

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**Faculdade de Ciências da Saúde**  
**Programa de Pós-Graduação em Odontologia**



Dissertação de Mestrado

**Pino de fibra condutor de luz: tecnologia para transmissão de luz e sua  
influência no grau de conversão e microdureza de cimentos resinosos**

**Camilla Rodrigues Peixoto**

Brasília, 30 de julho de 2025

**Camilla Rodrigues Peixoto**

**Pino de fibra condutor de luz: tecnologia para transmissão de luz e sua influência no grau de conversão e microdureza de cimentos resinosos**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Odontologia da Faculdade de Ciências da Saúde da Universidade de Brasília, como requisito parcial à obtenção do título de Mestra em Odontologia.

Orientador: Leonardo Fernandes da Cunha

Brasília, 30 de julho de 2025.

**Camilla Rodrigues Peixoto**

**Pino de fibra condutor de luz: tecnologia para transmissão de luz e sua influência no grau de conversão e microdureza de cimentos resinosos**

Dissertação aprovada, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestra em Odontologia, Programa de Pós-Graduação em Odontologia da Faculdade de Ciências da Saúde da Universidade de Brasília.

Data da defesa: 30 de julho de 2025

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Leonardo Fernandes da Cunha (Orientador)

---

Profa. Dra. Fernanda Cristina Pimentel Garcia

---

Prof. Dr. Carlos Eduardo Edwards Rezende

---

Profa. Dra. Evelyn Mikaela Kogawa (Suplente)

*Aos meus pais, Nair e Fernando, à minha irmã Fernanda e ao meu namorado,  
Victor. Vocês são minha fonte de amor e inspiração!  
Que este seja mais um passo em direção ao crescimento e à realização de sonhos.*

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Nair e Fernando, que sempre me apoiaram em minhas decisões e me proporcionaram condições para seguir meus sonhos. Sem o amor, dedicação e princípios de vocês eu nada seria. Vocês são meus maiores amores!

À minha irmã, com quem compartilho todos os meus desejos e conquistas. Obrigada por sempre caminhar ao meu lado e ser minha alma gêmea. A vida com você por perto é mais feliz, tenho certeza.

Ao Victor, por ser meu companheiro e fonte inesgotável de apoio. Agradeço por tudo que você fez e faz por mim. Obrigada por sempre me incentivar e me dar forças.

Ao meu orientador, Dr. Leonardo Cunha, por todos os ensinamentos que me transmitiu durante essa caminhada. Ter sido sua orientanda no mestrado foi uma grata surpresa! Sua tranquilidade ao me orientar foi essencial para o meu crescimento. Agradeço também pelos inúmeros conselhos e encorajamentos.

Aos meus amigos Ueslei, Kleyslla e Bruna Endres, que dividiram comigo essa caminhada. Obrigada pelo convívio na Universidade, pelas conversas e risadas, pelos trabalhos em grupo e pela amizade.

À Universidade de Brasília e ao Programa de Pós-Graduação em Odontologia, por proporcionarem ainda mais conhecimento e aprofundamento na minha jornada acadêmica. Estar na UnB é sempre um grande privilégio.

Ao CNPq, pela bolsa de estudos concedida durante o mestrado, que me permitiu maior dedicação às atividades acadêmicas.

Ao Professor Jorlandio Francisco Felix, do IF/UnB, por ter disponibilizado o laboratório e seus alunos para me ajudarem, além de ter me ensinado sobre a metodologia usada. Agradeço imensamente pela paciência e presteza!

Aos meus colegas de laboratório da Física, John, Juliani e Lucca, muito obrigada por me ensinarem a realizar a coleta de dados, operar os equipamentos e conduzir as análises estatísticas deste trabalho. Foi um grande prazer conhecê-los!

À minha amiga e colega de profissão, Celi, por ter gentilmente me apoiado com parte dos materiais utilizados nesta pesquisa e por estar sempre disposta a ajudar.

Obrigada!

*“Le succès est la somme des petits efforts répétés jour après jour.”*

*Leon Tolstói*

## RESUMO

### **Pino de fibra condutor de luz: tecnologia para transmissão de luz e sua influência no grau de conversão e microdureza de cimentos resinosos**

A polimerização do cimento resinoso utilizado na cimentação de retentores intrarradiculares é prejudicada nas regiões mais profundas do conduto radicular devido ao distanciamento em relação à fonte de luz fotopolimerizadora. Nesse contexto, o objetivo deste estudo *in vitro* foi comparar dois grupos de pinos — fibra de vidro (PFV, grupo comercial) e fibra de quartzo (PFQ, grupo experimental) — quanto à transmissão de luz e à polimerização do cimento resinoso, avaliando o grau de conversão (GC) por espectroscopia Raman e a microdureza Vickers (MV) nos terços cervical, médio e apical. Foram utilizadas sete amostras por grupo para GC e cinco amostras por grupo para MV. Os testes foram realizados utilizando uma matriz projetada digitalmente e fundida em liga metálica para simular o conduto radicular de forma padronizada. A fotoativação foi realizada por 60 s ( $1200 \text{ mW/cm}^2$ ), e os dados foram analisados por ANOVA two-way e teste de Tukey ( $\alpha = 5\%$ ). Os resultados demonstraram que não houve diferença estatisticamente significativa no GC entre PFV ( $38\% \pm 18\%$ ) e PFQ ( $43\% \pm 20\%$ ); entretanto, o GC diminuiu gradativamente do terço cervical para o apical ( $p = 0,007$ ). Os PFQ apresentaram maior MV ( $70,63 \text{ HV} \pm 3,88$ ) em comparação aos PFV ( $63,61 \text{ HV} \pm 5,45$ ) ( $p = 0,0151$ ). Conclui-se que a maior MV no grupo experimental pode indicar que, além do GC, outros fatores, como o grau de reticulação da rede polimérica formada, influenciam as propriedades mecânicas dos cimentos resinosos. Observou-se ainda que a transmissão de luz decresce do terço cervical para o apical, o que pode contribuir para a redução do GC e da MV nessas regiões mais profundas.

**Palavras-chave:** Pinos de fibra; Espectroscopia Raman; Dureza; Quartzo; Fotopolimerização; Cimento Resinoso.

## ABSTRACT

### **Light-Conducting Fiber Post: Technology for Light Transmission and Its Influence on the Degree of Conversion and Microhardness of Resin Cements**

The polymerization of resin cement used for the luting of intraradicular retainers is impaired in the deeper regions of the root canal due to the distance from the light-curing unit. In this context, the aim of this *in vitro* study was to compare two groups of posts — glass fiber posts (GFP, commercial group) and quartz fiber posts (QFP, experimental group) — regarding light transmission and resin cement polymerization, by evaluating the degree of conversion (DC) using Raman spectroscopy and Vickers microhardness (VMH) in the coronal, middle, and apical thirds. Seven samples per group were used for DC and five samples per group for VMH. Tests were performed using a digitally designed matrix cast in metal alloy to standardize the simulation of the root canal. Light activation was performed for 60 s (1200 mW/cm<sup>2</sup>), and data were analyzed using two-way ANOVA and Tukey's test ( $\alpha = 5\%$ ). The results showed no statistically significant difference in DC between GFP (38%  $\pm$  18%) and QFP (43%  $\pm$  20%); however, DC gradually decreased from the coronal to the apical third ( $p = 0.007$ ). QFP showed higher VMH (70.63 HV  $\pm$  3.88) compared to GFP (63.61 HV  $\pm$  5.45) ( $p = 0.0151$ ). It is concluded that the higher VMH in the experimental group may indicate that, in addition to DC, other factors such as the degree of crosslinking of the formed polymer network influence the mechanical properties of resin cements. Furthermore, it was observed that light transmission decreases from the coronal to the apical third, which may contribute to the reduction of DC and VMH in these deeper regions.

**Keywords:** Fiber posts; Raman spectroscopy; Microhardness; Quartz; Photopolymerization; Resin cement.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: Planejamento virtual da matriz utilizada para confecção das amostras..... | 23 |
| Figura 2: Partes da matriz fundida e matriz montada .....                           | 24 |
| Figura 3: Espectrômetro de Raman .....  | 24 |
| Figura 4: Etapas de preparo e cimentação dos pinos.....                             | 26 |
| Figura 5: Amostra posicionada para leitura no Raman.....                            | 27 |
| Figura 6: Interface do software Origin .....  | 28 |
| Figura 7: Politriz e preparo da amostra para teste de microdureza .....             | 29 |
| Figura 8: Microdurômetro.....   | 29 |
| Figura 9: Medida de Microdureza Vickers.....  | 30 |
| Figura 10: Média e Desvio-padrão do Grau de conversão nos terços. ....              | 32 |
| Figura 11: Média e Desvio-padrão do Grau de conversão dos grupos.....               | 33 |
| Figura 12: Média dos Espectros de Raman dos grupos comercial e experimental.....    | 34 |
| Figura 13: Gráfico do PCA.....  | 34 |
| Figura 14: Média e Desvio-padrão da Microdureza Vickers nos terços. ....            | 35 |
| Figura 15: Média e Desvio-padrão da Microdureza Vickers dos grupos. ....            | 35 |

## LISTA DE TABELAS

|   |       |
|---|-------|
| Tabela 1: Materiais utilizados para cimentação .....                                  | 25    |
| Tabela 2: Resultados do GC (%) obtidos por Espectroscopia de Raman.....               | 45    |
| Tabela 3: Resultados da ANOVA Two-Way e Teste de Tukey para - Grau de Conversão.....  | 46    |
| Tabela 4: Resultados da MV (HV).....  | 46/47 |
| Tabela 5: Resultados da ANOVA Two-Way e Teste de Tukey para Microdureza Vickers. .... | 47    |

## LISTA DE ABREVIATURAS

PFV – Pino de fibra de vidro  
PFQ – Pino de fibra de quartzo  
GC – Grau de conversão  
MV – Microdureza Vickers  
a.C. – Antes de Cristo  
Bis-GMA – Bisfenol A glicidil metacrilato  
Bis-EMA – Bisfenol A etoxilado dimetacrilato  
UDMA – Uretano dimetacrilato  
TEGDMA – Trietilenoglicol dimetacrilato  
HEMA – Hidroxietil metacrilato  
Ph – Fenil  
cm – centímetro  
mm – milímetro  
nm – nanômetro  
mW/cm<sup>2</sup> - miliwatts por centímetro quadrado  
HV – Dureza Vickers  
kgf – Quilograma força  
PCA – Análise de Componente Principal  
IQR – Intervalo interquartil

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b>                              | <b>13</b> |
| 1.1 JUSTIFICATIVA                                 | 15        |
| 1.2 OBJETIVOS                                     | 15        |
| 1.3 HIPÓTESES                                     | 15        |
| <b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b>                   | <b>17</b> |
| <b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b>                      | <b>22</b> |
| 3.1 PREPARO DAS AMOSTRAS                          | 22        |
| 3.2 GRAU DE CONVERSÃO POR ESPECTROSCOPIA DE RAMAN | 26        |
| 3.3 MICRODUREZA VICKERS                           | 27        |
| 3.4 CÁLCULO AMOSTRAL                              | 29        |
| <b>4. RESULTADOS</b>                              | <b>32</b> |
| <b>5. DISCUSSÃO</b>                               | <b>35</b> |
| <b>6. CONCLUSÃO</b>                               | <b>38</b> |
| <b>REFERÊNCIAS</b>                                | <b>39</b> |
| <b>PRESS RELEASE</b>                              | <b>43</b> |
| <b>ANEXOS</b>                                     | <b>44</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

Os pinos de fibra de vidro (PFV) foram desenvolvidos para reabilitação de dentes tratados endodonticamente e com grande perda da estrutura coronária, atuando como retentores de coroas protéticas [1]. Esses pinos foram desenvolvidos para permitir a passagem de luz emitida pelo fotopolimerizador, com o objetivo de promover a adequada polimerização do cimento resinoso ao longo de toda sua extensão [1,2]. Basicamente, são compostos por grande volume de fibras unidirecionais embebidas em matriz resinosa [2,3].

A energia luminosa decresce ao longo do comprimento dos pinos [2,3], por isso, o uso de cimentos resinosos que não dependem somente da fotopolimerização é recomendado [2]. A polimerização promovida apenas pela reação química pode ser insuficiente para alcançar um adequado grau de conversão (GC) [2], assim, a presença de luz continua sendo essencial para promover polimerização eficaz, reforçando a importância da transmissão de luz através dos pinos [2].

Estudos demonstram que a cimentação no terço apical é imprevisível, pois essa é a região mais distante da fonte de luz do fotopolimerizador [1,4]. Assim, o interesse por técnicas e materiais que otimizem a condução de luz e polimerização do cimento torna-se relevante, uma vez que a polimerização incompleta pode comprometer a interface adesiva, levando a falhas no tratamento reabilitador [2,3]. Entre as principais falhas descritas na literatura, destaca-se descolamento do pino, caracterizado como falha adesiva [5].

