o comparație termică și deoarece prezintă de regulă un singur canal, ceea ce îi face deosebit de potriviți pentru un protocol de instrumentare standardizat.

Accesul coronar a fost realizat cu freze diamantate de mare viteză sub răcire continuă cu apă. Lungimea de lucru a fost stabilită prin avansarea unui ac K de mărimea 10 de-a lungul canalului până când vârful său a devenit vizibil la foramenul apical, urmată de retragerea reperului cu 1 mm; pentru a elimina variațilitatea provenită din înălțimi coronare diferite, fiecare specimen a fost ajustat la o lungime de lucru uniformă de 17 mm. Fiecare dinte a fost fixat vertical într-un material de amprentă siliconic, care a reprodus efectul de amortizare al ligamentului parodontal și a oferit un suport stabil în timpul modelării și al imagisticii termice.

Dinții au fost repartițizați în mod egal în patru grupuri de câte cincisprezece, prin randomizare generată pe calculator, fiecare grup corespunzând unui sistem rotativ: ProTaper Next, un sistem cu rotație continuă și conicități relativ mari și variabile; Reciproc Blue, un instrument reciproc cu un singur ac, din aliaj tratat termic; WaveOne Gold, un sistem reciproc din metalurgie de aur; și TruNatomy, un sistem minim invaziv conceput pentru îndepărtarea conservatoare a dentinei. Fiecare sistem a fost utilizat de un singur operator conform specificațiilor producătorului, iar irigarea între instrumente a folosit hipoclorit de sodiu 5,25% pentru a standardiza curățarea și dezinfecția.

Variațiile de temperatură la suprafața radiculară externă mezială au fost înregistrate cu o cameră de termoviziune FLIR E60bx menținută la o distanță fixă, citirile de bază fiind efectuate înainte de instrumentare, iar temperatura maximă în treimile coronară, medie și apicală fiind notată continuu în timpul preparării. După instrumentare, irigarea a fost efectuată cu hipoclorit de sodiu atât la temperatura camerei, cât și încălzit la 60 °C, iar variațiile de temperatură rezultate au fost înregistrate în același mod. Pentru a caracteriza substratul anatomic, tomografia computerizată cu fascicul conic (CBCT) a fost efectuată înainte și după instrumentare cu unitatea Carestream CS 9600, la o grosime a secțiunii de 90 µm, permițând măsurarea grosimii dentinare reziduale meziale și a diametrului canalar la toate cele trei niveluri. Toate procedurile statistice au fost efectuate în IBM SPSS Statistics versiunea 26: ANOVA unifactorială a comparat variațiile de temperatură între cele patru grupuri, testele post-hoc Tukey au localizat diferențele perechi, iar corelația Pearson a cuantificat asocierea dintre grosimea dentinei și creșterea de temperatură, pragul de semnificație fiind $p < 0,05$.

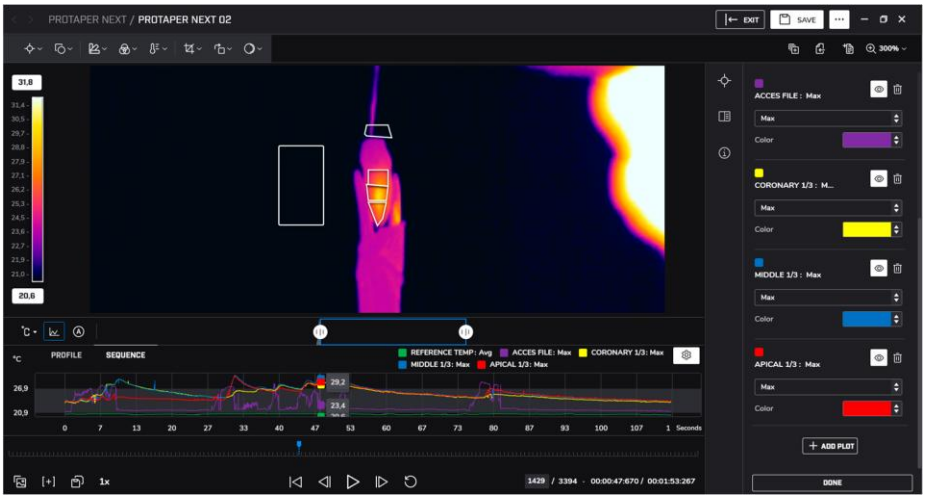


Figura 1. *Înregistrare termografică reprezentativă obținută în timpul preparării canalului cu sistemul ProTaper Next, sistemul rotativ care a produs cea mai mare creștere de temperatură la suprafața radiculară externă.* **[101]**

