



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE MEDICINA**

Guilherme dos Santos Sousa

**Desenvolvimento de uma técnica de fotoativação de resinas
compostas para minimização dos efeitos do aumento da
temperatura em restaurações dentárias**

Dissertação apresentada à Faculdade de Medicina,
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita
Filho”, Campus de Botucatu, para obtenção do título
de Mestre em Pesquisa e Desenvolvimento -
Biotecnologia Médica.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Plana Simões

**Botucatu
2020**

Guilherme dos Santos Sousa

Desenvolvimento de uma técnica de fotoativação de resinas compostas para minimização dos efeitos do aumento de temperatura em restaurações dentárias

Dissertação apresentada à Faculdade de Medicina, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Pesquisa e Desenvolvimento - Biotecnologia Médica.

Orientador: Rafael Plana Simões

Botucatu
2020

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉC. AQUIS. TRATAMENTO DA INFORM.
DIVISÃO TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - CÂMPUS DE BOTUCATU - UNESP
BIBLIOTECÁRIA RESPONSÁVEL: ROSEMEIRE APARECIDA VICENTE-CRB 8/5651

Sousa, Guilherme dos Santos.

Desenvolvimento de uma técnica de fotoativação de resinas compostas para minimização dos efeitos do aumento da temperatura em restaurações dentárias / Guilherme dos Santos Sousa. - Botucatu, 2020

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Medicina de Botucatu

Orientador: Rafael Plana Simões

Capes: 90300009

1. Materiais dentários. 2. Resinas dentárias. 3. Cura luminosa de adesivos dentários. 4. Luzes de cura dentária.

Palavras-chave: Controle de irradiância; Cura em profundidade; Eficiência da cura; Fotopolimerização; Resina composta.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado DE GUILHERME DOS SANTOS SOUSA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PESQUISA E DESENVOLVIMENTO (BIOTECNOLOGIA MÉDICA), DA FACULDADE DE MEDICINA - CÂMPUS DE BOTUCATU.

Aos 27 dias do mês de fevereiro do ano de 2020, às 09:00 horas, no(a) FCA/Botucatu - Unesp, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. RAFAEL PLANA SIMÕES - Orientador(a) do(a) Depto de Bioprocessos e Biotecnologia / FCA/Botucatu - Unesp, Profa. Dra. IVANA CESARINO do(a) Depto. de Bioprocessos e Biotecnologia / FCA/Botucatu - Unesp, Profa. Dra. CARLA DOS SANTOS RICCARDI do(a) Depto. de Bioprocessos e Biotecnologia / FCA/Botucatu - Unesp, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de GUILHERME DOS SANTOS SOUSA, intitulada **Desenvolvimento de uma técnica de fotoativação de resinas compostas para minimização dos efeitos do aumento de temperatura em restaurações dentárias**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. RAFAEL PLANA SIMÕES



Profa. Dra. IVANA CESARINO



Profa. Dra. CARLA DOS SANTOS RICCARDI



“Somos como anões aos ombros de gigantes, pois podemos ver mais coisas do que eles e mais distantes, não devido à acuidade da nossa vista ou à altura do nosso corpo, mas porque somos mantidos e elevados pela estatura de gigantes.”

Bernardo de Chartres

Agradecimentos

Meus sinceros agradecimentos,

Ao Professor Rafael Plana Simões, meu orientador, por ter me acolhido e me dado oportunidade de fazer algo que eu jamais pensei ser capaz de realizar, pelos momentos de ensinamento, e iluminação pelos quais foi me proporcionado, nunca pensei em ser um professor, depois de passar estes anos com ele, vendo seu trabalho, sua postura, seu compromisso com a educação e com a pesquisa, posso dizer que “quando eu crescer” quero ser igual a ele. Foi exemplo de caráter, ética, amizade, e uma benção em minha vida. Não caberiam agradecimentos nestas páginas. Muito obrigado Professor, por ser minha inspiração para a vida.

Ao Gabriel Felipe Guimarães, meu “coleguinha de turma” que acabou sendo meu “estagiário” e que me ensinou muitas coisas, compartilhou risadas (aquelas de foca), contribuiu muito para este trabalho e espero ter contribuído para o dele também. Obrigado meu amigo.

Ao meu amigo Arílson José de Oliveira Junior, o famoso Arílson Junior a quem eu devo também muito tempo dedicado a este trabalho, mesmo com interferências externas, os famosos “zigbees”, realizamos grandes coisas e tenho certeza que no futuro faremos muito mais.

Aos meus amigos Edgar Alan Gobo, Matheus Kendy Asimoto, Vitor Gabriel Nanini e Bruno Afonso Corrêa, por toda motivação e torcida para que esse trabalho fosse realizado, e nosso tempo de entretenimento digital era válvula de escape de momentos estressantes.

Ao José Eduardo Petit Rodokas, que contribui demais para este trabalho, posso dizer que sem ele algumas partes seriam bizarras e com seu apoio este trabalho tomou forma e se desenvolveu, e em outros campos, foi responsável para o meu crescimento como profissional.

Ao Marcos Ruybal Bica, pelo ajuda técnico científica com os problemas eletrônicos, e pelos ensinamentos em laboratório.

Ao Doutor Felipe Pierini, por me fazer ver os problemas que a tecnologia poderia resolver, foi responsável por me mostrar quais problemas eu poderia enfrentar e quais eu poderia resolver com este trabalho, as conversas e o incentivo para a pesquisa foram primordiais ao meu trabalho.

Ao Professor Dionísyo Benedicto Rapelli Júnior, por ter me ajudado com os problemas de manufatura eletrônica que surgiram e se não houvesse sua intervenção, não sei se este trabalho teria tomado as direções que tomou. Obrigado Professor.

Ao meu pai e minha mãe, Arnaldo Aragão de Sousa e Maíza Aparecida dos Santos Sousa, por terem acreditado em mim, proporcionado tudo que eu preciso e o que eu precisarei no futuro, não posso também expressar minha gratidão por meio destas palavras, mas serei grato nessa e em outras vidas.

A minha namorada, Rosana Harumi Otsubo, por todo o carinho e apoio na reta final, sem ela, acho que seria menos divertido falar de ciências e explicar para as pessoas o que eu sou capaz de fazer, Obrigado minha princesa.

RESUMO

O objetivo deste estudo é avaliar a eficiência do método de fotoativação exponencial de resinas compostas na redução do estresse de contração da polimerização e da variação de temperatura quando comparado aos métodos de fotoativação: convencional, *soft-start* e *pulse-delay*. Para isso, realizou-se uma revisão de literatura para identificar as energias de ativação relatadas para três citadas de técnicas de fotoativação. Esses dados foram utilizados para determinar a energia média de ativação de cada método de polimerização para comparação desses métodos com a técnica de fotoativação exponencial de acordo com a lei da reciprocidade. Avaliou-se o processo de fotopolimerização monitorando a tensão de contração e a variação da temperatura dos compósitos. A eficácia da cura do compósito sob cada método de fotoativação foi analisada por experimentos para determinar a cura em profundidade. Todos os experimentos foram realizados para três modelos diferentes de resinas: Filtek Z-250® XT, Charisma® Classic e Ultrafill®. O uso dos métodos exponencial e *pulse-delay* resultou em redução significativa da tensão de contração e variação de temperatura quando comparado às técnicas convencional e *soft-start*, sem afetar a microdureza em função da profundidade da cura. No entanto, o método de *pulse-delay* requer um tempo de fotoativação muito longo em relação aos outros métodos. Os resultados mostraram que a técnica exponencial pode promover a melhoria do processo de fotopolimerização da resina composta, minimizando os efeitos de retração e variação de temperatura. Esse método pode ser ajustado para cada tipo de resina composta do ponto de vista da ativação ideal do material, promovendo uma padronização operacional do processo de fotoativação.

Palavras-chave: resina composta; fotopolimerização; controle de irradiância; cura em profundidade; eficiência da cura; aumento de temperatura.

ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate the efficiency of the exponential photoactivation method of composite resins in reducing the polymerization shrinkage stress and temperature variation when compared to conventional, soft-start and pulse-delay photoactivation protocols. A literature review was performed to identify the activation energies reported for three cited photoactivation techniques. These data were used to determine the average activation energy for each polymerization method to compare these methods with the exponential photoactivation technique according to the law of reciprocity. The light curing process was evaluated by monitoring the contraction stress and the temperature variation of the composites. The effectiveness of curing the composite under each photoactivation method was analyzed by experiments to determine the cure in depth. All experiments were carried out for three different resin models: Filtek Z-250® XT, Charisma® Classic and Ultrafill®. The use of exponential and pulse-delay methods resulted in a significant reduction in contraction tension and temperature variation when compared to conventional and soft-start techniques, without affecting microhardness depending on the depth of cure. However, the pulse-delay method requires a very long photoactivation time compared to other methods. The results showed that the exponential technique can promote the improvement of the composite resin photopolymerization process, minimizing the effects of shrinkage and temperature variation. This method can be adjusted for each type of composite resin from the point of view of the ideal activation of the material, promoting an operational standardization of the photoactivation process.

Keywords: composite resins; photopolymerization; irradiance control, depth of cure; efficacy of the cure; temperature rise.

Sumário

1. Introdução	8
2. Objetivos.....	11
2.1 Objetivo Geral	11
2.2 Objetivos específicos	11
3. Métodos	12
3.1. Determinação das curvas ótimas de irradiância para fotoativação das resinas	12
3.2. Monitoramento da tensão de contração e da temperatura.....	14
3.3. Monitoramento do aumento de temperatura.....	16
3.4. Teste de Cura em Profundidade (Eficiência da Polimerização)	17
4. Resultados.....	19
4.1. Tensão de contração	19
4.2. Variação de Temperatura.....	22
4.3. Cura em Profundidade	23
5. Discussão dos resultados	29
6. Conclusão	32
Referências Bibliográficas	33

1. INTRODUÇÃO

As Resinas compostas polimerizáveis são amplamente utilizadas por profissionais de odontologia em procedimentos de restaurações dentárias diretas (1,2). Essas resinas são polimerizadas por meio da conversão de monômeros em polímeros por um processo denominado fotopolimerização, sendo de fundamental importância que esse procedimento seja rápido e eficaz. A melhoria no controle do processo de polimerização se deu pelo surgimento das resinas compostas fotopolimerizáveis, no qual uma fonte de luz ativa o processo de polimerização. Existem diversas pesquisas para aprimoramento das resinas compostas, especialmente no que tange a composição química dessas resinas (3).