A propagação da luz pelos diferentes tipos de pinos reforçados por fibras não é igual, ou seja, pinos compostos por diferentes fibras apresentam transmissão luminosa distinta [1,2]. Tal fato se deve à presença de fibras com desempenho ótico otimizado, em razão de fatores como o tratamento de superfície, à composição ou até mesmo ao seu arranjo no interior do pino [2,4].

As propriedades mecânicas do conjunto formado pelo pino e o cimento resinoso são influenciadas por diversos fatores, incluindo a técnica de fabricação, a composição do material, a proporção entre fibra e matriz, o tipo de fibra e sua disposição na matriz de resina, além da qualidade da polimerização [3,5,6]. Essas características são fundamentais para otimizar as propriedades adesivas e garantir

a longevidade clínica do tratamento [5].

As fibras são dispostas ao longo do eixo longitudinal do pino para facilitar a transmissão de luz até a porção apical, reduzindo o risco de falhas de cimentação [5,7]. Estudos prévios verificaram que a passagem de luz em PFV é melhor quando comparado às fibras de carbono [1,3]. Da mesma forma que as fibras de carbono, pinos que contêm fibras sílica-zircônia apresentam menor passagem de luz [4]. Portanto, o estudo das fibras nos pinos intracanal é fundamental uma vez que existem inúmeras fibras que podem ser utilizadas para essa finalidade e que apresentam comportamentos distintos no que diz respeito à transmissão de luz [4].

Diante disso, os pinos de fibra de quartzo (PFQ) têm sido apontados como uma possibilidade de otimizar esse processo, visto que sua composição é baseada na forma pura e cristalina da sílica, que aparentemente é capaz de transmitir mais luz através do pino e, conseqüentemente, melhorar a polimerização [4,5,7].

Vários estudos descreveram a transmissão da luz através de pinos intrarradiculares com várias técnicas, como medição direta ou indireta [1-4,6,7]. Um exemplo de medição direta é o uso de fibra óptica associada à espectrofotômetro e computador para contagem de fótons [4]. O teste de espectroscopia de Raman, por sua vez, é considerado um método indireto e com elevada acurácia na mensuração do GC dos cimentos resinosos [8]. A sua utilização pode ser interessante para avaliar a eficiência dos pinos em função da melhor condução de luz, já que uma maior irradiação luminosa está associada com maior GC [4,8].

A mensuração da microdureza é um método frequentemente utilizado para determinar as propriedades mecânicas dos materiais dentários. Dentre as principais vantagens desse método estão a manutenção da amostra, uma vez que esta não é destruída, e a facilidade de execução [9]. Os indentadores de Knoop e Vickers são usados para caracterizar a deformação plástica dos materiais dentários rígidos por meio da aplicação de uma força compressiva [9].

O teste de microdureza Knoop, considerado um método indireto de avaliação da transmissão de luz, foi efetivamente utilizado para estimar a qualidade da polimerização de cimentos resinosos nos terços cervical, médio e apical após cimentação de PFV [10,11]. Além disso, a Microdureza Vickers (MV) também é

frequentemente utilizada em estudos laboratoriais para mensuração da polimerização de materiais resinosos [14].

Assim, análise do GC por espectroscopia de Raman e a MV são parâmetros importantes para avaliar a eficácia da polimerização, uma vez que aferem as propriedades químicas e físicas do cimento resinoso, respectivamente [12-15].

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O uso de retentores intrarradiculares associados aos cimentos resinosos fotopolimerizáveis é rotineiro em Odontologia. Com isso, a qualidade e a longevidade desse tipo tratamento podem ser afetadas pela inadequada polimerização do cimento resinoso, especialmente na região mais apical do conduto radicular. Dessa forma, investigar tipos de fibras que possam ser capazes de transmitir melhor a luz através do pino intrarradicular, otimizando a conversão e dureza do cimento resinoso em áreas críticas é de interesse clínico.

## 1.2 OBJETIVOS

Assim, o objetivo do presente estudo foi investigar a influência de irradiâncias através dos PFV (grupo comercial) e PFQ (grupo experimental), na melhoria da microdureza e grau de conversão do cimento.

## 1.3 HIPÓTESES

As hipóteses assumidas para este estudo foram divididas para avaliar a influência do tipo de pino (PFV ou PFQ) e da região anatômica avaliada (terço cervical, médio ou apical) nos diferentes testes realizados (GC e MV). Em caso de haver diferença estatisticamente significativa entre os grupos, descarta-se a hipótese nula ( $H_0$ ).

Efeito tipo de pino:

$H_0$ : Não há diferença no GC e MV entre PFV e PFQ.

Efeito da região anatômica:

$H_0$ : Não há diferença no GC e MV entre as regiões cervical, médio e apical.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

Desde a Antiguidade, os seres humanos buscam soluções para repor dentes perdidos, tanto por motivos estéticos, quanto funcionais [16,17]. Um dos registros mais antigos dessa prática remonta a 2000 a.C., na China Antiga, onde pinos de bambu eram utilizados para reter e estabilizar dentes perdidos [16]. Esforços semelhantes foram documentados em uma escavação arqueológica na Itália, onde foi encontrada uma prótese com dentes fixados em ouro, evidenciando a evolução da odontologia em diversas culturas no que tange à manutenção ou substituição de dentes [17]. Esses achados históricos demonstram que a preocupação com a estética e função oral é um aspecto intrínseco aos seres humanos e que acompanha as civilizações há milênios.

Na odontologia contemporânea, a reabilitação de dentes tratados endodonticamente com extensa perda da estrutura coronária e necessidade de restaurações indiretas requer o uso de retentores intrarradiculares [2,5,18-20]. Entre os mais utilizados destacam-se os pinos metálicos e os reforçados por fibra como vidro, quartzo, carbono, embebidas em resina epóxi [19,20]. A escolha do retentor deve considerar aspectos como estética, resistência mecânica, adaptação ao conduto e o comportamento biomecânico frente às forças mastigatórias [19,21].

Com a valorização da estética nos tratamentos restauradores, o uso de pinos metálicos reduziu significativamente ao longo dos anos [3,7,19-21]. Esses pinos, além de comprometerem a estética, possuem módulo de elasticidade superior ao da dentina, predispondo à fratura radicular [20]. Em contrapartida, os pinos reforçados por fibras, quando combinados com cimentos resinosos e cerâmicas odontológicas, proporcionam resultado estético mais harmonioso, além de melhor distribuição de cargas mastigatórias [3,5,12,13].

Dentre os mais recomendados, destacam-se os PFV e PFQ, em virtude de suas propriedades óticas e mecânicas, que conferem um aspecto mais natural ao dente restaurado e baixo risco de fratura radicular [4,20,21]. As fibras de carbono, embora apresentem excelente resistência mecânica, têm coloração escura, o que limita seu uso em áreas estéticas [3]. Já os PFV apresentam coloração esbranquiçada e translucidez moderada, sendo mais indicados para regiões anteriores [14]. Os PFQ,

por sua vez, reúnem translucidez superior e resistência mecânica elevada, configurando-se como uma alternativa promissora para casos que exigem simultaneamente estética e desempenho funcional [2,4,7,21].

Com isso, os PFQ têm se mostrado uma alternativa promissora, por apresentarem propriedades mecânicas superiores aos PFV e pinos de fibra de carbono [21]. Sua estrutura composta por sílica pura favorece a transmissão de luz ao longo do conduto, contribuindo para uma polimerização mais eficiente do cimento resinoso, especialmente em regiões profundas [2,4,7,21,22]. Essa maior transmissividade luminosa está relacionada à organização interna das fibras de quartzo, que minimiza dispersões e promove uma trajetória mais retilínea da luz [7].

Apesar das vantagens biomecânicas e estéticas, os pinos reforçados por fibras ainda enfrentam desafios no que diz respeito à adesão ao conduto radicular [1,6,20]. A cimentação adesiva é um procedimento sensível devido às dificuldades técnicas inerentes às suas etapas de execução [10]. Com isso, o descolamento do retentor é a falha mais frequentemente apostada apontada pela literatura [6,12,14].

Um dos principais fatores limitantes relacionados à adesão eficaz é a redução da intensidade luminosa para as regiões mais profundas do conduto, devido à atenuação da luz, que ocorre mesmo em pinos translúcidos, comprometendo o GC dos cimentos resinosos fotoativáveis e consequentemente, a qualidade da cimentação [1-6,12,20]. A polimerização insuficiente nos terços médio e apical pode comprometer não apenas a resistência mecânica da cimentação, mas também sua durabilidade química e estabilidade dimensional, fatores essenciais para a longevidade clínica da restauração [14].

Para compensar essa limitação, o uso de cimentos resinosos duais, que combinam a polimerização química e fotoativada, são preferidos, uma vez que promovem uma maior conversão dos monômeros [2,9,10,14]. No entanto, observa-se que mesmo esses cimentos dependem da energia luminosa para que ocorra adequada polimerização [2,6,10,20]. Isso ocorre porque a reação química pode iniciar a polimerização dos cimentos, mas, de maneira isolada, não é totalmente eficaz, sendo a luz essencial para complementar a conversão monomérica [1,2,8,14]. Este é um ponto crucial porque um baixo GC está associado com propriedades mecânicas e biológicas insatisfatórias, além de acelerar a degradação do material [10,14].

É desejável em materiais dentários que todos os monômeros sejam convertidos durante o processo de polimerização, porém isso não ocorre, uma vez que sempre há ligações duplas de carbono que não reagem [12]. É descrito pela literatura que um GC de 50 a 80% é satisfatório para materiais resinosos [9].

Com objetivo de superar essas limitações, pesquisadores têm investigado alternativas que melhorem a polimerização dos cimentos resinosos em toda a extensão do conduto. Nesse cenário, estudos sugerem que o desempenho dos PFQ é superior aos PFV, principalmente porque a sílica pura parece conduzir a luz de forma mais eficaz através do pino [5,7]. Essa superioridade na transmissão luminosa está relacionada à estrutura interna altamente organizada das fibras de quartzo, que favorece o trajeto da luz sem dispersões significativas [7].

Estudos demonstraram que, mesmo em profundidades como 8 mm, 5 mm e 2mm do ápice, os PFQ apresentam melhor transmissão luminosa, medida por espectrofotometria acoplada a fibra óptica [2,4]. Outros trabalhos também avaliaram a passagem da luz por esses pinos utilizando lasers violeta, azul e LED, reforçando a eficiência óptica dos PFQ com alta translucidez [24]

Além da boa irradiação luminosa, os PFQ demonstram boas propriedades mecânicas, como módulo de elasticidade compatível com a dentina radicular, garantindo a integridade do remanescente dental [5]. Para avaliar a eficácia da polimerização promovida por esses pinos, duas técnicas são amplamente utilizadas: a espectroscopia de Raman e o teste de MV [8,9].

O GC obtido pela espectroscopia de Raman é um parâmetro fundamental e muito confiável para mensurar a polimerização de compósitos resinosos [8,12-14,24-26]. Essa é técnica uma técnica analítica não destrutiva que se baseia na dispersão inelástica da luz monocromática para gerar espectros que refletem a interação do laser com as ligações químicas do material, possibilitando assim, a identificação precisa da composição química e estrutural [8,12,13]. É considerada uma técnica de fácil reprodução por não haver necessidade de preparo específico das amostras [24,25].

Na espectroscopia de Raman, um laser monocromático é emitido pelo espectrômetro e interage com a amostra, ocasionando em espalhamento da luz [25]. Esse espalhamento ocorre de forma elástica (efeito Rayleigh) e inelástica (efeito

Raman). O espectrômetro rejeita, através de um filtro, o espalhamento elástico e com isso, apenas o efeito Raman é detectado e transformado em espectro [25].

Durante a fotopolimerização de materiais resinosos, ligações duplas carbono-carbono ( $C=C$ ) dos monômeros metacrilatos são convertidas em ligações simples de carbono-carbono ( $C-C$ ), por meio de reação de polimerização por adição, formando uma matriz polimérica rígida [8,21]. Assim, a espectroscopia de Raman permite a avaliação do GC, que é dado em porcentagem, a partir da razão intensidade das bandas de estiramento  $C=C$  antes e depois da polimerização [8,12-14,25,26].

Os principais monômeros dimetacrilatos presentes nos cimentos resinosos são: Bis-GMA, Bis-EMA, UDMA, TEGDMA e HEMA [27,28], sendo cada um deles responsável por uma determinada característica [28]. O Bis-GMA e Bis-EMA possuem em sua estrutura anéis aromáticos e grupamentos vinílicos [28]. Durante a polimerização, a vibração do anel aromático, determinado Ph, não sofre alterações, já que esta estrutura não participa da reação [26]. Dessa forma, a banda de vibração deste grupo, em  $1611\text{cm}^{-1}$ , é utilizada como parâmetro para normalizar e comparar o estiramento da banda associada à vibração do grupo vinílico ( $C=C$ ), que se encontra em  $1640\text{cm}^{-1}$  [12,26-28]. Assim, o GC é obtido pela razão das bandas  $C=C/\text{Ph}$  depois e antes da polimerização [25,26].