Rezultate

Grosimea dentinei reziduale a diferit semnificativ între cele patru sisteme la fiecare nivel radicular ($p < 0,001$). ProTaper Next a prezentat cea mai mare grosime medie, măsurând 1,61 mm coronar, 1,34 mm în treimea medie și 1,02 mm apical, în timp ce TruNatomy a prezentat constant cei mai subțiri pereți, de 1,10 mm, 0,95 mm și, respectiv, 0,75 mm; grupurile Reciproc Blue și WaveOne Gold au ocupat poziții intermediare. Deoarece dentina se comportă ca o barieră izolatoare, pereții mai subțiri caracteristici specimenelor TruNatomy ar permite ca o proporție mai mare din căldura generată intern să ajungă la suprafața externă, o considerație care revine pe tot parcursul interpretării datelor termice.

Creșterea de temperatură în timpul instrumentării a diferit din nou semnificativ între grupuri ($p < 0,001$). ProTaper Next a produs cele mai mari creșteri medii, ajungând la 5,0 °C coronar și scăzând la 3,0 °C apical, un gradient care reflectă sarcina de fricțiune mai mare suportată de porțiunea coronară mai largă a instrumentului. TruNatomy a generat cele mai mici creșteri, cu o medie de 2,5 °C coronar, 1,8 °C în treimea medie și 1,2 °C apical, Reciproc Blue și WaveOne Gold ocupând un interval intermediar. Declinul coronar-apical observat în fiecare grup se explică plauzibil prin îngustarea naturală a canalului, care reduce contactul instrumentului și fricțiunea pe măsură ce se apropie de apex.

Comparația perechilor a confirmat că diferența dintre ProTaper Next și TruNatomy a fost cea mai pronunțată, cu diferențe medii extinzându-se de la 1,8 °C apical la 2,5 °C coronar și rămânând înalt semnificative la fiecare nivel ($p < 0,001$). Contrastul dintre ProTaper Next și Reciproc Blue a fost mai modest (0,5–0,8 °C), dar tot semnificativ, iar cel dintre ProTaper Next și WaveOne Gold ușor mai mare (0,8–1,2 °C). Cele două sisteme reciproce nu au diferit semnificativ unul de celălalt, ceea ce sugerează că împărtășesc o semnătură termică în linii mari similară.

Irigarea a contribuit cu o sarcină termică suplimentară substanțială. În fiecare grup, irigantul încălzit a produs o creștere de temperatură semnificativ mai mare decât omologul său la temperatura camerei ($p < 0,001$). ProTaper Next a înregistrat din nou cea mai mare valoare, cu

o creștere medie de 6,0 °C sub irigare încălzită față de 1,5 °C la temperatura camerei, în timp ce TruNatomy a înregistrat cele mai mici creșteri în ambele condiții. Incrementul adus de hipocloritul de sodiu încălzit a fost așadar de același ordin cu, și în unele grupuri a depășit, căldura instrumentării înseși, astfel încât încălzirea irigantului s-a dovedit un determinant deosebit de puternic al sarcinii termice cumulative.

Relația dintre grosimea dentinei și creșterea de temperatură a fost formalizată prin corelația Pearson. Coeficienți negativi au fost obținuți la fiecare nivel, confirmând o asociere inversă în care pereții mai subțiri corespund unor creșteri mai mari de temperatură externă; cea mai puternică corelație a fost găsită apical ($r = -0,85$, $p < 0,001$), treimea medie ($r = -0,82$) și coronară ($r = -0,78$) fiind marginal mai slabe, dar tot puternice și înalt semnificative. Diametrul canalar, în schimb, nu a prezentat practic nicio relație cu variația de temperatură, coeficienții oscilând în jurul valorii zero și neînregistrând semnificație la niciun nivel — o constatare care indică faptul că peretele rezidual, și nu lărgimea lumenului, guvernează câtă căldură ajunge la țesutul parodontal.

În cele din urmă, creșterile maxime produse în timpul instrumentării și al irigării încălzite au fost combinate pentru fiecare sistem și comparate cu pragul de referință de 10 °C. ProTaper Next a înregistrat cea mai mare creștere combinată, 12,6 °C, depășind clar pragul; Reciproc Blue l-a depășit de asemenea, cu 10,5 °C; WaveOne Gold s-a apropiat de el, cu 9,5 °C; iar TruNatomy a rămas confortabil sub el, cu 6,5 °C. Clasamentul stabilit în timpul instrumentării a fost așadar păstrat atunci când irigarea încălzită a fost suprapusă, cele două contribuții consolidându-se reciproc în loc să se anuleze, ceea ce conferă încredere concluziei că trei caracteristicile de proiectare ale sistemului rotativ exercită o influență constantă pe întreaga procedură.