Para que as resinas fotopolimerizáveis sejam ativadas na presença de luz, há a necessidade de uso de substâncias em sua composição que absorvam energia em um determinado comprimento de onda e ativem o processo de polimerização. Essas substâncias recebem o nome de fotoiniciadores, sendo o principal deles a canforoquinona (3,4). O uso da canforoquinona não associada a outros fotoiniciadores implica em problemas estéticos, resultando em resinas polimerizadas com coloração amarelada, o que deixa a restauração com aparência de envelhecida (4). Com isso, tem-se associado outros compostos fotoiniciadores às resinas compostas. O fotoiniciador mais utilizado em conjunto com a canforoquinona é o óxido de trimetilbenzol-difenilfosfina, conhecido como TPO (5).

No entanto, o espectro de absorção do TPO está em uma faixa de comprimento de ondas diferente da canforoquinona, o que inviabiliza a total conversão dos monômeros em polímeros (6,7). Para isso foi desenvolvido um LED denominado de terceira geração, o qual é caracterizado por uma combinação de fontes luminosas que permitem a irradiação em comprimentos de ondas distintos. Em geral a distribuição dos emissores é caracterizada pelo uso de: dois diodos azuis que emitem luz na faixa dos 460 nm; um diodo de ondas curtas do

azul que emite luz na faixa dos 445 nm e; um diodo que emite luz violeta com comprimento de onda de aproximadamente 400 nm (7).

No que se pode descrever sobre a irradiância, tem-se que diferentes modelos/marcas de aparelhos fotoativadores possuem diferentes potências luminosas, sendo que a variação irradiância desses aparelhos é geralmente de 400 mW/cm² a 1200 mW/cm² (7) para aparelhos com LEDs de segunda geração. Já aparelhos equipados com LED de terceira geração possuem irradiância até 1800 mW/cm² (8). No entanto, valores de irradiância elevados não necessariamente levam a melhores resultados na polimerização das resinas (9).

Algumas pesquisas demonstram que a excessiva irradiância em resinas compostas induzem a contração de polimerização (7,9,10). A tensão de contração é a principal razão da baixa durabilidade das restaurações dentárias utilizando resinas compostas (11). Com o decorrer do tempo, a tensão de contração leva a microinfiltrações na região restaurada, mais precisamente na interface dente-resina e tais microinfiltrações podem ocasionar a recidiva da cárie (12).

Além disso, a temperatura na resina e nas vizinhanças em que o material é aplicado aumentam durante o processo de fotoativação (13). Vale ressaltar que o aumento da temperatura é geralmente induzido pelos elevados níveis de irradiância durante o processo de fotoativação e da anatomia da região. As áreas mais afetadas são dentes e gengiva, com risco potencial de danos à polpa dos dentes e tecidos adjacentes (14). A literatura sugere alguns métodos de fotoativação diferentes, com variação do tempo de exposição, distância de aplicação e região de incidência (15,16). No entanto, não existe um protocolo padrão para a fotoativação para minimizar os efeitos adversos, de modo que o aumento da temperatura e o tensão de contração são ocorrências comuns ao usar dispositivos com tecnologia LED (7,17).

Estudos recentes demonstraram que o controle da irradiância durante o processo de polimerização pode contribuir para a melhoria das propriedades mecânicas do material curado, e um dos principais objetivos desta área de pesquisa é identificar um processo ideal para a fotoativação de resinas compostas (15,18,19). Guimarães et al. (9) desenvolveram um

método de fotoativação alternativo denominado exponencial, no qual a irradiância do LED ao longo da fotoativação foi determinada e modelada por uma função matemática (sendo essa função um crescimento exponencial de irradiância no domínio do tempo). Seus resultados mostraram que o método de fotoativação proposto minimizou a tensão de contração e seus efeitos, sem afetar a conversão efetiva de monômeros em polímeros. No entanto, a lei da reciprocidade não foi considerada em seu estudo e, dessa maneira, as energias totais de ativação foram diferentes para os métodos de fotoativação comparados.

Assim, o presente estudo teve como um dos seus objetivos avaliar a técnica de fotoativação exponencial e compará-la com os métodos de fotoativação mais comuns: convencional, *soft-start* e *pulse-delay*, visto que as sugestões na literatura são sempre voltadas para novas formulações das resinas compostas, que é foco de concorrência comercial e das empresas fabricantes deste biomaterial, e o desenvolvimento de parâmetros físicos complementares a este processos, como novos protocolos não é explorado. Para uma melhor comparação, proponha-se obedecer à lei da reciprocidade ajustando a energia e o tempo de fotoativação de acordo com os parâmetros relatados na literatura.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

- Determinar curvas ótimas de variação de irradiância em função do tempo de polimerização (método exponencial) para minimizar os efeitos da contração de polimerização e do aumento de temperatura na região da restauração dentária.

2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um equipamento fotoativador de resinas compostas que controle a irradiância de acordo com as curvas otimizadas.
- Comparar a eficiência do método exponencial de fotoativação com as técnicas: convencional, *soft-start* e *pulse-delay* utilizando a lei de reciprocidade, realizando fazendo testes de tensão de contração, cura em profundidade e de variação da temperatura durante a fotoativação.

3. MÉTODOS

3.1. Determinação das curvas ótimas de irradiância para fotoativação das resinas

Para comparar as técnicas de fotoativação obedecendo à lei da reciprocidade, foi realizada uma revisão bibliográfica para verificar o tempo e a energia de ativação aplicados nos diferentes estudos relatados na literatura (Tabela 1). Como os dados são bastante divergentes, nota-se que não há protocolo padrão para fotoativação. Tal fato pode ser atribuído a diferentes energias de ativação necessário para os diferentes modelos/marcas de resinas. No entanto, deve-se enfatizar que nenhum dos estudos mencionados apresentou um método sistemático para determinar os parâmetros ótimos de fotoativação.

Tabela 1. Métodos de fotoativação coletados em revisão bibliográfica.

Técnica	Parâmetros de Fotoativação	Energia (J)	Referência
<i>Convencional</i>	20 s – 1000 mW/cm ²	20	(20)
	30 s – 1200 mW/cm ²	36	(21)
	20 s – 1200 mW/cm ²	24	(22)
	40 s – 1200 mW/cm ²	48	(23)
	60 s – 1000 mW/cm ²	60	(24)
	20 s – 1000 mW/cm ²	20	(25)
	20 s – 1200 mW/cm ²	24	(26)
	20 s – 1200 mW/cm ²	24	(27)
	40 s – 1200 mW/cm ²	48	(27)
	40 s – 700 mW/cm ²	28	(28)
40 s – 750 mW/cm ²	30	(29)	
<i>Pulse-delay</i>	6 s – 350 mW/cm ² ; 180 s de espera; 37 s – 700 mW/cm ²	28	(28)
	5 s – 650 mW/cm ² ; 300 s de espera; 30 s – 120 mW/cm ²	39	(30)
	3 s – 100 mW/cm ² ; 180 de espera; 30 s – 500 mW/cm ²	15	(31)
	20 s – 200 mW/cm ² ; 180 s de espera; 30 s – 500 mW/cm ²	19	(31)
<i>Soft-start</i>	5 s – 650 mW/cm ² ; 15 s – 1200 mW/cm ²	21	(27)
	10 s – 650 mW/cm ² ; 30 s – 1200 mW/cm ²	43	(27)
	10 s – 350 mW/cm ² ; 35 s – 700 mW/cm ²	28	(30)
	10 s – 200 mW/cm ² ; 30 s – 750 mW/cm ²	25	(29)

Em geral, os parâmetros de fotoativação são propostos sem um critério claro. Assim, a partir dos resultados da revisão, a energia total média de fotoativação ($\overline{E_{TOTAL}}$) e os parâmetros de fotoativação (tempo e irradiância) foram determinados para cada técnica de fotoativação: convencional, *soft-start* e *pulse-delay*.

Os parâmetros correspondentes para o método de fotoativação exponencial foram determinados usando o modelo da função exponencial proposto por Guimarães et al. (9) e Affonso et al. (32), que permite determinar a irradiância instantânea durante a fotoativação (i) em função do tempo (t):

$$i(t) = a \cdot e^{\frac{t}{b}} + i_0 \quad (1)$$

onde $a = 0,58309$, $b = 4,928$ e $i_0 = 300$. O último termo na Equação 1 (i_0) corresponde à irradiância no ponto inicial do processo de fotoativação (300 mW/cm^2). O tempo total de fotoativação para cada técnica foi determinado pela simples integração da Equação 1, de modo que a energia de ativação atingisse os valores esperados, conforme apresentado na Equação 2:

$$\int_0^t \left(0,58309 \cdot e^{\frac{t}{4,928}} + 300 \right) dt = \overline{E_{TOTAL}} \quad (2)$$

Na Equação 2, o tempo (t) é a única variável de integração para ajustar a função às energias de ativação. Assim, a Equação 2 foi resolvida e diferentes valores de t foram obtidos para cada valor diferente de $\overline{E_{TOTAL}}$. Esse procedimento resultou em três tempos de ativação diferentes, cada um dos quais foi usado para comparar o método exponencial com os métodos convencional, *soft-start*, e *pulse-delay*.

Três modelos / marcas de resinas compostas foram selecionados para o nosso estudo: Z250 (3M Dental Products, St. Paul, MN, EUA), Carisma (Heraeus Kulzer, Hanau, Alemanha) e Ultrafill (Biodinâmica, Paraná, Brasil), suas formulações são mostradas na Tabela 2, a seguir:

Tabela 2. Formulações (resumidas) conforme especificações dos fabricantes das resinas compostas, Z250, Charisma e Ultrafill

Resina	Matriz Orgânica	Carga Inorgânica
Z250	Bis-GMA, UDMA, Bis-EMA PEG-DMA e TEG-DMA	Zircônica/Sílica (3,0 μm , aglomerado) ZnO_2/SiO_2
Charisma Classic	Bis-GMA, TEG-DMA	Bário, Alumínio fluoretado vítreo (0,02 μm), SiO_2 altamente disperso (0,02 – 0,07 μm)
Ultrafill	Bisfenol A glicidilmetacrilato, Etileno Uretano Dimetacrilato	Pigmentos e Catalisadores

Os processos de fotoativação foram realizados utilizando um dispositivo de polimerização desenvolvido por nosso grupo de pesquisa (número de registro de patente BR1020160078245, INPI, Brasil). Este dispositivo está equipado com um LED azul dental (LZ4-40B208-0000, LED Engin Inc. San Jose, Califórnia, EUA). A irradiância da saída foi calibrada usando um radiômetro (RD7, Ecel Indústria e Comércio Ltda; Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil). O dispositivo foi conectado a um computador pessoal com uma interface que permitia o controle da irradiância do LED ao longo do processo de fotoativação, de acordo com uma função matemática. Esse dispositivo foi construído utilizando tecnologia Arduino, sendo que estudos recentes mostram que é possível controlar a irradiância de LEDs utilizando microcontroladores (33).