A acurácia da técnica de Raman na análise do grau de conversão tem sido amplamente reconhecida, sendo considerada padrão ouro por diversos autores, devido à sua sensibilidade e reprodutibilidade [24-26]. Essa técnica permite, inclusive, análises em regiões específicas do cimento, como diferentes terços do canal radicular, o que é essencial para avaliar a polimerização em profundidade [4,26]. Isso é particularmente importante para se obter uma avaliação tridimensional do comportamento do cimento em todas as regiões do conduto radicular.

Além do GC, outra propriedade frequentemente avaliada na análise da polimerização de cimentos resinosos é a microdureza. A MV de um material resinoso, por sua vez, é uma propriedade importante, pois é capaz de prever a capacidade de resistência do material às deformações, abrasão, penetração por água e outras, após a polimerização [14,29]. Ademais, um elevado GC está associado com uma maior microdureza [14,15,29].

Estudos indicam que essa correlação direta entre microdureza e GC é um reflexo da densidade da rede polimérica formada, uma vez que maior conversão leva à formação de uma matriz mais compacta e resistente, com consequente melhora nas propriedades mecânicas e estabilidade química do material restaurador [25]. Portanto, ambas as variáveis estão fortemente correlacionadas e devem ser analisadas de maneira complementar.

A MV é uma técnica empregada para mensurar a resistência mecânica do material à deformação após a polimerização, a partir da aplicação de uma carga [9,29]. Uma carga pré-determinada é aplicada sobre a superfície do material utilizando um indentador de diamante em forma de pirâmide de base quadrada com ângulos entre as faces de  $136^\circ$  [9]. O valor numérico da MV é obtido a partir da razão da carga aplicada (F) pela área de indentação (A). A área (A), por sua vez, não é dada pelo equipamento que realiza a MV, mas esta é calculada a partir das diagonais ( $d_1$  e  $d_2$ ) [9,30]. Dessa forma, a MV é uma ferramenta essencial para caracterização dos materiais resinosos, permitindo analisar de forma indireta a qualidade da polimerização e a resistência do cimento resinoso.

Além disso, a MV permite comparações entre diferentes tipos de pinos e cimentos, identificando quais combinações proporcionam melhor desempenho mecânico do agente de cimentação [9,14]. Dessa forma, a associação entre os dados obtidos pela espectroscopia de Raman e pela MV proporciona uma análise mais robusta da qualidade de cimentação intrarradicular.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 PREPARO DAS AMOSTRAS

Para realização deste estudo piloto, o GC e a MV foram avaliados, respectivamente, por espectroscopia de Raman e MV, sendo o primeiro teste realizado no Laboratório de Microscopia Ótica do Instituto de Física (IF/UnB) e o segundo no Laboratório de Engenharia Mecânica (SG 09/UnB), ambos na Universidade de Brasília, campus Darcy Ribeiro.

O grupo comercial foi composto por pinos de fibra de vidro *Exacto* (Angelus – Londrina/PR – Brasil), enquanto o grupo experimental era composto por pinos de fibra de quartzo patenteados. O grupo experimental apresenta pinos que possuem a mesma morfologia, resina epóxi e fibras de vidro do pino *Exacto*, mas possuem também fibras de quartzo acrescidas em sua composição, além de uma disposição modificada das fibras. No entanto, a proporção entre as fibras de quartzo e vidro não é informada pelo fabricante.

A fim de padronizar as amostras quanto à espessura do cimento e garantir a reprodutibilidade dos experimentos, foi desenvolvida uma matriz para simular uma raiz dentária com conduto. Esse dispositivo foi elaborado em colaboração com um engenheiro da computação de uma empresa terceirizada especializada em planejamento digital em Odontologia (Trion 3D – Centro de Planejamento – Brasília/DF – Brasil).

Para que a matriz tivesse dimensões adequadas, previamente foi realizado o escaneamento digital de um dos pinos a ser usado nos experimentos. A partir disso o planejamento foi realizado de modo que o pino ficasse sempre centralizado e que a espessura do cimento fosse de 1mm no terço cervical. O modelo apresenta uma base externa plana e divisões internas bem definidas entre os terços apical, médio e cervical, o que garante compatibilidade com os equipamentos utilizados e a mensuração padronizada dos dados (FIGURA 1).

O dispositivo foi confeccionado no formato de prisma de base quadrada, com 12 mm de altura, contendo em seu interior um canal cilíndrico com 3 mm de diâmetro, dimensionado para acomodar a cimentação de um pino endodôntico com um aro

uniforme de cimento ao redor do pino. Essa estrutura principal foi projetada em metades separáveis e, para garantir sua estabilidade durante o processo de cimentação, foram adicionadas bases superior e inferior na porção externa, que atuaram como elementos de contenção e evitando a movimentação das metades (FIGURA 2).

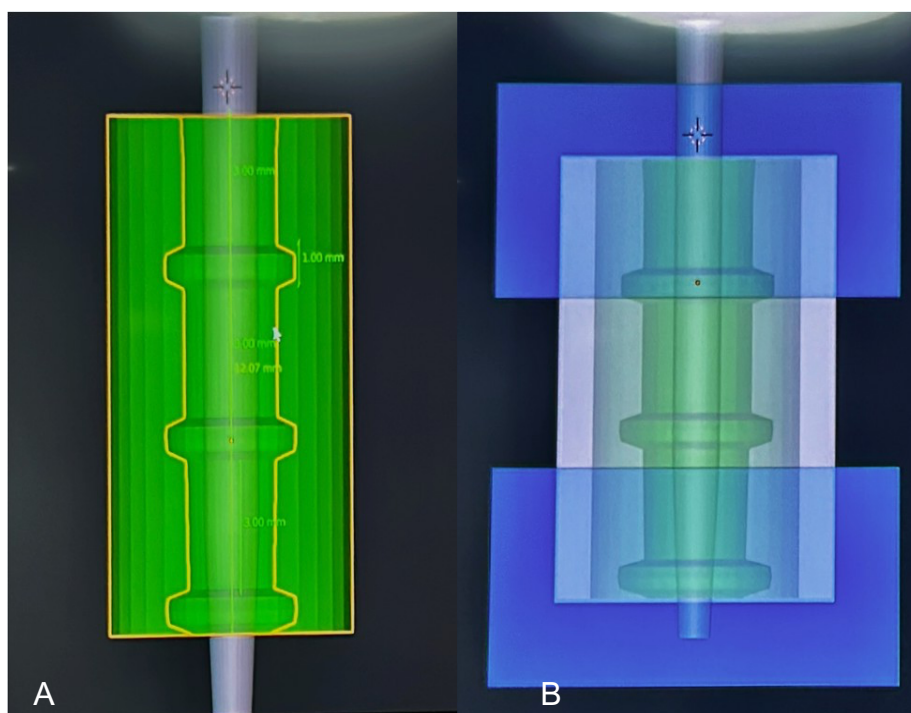


Figura 1: (A) Planejamento virtual da matriz com 12 mm de altura, aros para divisão dos terços cervical, médio e apical com 1 mm de altura e cada terço com 3 mm. (B) Bases externas superior e inferior para contenção da estrutura.

Internamente, a matriz apresenta divisões dos terços radiculares marcadas em alto-relevo com 1 mm de espessura, delimitando as regiões apical, média e cervical, cada um com 3 mm de extensão, perfazendo 9 mm de canal útil (FIGURA 1). A partir do planejamento digital, foi gerado um arquivo no formato .stl, posteriormente impresso como UCLA para fundição da matriz em liga níquel-cromo, realizada em laboratório de prótese dentária (Planning Prótese Lab – Águas Claras/DF – Brasil) (FIGURA 2). O metal utilizado não permitia a passagem de luz, exceto pelo interior do pino, o que reduziu a dispersão luminosa por outras regiões que não através dos pinos de fibra em ambos os grupos.

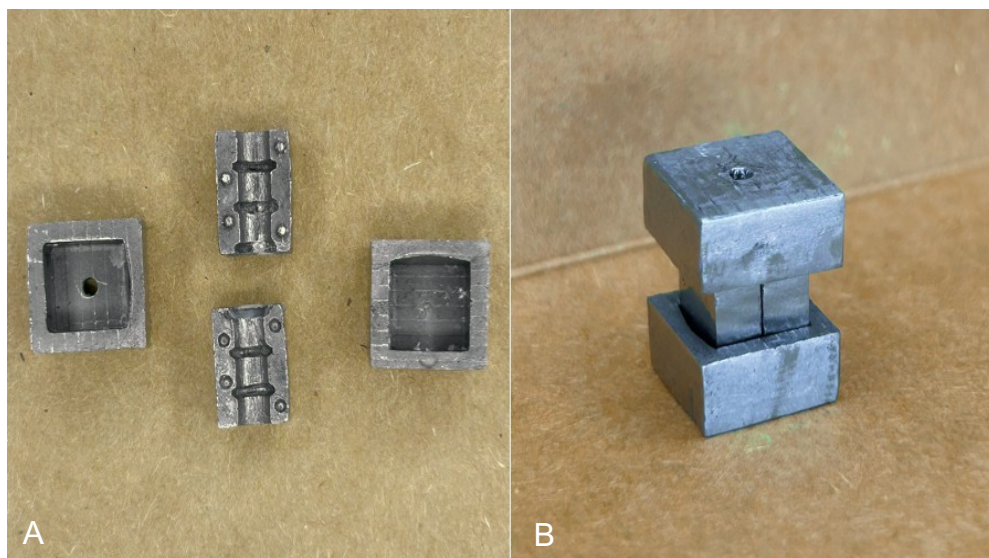


Figura 2: (A) Partes constituintes da matriz fundidas em liga de níquel-cromo. (B) Matriz montada para cimentação dos pinos e confecção das amostras.

Tendo em vista que a avaliação do GC se baseia na comparação das ligações existentes antes da polimerização com as formadas após a fotoativação, o cimento resinoso foi analisado isoladamente, sem polimerizar e separado do catalisador químico, de modo que fosse possível comparar os resultados antes e depois da polimerização. Ou seja, essa medição prévia foi realizada de modo que fosse possível quantificar as ligações C=C convertidas em C-C. O espectrofotômetro de Raman (LabRAM HR Evolution – Horiba – Japão) (FIGURA 3) foi calibrado com laser em comprimento igual a 785 nm, de modo a evitar a polimerização do cimento resinoso, que ocorre entre 400 nm e 500 nm, durante a leitura da amostra [31].

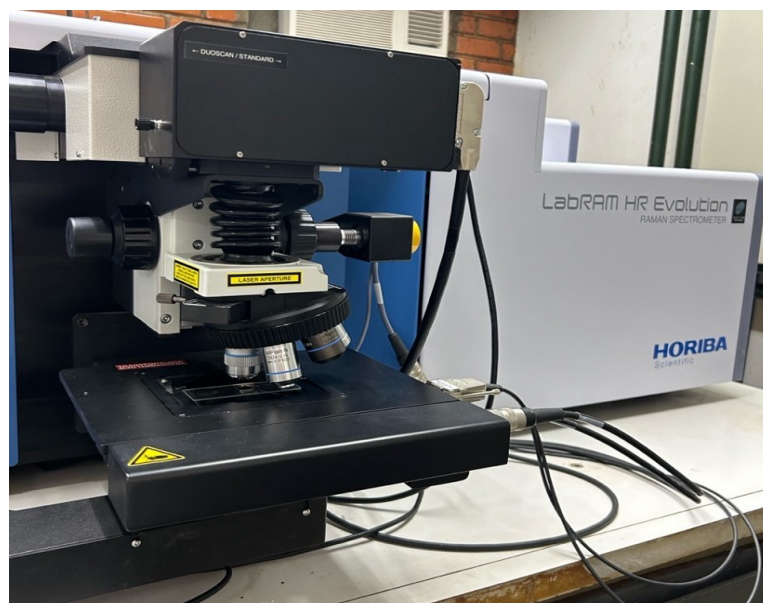


Figura 3: Espectrômetro Raman - LabRAM HR Evolution, Horiba - equipado com microscópio confocal e lasers semicondutores sintonizados nos comprimentos de 405, 532, 633 e 785 nm.

Para o teste de GC por espectroscopia de Raman, cada grupo contou com sete amostras (n=7) e para MV, cada grupo era composto por cinco amostras (n=5). O número de amostras presente em cada um dos grupos foi determinado com base em outros estudos que seguiram metodologia semelhante [3,4,9]. No entanto, por ser tratar de estudo piloto, os valores obtidos foram utilizados para cálculo amostra.