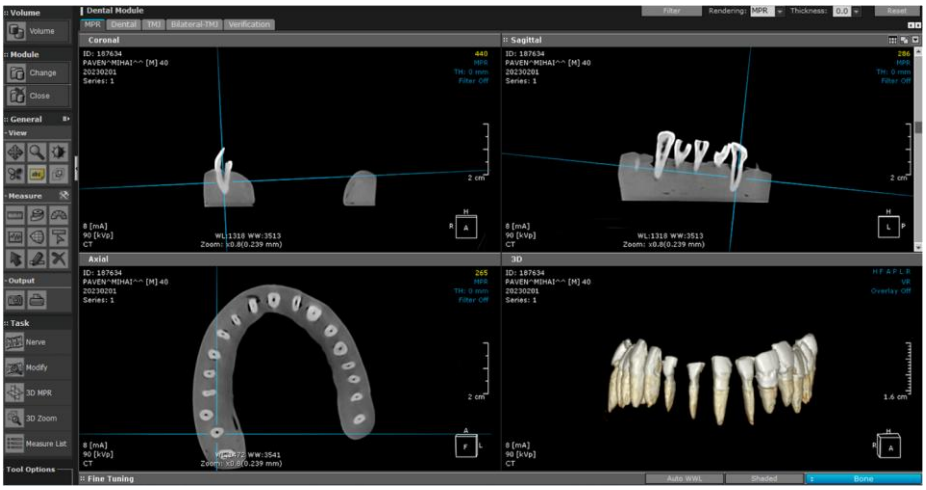


Figura 2. *Reconstrucție reprezentativă prin tomografie computerizată cu fascicul conic utilizată pentru cuantificarea grosimii dentinei reziduale și a diametrului canalar la cele trei niveluri radiculare.* **[101]**

Discuții și concluzii

Datele demonstrează clar că atât sistemul de instrumentare, cât și temperatura irigantului exercită o influență semnificativă asupra temperaturii suprafeței radiculare externe, cu consecințe care privesc direct sănătatea parodontală. ProTaper Next a produs cele mai mari creșteri termice în timpul modelării, un rezultat ușor de împăcat cu mișcarea sa de rotație continuă și cu conicitățile

mari, ambele crescând căldura de fricțiune, în timp ce geometria minim invazivă a TruNatomy le-a generat pe cele mai mici. Corelațiile inverse puternice care leagă grosimea dentinei de creșterea de temperatură întăresc concepția despre dentină ca strat izolator protector; acolo unde peretele este subțire, și în special în treimea apicală, o cantitate mai mare de căldură scapă la suprafața externă, iar pericolul de leziune termică crește în consecință.

Observația că diametrul canalar nu a prezentat practic nicio relație cu temperatura externă, în timp ce grosimea dentinei a prezentat una puternică, are un corolar clinic liniștitor: operatorul nu trebuie să se teamă că lărgirea unui canal va crește în sine riscul termic, cu condiția ca lărgirea să nu subțieze peretele rezidual sub minimul protector. Consecvența gradientului coronar-apical în toate cele patru sisteme dezvăluie că treimea apicală, deși a primit cea mai puțină căldură în termeni absoluți, a fost și regiunea cu cel mai subțire perete și cu cea mai mare corelație între grosime și temperatură; este, prin urmare, simultan regiunea cea mai rece și cea mai vulnerabilă, astfel încât o cantitate relativ modestă de căldură care ajunge la un perete apical foarte subțire poate reprezenta un pericol la fel de mare ca o cantitate mai mare care ajunge la un perete coronar robust.

Aceste observații se încadrează confortabil în literatura de specialitate mai largă, care a arătat în mod repetat că generarea de căldură, metalurgia instrumentului și strategia de răcire sunt strâns interconectate și că irigantele răcite și cavitățile de acces pregătite limitează considerabil creșterea de temperatură. Înregistrările in vivo ale temperaturii peretelui canalar în etapele care preced cimentarea pivotului de fibră, studiile de materiale privind transformarea de fază a acelor de nichel-titan tratate termic și comparațiile capacității de modelare în canale cu dublă curbură converg toate spre același mesaj: mediul termic modelează nu doar răspunsul țesutului înconjurător, ci și performanța mecanică a instrumentului însuși. Lecția practică este că medicul exercită un control real asupra costului termic al preparării canalului prin alegeri făcute de rutină și fără cheltuieli suplimentare: selectarea unui sistem minim invaziv, cu conicitate mai mică, într-un dinte vulnerabil termic, moderarea deliberată a temperaturii irigantului acolo unde peretele dentinar este subțire și o apreciere preoperatorie a grosimii dentinei informată prin evaluare radiografică sau tomografică. Contrastul dintre cele două extreme ale eșantionului prezent nu a fost marginal; el s-a ridicat la o diferență de peste două grade în treimea coronară, o marjă care poate decide dacă sarcina termică cumulativă a unei proceduri rămâne sub sau urcă peste pragul de leziune.