3.2. Monitoramento da tensão de contração e da temperatura

O monitoramento foi realizado utilizando uma máquina de ensaios universal Emic DI 3000 (EMIC Equipamentos e Sistemas de Ensaios Ltda, São José dos Pinhais, PR, Brazil) com adaptação de duas bases de aço acopladas aos braços do equipamento e ajustadas para a inserção e polimerização da resina conforme ilustrado na Figura 1 (30). O volume de resina

utilizado no experimento foi de 12 mm³. O LED foi posicionado a 6 mm de distância permitindo a incidência de luz sobre todo o material resinoso. A distância de polimerização foi de 2 mm.

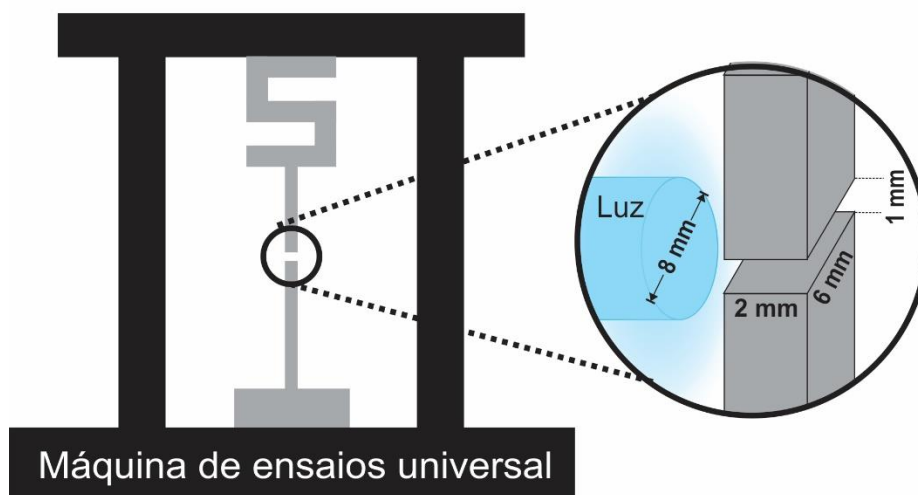


Figura 1. Esquema experimental para o monitoramento em tempo real da tensão de contração das resinas. As resinas foram inseridas entre as duas bases de aço retangulares.

Durante o processo de polimerização, o *software* controlador da máquina traçou a curva da força de contração em função do tempo de polimerização. A força foi obtida pela célula de carga acoplada à máquina, a qual realiza medidas com base na variação da resistência ôhmica de um sensor denominado extensômetro quando submetido a deformações. A fenda entre as duas bases, na qual a resina foi inserida, foi regulada com uma extensão de 1 mm. Apesar da fotoativação ser normalmente efetuada em no máximo 50 segundos, o tempo de monitoramento para cada processo foi de 300 segundos. Isso porque a contração das resinas continua ocorrendo mesmo após a ativação. Os ensaios foram realizados em triplicata para cada um dos modelos de resina e método de fotoativação.

O teste T para amostras pareadas foi utilizado para inferir se os valores de tensão de contração no final dos experimentos (300 s) eram estatisticamente diferentes quando

comparados os resultados obtidos em todos os modelos de resinas agrupados pela técnica de fotoativação, ou seja, foram 3 comparativos resultando em 9 medidas para cada resina e um total de 27 testes. Dessa forma, determinou-se se a tensão de contração do compósito resultante do uso do método exponencial era estatisticamente diferente dos resultados obtidos pelo uso das técnicas de fotoativação: convencional, *soft-start* e *pulse-delay*. Para esta análise, foi utilizado o software R (versão 3.2.2, R Foundation for Statistical Computing, Viena, Áustria) (34).

3.3. Monitoramento do aumento de temperatura

O monitoramento da variação de temperatura da resina durante a fotoativação foi realizado usando um sensor de temperatura sem contato (termômetro infravermelho modelo MLX90614 TO-39, Melexis, Ypres, Bélgica). Utilizou-se um microcontrolador para obter temperatura em tempo real das amostras.

As resinas foram inseridas em uma matriz de aço inoxidável com uma cavidade de 6 mm × 2 mm × 1 mm, resultando em amostras com 12 mm³. Desenvolveu-se um dispositivo para segurar a matriz de aço inoxidável, conforme ilustrado na Figura 2. A ponta do fotoativador foi posicionada a uma distância de 2 mm da amostra e o sensor de temperatura a uma distância de 1,5 cm do lado oposto da matriz. Para esse experimento o tempo total de monitoramento de temperatura foi de 300 segundos. O intervalo de leitura da aquisição dos dados foi de 0,5 segundos. Todos os experimentos foram realizados em triplicata.

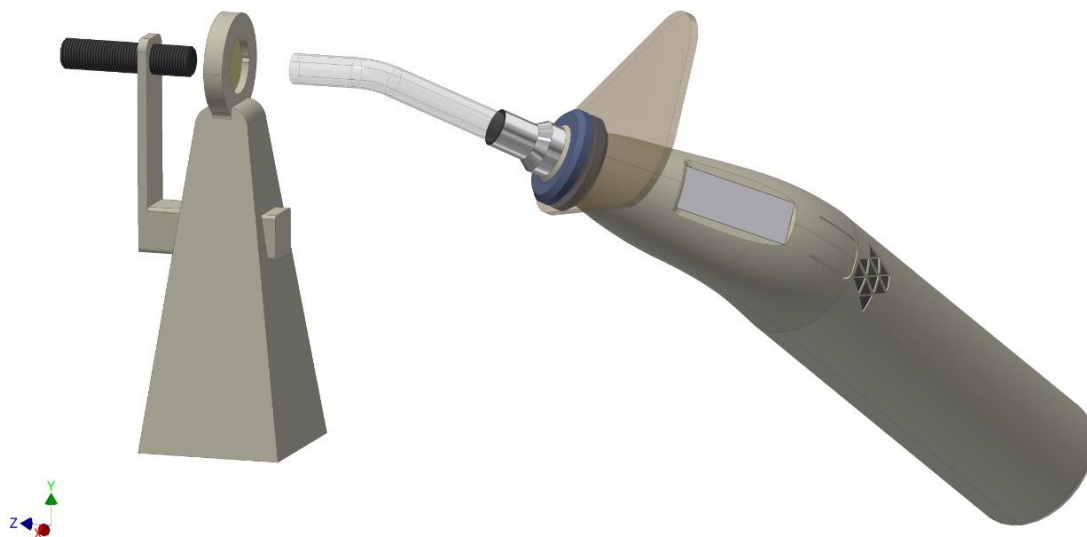


Figura 2. Ilustração do esquema de montagem dos experimentos para monitorar a temperatura das resinas durante os processos de fotoativação.

O teste T para amostras pareadas foi utilizado para inferir se a variação da temperatura média nas resinas geradas pela aplicação de diferentes métodos de fotoativação foi estatisticamente significativa, sempre comparando a técnica exponencial com uma das outras técnicas de fotoativação utilizadas neste estudo para todas as resinas descritas anteriormente (Charisma, Ultrafill e Z-250). Para esta análise, também foi utilizado o software R.

3.4. Teste de Cura em Profundidade (Eficiência da Polimerização)

Os experimentos para determinar a cura em profundidade foram realizados de acordo com a metodologia descrita por Alrahlah et al. (35). Para isso, foram fabricadas matrizes com uma cavidade de dimensões de 15 mm x 4 mm x 2 mm. Em cada experimento, as resinas foram inseridas na cavidade da matriz e os compósitos foram fotoativados apenas em um lado da matriz. A ponta do fotoativador foi posicionada a uma distância de 2 mm da amostra. Todas as amostras foram armazenadas por 24 horas a 37 °C em ambiente seco, sem

incidência de luz. Posteriormente, a cobertura de poeira da matriz foi removida e o número de dureza Vickers (VHN) foi medido em função da profundidade da cura em intervalos de 0,3 mm. O experimento foi realizado utilizando um microdurômetro (Modelo HM-112, Mitutoyo Corp., Tóquio, Japão), aplicando uma carga de 300g por 15s. Todos os experimentos foram realizados em triplicata.

O teste ANOVA *Two-way* foi utilizado para inferir se as diferenças correspondentes às medidas de dureza obtidas por diferentes métodos de fotoativação foram estatisticamente significativas. Assim, os dois fatores considerados como variáveis independentes para a análise ANOVA foram o método de polimerização e a medida de dureza em função da profundidade. Para esta análise, utilizou-se o software R. A análise sempre foi realizada em pares de dados, comparando o método de fotoativação exponencial com algum dos outros métodos descritos neste estudo (convencional, *soft-start* e *pulse-delay*) para todas as resinas descritas (Charisma, Ultrafill e Z-250).

4. RESULTADOS

4.1. Tensão de contração

A Figura 3 mostra a representação gráfica dos resultados obtidos no monitoramento da tensão de contração para comparação da técnica de fotoativação exponencial com os outros métodos de polimerização: convencional, *pulse-delay* e *soft-start*.