O preparo das amostras ocorreu imediatamente antes de cada leitura, seguindo os mesmos padrões, com objetivo de minimizar o efeito da cura química do cimento resinoso dual Allcem (FGM – Joinville/SC – Brasil), otimizando a avaliação da influência da transmissão luminosa através dos pinos. Inicialmente, os pinos e a matriz foram limpos com álcool 70% e gaze. Em seguida, a matriz era parcialmente montada e a porção cilíndrica, no centro, preenchida com cimento resinoso dual Allcem com o uso de pontas misturadoras preconizadas pelo próprio fabricante (FIGURA 4 – A, B, C). O pino era posicionado de forma mais centralizado possível, com auxílio de pinça clínica, e para que permanecesse exatamente no centro da matriz, a tampa, projetada com furo no meio, era então posicionada, impedindo movimentações indesejadas durante a polimerização (FIGURA 4 – D, E). Os materiais utilizados para cimentação e os pinos estão descritos na tabela abaixo, bem como seus respectivos fabricantes (Tabela 1).

| Material                  | Marca/Modelo      | Fabricante | Observações                 |
|---------------------------|-------------------|------------|-----------------------------|
| Pinos de fibra de quartzo | Experimental (#2) | Angelus    | Grupo experimental          |
| Pinos de fibra de vidro   | Exacto (#2)       | Angelus    | Grupo comercial             |
| Matriz metálica           | Liga níquel-cromo | —          | Utilizada para padronização |
| Fotopolimerizador         | Quazar            | FGM        | Fonte de luz LED            |
| Cimento resinoso dual     | AllCem            | FGM        | Cimento                     |

Tabela 1: Materiais utilizados na cimentação dos pinos em ambos os grupos e seus respectivos fabricantes.

Com o fotopolimerizador Quazar (FGM – Joinville/SC – Brasil) posicionado de forma perpendicular ao pino, a fotoativação era realizada, no modo normal, com intensidade de 1200 mW/cm<sup>2</sup>, durante 60 segundos (FIGURA 4 – F). A densidade de potência e tempo utilizados para realizar a fotopolimerização foram escolhidos com base em estudo que demonstrou que 1000 mW/cm<sup>2</sup> por 40 segundos foi insuficiente

para cura adequada no terço apical, sendo recomendado o aumento do tempo e intensidade de luz [3]. O aparelho fotopolimerizador utilizado neste estudo apresenta radiômetro integrado em sua base carregadora, dessa forma, a potência pôde ser aferida a cada nova amostra preparada.

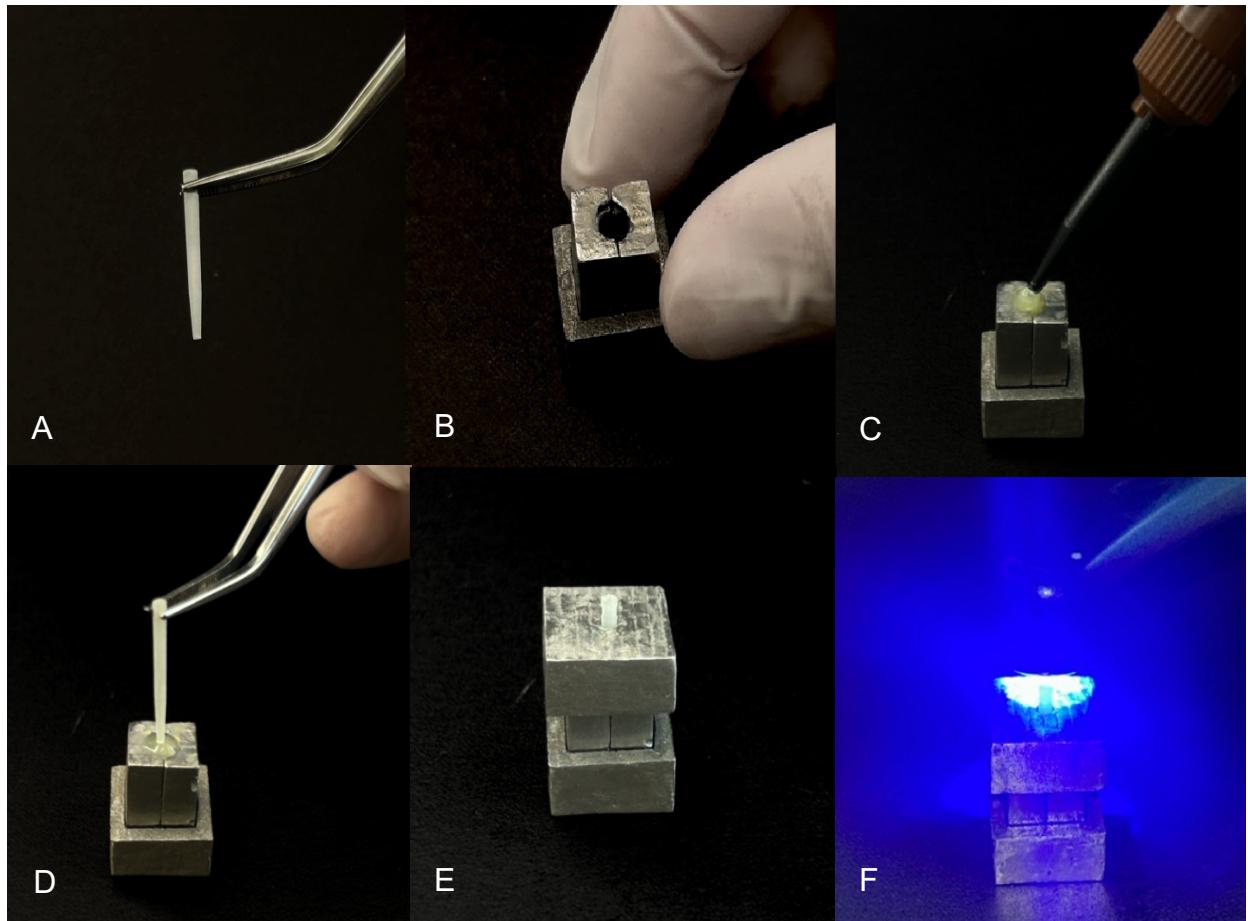


Figura 4: Etapas de preparo das amostras para ambos os testes. (A) Pino selecionado e higienizado com álcool 70%. (B) Matriz montada para inserção do cimento resinoso. (C) Inserção do cimento resinoso na cavidade com auxílio de ponta misturadora. (D) Inserção do pino na cavidade. (E) Colocação da tampa centralizadora da matriz. (F) Fotoativação por 60s no modo normal do equipamento fotopolimerizador.

### 3.2 GRAU DE CONVERSÃO POR ESPECTROSCOPIA DE RAMAN

Após a polimerização, as metades da matriz eram separadas para expor a superfície do cimento resinoso. Para a análise do GC (n=7), a amostra era posicionada no equipamento de espectroscopia de Raman (FIGURA 5), com laser calibrado em 785 nm, o foco era ajustado e duas medidas eram tomadas em cada terço – apical, médio e cervical, resultando em 6 medidas por pino. É importante ressaltar que todas as medidas eram feitas com as luzes da sala apagadas, reduzindo possíveis interferências no laser e consequentes alterações nos espectros.

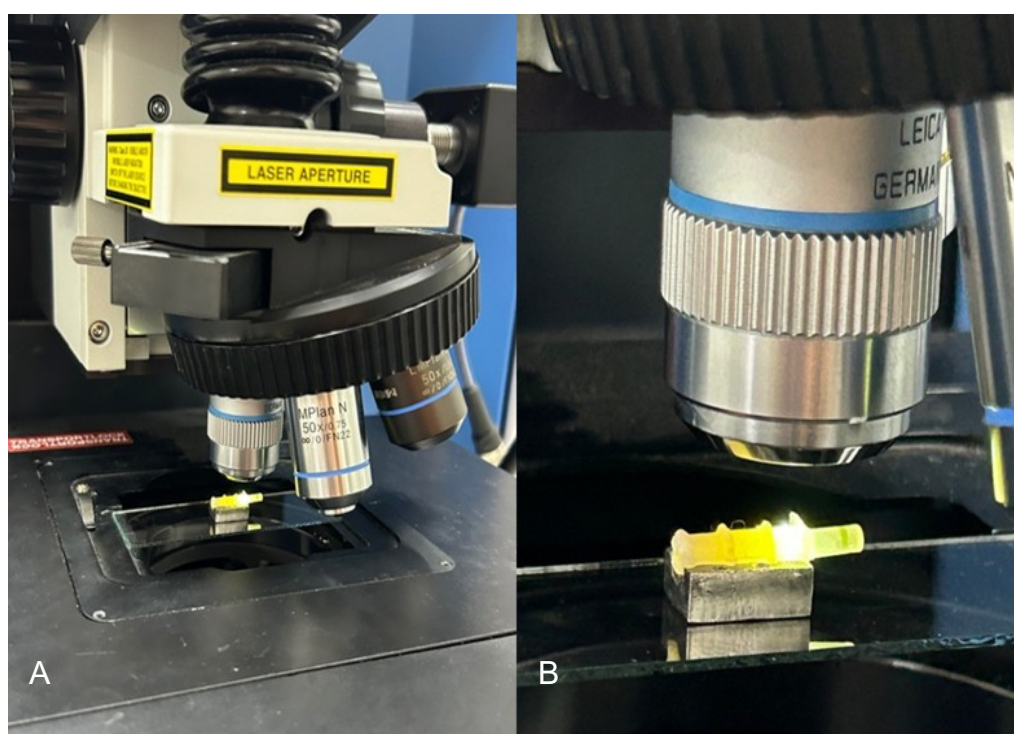


Figura 5: (A) Amostra posicionada no microscópio para leitura do terço cervical pelo espectrômetro de Raman. (B) Ponto focal do microscópio posicionado na região apical.

Essas leituras geraram espectros com dois picos de interesse, sendo um em  $1611\text{cm}^{-1}$  (pico aromático) e outro em  $1640\text{cm}^{-1}$  (pico alifático). A partir do software Origin (OriginLab), foi realizado o tratamento desses espectros, que consistiu na correção da linha base, cálculo da área integrada e normalização. Assim, foram removidas interferências e os picos de interesse puderam ser separados dos demais, permitindo uma comparação quantitativa (FIGURA 6).

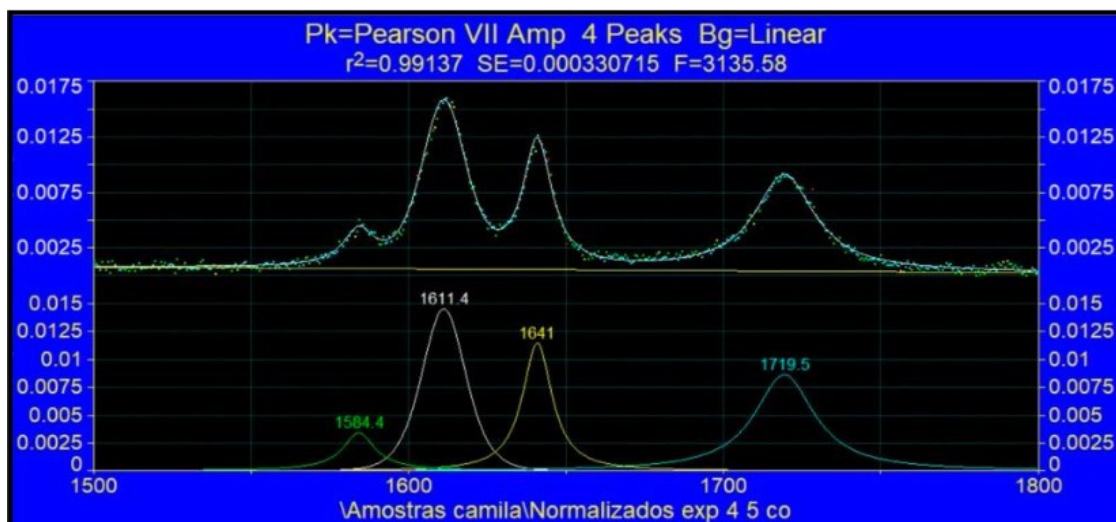


Figura 6: Interface do software Origin durante a correção da linha base, cálculo da área integrada e normalização.

A técnica de deconvolução foi realizada, em seguida, através do software PeakFit (Systat Software), com objetivo de separar a sobreposição nos espectros de Raman e com isso, obter as áreas dos picos de interesse de forma individualizada, em cada uma das medidas. Estas áreas foram então usadas para calcular o GC, que é dado em porcentagem, conforme descrito na fórmula [3,8]:

$$GC\% = \left[ 1 - \frac{(1640\text{cm}^{-1}/1611\text{cm}^{-1}) \text{ área do pico após polimerização}}{(1640\text{cm}^{-1}/1611\text{cm}^{-1}) \text{ área do pico antes da polimerização}} \right] \times 100$$

### 3.3 MICRODUREZA VICKERS

Para o teste de MV, as amostras (n=5) seguiram a mesma sequência de preparo. Para evitar movimentos de báscula e melhorar a qualidade da indentação, a amostra era levada para uma politriz lixadeira de velocidade variável (Teclago – Vargem Grande Paulista/SP – Brasil), disponível no Laboratório de Engenharia Mecânica da UnB, e a superfície do cimento resinoso preparada com lixa d'água 1200 até que se tornar lisa e plana (FIGURA 7).