Mai multe constrângeri temperează aceste rezultate. Lucrarea a fost efectuată in vitro pe dinți extrași, un aranjament care nu poate reproduce efectul de tamponare al fluxului sanguin și al perfuziei tisulare din dintele viu; eșantionul, deși adecvat statistic, a cuprins un singur tip de dinte a cărui anatomie poate să nu reprezinte pe cea a molarilor sau premolarilor; iar absența oricărei dimensiuni longitudinale înseamnă că consecințele biologice pe termen lung ale creșterilor de temperatură observate aici nu au putut fi evaluate. În aceste limite, se poate concluziona că diferitele sisteme de instrumentare rotative generează grade distinct diferite de creștere a temperaturii la suprafața radiculară externă, că ProTaper Next a produs constant cea mai mare creștere termică și TruNatomy cea mai mică, că hipocloritul de sodiu încălzit a ridicat apreciabil temperaturile externe și în anumite specimene a împins creșterea combinată peste pragul critic de 10 °C și că o relație inversă constantă între grosimea dentinei și creșterea de temperatură confirmă că pereții mai subțiri sunt mai ușor penetrați de căldură. Clinicienii ar trebui așadar să

își selecteze cu grijă protocoalele de instrumentare și irigare, mai ales atunci când tratează incisivi, favorizând sistemele minim invazive și temperaturile controlate ale irigantului pentru a proteja sănătatea parodontală.

STUDIUL 2 — VARIAȚIILE DE TEMPERATURĂ LA SUPRAFAȚA RADICULARĂ EXTERNĂ ÎN TIMPUL OBTURĂRII CU GUTAPERCĂ INJECTABILĂ CALDĂ LA DIFERITE SETĂRI DE TERMOPLASTIFIERE: UN STUDIU IN VITRO

Context și obiective

Este un principiu de mult stabilit în literatura endodontică faptul că multe proceduri dentare eliberează căldură capabilă să vătame pulpa dentară și structurile parodontale care înconjoară rădăcina. Comportamentul termic al preparării canalului, al irigării și al obturării a devenit un domeniu de cercetare în sine, tocmai pentru că depășirea anumitor praguri de temperatură poate precipita leziuni tisulare ireversibile, inclusiv necroza osului și distrugerea ligamentului parodontal. Succesul tratamentului endodontic depinde de obținerea unei sigilări complete, tridimensionale și ermetice a sistemului canalar după încheierea debridării chemomecanice, iar dintre tehnicile de obturare disponibile, metodele de injectare a gutapercăi calde au căpătat o popularitate considerabilă pentru capacitatea lor de a se conforma anatomiei canalare complexe, de a îmbunătăți densitatea obturației și de a reduce incidența golurilor.

Aceste tehnici necesită încălzirea gutapercăi la temperaturi din intervalul 160 °C–200 °C sau mai mult, astfel încât materialul înmuiat să poată curge în canalele laterale, istmuri și alte neregularități pe care condensarea laterală la rece nu le poate de obicei umple adecvat. Din perspectivă clinică, încălzirea suprafeței radiculare externe este de reală importanță, deoarece celulele ligamentului parodontal, cementul și osul alveolar învecinat pot fi toate expuse la căldura condusă prin dentină în timpul obturării. Magnitudinea acestui risc nu este dictată doar de setările aparatului; ea rezultă din interacțiunea dintre temperatură, durata de expunere, grosimea dentinei reziduale, morfologia rădăcinii și prezența oricărui defect anatomic sau a unei leziuni de resorbție.