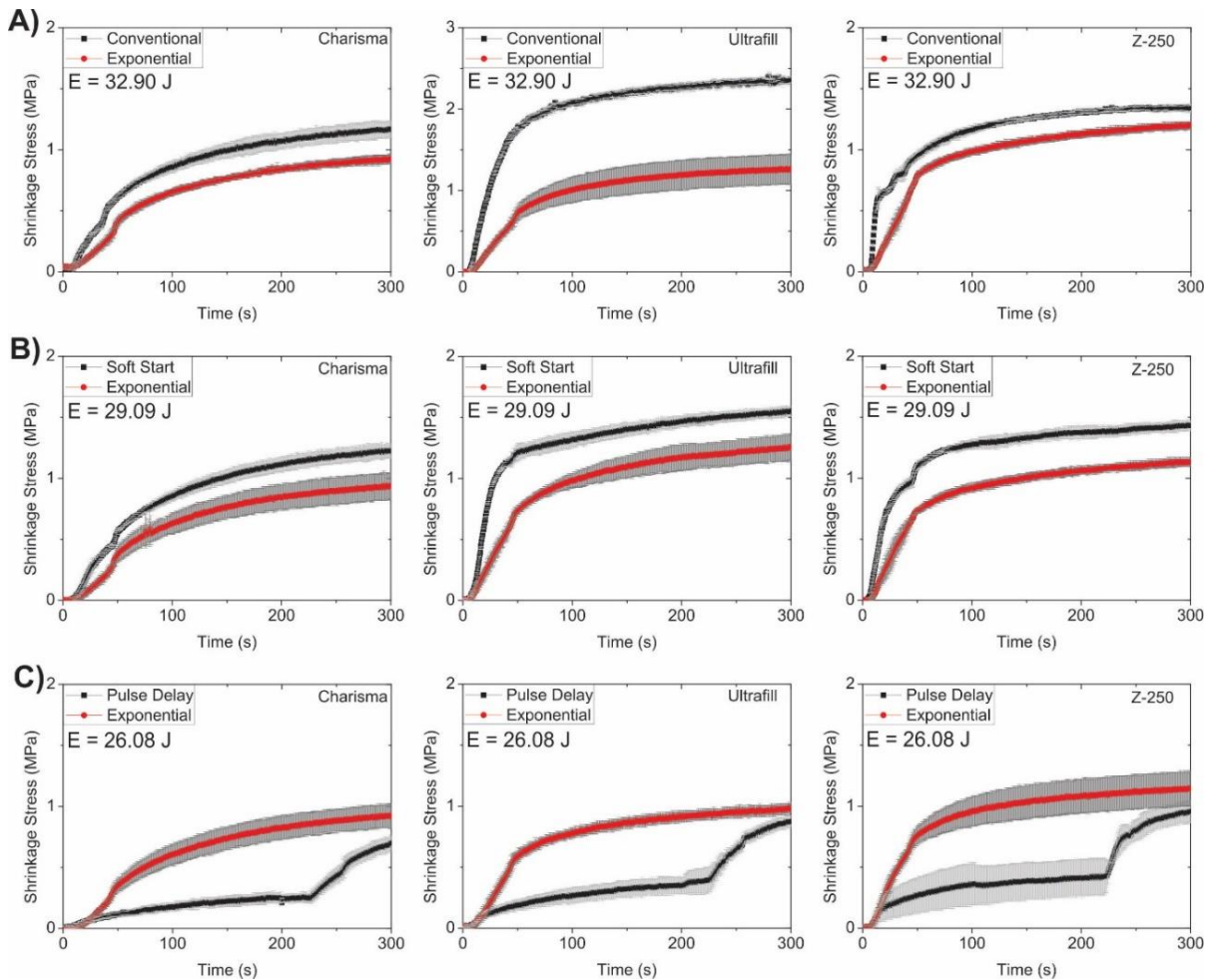


Figura 3. Tensão de contração ao longo do processo de cura do compósito comparando o uso das seguintes técnicas de fotoativação: **(A)** convencional x exponencial; **(B)** *soft-start* x exponencial; e **(C)** *pulse-delay* x exponencial. Todas as comparações foram realizadas para as resinas compostas Charisma, Ultrafill e Z-250.

Os resultados mostram que o método de exponencial reduziu a contração para quase todos os modelos de resinas testados e técnicas de fotoativação (exceto para o método

pulse-delay). Essa redução pode ser explicada pela baixa irradiância no início do processo de exponencial, o que pode estender a fase pré-gel da polimerização, alterando a cinética da reação química de polimerização. Nessa fase pré-gel, as moléculas têm maior mobilidade e podem adquirir novas posições e orientações de modo a compensar a tensão gerada pela contração de polimerização. (36–38,38)

As Tabelas 3, 4 e 5 apresentam a quantificação da tensão de contração ao final dos experimentos (300 s), além da análise estatística desses resultados comparando o método de exponencial com as técnicas convencional, *soft-start* e *pulse-delay*.

Tabela 3. Comparação da Tensão de Contração para os métodos de polimerização convencional e de exponencial.

Resinas	Tensão de Contração (MPa)	
	Convencional	Exponencial
Z-250	1.35 ± 0.02	1.21 ± 0.03
Charisma	1.18 ± 0.06	0.94 ± 0.03
Ultrafill	2.36 ± 0.02	1.28 ± 0.17
Teste T	Diferença estatisticamente significativa (t = 3.16, p-value = 0.0134)	

Ao analisar o resultado do teste-T na Tabela 3, pode-se concluir que o método de exponencial promoveu uma redução significativa da tensão de contração para todas as marcas/modelos de compósitos analisados, quando comparado ao método convencional.

A Tabela 4, por sua vez, apresenta a análise dos resultados comparando os métodos de polimerização *pulse-delay* e convencional. Conclui-se a partir do teste-T que não há diferença estatisticamente significativa entre os métodos avaliados. Com isso, podemos afirmar que o método de exponencial proporciona uma contração equivalente ao método *pulse-delay*. Contudo deve-se ressaltar que o método de exponencial é mais viável do ponto de vista prático, pois pode ser realizado num curto período de tempo.

Tabela 4. Comparação da Tensão de Contração para os métodos de polimerização *Pulse Delay* e de exponencial.

Resinas	Tensão de Contração (MPa)	
	<i>Pulse Delay</i>	Exponencial
Z-250	1.09 ± 0.14	1.15 ± 0.13
Charisma	0.93 ± 0.09	0.95 ± 0.10
Ultrafill	1.17 ± 0.21	1.12 ± 0.24
Teste T	Não há diferença estatisticamente significativa (t = 0.124, p-value = 0.9040)	

Finalizando, a Tabela 5 apresenta os resultados de comparação entre os métodos *soft-start* e de exponencial. Pode-se concluir a partir dos resultados obtidos que o método de exponencial proporcionou uma significativa redução na contração de polimerização também quando comparado à técnica *soft-start*.

Tabela 5. Comparação da Tensão de Contração para os métodos de polimerização *soft start* e de exponencial

Resinas	Tensão de Contração (MPa)	
	<i>Soft Start</i>	Exponencial
Z-250	1.46 ± 0.05	1.14 ± 0.03
Charisma	1.26 ± 0.05	0.95 ± 0.12
Ultrafill	1.51 ± 0.02	1.28 ± 0.11
Teste T	Diferença estatisticamente significativa (t = 8.5458, p-value = 0.0001)	

A redução da tensão de contração promovida pelo método exponencial pode ser explicada pela baixa irradiância no início do processo, o que pode estender a fase pré-gel da polimerização, alterando a cinética da reação química de polimerização (39,40). Nesse sentido, apesar do método de fotoativação *soft-start* também fazer uso da baixa luminosidade no início do processo, há no *soft-start* uma variação abrupta da irradiância durante a fotoativação, o que não favorece a redução da tensão de contração. Já no método exponencial, a irradiância é praticamente constante no início da fotoativação e aumentada de forma gradativa e suave, modelada por uma curva exponencial.

Quando comparado o método exponencial ao método *pulse-delay*, os resultados foram estatisticamente equivalentes. Todavia, os dois métodos se diferem quanto sua aplicação, visto que a técnica de *pulse-delay* é excessivamente demorada (251 segundos), não sendo

viável para aplicações práticas. Já o método exponencial pode ser executado em menos de um minuto, sendo um ponto favorável para a rotina dos consultórios odontológicos.

4.2. Variação de Temperatura

A Figura 4 apresenta os resultados de avaliação da variação de temperatura para as diferentes resinas e diferentes métodos de fotoativação considerados no presente estudo. Foi verificada diferenças estatisticamente significativas de variação de temperatura para todos os processos de fotoativação quando comparados com o método exponencial.

Uma das variáveis para obtenção de padrões diferentes de temperatura durante a fotoativação se constitui por diferenças na composição das resinas compostas (41), o que justifica a avaliação dos diferentes métodos de fotoativação seja realizado em diferentes marcas de resinas compostas. Dessa forma, a partir dos resultados obtidos, observa-se que diferentes resinas produzem padrões diferentes de variação de temperatura.

Em alguns casos, como no método convencional, a temperatura apresenta grande variação, podendo alcançar valores maiores que 32 °C, o que pode ocasionar diversos problemas na região de incidência da luz, como quadros inflamatórios irreversíveis no órgão pulpar (42).

O método *soft-start*, assim como o convencional, também apresentou valores de temperatura maiores que 30 °C, pois mesmo tendo um início de fotoativação com baixa irradiância, o final do processo é caracterizado por elevados valores de irradiância.

Já para o método *pulse-delay* não houve grandes variações de temperatura durante a fotoativação. Isso ocorre devido à baixa irradiância utilizada.

Por final, o método exponencial apresentou baixa variação de temperatura durante o processo de fotoativação para todas as marcas/modelos de resinas, apresentando valores estatisticamente inferiores quando comparados a outros métodos.