Imediatamente após o preparo, a amostra era posicionada no microdurômetro (DuraScan 20 – EMCO Test – Áustria) (FIGURA 8) e a lente com aumento de 40x era usada para escolher dentro de cada terço, três áreas de medição. Escolhido o ponto de indentação, de forma aleatória, o microdurômetro incidia automaticamente a carga de 0,1 HV (0,1kgf), por 15 segundos. Cada amostra foi indentada três vezes em cada

terço, dessa forma, cada amostra gerou nove medidas de MV. Na sequência, a lente de aumento de 40x retornava à posição, o software do microdurômetro realizava a medida das diagonais geradas pela indentação e a partir disso, o valor da MV era projetado em tela, acompanhado da imagem gerada (FIGURA 9).

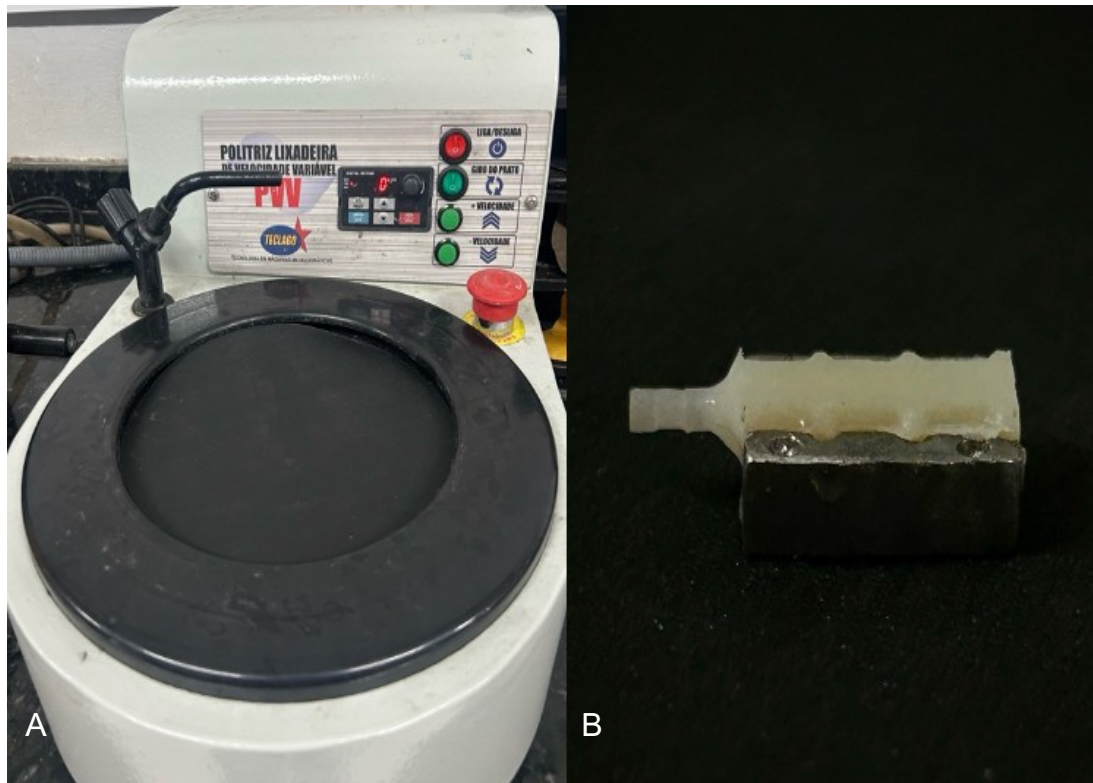


Figura 7: (A) Politriz usada para aplainar a superfície do cimento resinoso. (B) Superfície do cimento resinoso plana, pronta para ser analisada no microdurômetro.



Figura 8: Microdurômetro, DuraScan 20, utilizado para mensurar a MV das amostras.

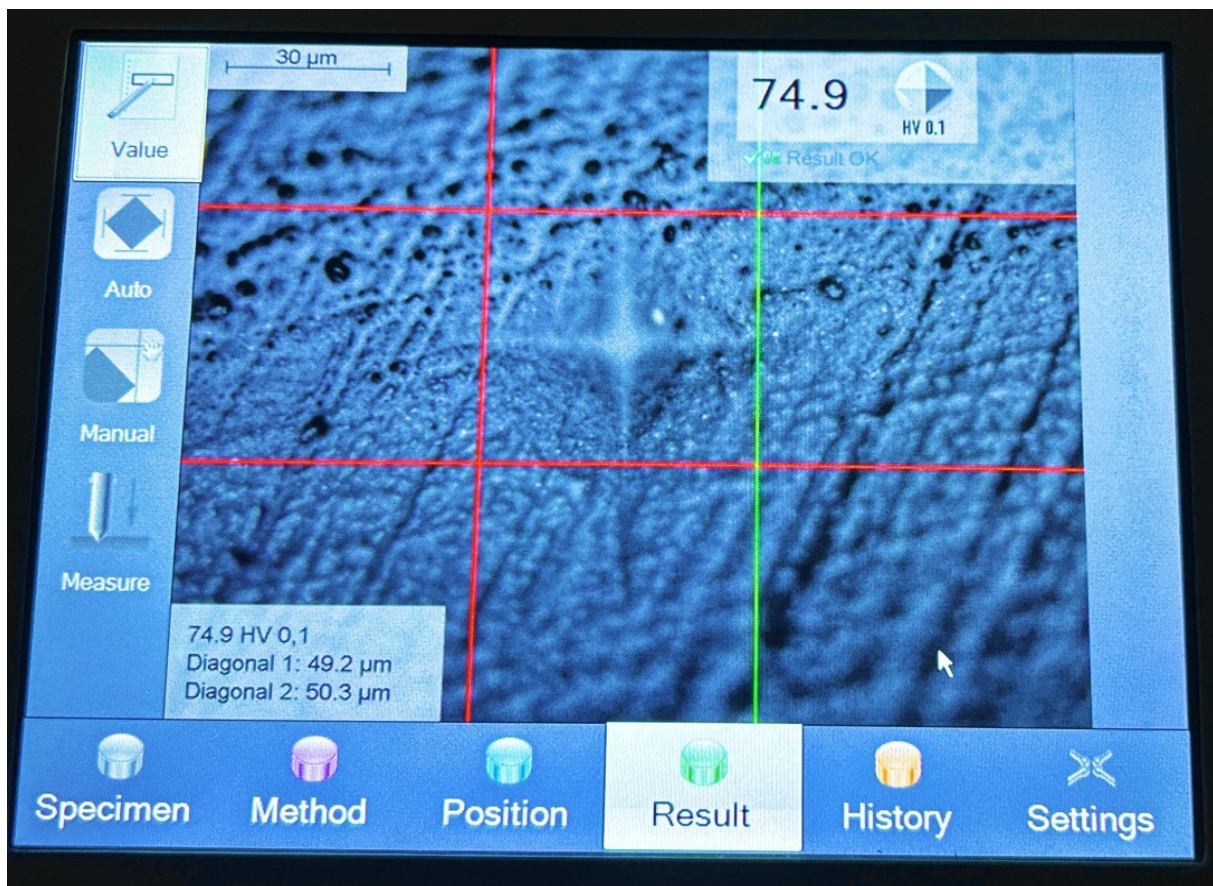


Figura 9: Medida das diagonais realizadas pelo modo Auto do microdurômetro e resultado da MV.

### 3.4 CÁLCULO AMOSTRAL

Os dados de GC e MV obtidos foram submetidos à análise estatística por meio dos testes ANOVA *two-way epost-hoc* de Tukey. Além disso, os espectros de Raman foram analisados por meio da Análise de Componentes Principais (PCA), de modo que fosse possível uma interpretação visual destes.

Tendo em vista que esse modelo de estudo, incluindo as análises realizadas, não havia sido previamente realizado com objetivo de avaliar GC e MV, esta dissertação é caracterizada como um estudo piloto.

Os dados obtidos foram utilizados para calcular o tamanho da amostra necessária para futuras análises e transposição dos resultados para uma população maior, possibilitando generalização e validação da metodologia utilizada.

Assim, o cálculo amostral iniciou-se pela determinação de *outliers* pelo método de quartis e intervalo interquartil (IQR). Não foram identificados *outliers* nas medidas de GC e MV. O terço apical foi o mais variável, em ambos os testes, dessa forma, foi utilizado como parâmetro para o cálculo. O nível de confiança ( $Z_{\alpha/2}=1,96$ ) determinado foi de 95%, o poder estatístico de 80% ( $Z_{\beta}=0,84$ ) e diferença mínima detectável de 10% para o GC e 3,74HV para MV. O desvio padrão combinado ( $\sigma_{comb}^2$ ) foi calculado a partir dos dados do piloto, resultando em 19% para o GC e 3,23HV para MV.

Assim, a fórmula a seguir, usada para calcular o tamanho amostral (n) para comparação de duas médias independentes foi aplicada:

$$n = \frac{\left[ 2 \cdot \left( \frac{Z_{\alpha}}{2} + Z_{\beta} \right)^2 \cdot \sigma_{comb}^2 \right]}{(\Delta)^2}$$

Com isso, o cálculo amostral indicou que o número de amostras necessárias para o teste de MV seria de 12 amostras por grupo e para o teste de GC seriam necessárias 57 amostras por grupo.

#### 4. RESULTADOS

Para análise estatística, os resultados do GC e de MV foram organizados em tabelas (Tabelas 2 e 3 – disponíveis nos anexos), separados por grupo, número da amostra, posição do terço e número da análise (Ex: Exp1Ap1 ou Com2Md2). Os valores dos testes laboratoriais de GC e MV foram submetidos ao teste de análise de variância ANOVA Two-Way e *post-hoc* teste de Tukey, adotando o grau de significância de 5%.

Como estratégia para reduzir a influência de valores discrepantes e aumentar a robustez da média representativa de cada terço, optou-se por excluir o menor valor individual de cada amostra, tanto para o GC quanto para MV.

Com relação ao GC, a análise de variância revelou diferenças estatisticamente significativas entre as regiões anatômicas dos pinos (apical, médio e cervical) ( $F = 5.63$ ;  $p = 0.007$ ), indicando que este parâmetro varia conforme a região anatômica do pino. A região cervical apresentou o maior percentual médio de GC, seguida da região média e por último a região apical, conforme o gráfico abaixo (FIGURA 10).

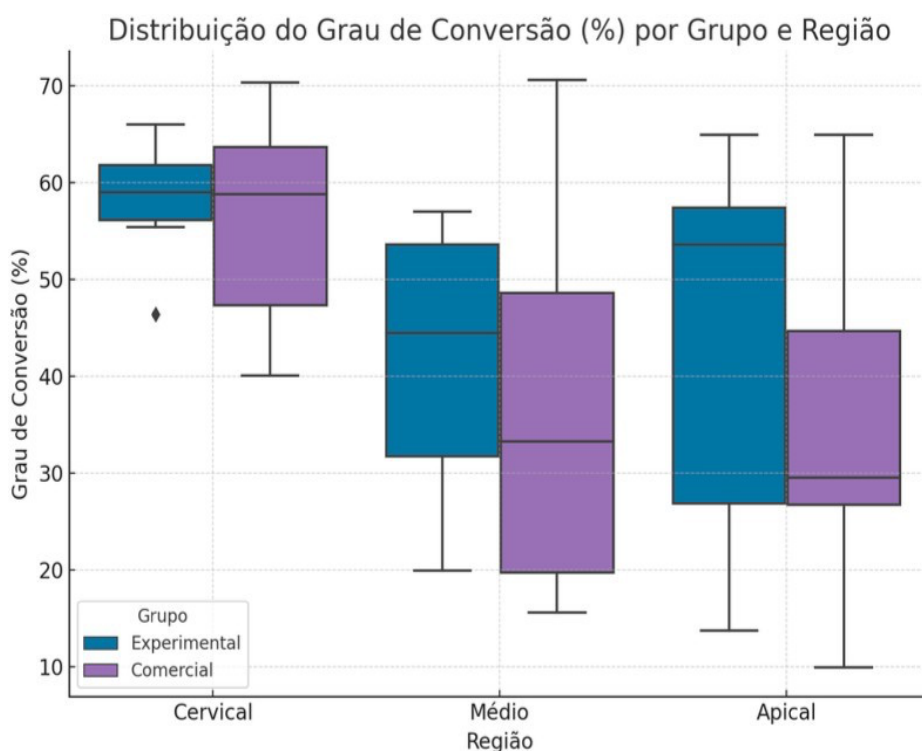


Figura 10: Comparação das médias e desvios-padrão do GC (%) nas diferentes regiões anatômicas de ambos os grupos.