Lacuna științifică specifică abordată de acest studiu privește absența datelor cantitative privind dacă diferitele setări de termoplastifiere ale sistemului Woodpecker FI-G/FI-P dau naștere unor diferențe semnificative clinic în temperatura suprafeței radiculare externe și privind dacă setările nominale afișate de aparat corespund temperaturilor efectiv livrate la punctele de lucru ale instrumentelor. Ipoteza nulă susținea că setările de 180 °C și 230 °C nu ar produce diferențe semnificative în temperatura suprafeței radiculare externe la treimile coronară, medie sau apicală și că ieșirea măsurată a aparatului nu ar diferi material de setările declarate de producător. Investigația a fost așadar concepută ca două brațe complementare care împărtășesc un singur titlu: un studiu pe dinți care evaluează temperatura suprafeței radiculare externe în timpul obturării la 180 °C și 230 °C și un studiu pe aparate care măsoară temperaturile efective produse de pistolul FI-G și de pluggerele încălzite FI-P pe gama de setări disponibile.

Materiale și metode

Primul braț a utilizat douăzeci de dinți umani permanenți monoradiculari extrași și un design comparativ cu două grupuri definite de temperatura de injectare FI-G: Grupul A la 180 °C și Grupul B la 230 °C, câte zece specimene fiecare. Criterii stricte de includere au asigurat omogenitatea eșantionului: dinții trebuiau să fie permanenți, monoradiculari, cu apexuri complet formate și rădăcini drepte de dimensiuni similare, în timp ce dinții multiradiculari, apexurile

deschise, canalele calcificate, curbura pronunțată, anatomia atipică și defectele structurale au fost excluse. Fiecare specimen a fost secționat la o lungime standardizată de 18 mm cu un disc diamantat sub răcire cu apă, permițând împărțirea suprafeței externe în trei treimi egale de 6 mm, și a fost păstrat în ser fiziologic pentru menținerea hidratării.

Toți cei douăzeci de dinți au fost preparați mecanic cu sistemul rotativ de nichel-titan ProTaper Next conform secvenței producătorului, hipocloritul de sodiu fiind utilizat ca irigant, cu o clătire finală de EDTA 17% și ser fiziologic înainte ca acele canale să fie uscate cu conuri de hârtie sterile. Obturarea a fost efectuată cu sistemul de gutapercă injectabilă Woodpecker FI-G echipat cu canula de injectare E23G; pentru standardizare termică nu s-a folosit sealer, astfel încât experimentul a izolat efectul de temperatură al gutapercăi termoplastifiate și al setării aparatului. Canula a fost introdusă la aproximativ 3 mm de lungimea de lucru și retrasă cu o rată constantă în timp ce gutaperca era injectată, fiecare specimen primind un singur ciclu de injectare de zece secunde, iar aparatul a fost lăsat să revină la setările selectate înainte de obturarea fiecărui specimen.

Temperatura a fost înregistrată în timp real cu camera de termoviziune încorporată a unui smartphone Blackview BV8900 echipat cu un senzor FLIR Lepton 3.5. În primul braț, temperatura a fost înregistrată la treimile coronară, medie și apicală ale suprafeței externe, împreună cu temperatura ambiantă, cea mai mare valoare vizibilă în fiecare regiune predefinită în timpul ciclului de injectare fiind înregistrată. În al doilea braț, măsurători termice directe au fost efectuate pe pistolul FI-G în trei locații standardizate — corpul principal, baza vârfului de încălzire și apexul vârfului — pe toate cele patru setări (150 °C, 180 °C, 200 °C și 230 °C) și pe pluggerele încălzite FI-P (modelele 5506 și 5508) la vârf, treimea medie și bază, în aceleași condiții.

Statistici descriptive au fost calculate pentru fiecare măsurătoare, iar ANOVA unifactorială a comparat cele două grupuri la fiecare treime radiculară, cu pragul de semnificație stabilit la $\alpha = 0,05$. Testul Mann–Whitney U a servit drept alternativă neparametrică pentru comparațiile gradientului termic, coeficienții de corelație Pearson au evaluat relațiile liniare între treimile radiculare în cadrul fiecărui grup, iar mărimile de efect Cohen’s d cu intervale de încredere de 95% au exprimat magnitudinea diferențelor independent de mărimea eșantionului, clasificate ca mici, medii sau mari. Coeficientul de variație și raportul CV (Grupul B împărțit la Grupul A) au evaluat reproductibilitatea măsurătorilor și variațilitatea între specimene. Deoarece achiziția și extragerea regiunilor de interes au fost efectuate de un singur operator calibrat, testarea formală a fiabilității inter-operatori nu a fost aplicabilă, iar reproductibilitatea a fost exprimată în schimb prin coeficientul de variație.