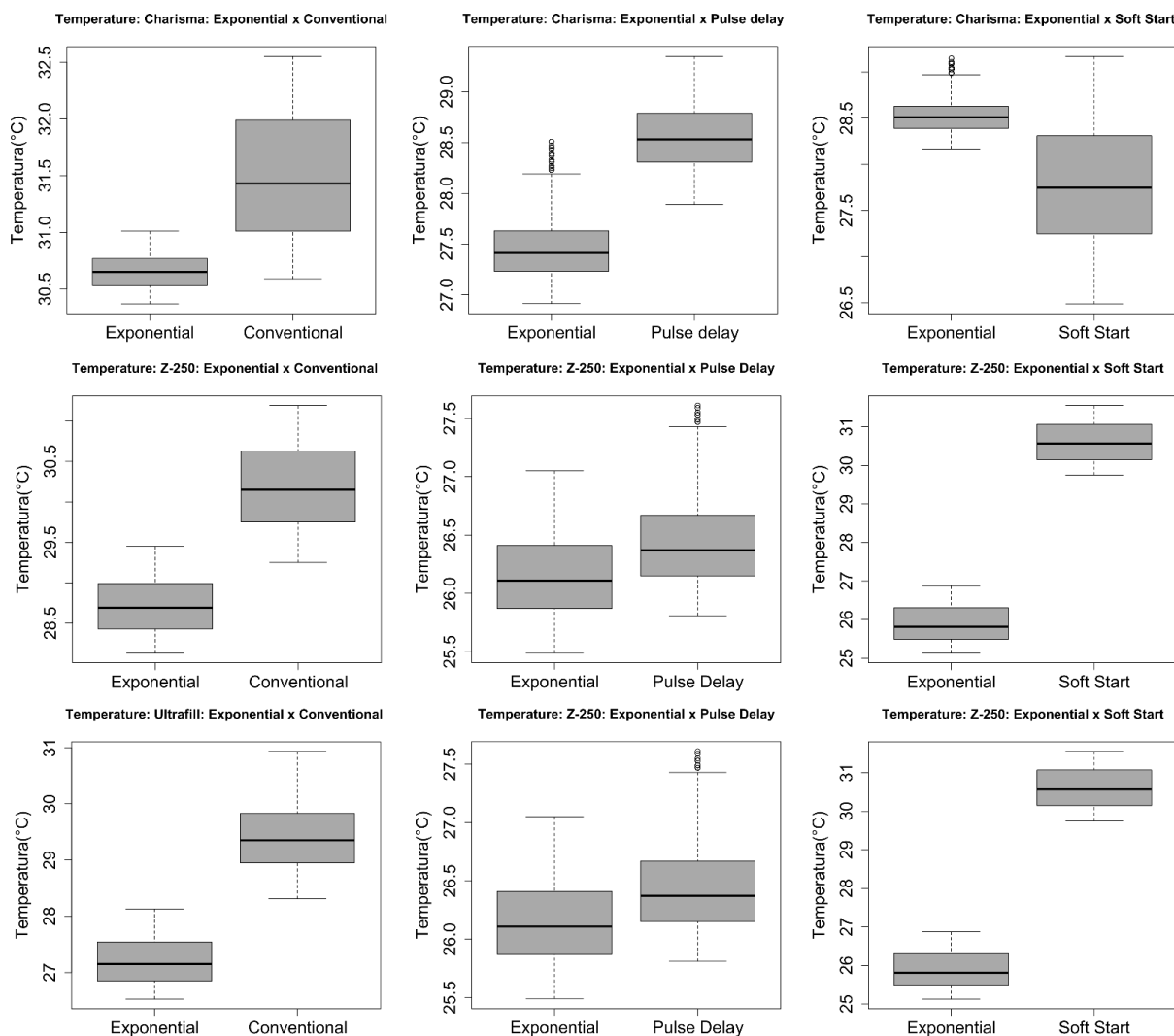


Figura 4. Avaliação da variação de temperatura para as resinas Charisma, Z-250 e Ultrafill comparando-se os diferentes métodos de fotoativação.

4.3. Cura em Profundidade

A Figura 5 apresenta os resultados de cura em profundidade, comparando os resultados obtidos com o método de fotoativação exponencial e com o método convencional para os três modelos de resinas utilizados neste estudo.

A comparação entre os métodos convencional e exponencial mostra que a aplicação do método de fotoativação exponencial resultou em dureza superior para as resinas Charisma e Ultrafill. Para a resina Charisma, os valores de dureza obtidos pela aplicação do método exponencial foram superiores para praticamente todos os valores de profundidade, ou seja,

para toda a extensão do corpo de prova. Já para a resina Ultrafill nota-se que a diferença de dureza é maior apenas na região próxima da superfície de polimerização (entre 0,3 e 2,1 mm). Já para a resina Z-250, não houve diferença estatisticamente significativa para cura em profundidade, sendo os valores de dureza estatisticamente equivalentes.

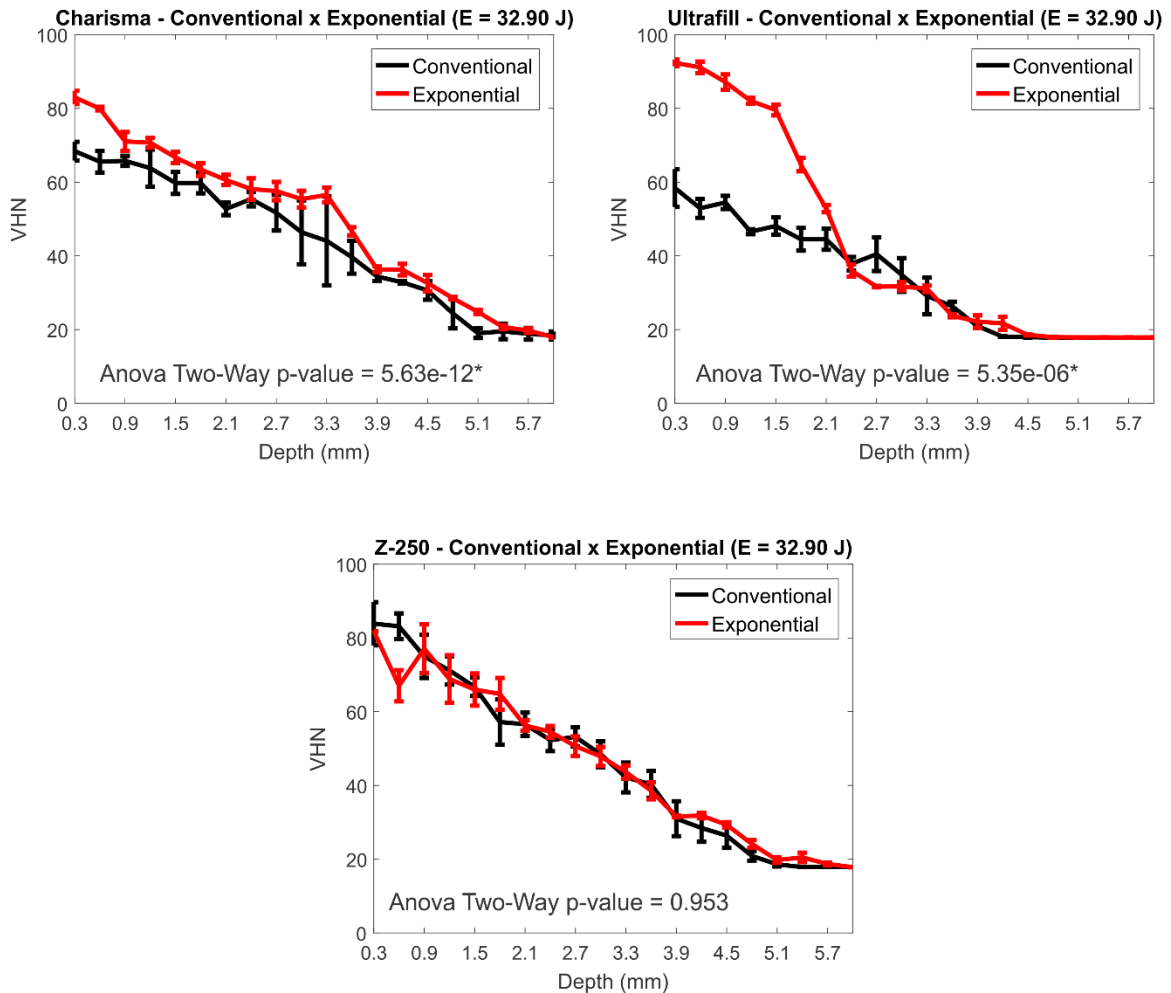


Figura 5. Comparação da cura em profundidade das resinas fotoativadas pelo método convencional e exponencial. Os *p-values* acompanhados de * indicam que os dados dureza em função da profundidade possuem diferença estatisticamente significativa ($p\text{-value} \leq 0,05$).

A Figura 6 apresenta os resultados de cura em profundidade, comparando os resultados obtidos com o método de fotoativação exponencial e com o método *soft-start*. Novamente observa-se que o método de fotoativação exponencial gerou resinas com dureza

superior em duas das três comparações realizadas, sendo neste caso para as resinas Charisma e Z-250. Contudo, deve-se destacar que na comparação para a resina Z-250, a técnica *soft-start* promoveu maior dureza em profundidades menores (até 1,5 mm), enquanto o método exponencial apresentou maior dureza em profundidades maiores. Isso pode indicar uma menor vitrificação superficial da resina para o processo exponencial, favorecendo a polimerização do material por toda sua extensão. Contudo, experimentos adicionais devem ser realizados para confirmação dessa hipótese.