Não houve diferença significativa entre os grupos Comercial (PFV) vs. Experimental (PFQ) ( $F = 1.00$ ;  $p = 0.324$ ) (FIGURA 11), nem na interação entre grupo e região ( $F = 0.096$ ;  $p = 0.909$ ) no GC. O teste de Tukey confirmou que nenhuma comparação pareada entre regiões ou grupos foi significativa ( $p > 0.05$ ), sugerindo que a variação observada no GC está mais relacionada à região anatômica dos terços do que ao tipo de material das fibras que compõe os pinos.

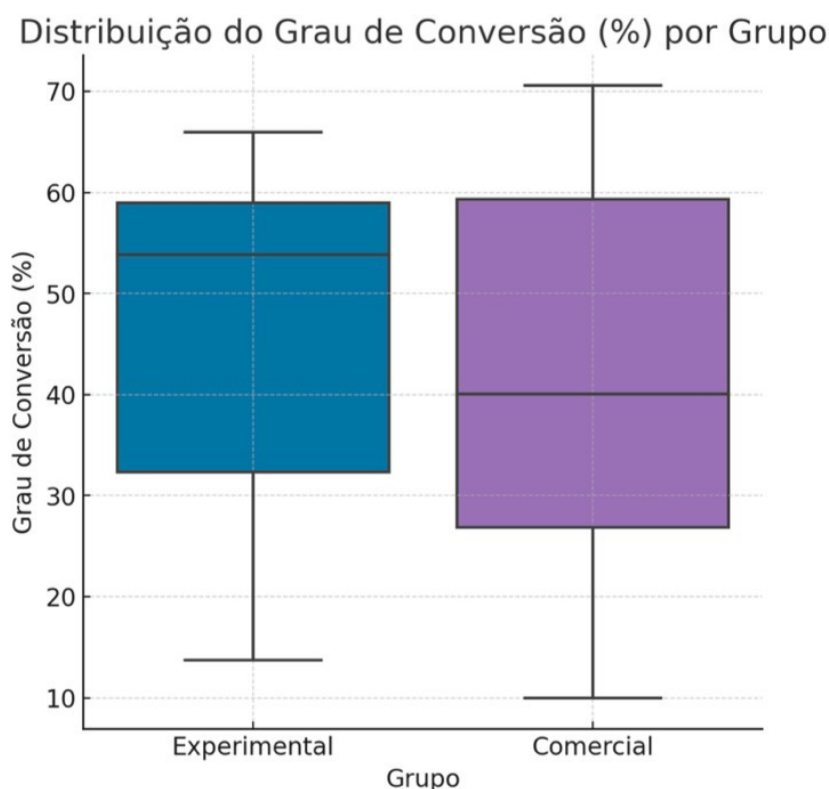


Figura 11: Comparação das médias e desvios-padrão do GC (%) geral de ambos os grupos.

A análise de componentes principais (PCA) é uma técnica estatística multivariada não paramétrica e foi aplicada neste estudo com objetivo de investigar os padrões nos espectros Raman (FIGURA 12) e realçar as diferenças entre eles, tornando estas mais visuais [32]. Os espectros Raman possuem inúmeros picos (eixo y) em diferentes deslocamentos (eixo x), isso gera um grande e complexo volume de dados, tendo em vista que cada ponto do espectro é uma variável.

A PCA ajuda a extrair informações significativas desses dados e as transforma em componentes principais, permitindo sua visualização gráfica em espaço bidimensional ou tridimensional [32]. O resultado da PCA demonstra que houve clara separação do GC entre as regiões cervical, média e apical, reforçando os resultados da ANOVA (FIGURA 13). Além disso, é possível observar que não houve clara

separação entre os mesmos terços dos diferentes grupos, corroborando com os resultados da ANOVA (FIGURA 13).

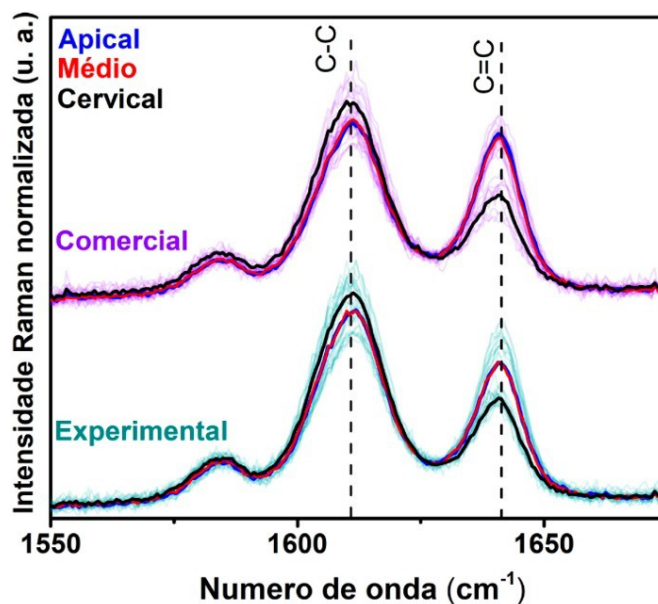


Figura 12: Espectros Raman médios das amostras comerciais e experimentais, obtidos a partir da média das medidas em cada terço: apical (azul), médio (vermelho) e cervical (preto).

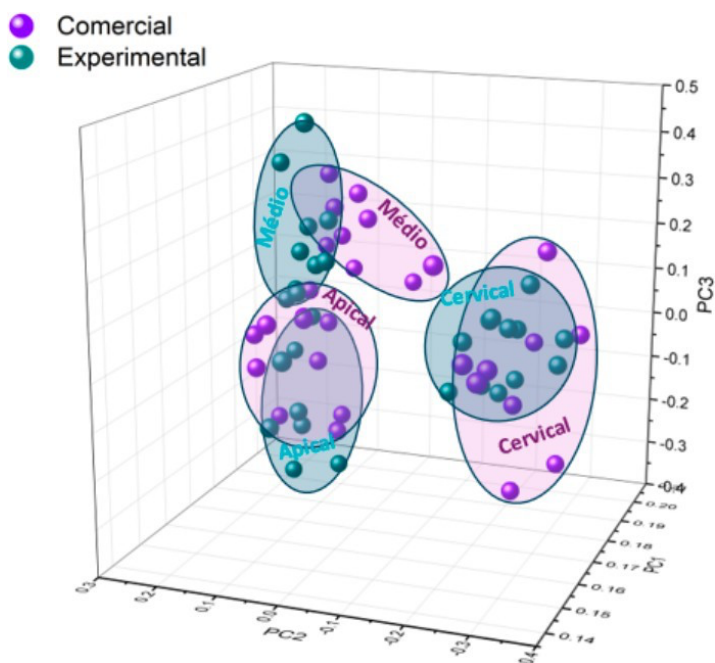


Figura 13: Análise de Componentes Principais (PCA) das amostras comerciais e experimentais, classificadas por região: apical, médio e cervical. A análise revelou mais de 90% de variância, evidenciada pela separação entre os grupos no gráfico, destacada por formas ovais. O terço cervical apresentou a maior separação, em concordância com a análise do GC.

Com relação à MV, a ANOVA demonstrou haver diferença significativa entre os grupos Comercial (PFV) vs. Experimental (PFQ) ( $F = 6.16$ ;  $p = 0.0151$ ), sugerindo que o material do pino influenciou diretamente na dureza do cimento resinoso (FIGURA 14). Mas, não existe diferença estatisticamente significativa entre as regiões anatômicas do pino ( $F = 0.39$ ;  $p = 0.6786$ ) e nem na interação entre grupo e região ( $F = 0.19$ ;  $p = 0.8243$ ), o que sugere que a microdureza do cimento resinoso não é afetada pela profundidade do pino no canal radicular (FIGURA 15).

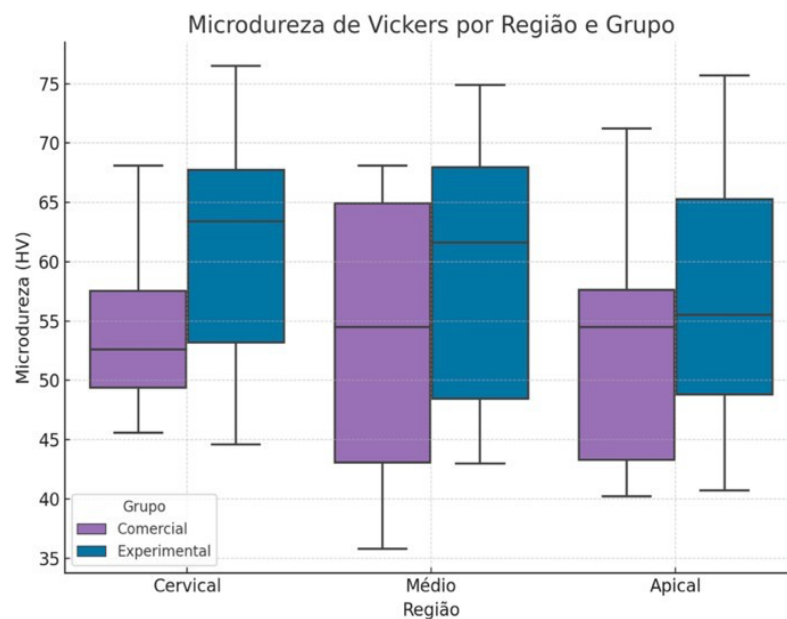


Figura 14: Comparação das médias e desvios-padrão da MV (HV) nas diferentes regiões anatômicas de ambos os grupos.

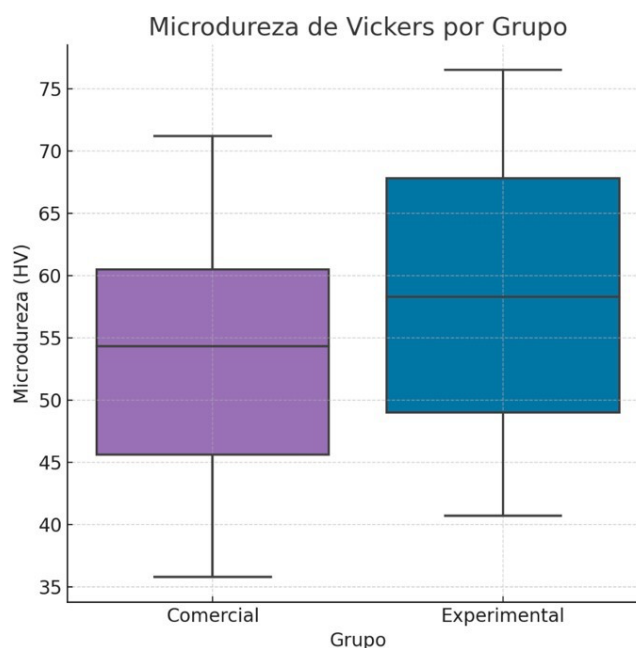


Figura 15: Comparação das médias e desvios-padrão da MV (HV) geral de ambos os grupos.

## 5. DISCUSSÃO

Estudos anteriores relatam que fibras de quartzo apresentam características que justificam sua aplicação em materiais dentários, dentre estas uma maior resistência mecânica, inércia química, alta pureza e maior capacidade de transmissão de luz [4,5,7,24,33,34]. Nesse contexto, o presente estudo comparou o GC e a MV do cimento resinoso dual usado na cimentação de PFV (grupo comercial) e PFQ (grupo experimental).

Os resultados demonstraram um gradiente de polimerização ao longo do canal radicular, com valores de GC mais elevados no terço cervical, seguido pelos terços médio e apical. Esse padrão está em consonância com a literatura, que atribui tal comportamento à atenuação da intensidade luminosa e à dificuldade de acesso ao fotoativador em regiões mais profundas do conduto radicular [1,7,13,35]. Assim, a posição anatômica do pino influenciou o GC, mas não houve diferença estatisticamente significativa entre os PFV e os PFQ, sugerindo que o tipo de fibra não exerceu impacto direto sobre a conversão monomérica do cimento.

Por outro lado, os resultados de MV revelaram um desempenho superior nos PFQ em relação aos PFV. Embora não tenham sido observadas diferenças significativas entre as regiões dentro de cada grupo, a comparação global evidenciou desempenho superior dos PFQ. Em geral, um maior GC está relacionado a uma maior resistência mecânica e maior microdureza do cimento resinoso [14, 15, 35]. No entanto, materiais com o mesmo GC podem apresentar microdurezas distintas, o que indica a influência de outros fatores, como a densidade de reticulação da rede polimérica [36,37].

Estudos demonstram que a densidade de reticulação exerce impacto direto nas propriedades mecânicas de polímeros à base de dimetacrilatos [36,39]. Polímeros com maior densidade reticular apresentam maior dureza, mesmo quando o GC é semelhante [37,38]. Esse fenômeno está relacionado à estrutura heterogênea da matriz polimérica, que pode apresentar regiões com alta ciclização e aglomerados de microgel altamente reticulados [36,39].