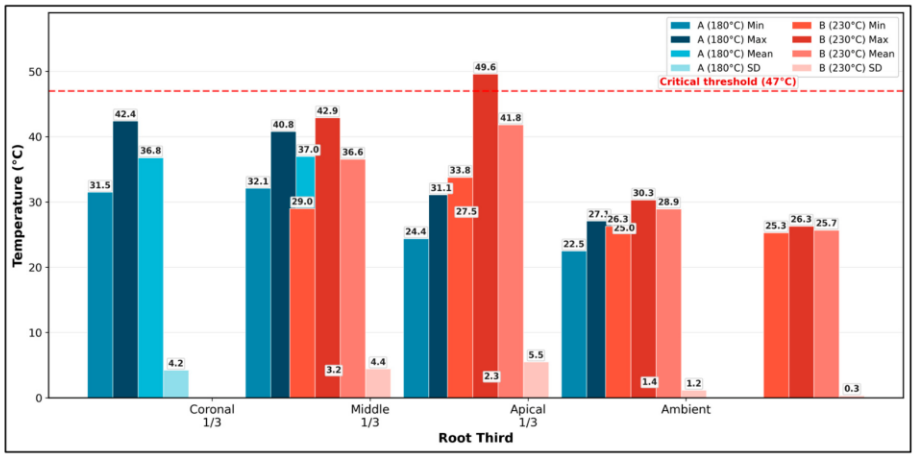


Figura 3. *Distribuția temperaturii pe treimi radiculare și grupuri experimentale, arătând minimul, maximul, media și abaterea standard; linia roșie punctată marchează pragul critic de 47 °C.* **[105]**

Rezultate

În Grupul A, obturat la 180 °C, temperaturile coronare au variat între 31,5 °C și 42,4 °C, treimea medie între 32,1 °C și 40,8 °C, iar treimea apicală a înregistrat valori constant mai mici, între 24,4 °C și 31,1 °C. În Grupul B, obturat la 230 °C, treimea medie a produs cea mai mare valoare unică a întregului experiment, 49,6 °C în specimenul B7, care a fost singura valoare ce a depășit pragul critic de 47 °C; trei specimene din treimea medie a Grupului B au depășit acest prag, reprezentând 30% din grup. Temperaturile ambiante au rămas stabile în ambele grupuri, confirmând condiții de mediu constante pe tot parcursul.

Analiza descriptivă a relevat un tipar instructiv. În Grupul A, mediile coronară și medie au fost aproape identice (36,79 ± 4,25 °C față de 36,99 ± 3,21 °C), implicând o distribuție uniformă a căldurii între aceste regiuni, în timp ce treimea apicală a scăzut substanțial la 27,49 ± 2,25 °C. În Grupul B, treimea medie a afișat cea mai mare medie (41,84 ± 5,52 °C), depășind media coronară (36,56 ± 4,45 °C) cu 5,28 °C — o inversare de gradient care nu a apărut în Grupul A — iar abaterea standard a acestei regiuni a fost cea mai mare dintre toate, indicând o variațilitate mai mare, atribuibilă cel mai plauzibil diferențelor de grosime a dentinei reziduale și de morfologie canalară.

Rezultatele ANOVA au fost specifice regiunii. Comparația coronară a dat $F = 0,014$ ($p = 0,907$), indicând nicio diferență semnificativă; treimea medie, însă, a returnat $F = 5,770$ și o valoare p semnificativă de 0,027, confirmând că setarea de 230 °C a generat temperaturi semnificativ mai mari în treimea medie; iar comparația apicală a fost la limită ($F = 3,269$, $p = 0,087$). O comparație globală ar fi mascat așadar riscul termic localizat concentrat în treimea medie.

Brațul pe aparate a dezvăluit discrepanțe marcate între temperaturile setate și cele efective. La setarea de 150 °C, baza vârfului FI-G a atins doar 70,4 °C și apexul vârfului 35,4 °C, în timp ce la setarea de 230 °C baza vârfului a atins 150,0 °C și apexul vârfului doar 51,3 °C; chiar și la cea mai înaltă setare nominală, segmentul terminal activ a înregistrat valori mult sub temperatura programată, în timp ce corpul principal a rămas relativ stabil, indicând o izolare eficientă. Ambele modele de plugger FI-P au produs temperaturi substanțiale la vârf, crescând proporțional cu

setarea și atingeând un maxim de 120,0 °C la setarea de 230 °C, în timp ce treimea medie și baza au rămas într-un interval aproximativ de 30–40 °C, demonstrând un gradient abrupt și puternic localizat concentrat la capătul de lucru. Citite împreună cu brațul pe dinți, aceste date ajută la explicarea motivului pentru care temperaturile suprafeței radiculare au rămas mult sub setările nominale și totuși punctele fierbinți relevante clinic au putut apărea în treimea medie atunci când a fost utilizat modul de 230 °C.