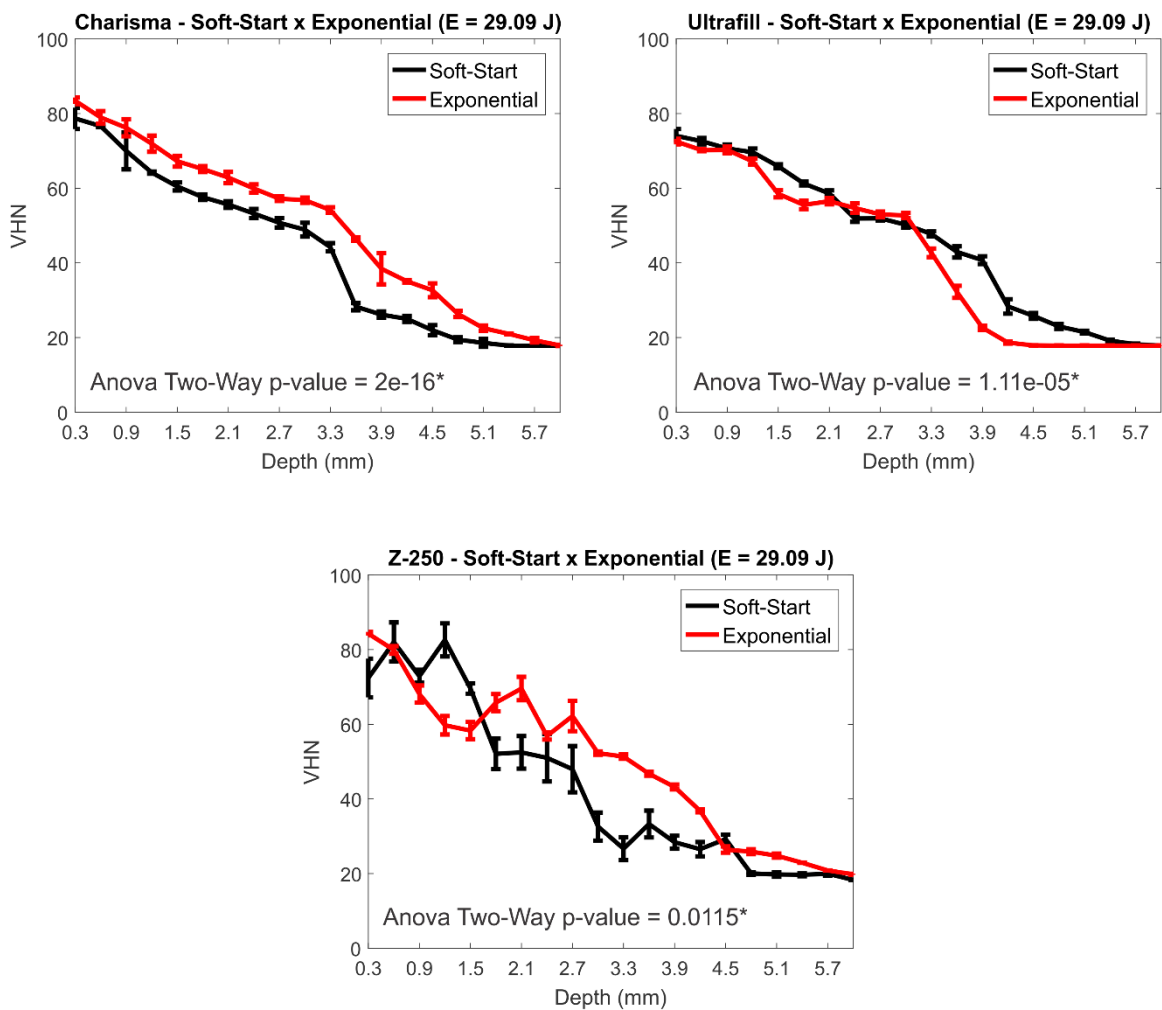


Figura 6. Comparação da cura em profundidade das resinas fotoativadas pelo método *soft-start* e exponencial. Os *p-values* acompanhados de * indicam que os dados dureza em função da profundidade possuem diferença estatisticamente significativa ($p\text{-value} \leq 0,05$).

A Figura 7 apresenta os resultados de cura em profundidade, comparando os resultados obtidos com o método de fotoativação exponencial e com o método *pulse-delay*.

Observa-se também na Figura 7 que a utilização do método de fotoativação exponencial resultou em corpos de prova com dureza superior para duas das três resinas estudadas (neste caso as resinas Charisma e Z-250). Novamente, observa-se que a dureza das resinas fotoativadas utilizando o método exponencial é superior em profundidades maiores. Para a resina Ultrafill, os dados não apresentaram diferença estatisticamente significativa.

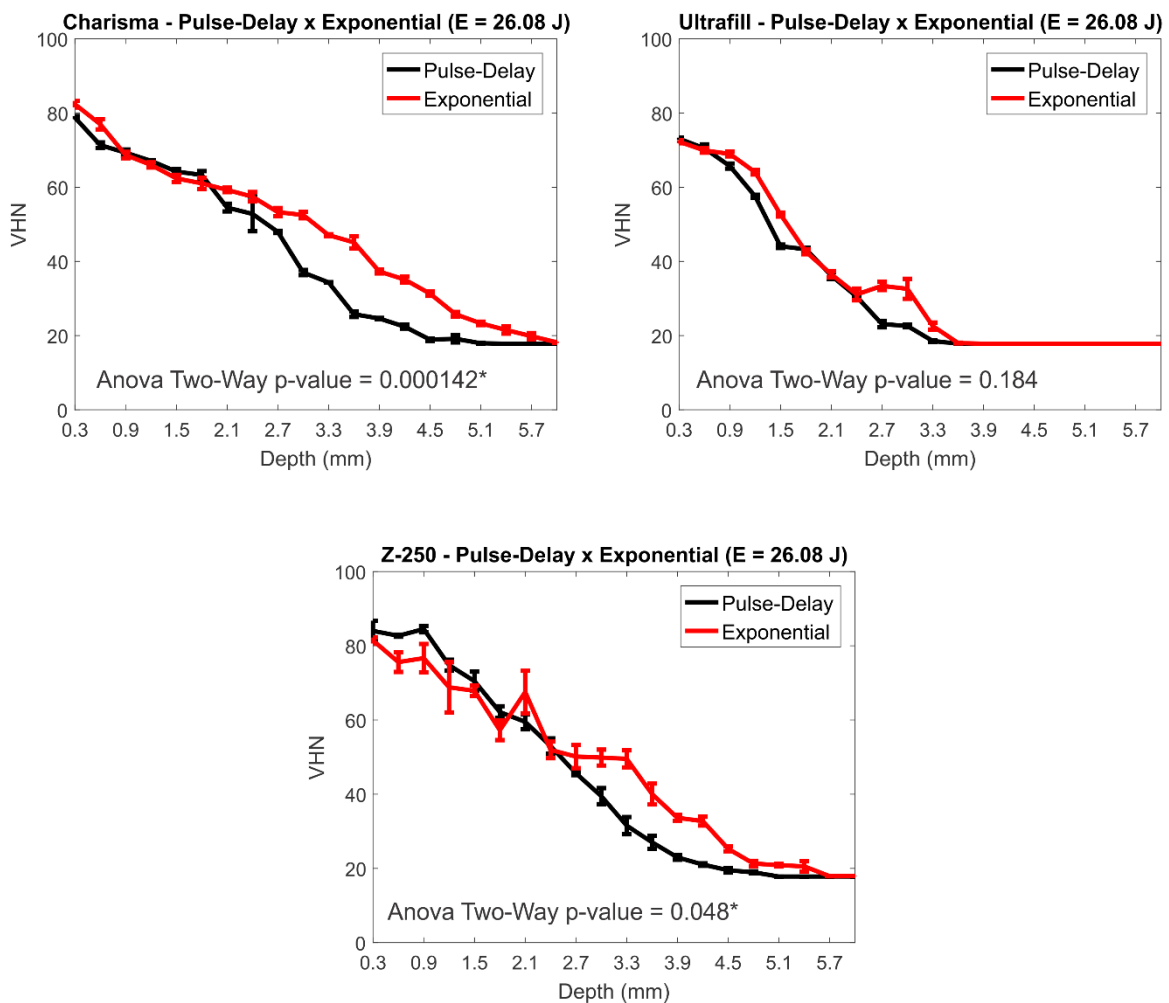


Figura 7. Comparação da cura em profundidade das resinas fotoativadas pelo método *pulse-delay* e exponencial. Os *p-values* acompanhados de * indicam que os dados dureza em função da profundidade possuem diferença estatisticamente significativa ($p\text{-value} \leq 0,05$).

Também pode ser observado por esses gráficos que a energia total de ativação relativamente menor utilizada para a comparação entre os métodos *pulse-delay* e exponencial (26,08 J) resultou em resinas com dureza em função da profundidade menores que as das demais comparações apresentadas nas Figuras 5 e 6. Os dados para a energia de ativação de 26,08 J mostram que para a profundidade de 3 mm a dureza das resinas já se aproxima de 20 HV. Já para os dados correspondentes às demais comparações (Figuras 5 e 6), a dureza das resinas se aproxima de 20 HV apenas para profundidades superiores a 4 mm.

Adicionalmente, a Figura 8 apresenta os resultados de dureza em profundidade obtidos para o método exponencial comparando as diferentes energias utilizadas para uma mesma resina. Dessa forma, os resultados foram agrupados de acordo com a energia utilizada no processo, sendo: 1- Exponencial 1 ou E1 (energia total de ativação de 32,9 J); 2- Exponencial 2 ou E2 (energia total de ativação de 26,08 J); e 3- Exponencial 3 ou E3 (energia total de ativação de 29,09 J). A análise ANOVA foi realizada para comparar as curvas e inferir sobre diferenças estatisticamente significativas entre a dureza em função da profundidade tendo como variável independente a energia total de ativação.

A comparação entre os resultados obtidos para a resina Charisma mostra que a aplicação do método exponencial resultou em valores de dureza com padrões semelhantes independentemente da energia utilizada total no processo. Esse resultado indica que a energia de ativação tem pouca influência sobre a dureza em função da profundidade para essa resina quando é utilizado o método de fotoativação exponencial.

Um comportamento semelhante foi observado para a resina Z-250, onde os padrões dos dados de dureza em função da profundidade são semelhantes para todas as energias de ativação utilizadas. Contudo, observa-se grandes barras de desvio padrão para os referidos valores, indicando que não houve homogeneidade na cura da resina para os experimentos realizados.

Por final, para a resina Ultrafill nota-se uma dureza maior na região próxima da superfície de polimerização (entre 0,3 e 2,1 mm) para a energia de 32,9 J e na região entre 1,5 e 3,3 mm para a energia de 29,09 J. Os resultados mostram que a menor energia aplicada à resina ($E = 26,08$ J) resultou em menores valores de dureza principalmente em profundidades superiores a 1,5 mm. Dessa forma, observou-se que a resina Ultrafill retratou maior sensibilidade à variação da energia total aplicada no processo de fotopolimerização e também maior variação da dureza em função da profundidade de cura, o que pode estar relacionado à sua composição química.