Além disso, a formação de microestruturas compactadas pode aumentar a resistência à deformação, mesmo sem conversão total dos monômeros [36-39]. Vale

ressaltar que o GC nunca atinge 100%, pois a reação química de polimerização desacelera à medida que a viscosidade do cimento resinoso aumenta e a mobilidade dos radicais livres diminui, resultando em monômeros não convertidos [9,39].

Além disso, estudos prévios demonstram que apesar do GC ser um fator importante para determinação da polimerização, não é uma medida homogênea, podendo variar dentro de uma mesma amostra e não levar em consideração a reticulação da rede polimérica formada [36,38]. Nesse sentido, a maior MV apresentada pelos PFQ pode sugerir que esse grupo seja capaz de formar redes poliméricas de maior densidade, ainda que com um GC semelhante ao do grupo dos PFV.

Os dados obtidos sugerem que o tipo de fibra pode influenciar diretamente na MV cimento resinoso, independentemente do GC. Esse efeito pode estar relacionado à interação entre a fibra e a matriz resinosa, resultando em uma rede polimérica mais densa. A maior MV observada nos PFQ pode ser resultado de uma melhor transmissão de luz [7] e também a topografia superficial das fibras de quartzo, que favorece a formação de zonas de interpenetração com o cimento resinoso, aumentando a densidade local de reticulação e coesão da matriz [37,38].

Adicionalmente, esses achados indicam que a eficiência da fotopolimerização não é o único fator determinante da resistência do cimento resinoso. A interface de adesão entre o pino e o cimento [2], a estrutura química e morfológica dos monômeros, bem como a presença de fotoiniciadores e co-iniciadores, influenciam a formação de redes poliméricas tridimensionais mais ou menos densas [32,36,39]. A compatibilidade físico-química entre o substrato inorgânico das fibras (como a sílica presente nos PFQ) e a matriz orgânica do cimento pode resultar em uma interação mais efetiva, com impacto positivo na microestrutura e, conseqüentemente, na resistência do material [36,39].

Portanto, os resultados obtidos reforçam a importância de considerar não apenas o GC e a MV, mas também outros parâmetros mecânicos ao avaliar o desempenho clínico de pinos intrarradiculares. A maior MV observada nos PFQ pode indicar maior resistência à degradação do cimento ao longo do tempo, favorecendo a longevidade da reabilitação [37].

Estudos futuros devem explorar com maior profundidade a influência das fibras de quartzo na cinética de polimerização, nas propriedades mecânicas e na durabilidade da cimentação sob condições clínicas reais. Considerando que a MV está relacionada não só ao GC, mas também à estrutura da rede polimérica, a seleção de pinos com maior integração com a matriz do cimento pode ser mais relevante para a longevidade clínica do que o GC isoladamente [37,39].

Por fim, os achados deste estudo contribuem para o entendimento dos fatores que influenciam a qualidade da cimentação de pinos de fibra e fornecem subsídios para a escolha de materiais que otimizem a performance e durabilidade das restaurações com retentores intrarradiculares. A adoção de pinos de fibra de quartzo mostra-se, assim, uma alternativa promissora para melhorar a resistência mecânica do cimento resinoso em contextos clínicos nos quais a durabilidade é essencial para o sucesso do tratamento reabilitador.

## **6. CONCLUSÃO**

O tipo de fibra que compõe cada pino não influenciou o GC, mas PFQ apresentaram maior MV. Em ambos os grupos, observou-se diminuição do GC e da MV do terço cervical para o apical, indicando que fatores como transmissão de luz e interação da fibra com o cimento influenciam diretamente na formação da rede polimérica e na resistência final do material.

## REFERÊNCIAS

1. Vieira C, Bachmann L, Chaves CAL, Silva-Sousa YTC, Da Silva SR, Alfredo E. Light transmission and bond strength of glass fiber posts submitted to different surface treatments. *J Prosthet Dent*. 2021 Apr;125(4):674.e1-7. doi:10.1016/j.prosdent.2020.11.031.
2. Radovic I, Corciolani G, Magni E, Krstanovic G, Pavlovic V, Vulicevic ZR, et al. Light transmission through fiber post: The effect on adhesion, elastic modulus and hardness of dual-cure resin cement. *Dent Mater*. 2009;25(7):837-44. doi:10.1016/j.dental.2009.01.004.
3. Ho YC, Lai YL, Chou IC, Yang SF, Lee SY. Effects of light attenuation by fibre posts on polymerization of a dual-cured resin cement and microleakage of post-restored teeth. *J Dent*. 2011 Apr;39(4):309-15. doi:10.1016/j.jdent.2011.01.009.
4. Goracci C, Corciolani G, Vichi A, Ferrari M. Light-transmitting ability of marketed fiber posts. *J Dent Res*. 2008 Dec;87(12):1122-6. doi:10.1177/154405910808701208.
5. Parisi C, Valandro LF, Ciocca L, Gatto MRA, Baldissara P. Clinical outcomes and success rates of quartz fiber post restorations: A retrospective study. *J Prosthet Dent*. 2015 Sep;114(3):367-72. doi:10.1016/j.prosdent.2015.03.011.
6. Stylianou A, Burgess JO, Liu PR, Givan DA, Lawson NC. Light-transmitting fiber optic posts: An in vitro evaluation. *J Prosthet Dent*. 2017 Jan;117(1):116-23. doi:10.1016/j.prosdent.2016.06.020.
7. CP, Pierdoná J, Rezende LVML, Madalena IR, Baratto-Filho F, da Cunha LF. The luminous transmittance of the quartz-glass fiber posts is superior to glass fiber posts. *Acta Odontol Latinoam*. 2023 Aug 30;36(2):105-111.
8. Faria e Silva AL, Arias VG, Soares LE, Martin AA, Martins LR. Influence of fiber-post translucency on the degree of conversion of a dual-cured resin cement. *J Endod*. 2007 Mar;33(3):303-5.
9. Pedreira AP, Pegoraro LF, de Góes MF, Pegoraro TA, Carvalho RM. Microhardness of resin cements in the intraradicular environment: effects of water storage and softening treatment. *Dent Mater*. 2009 Jul;25(7):868-76. doi: 10.1016/j.dental.2009.01.096.
10. Ramos MB, Pegoraro TA, Pegoraro LF, Carvalho RM. Effects of curing protocol and storage time on the micro-hardness of resin cements used to lute fiber-reinforced resin posts. *J Appl Oral Sci*. 2012;20(5):556-62. doi:10.1590/S1678-77572012000500011.

11. Shiratori FK, Valle AL, Pegoraro TA, Carvalho RM, Pereira JR. Influence of technique and manipulation on self-adhesive resin cements used to cement intraradicular posts. *J Prosthet Dent*. 2013 Jul;110(1):56-60. doi: 10.1016/S0022-3913(13)60341-8. PubMed PMID: 23849614.
12. Pulido CA, Franco APGO, Gomes GM, Bittencourt BF, Kalinowski HJ, Gomes JC, Gomes OMM. An in situ evaluation of the polymerization shrinkage, degree of conversion, and bond strength of resin cements used for luting fiber posts. *J Prosthet Dent*. 2016 Oct;116(4):570-6. doi:10.1016/j.prosdent.2016.02.019.
13. Bahari M, Oskoe SS, Kimyai S, Mohammadi N, Khosroshahi ES. Effect of light intensity on the degree of conversion of dual-cured resin cement at different depths with the use of translucent fiber posts. *J Dent Res Dent Clin Dent Prospects*. 2014 May;11(3):248-55. doi:10.5681/joddd.2014.044. PMCID: PMC4290752. PMID: 25628659.
14. Ortiz-Magdaleno M, Bogarin-Topete ER, Cerda-Cristerna BI, Gutiérrez-Sánchez M. Effect of degree of conversion on the surface properties of polymerized resin cements used for luting glass fiber posts. *J Prosthet Dent*. 2023 Aug;130(2):256.e1-256.e12. doi:10.1016/j.prosdent.2023.05.009. PMID: 37357085.
15. Pulido C, Gomes OM, Loguercio AD, et al. How the translucency of direct anatomic fiber posts affects the bond strength and microhardness of a self-adhesive luting agent in flared roots. *Clin Oral Invest*. 2022;26:4447-4456. doi:10.1007/s00784-022-04408-x.
16. López-Píriz R, Cabal B, Goyos-Ball L, Fernández A, Bartolomé JF, Moya JS, Torrecillas R. Current state-of-the-art and future perspectives of the three main modern implant-dentistry concerns: Aesthetic requirements, mechanical properties, and peri-implantitis prevention. *J Biomed Mater Res A*. 2019 Jul;107(7):1466-75. doi:10.1002/jbm.a.36661.
17. Minozzi S, Panetta D, De Sanctis M, Giuffra V. A dental prosthesis from the Early Modern Age in Tuscany (Italy). *Clin Implant Dent Relat Res*. 2017 Apr;19(2):365-371. doi:10.1111/cid.12460. PMID: 27804261.
18. Jurema ALB, Filgueiras AT, Santos KA, Bresciani E, Caneppele TMF. Effect of intraradicular fiber post on the fracture resistance of endodontically treated and restored anterior teeth: A systematic review and meta-analysis. *J Prosthet Dent*. 2022;128(1):13-24. [10.1016/j.prosdent.2020.12.013](https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.12.013)
19. Prado MAA, Kohl JCM, Nogueira RD, Geraldo-Martins VR. Retentores Intrarradiculares: Revisão da Literatura. *J Health Sci*. 2015 Jul 2;16(1). doi:10.17921/2447-8938.2014v16n1p%25p.
20. Goracci C, Ferrari M. Current perspectives on post systems: a literature review. *Aust Dent J*. 2011;56(1 Suppl):77-83. doi: 10.1111/j.1834- 7819.2010.01298.x.

21. Sharma S, et al. Comparative evaluation of fracture resistance of glass fiber reinforced, carbon, and quartz post in endodontically treated teeth: an in-vitro study. *J Int Soc Prev Community Dent*. 2016 Jul-Aug;6(4):373-376. doi:10.4103/2231-0762.186793.
22. Chieruzzi M, Pagano S, Pennacchi M, Lombardo G, D'Errico P, Kenny JM. Compressive and flexural behaviour of fibre reinforced endodontic posts. *J Dent*. 2012 Nov;40(11):968-978. doi:10.1016/j.jdent.2012.08.003.
23. Rezende EC, Gomes GM, Szesz AL, da Silveira Bueno CE, Reis A, Loguercio AD. Effects of dentin moisture on cementation of fiber posts to root canals. *J Adhes Dent*. 2016;18(1):29-34. doi: 10.3290/j.jad.a35516. PMID: 26814316.
24. De Santis R, Russo T, Gloria A. An analysis on the potential of diode-pumped solid-state lasers for dental materials. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*. 2018 Nov;92:862-7. doi:10.1016/j.msec.2018.07.051. PubMed PMID: 30184815.
25. Par M, Gamulin O, Spanovic N, Bjelovucic R, Tarle Z. The effect of excitation laser power in Raman spectroscopic measurements of the degree of conversion of resin composites. *Dent Mater*. 2019;35(9):1227-1237. doi: 10.1016/j.dental.2019.05.018.
26. Gauthier MA, Stangel I, Ellis TH, Zhu XX. A new method for quantifying the intensity of the C=C band of dimethacrylate dental monomers in their FTIR and Raman spectra. *Biomaterials*. 2005;26(29):6440-6448. doi: 10.1016/j.biomaterials.2005.04.054.
27. BinMahfooz AM, Qutub OA, Marghalani TY, Ayad MF, Maghrabi AA. Degree of conversion of resin cement with varying methacrylate compositions used to cement fiber dowels: A Raman spectroscopy study. *J Prosthet Dent*. 2018 Jun;119(6):1014-1020. doi: 10.1016/j.prosdent.2017.09.002.
28. Maletin A, Ristic I, Veljovic T, Ramic B, Puskar T, Jeremic-Knezevic M, Djurovic Koprivica D, Milekic B, Vukoje K. Influence of Dimethacrylate Monomer on the Polymerization Efficacy of Resin-Based Dental Cements-FTIR Analysis. *Polymers (Basel)*. 2022 Jan 7;14(2):247. doi: 10.3390/polym14020247.
29. Aung SZ, Takagaki T, Ikeda M, Nozaki K, Burrow MF, Abdou A, Nikaido T, Tagami J. The effect of different light curing units on Vickers microhardness and degree of conversion of flowable resin composites. *Dent Mater J*. 2021 Jan 31;40(1):44-51. doi: 10.4012/dmj.2019-353.
30. Secretaria da Educação do Estado do Ceará. Fabricação mecânica: ensaios mecânicos e não destrutivos [Internet]. Ceará: SEDUC; 2012 [citado em 2025 fev 27]. Disponível em: [https://www.seduc.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/37/2012/08/fabricacao\\_mecanica\\_ensaios\\_\\_\\_mecanicos\\_e\\_nao\\_destrutivos.pdf](https://www.seduc.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/37/2012/08/fabricacao_mecanica_ensaios___mecanicos_e_nao_destrutivos.pdf)