Analiza de siguranță clinică a indicat că în Grupul A niciun specimen nu a depășit 47 °C la nicio treime radiculară, maximul fiind 42,4 °C la nivel coronar, în timp ce în Grupul B cele trei specimene din treimea medie care au depășit 47 °C au reprezentat din nou 30% din grup. Creșterea medie în treimea medie a Grupului B a fost de +4,84 °C peste temperatura corpului, sub referința de creștere medie de 10 °C, însă maximul unic de 49,6 °C a corespuns unei creșteri de 12,6 °C, depășind acea referință și semnalând un risc localizat semnificativ acolo unde pereții dentinari sunt subțiri.

Analiza gradientului intraradicular a cuantificat acest fenomen. Gradientul coronar-medie a fost neglijabil în Grupul A (−0,20 ± 2,16 °C), dar substanțial negativ în Grupul B (−5,28 ± 5,67 °C), o diferență semnificativă prin testul Mann–Whitney U (U = 77,0, p = 0,045) și implicând că la 230 °C gutaperca reține suficientă energie termică pentru a crea un vârf de temperatură paradoxal mai adânc în canal. Corelația Pearson a expus tipare fundamental diferite de cuplaj termic: în Grupul A o corelație pozitivă puternică și înalt semnificativă a legat treimile coronară și medie (r = 0,869, p = 0,001), conform unui declin monoton previzibil, în timp ce în Grupul B toate corelațiile au fost mai slabe și nesemnificative, sugerând că la setarea mai înaltă comportamentul termic devine neliniar și impredictibil, guvernat mai mult de factori anatomici locali decât de un declin ordonat proximal-distal al căldurii. Analiza mărimii de efect a confirmat robustețea acestor constatări: treimea medie a dat un efect mare (d = 1,074, IC 95% [0,137, 2,012]), iar inversarea gradientului coronar-medie cea mai mare dintre toate (d = −1,185, IC 95% [−2,135, −0,235]), ambele cu intervale de încredere care exclud zero, în timp ce coeficientul de variație a arătat că setarea de 230 °C a amplificat variațilitatea între specimene a treimii medii cu 52%.

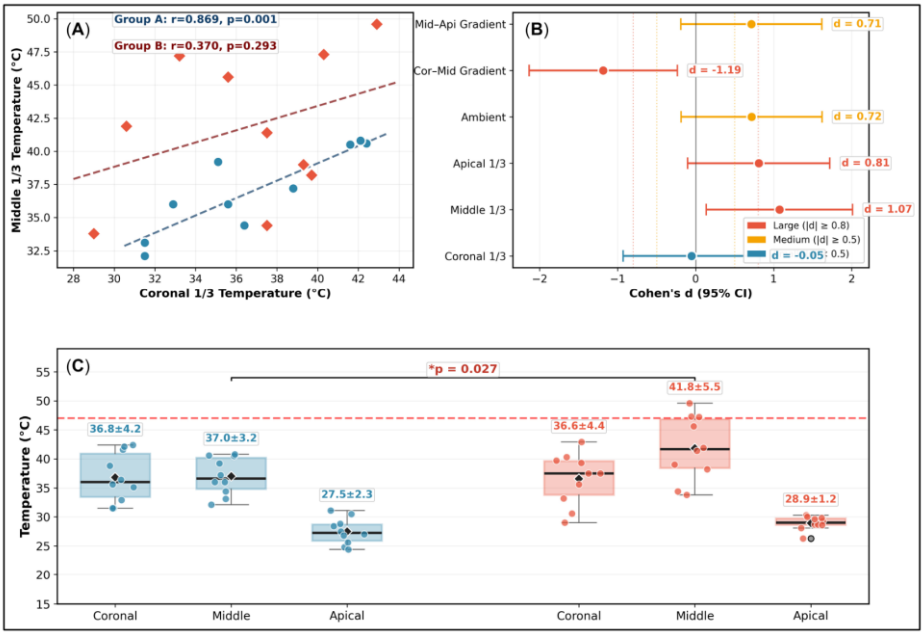


Figura 4. *Analiză statistică multi-panel. (A) Diagramă de dispersie cu corelația Pearson și liniile de regresie. (B) Diagramă forest a mărimilor de efect Cohen's d cu IC 95%. (C) Diagramă box-and-jitter cu bracket de semnificație; * = semnificativ statistic.* **[105]**