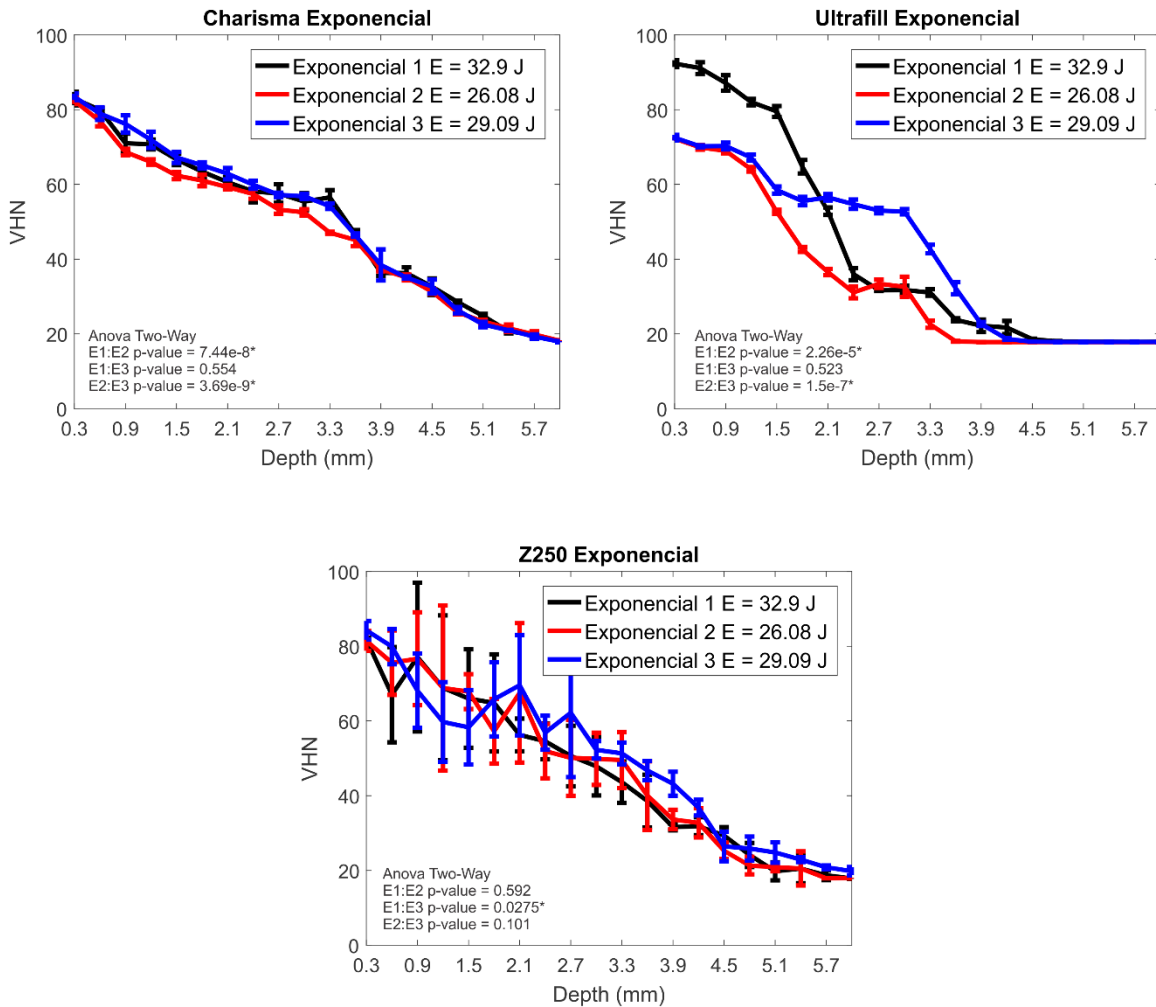


Figura 8. Comparação da cura em profundidade das resinas fotoativadas pelo método exponencial. Os *p-values* acompanhados de * indicam que os dados dureza em função da profundidade possuem diferença estatisticamente significativa ($p\text{-value} \leq 0,05$).

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados apresentados indicam que a aplicação método exponencial reduziu significativamente a tensão de contração para todos os modelos de resina quando comparado aos métodos convencional e *soft-start*. Era esperado que o método exponencial promovesse redução na tensão de contração quando comparado ao método convencional, uma vez que este último não possui qualquer tipo de controle de irradiância durante a fotoativação. Contudo, observou-se que o método exponencial foi mais eficiente na redução da tensão de contração também quando comparado ao método *soft-start*, mesmo sendo o método *soft-start* reconhecido na literatura por minimizar os efeitos da tensão contração (38,43). A redução da tensão de contração promovida pelo método exponencial pode ser explicada novamente pela baixa irradiância no início do processo, o que pode estender a fase pré-gel da polimerização, alterando a cinética da reação química de polimerização (36,44). Na fase pré-gel, as moléculas têm maior mobilidade e podem adquirir novas posições e orientações de modo a compensar a tensão gerada pela contração de polimerização. Nesse sentido, apesar do método de fotoativação *soft-start* assemelha-se ao método exponencial (pois em ambas as técnicas se utiliza baixa luminosidade no início do processo), há no *soft-start* uma variação abrupta da irradiância durante a fotoativação, o que não favorece a redução da tensão de contração. Já no método exponencial, a irradiância é praticamente constante no início da fotoativação e aumentada de forma gradativa e suave, modelada por uma curva exponencial.

Quando comparado o método exponencial ao método *pulse-delay*, os resultados de tensão de contração foram estatisticamente equivalentes. Todavia, os dois métodos se diferem quanto sua aplicação, visto que a técnica de *pulse-delay* é excessivamente demorada (251 segundos), não sendo viável para aplicações práticas. Já o método

exponencial pode ser executado em menos de um minuto, sendo um ponto favorável para a rotina dos consultórios odontológicos.

É importante observar que o método de fotoativação exponencial promoveu uma significativa redução na tensão de contração para a resina Ultrafill, sendo essa uma resina de baixo custo e muito utilizado no Sistema Único de Saúde (SUS) do Brasil. Os resultados mostraram que a tensão final para a resina Ultrafill utilizando o método exponencial foi similar aos resultados para as demais resinas (mais tradicionais e mais caras) avaliadas neste estudo. Esse resultado é extremamente relevante do ponto de vista social, pois, de maneira indireta, o uso desse método exponencial pode promover a melhoria nos processos de restaurações dentárias para a população atendida pelo SUS, potencialmente diminuindo a possibilidade de recidiva de cárie e de retrabalho.

A avaliação da eficiência da polimerização da resina composta pôde ser realizada com as medidas de cura em profundidade, sendo a microdureza considerada uma propriedade física associada à efetividade de polimerização desse tipo de material (30,45). Ao analisar os gráficos obtidos para os ensaios de microdureza Vickers, observa-se uma diferença entre os valores obtidos na região superficial (onde ocorre a incidência de luz) e a outra extremidade do material. Isso ocorre pois a superfície que está em contato direto com a luz emitida pelo aparelho fotopolimerizador recebe uma quantidade superior de fótons que irão excitar as substâncias fotoiniciadoras (30). Como a outra extremidade encontra-se afastada do aparelho fotopolimerizador e pela ocorrência dos fenômenos de absorção e dispersão da luz, há uma diminuição da capacidade de interação dos fótons com os elementos fotoiniciadores. Isso resulta em uma baixa conversão dos monômeros em polímeros, induzindo a menores valores de microdureza (46,47). Indiretamente, a partir desse resultado pode-se inferir que, caso a cavidade dentária seja profunda, as restaurações devem ser realizadas em incrementos.

Os resultados de variação da temperatura da resina durante a polimerização mostram que o método exponencial promoveu menor variação de temperatura em comparação aos métodos de ativação convencional e *soft-start* em cinco das seis comparações realizadas neste estudo. Contudo, deve-se ressaltar que os resultados mostraram que para nenhum dos experimentos realizados houve variações de superiores ao ponto considerado crítico de variação de temperatura (em torno de 5,6°C) (42,48).

Avaliando os resultados de forma global, observa-se que os resultados comparando a variação de temperatura obtida pelo uso dos diferentes métodos de fotoativação foram semelhantes aos padrões observados nos resultados de tensão de contração. Nesse sentido, estudos mostram que o aumento de temperatura durante o processo de polimerização tem influência na mobilidade das moléculas do material resinoso e pode acelerar a conversão de monômeros em polímeros e, conseqüentemente, o aumento da contração de polimerização (49). Os resultados obtidos neste estudo são congruentes com essa hipótese, o que pode explicar a correspondência entre os resultados de tensão de contração e variação de temperatura.

6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo demonstraram que o controle da irradiância durante o processo de fotoativação tem influência direta no comportamento dinâmico da tensão de contração e da variação de temperatura durante a polimerização da resina composta. O uso das técnicas de fotoativação exponencial e *pulse-delay* promoveram melhores resultados quando comparados aos métodos convencional e *soft-start*, promovendo redução significativa da tensão de contração de polimerização e da variação de temperatura. Outro ponto relevante é que, apesar dos métodos exponencial e *pulse-delay* apresentarem desempenhos equivalentes nesses experimentos, o método *pulse-delay* requer um tempo de fotoativação relativamente longo, o que dificulta sua aplicação e adoção por profissionais de restauração dentária.

Os resultados dos experimentos de cura em profundidade revelaram que o uso do método de fotoativação exponencial resultou em resinas com dureza inferior ao método comparativo em apenas uma das nove comparações realizadas neste estudo. Dessa forma, pode-se concluir que o uso do método de fotoativação exponencial foi eficiente para a polimerização de compósitos neste estudo. Esses resultados indicam que o método de fotoativação exponencial proposto no presente estudo, com controle de irradiância determinado por técnicas matemáticas de otimização de função, pode ser uma boa alternativa para processos de fotoativação de resina composta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Jum'ah AA, Creanor S, Wilson NHF, Burke FJT, Brunton PA. Dental practice in the UK in 2015/2016. Part 3: aspects of indirect restorations and fixed prosthodontics. *Br Dent J*. fevereiro de 2019;226(3):192–6.
2. Laske M, Opdam NJM, Bronkhorst EM, Braspenning JCC, Huysmans MCDNJM. Longevity of direct restorations in Dutch dental practices. Descriptive study out of a practice based research network. *J Dent*. 1º de março de 2016;46:12–7.
3. Caldarelli P G, et al. Aparelhos fotopolimerizadores evolução e aplicação.pdf. 2011.
4. Schneider LFJ, Cavalcante LM, Pahl SA, Pfeifer CS, Ferracane JL. Curing efficiency of dental resin composites formulated with camphorquinone or trimethylbenzoyl-diphenyl-phosphine oxide. *Dent Mater*. abril de 2012;28(4):392–7.
5. Rueggeberg FA. State-of-the-art: Dental photocuring—A review. *Dent Mater*. janeiro de 2011;27(1):39–52.
6. Price RBT. Light Curing in Dentistry. *Dent Clin North Am*. outubro de 2017;61(4):751–78.
7. Rueggeberg FA, Giannini M, Arrais CAG, Price RBT. Light curing in dentistry and clinical implications: a literature review. *Braz Oral Res [Internet]*. 28 de agosto de 2017 [citado 8 de dezembro de 2017];31(suppl 1). Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-83242017000500206&lng=en&tlng=en
8. Silva VAD, Silva SAD, Pecho OE, Bacchi A. Influence of composite type and light irradiance on color stability after immersion in different beverages. *J Esthet Restor Dent*. 2018;30(5):390–6.
9. Guimarães GF, Marcelino E, Cesarino I, Vicente FB, Grandini CR, Simões RP, et al. Minimization of polymerization shrinkage effects on composite resins by the control of irradiance during the photoactivation process. *J Appl Oral Sci [Internet]*. 2018 [citado 12 de julho de 2018];26. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1678-77572018000100473&lng=en&nrm=iso&tlng=en
10. El-Damanny H, Platt J. Polymerization Shrinkage Stress Kinetics and Related Properties of Bulk-fill Resin Composites. *Oper Dent*. 18 de julho de 2013;39(4):374–82.
11. van Dijken JWV, Pallesen U. Durability of a low shrinkage TEGDMA/HEMA-free resin composite system in Class II restorations. A 6-year follow up. *Dent Mater*. 1º de agosto de 2017;33(8):944–53.
12. Celik C, Cehreli SB, Arhun N. Resin composite repair: Quantitative microleakage evaluation of resin-resin and resin-tooth interfaces with different surface treatments. *Eur J Dent*. 2015;9(1):92–9.
13. Rastelli ANS, Jacomassi DP, Bagnato VS. Effect of power densities and irradiation times on the degree of conversion and temperature increase of a microhybrid dental composite resin. *Laser Phys*. 1º de setembro de 2008;18(9):1074–9.