31. Braga SSL, Price RB, Juckes SM, Sullivan B, Soares CJ. Effect of the violet light from polywave light-polymerizing units on two resin cements that use different photoinitiators. *J Prosthet Dent*. 2024 Apr;131(4):744-51. doi: 10.1016/j.prosdent.2022.02.017. Epub 2022 Mar 31. PMID: 35369979.
32. Shlens J. A tutorial on principal component analysis. *ArXiv*. 2014; abs/1404.1100.
33. Wang J, Chen H, Liu H, Wang R, Qin Z, Zhu M. Surface modifications of short quartz fibers and their influence on the physicochemical properties and in vitro cell viability of dental composites. *Dent Mater*. 2024;40(8):e1-e10. doi:10.1016/j.dental.2024.05.023.
34. Fan J, Lu J, Sha Z, Zuo W, Fei X, Zhu M. Conformally anchoring nanocatalyst onto quartz fibers enables versatile microreactor platforms for continuous-flow catalysis. *Sci China Chem*. 2021;64(9):1596-1604. doi:10.1007/s11426-021-1101-4.
35. Haralur SB, Alasmari TA, Alasmari MH, Hakami HM. Light transmission of various aesthetic posts at different depths and its effect on push-out bond strength, microhardness of luting cement. *Medicina (Kaunas)*. 2022 Jan 4;58(1):75. doi:10.3390/medicina58010075. PMID: 35056383; PMCID: PMC8780944.
36. Sirovica S, Solheim JH, Skoda MWA, Hirschmugl CJ, Mattson EC, Aboualizadeh E, et al. Origin of micro-scale heterogeneity in polymerisation of photo-activated resin composites. *Nat Commun*. 2020 Apr 15;11(1):1849.
37. Al-Zain AO, Eckert GJ, Lukic H, Megremis SJ, Platt JA. Degree of conversion and cross-link density within a resin-matrix composite. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*. 2017;106(4):1496-1504.
38. Soh MS, Yap AU. Influence of curing modes on crosslink density in polymer structures. *J Dent*. 2004 May;32(4):321-6.
39. Barszczewska-Rybarek IM. A guide through the dental dimethacrylate polymer network structural characterization and interpretation of physico-mechanical properties. *Materials (Basel)*. 2019 Dec 5;12(24):4057.

## **PRESS RELEASE**

O uso de retentores intrarradiculares é comumente indicado em casos de necessidade de reabilitação de dentes tratados endodonticamente e com extensa perda coronária. Atualmente, os pinos de fibras translúcidas são os mais comumente utilizados, dentre eles os pinos de fibra de vidro e os de fibra de quartzo. No entanto, é comum que haja falha nesses tratamentos, devido à má fotopolimerização do cimento utilizado, uma vez que a luz não consegue chegar nas regiões mais profundas do canal radicular. A transmissão de luz pode ser avaliada de forma indireta por meio da medição do grau de conversão e microdureza do cimento.

Dessa forma, o desenvolvimento de materiais mais translúcidos é recomendado, com objetivo de otimizar a polimerização e aumentar a longevidade dos tratamentos. Por isso, esse estudo avaliou o grau de conversão e a microdureza de pinos de fibra de vidro e pinos de fibra de quartzo. Não houve diferença no grau de conversão entre os dois tipos de pinos estudados, mas a microdureza dos pinos de fibra de quartzo foi maior, sugerindo que o cimento, nesse grupo, se torna mais resistente após polimerização, quando comparado aos pinos de fibra de vidro. Com isso, o uso dos pinos de quartzo precisa ser mais profundamente estudado, pois estes podem ser uma alternativa melhor para o tratamento proposto.

## ANEXOS

### 1. TABELA DOS VALORES DE GRAU DE CONVERSÃO (%) POR ESPECTROSCOPIA DE RAMAN

| AMOSTRA<br>EXPERIMENTAL | GC (%)      | AMOSTRA<br>COMERCIAL | GC (%)      |
|-------------------------|-------------|----------------------|-------------|
| EXP1AP1                 | 13,01173266 | COM1AP1              | 9,026596404 |
| EXP1AP2                 | 13,76337262 | COM1AP2              | 9,966307463 |
| EXP2AP1                 | 21,80861297 | COM2AP1              | 26,86199283 |
| EXP2AP2                 | 22,68006617 | COM2AP2              | 18,71089433 |
| EXP3AP1                 | 31,05995095 | COM3AP1              | 26,55491479 |
| EXP3AP2                 | 22,45068422 | COM3AP2              | 17,34919235 |
| EXP4AP1                 | 41,97534291 | COM4AP1              | 13,29564636 |
| EXP4AP2                 | 60,83142976 | COM4AP2              | 29,50840866 |
| EXP5AP1                 | 53,91864996 | COM5AP1              | 54,69940068 |
| EXP5AP2                 | 49,22469845 | COM5AP2              | 56,95021407 |
| EXP6AP1                 | 41,53508704 | COM6AP1              | 32,36220296 |
| EXP6AP2                 | 53,5769758  | COM6AP2              | 23,14772946 |
| EXP7AP1                 | 49,83569276 | COM7AP1              | 28,79125054 |
| EXP7AP2                 | 64,88115973 | COM7AP2              | 64,8812649  |
|                         |             |                      |             |
| EXP1MD1                 | 7,298705444 | COM1MD1              | 15,40602678 |
| EXP1MD2                 | 19,96712335 | COM1MD2              | 16,56188626 |
| EXP2MD1                 | 23,55798237 | COM2MD1              | 15,29882109 |
| EXP2MD2                 | 31,06283107 | COM2MD2              | 15,58466039 |
| EXP3MD1                 | 30,52506864 | COM3MD1              | 33,27113433 |
| EXP3MD2                 | 32,3384102  | COM3MD2              | 31,9160504  |
| EXP4MD1                 | 56,02310739 | COM4MD1              | 22,06192835 |
| EXP4MD2                 | 56,98310891 | COM4MD2              | 22,89070292 |
| EXP5MD1                 | 53,82215587 | COM5MD1              | 37,83846164 |
| EXP5MD2                 | 42,91469546 | COM5MD2              | 30,35308444 |
| EXP6MD1                 | 53,30239658 | COM6MD1              | 70,56512316 |
| EXP6MD2                 | 50,28945536 | COM6MD2              | 23,26513951 |
| EXP7MD1                 | 44,47081908 | COM7MD1              | 59,33451085 |
| EXP7MD2                 | 29,1451365  | COM7MD2              | 59,3344871  |
|                         |             |                      |             |
| EXP1CV1                 | 46,38385771 | COM1CV1              | 40,09188952 |
| EXP1CV2                 | 16,81523038 | COM1CV2              | 34,10675234 |
| EXP2CV1                 | 60,6654162  | COM2CV1              | 44,312164   |
| EXP2CV2                 | 61,64888372 | COM2CV2              | 42,23610809 |
| EXP3CV1                 | 56,48578714 | COM3CV1              | 53,89113445 |
| EXP3CV2                 | 58,98505093 | COM3CV2              | 60,14951787 |
| EXP4CV1                 | 50,69458468 | COM4CV1              | 50,31151019 |
| EXP4CV2                 | 56,8543459  | COM4CV2              | 45,38487906 |
| EXP5CV1                 | 47,61250453 | COM5CV1              | 70,27416718 |
| EXP5CV2                 | 55,35313503 | COM5CV2              | 64,15182825 |
| EXP6CV1                 | 59,88628154 | COM6CV1              | 58,81063475 |
| EXP6CV2                 | 61,86936702 | COM6CV2              | 48,90431911 |
| EXP7CV1                 | 61,35419106 | COM7CV1              | 67,15125466 |
| EXP7CV2                 | 65,97289505 | COM7CV2              | 57,50655049 |

Os valores notados em vermelho foram excluídos para fins de cálculos estatísticos, conforme descrito nos resultados.

## 2. TABELA DE RESULTADOS ANOVA TWO-WAY E TESTE DE TUKEY PARA GRAU DE CONVERSÃO

| GRAU DE CONVERSÃO (%) ESPECTROSCOPIA DE RAMAN |               |  |   |
|---|---------------|--|---|
| FATOR ANALISADO                               | ESTATÍSTICA F | VALOR-P                                      | CONCLUSÃO                                   |
| ANOVA Two-Way                                 |               |  |   |
| Grupo (Comercial vs. Experimental)            | 1.00          | 0.324  | Diferença não significativa entre os grupos |
| Região (Apical, Médio, Cervical)              | 5.63          | 0.007  | Diferença significativa entre as regiões    |
| Interação (Grupo x Região)                    | 0.096         | 0.909  | Interação não significativa                 |
| Teste de Tukey                                |               |  |   |
| ENTRE REGIÕES (COM. Vs EXP.)                  | VALOR-P       | CONCLUSÃO                                    |   |
| Apical  | 0.949         | Diferença não significativa entre as regiões |   |
| Médio   | 0.991         | Diferença não significativa entre as regiões |   |
| Cervical                                      | 0.999         | Diferença não significativa entre as regiões |   |

## 3. TABELA DOS VALORES DE MICRODUREZA VICKERS

| AMOSTRA | COMERCIAL | EXPERIMENTAL | AMOSTRA | COMERCIAL | EXPERIMENTAL |
|---------|-----------|--------------|---------|-----------|--------------|
| 1       | 68,1      | 76,5         | 3       | 68,1      | 67,1         |
|         | 60,5      | 74,9         |         | 61,9      | 69,8         |
|         | 61,9      | 71,9         |         | 67,1      | 68,1         |
|         | 50,4      | 67,4         |         | 54,5      | 64,3         |
|         | 52,6      | 51,1         |         | 53,8      | 58,8         |
|         | 45,6      | 65,5         |         | 55,7      | 61,6         |
|         | 48,2      | 51,7         |         | 46,8      | 50,9         |
|         | 48,4      | 44,6         |         | 35,8      | 48,1         |
|         | 46,2      | 45,1         |         | 44,6      | 47,8         |
| 2       | 56,4      | 63,4         | 4       | 65,5      | 67,8         |
|         | 57,4      | 67,1         |         | 64,3      | 74,9         |
|         | 51,1      | 68,1         |         | 65,8      | 69,5         |
|         | 57,7      | 55,5         |         | 57,5      | 64           |
|         | 50,9      | 54,7         |         | 57        | 58,3         |
|         | 54        | 57,2         |         | 54,3      | 66,5         |
|         | 40,9      | 48,8         |         | 43,7      | 46,8         |
|         | 41,6      | 43           |         | 40,5      | 48,6         |
|         | 40,8      | 44,1         |         | 40,2      | 49,1         |

| AMOSTRA | COMERCIAL | EXPERIMENTAL |
|---------|-----------|--------------|
| 5       | 71,2      | 75,7         |
|         | 69,1      | 70,5         |
|         | 65,8      | 74,2         |
|         | 57,7      | 53,3         |
|         | 54,5      | 57,5         |
|         | 57,2      | 55,5         |
|         | 42,9      | 49           |
|         | 42,7      | 40,7         |
|         | 44,8      | 45,9         |

**LEGENDA:**

|  |                |
|--|----------------|
|  | Terço Cervical |
|  | Terço Médio    |
|  | Terço Apical   |

Os valores notados em vermelho foram excluídos para fins de cálculos estatísticos, conforme descrito nos resultados.

#### 4. TABELA DE RESULTADOS ANOVA TWO-WAY E TESTE DE TUKEY PARA MICRODUREZA VICKERS

| MICRODUREZA VICKERS (HV)           |               |  |  |
|------------------------------------|---------------|--|--|
| FATOR ANALISADO                    | ESTATÍSTICA F | VALOR-P                                      | CONCLUSÃO                                    |
| ANOVA Two-Way                      |               |  |  |
| Grupo (Comercial vs. Experimental) | 6.16          | 0.0151                                       | Diferença significativa entre os grupos      |
| Região (Apical, Médio, Cervical)   | 0.39          | 0.6786                                       | Diferença não significativa entre as regiões |
| Interação (Grupo x Região)         | 0.19          | 0.8243                                       | Interação não significativa                  |
| Teste de Tukey                     |               |  |  |
| ENTRE REGIÕES (COM. Vs EXP.)       | VALOR-P       | CONCLUSÃO                                    |  |
| Apical                             | 0.9115        | Diferença não significativa entre as regiões |  |
| Médio                              | 0.7322        | Diferença não significativa entre as regiões |  |
| Cervical                           | 0.3089        | Diferença não significativa entre as regiões |  |