Discuții și concluzii

Contribuția principală a acestei lucrări constă în integrarea a două studii termice complementare desfășurate pe o singură platformă de obturare. Brațul pe dinți a stabilit că setarea de injectare de 230 °C a produs temperaturi semnificativ mai mari în treimea medie, fără diferențe semnificative în treimile coronară sau apicală, și a expus o inversare de gradient în care treimea medie a fost paradoxal mai caldă decât treimea coronară — cea mai mare mărime de efect din întregul studiu. Brațul pe aparate a întărit interpretarea demonstrând că aparatele FI-G și FI-P nu livrează setarea nominală uniform la punctele relevante clinic, ci prezintă în schimb o atenuare pronunțată împreună cu o concentrare localizată a căldurii. Citite împreună, cele două brațe sugerează că răspunsul suprafeței radiculare externe reflectă atât setarea aleasă, cât și modul neliniar în care energia termică trece de la instrumentele de obturare în dentină și gutapercă.

Interpretarea clinică a acestor rezultate cere prudență. Pragul de 47 °C este citat convențional ca referință pentru potențiala leziune parodontală și osoasă, însă răspunsul tisular depinde atât de temperatură, cât și de durata expunerii; un vârf tranzitoriu scurt nu trebuie să exercite același efect biologic ca o încălzire susținută, iar o termogramă in vitro nu poate în sine cuantifica leziunea celulară. Datele ar trebui prin urmare citite ca dovadă a riscului termic relativ între setări, mai degrabă decât ca dovadă a unei vătămări clinice sau a unei siguranțe complete. Discrepanța substanțială între setările producătorului și temperaturile înregistrate, cu baza vârfului FI-G atingeând 150,0 °C în timp ce apexul vârfului a înregistrat doar 51,3 °C, indică faptul că valorile setate nu ar trebui echivalate cu temperatura resimțită în toate părțile de lucru ale sistemului.

Punctul fierbinte din treimea medie observat la 230 °C este plauzibil biologic, dar nu ar trebui supra-interpretat, deoarece transferul de căldură în timpul obturării calde este influențat de grosimea dentinei reziduale, de diametrul canalar, de proximitatea masei de gutapercă față de

suprafața externă și de durata activării aparatului. Deoarece grosimea dentinei nu a fost măsurată tridimensional, inversarea de gradient ar trebui privită ca o observație experimentală care necesită confirmare pe eșantioane mai mari și pe diferite tipuri de dinți. Constatările sunt de cea mai mare relevanță pentru situațiile clinice cu risc ridicat — dinți cu pereți radiculari subțiri, apexuri imature, lărgire canalară extensivă, resorbție internă sau externă, concavități radiculare, leziuni iatrogene anterioare sau suport parodontal compromis — în care chiar și încălzirea tranzitorie a treimii medii capătă o importanță mai mare, deoarece grosimea dentinară redusă diminuează bariera izolatoare dintre materialul de obturare încălzit și țesuturile parodontale.

Mai multe limitări merită o recunoaștere explicită. Designul in vitro nu a reprodus ligamentul parodontal, osul alveolar, fluxul sanguin sau țesuturile moi adiacente care ar disipa căldura in vivo; eșantionul a fost limitat la douăzeci de dinți monoradiculari, astfel încât studiul nu a avut puterea de a detecta diferențe mici sau moderate la fiecare nivel; variațilitatea anatomică nu a putut fi complet eliminată, deoarece grosimea dentinei și secțiunea canalară nu au fost cuantificate prin CBCT sau micro-CT; toate procedurile au fost efectuate de un singur operator calibrat; și au fost evaluate doar dinți monoradiculari și două setări de injectare. În aceste limite, setarea de 180 °C a produs un profil termic al suprafeței radiculare externe mai scăzut și mai previzibil decât setarea de 230 °C, care a generat temperaturi semnificativ mai mari în treimea medie și o inversare de gradient localizată, trei din zece specimene depășind pragul de referință de 47 °C. Măsurătorile directe pe aparate au confirmat că setările producătorului nu au corespuns unor temperaturi de ieșire uniforme la punctele de lucru. Aceste constatări susțin utilizarea prudentă a setărilor mai înalte de termoplastifiere și sugerează că setările mai joase, timpii de activare mai scurți și controlul atent al adâncimii vârfului de livrare pot fi preferabile în dinții cu dentină subțire, defecte de resorbție sau anatomie radiculară compromisă. Clinicienii ar trebui așadar să cântărească fluxul îmbunătățit al gutapercăi oferit de o setare mai înaltă în raport cu riscul termic localizat pe care îl introduce, mai ales în dinții compromiși anatomic, unde peretele dentinar protector este redus.