14. Vinagre A, Ramos JC, Rebelo C, Basto JF, Messias A, Alberto N, et al. Pulp Temperature Rise Induced by Light-Emitting Diode Light-Curing Units Using an Ex Vivo Model. *Materials*. janeiro de 2019;12(3):411.
15. Gonçalves F, Calheiros FC, Witzel MF, Kawano Y, Braga RR. Effect of photoactivation protocol and radiant exposure on monomer conversion and flexural strength of a resin composite after water and ethanol storage. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*. 2007;82B(1):89–92.
16. Watts DC, Kaiser C, O'Neill C, Price RB. Reporting of light irradiation conditions in 300 laboratory studies of resin-composites. *Dent Mater*. 1º de março de 2019;35(3):414–21.
17. AlShaafi MM. Factors affecting polymerization of resin-based composites: A literature review. *Saudi Dent J*. abril de 2017;29(2):48–58.
18. Brandt WC, Schneider LFJ, Frollini E, Correr-Sobrinho L, Sinhoreti MAC. Effect of different photo-initiators and light curing units on degree of conversion of composites. *Braz Oral Res*. setembro de 2010;24(3):263–70.
19. Cardoso KAOR de F, Zarpellon DC, Madruga CFL, Rodrigues JA, Arrais CAG, Cardoso KAOR de F, et al. Effects of radiant exposure values using second and third generation light curing units on the degree of conversion of a lucirin-based resin composite. *J Appl Oral Sci*. abril de 2017;25(2):140–6.
20. Beltrami R, Chiesa M, Scribante A, Allegretti J, Poggio C. Comparison of shear bond strength of universal adhesives on etched and nonetched enamel. *J Appl Biomater Funct Mater*. 6 de abril de 2016;14(1):e78-83.
21. Zorzin J, Maier E, Harre S, Fey T, Belli R, Lohbauer U, et al. Bulk-fill resin composites: polymerization properties and extended light curing. *Dent Mater Off Publ Acad Dent Mater*. março de 2015;31(3):293–301.
22. Sunbul HA, Silikas N, Watts DC. Polymerization shrinkage kinetics and shrinkage-stress in dental resin-composites. *Dent Mater*. 1º de agosto de 2016;32(8):998–1006.
23. Lau A, Li J, Heo YC, Fok A. A study of polymerization shrinkage kinetics using digital image correlation. *Dent Mater Off Publ Acad Dent Mater*. abril de 2015;31(4):391–8.
24. Wang R, Zhang M, Liu F, Bao S, Wu T, Jiang X, et al. Investigation on the physical-mechanical properties of dental resin composites reinforced with novel bimodal silica nanostructures. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl*. maio de 2015;50:266–73.
25. Boroujeni PM, Mousavinasab SM, Hasanli E. Effect of configuration factor on gap formation in hybrid composite resin, low-shrinkage composite resin and resin-modified glass ionomer. *J Investig Clin Dent*. maio de 2015;6(2):156–60.
26. Al-Ahdal K, Ilie N, Silikas N, Watts DC. Polymerization kinetics and impact of post polymerization on the Degree of Conversion of bulk-fill resin-composite at clinically relevant depth. *Dent Mater Off Publ Acad Dent Mater*. outubro de 2015;31(10):1207–13.
27. Gamarra VSS, Borges GA, Júnior LHB, Spohr AM. Marginal adaptation and microleakage of a bulk-fill composite resin photopolymerized with different techniques. *Odontology*. janeiro de 2018;106(1):56–63.

28. Piccioni MARV, Baratto-Filho F, Kuga MC, Morais ECC de, Campos EA. Cuspal movement related to different polymerization protocols. *J Contemp Dent Pract.* 1º de janeiro de 2014;15(1):26–8.
29. Silikas N, Eliades G, Watts DC. Light intensity effects on resin-composite degree of conversion and shrinkage strain. *Dent Mater Off Publ Acad Dent Mater.* julho de 2000;16(4):292–6.
30. Schneider AC, Mendonça MJ, Rodrigues RB, Busato P do MR, Camilotti V. Influência de três modos de fotopolimerização sobre a microdureza de três resinas compostas. *Polímeros.* 19 de janeiro de 2016;26(spe):37–42.
31. Yap AUJ, Soh MS, Siow KS. Effectiveness of composite cure with pulse activation and soft-start polymerization. *Oper Dent.* fevereiro de 2002;27(1):44–9.
32. Affonso PHA, Marcelino E, Carsoso G, Guimarães GF, TEIXEIRA R, LUTTI RL, et al. Minimização da contração de polimerização em processos de fotoativação de resinas compostas. *Sodebras.* 2016;11:79–82.
33. Magro A, Silva M, Sousa G, Cardoso F, Guimarães G, Muniz S, et al. Development of a low-cost colorimeter-like for undergraduate classes using microcontroller board and RGB LED. *Educ Quím.* 6 de fevereiro de 2020;31(1):36-48–48.
34. Rb D, Cb P. [“R”--project for statistical computing]. *Ugeskr Laeger.* 1º de janeiro de 2008;170(5):328–30.
35. Alrahlah A, Silikas N, Watts DC. Post-cure depth of cure of bulk fill dental resin-composites. *Dent Mater Off Publ Acad Dent Mater.* fevereiro de 2014;30(2):149–54.
36. Tauböck TT, Feilzer AJ, Buchalla W, Kleverlaan CJ, Krejci I, Attin T. Effect of modulated photo-activation on polymerization shrinkage behavior of dental restorative resin composites. *Eur J Oral Sci.* agosto de 2014;122(4):293–302.
37. Carvalho AA, Moreira F do CL, Fonseca RB, Soares CJ, Franco EB, Souza JB de, et al. Effect of light sources and curing mode techniques on sorption, solubility and biaxial flexural strength of a composite resin. *J Appl Oral Sci.* abril de 2012;20(2):246–52.
38. Ernst C-P, Brand N, Frommator U, Rippin G, Willershausen B. Reduction of polymerization shrinkage stress and marginal microleakage using soft-start polymerization. *J Esthet Restor Dent Off Publ Am Acad Esthet Dent Al.* 2003;15(2):93–103; discussion 104.
39. Chiappino-Pepe A, Pandey V, Ataman M, Hatzimanikatis V. Integration of metabolic, regulatory and signaling networks towards analysis of perturbation and dynamic responses. *Curr Opin Syst Biol.* 1º de abril de 2017;2:59–66.
40. Carvalho AA, Moreira F do CL, Fonseca RB, Soares CJ, Franco EB, Souza JB de, et al. Effect of light sources and curing mode techniques on sorption, solubility and biaxial flexural strength of a composite resin. *J Appl Oral Sci.* abril de 2012;20(2):246–52.
41. Godoy E de P. AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE POLIMERIZAÇÃO E ELEVÇÃO DE TEMPERATURA PRODUZIDA POR APARELHOS FOTOPOLIMERIZADORES. Curing efficiency and temperature increasement

produced by photo-activation devices [Internet]. 26 de fevereiro de 2008 [citado 3 de abril de 2019]; Disponível em: <http://tede2.uepg.br/jspui/handle/prefix/1750>

42. Zach L, Cohen G. Pulp response to externally applied heat. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* abril de 1965;19(4):515–30.
43. Soares C, Bicalho A, Verissimo C, Soares P, Tantbirojn D, Versluis A. Delayed Photo-activation Effects on Mechanical Properties of Dual Cured Resin Cements and Finite Element Analysis of Shrinkage Stresses in Teeth Restored With Ceramic Inlays. *Oper Dent.* 21 de janeiro de 2016;41(5):491–500.
44. Carvalho AA, Moreira F do CL, Fonseca RB, Soares CJ, Franco EB, Souza JB de, et al. Effect of light sources and curing mode techniques on sorption, solubility and biaxial flexural strength of a composite resin. *J Appl Oral Sci.* abril de 2012;20(2):246–52.
45. Ferreira APB, Júnior S, César P, Souza EM, Rached RN, Pezzin SH, et al. Wavelength of Experimental LEDS: Hardness, Elastic Modulus, Degree of Conversion and Temperature Rise of a Microhybrid Composite. *Mater Res.* abril de 2015;18(2):240–4.
46. Flury S, Peutzfeldt A, Lussi A. Influence of increment thickness on microhardness and dentin bond strength of bulk fill resin composites. *Dent Mater Off Publ Acad Dent Mater.* outubro de 2014;30(10):1104–12.
47. Son S-A, Roh H-M, Hur B, Kwon Y-H, Park J-K. The effect of resin thickness on polymerization characteristics of silorane-based composite resin. *Restor Dent Endod.* novembro de 2014;39(4):310–8.
48. Kim RJ-Y, Lee I-B, Yoo J-Y, Park S-J, Kim S-Y, Yi Y-A, et al. Real-Time Analysis of Temperature Changes in Composite Increments and Pulp Chamber during Photopolymerization. *BioMed Res Int.* 2015;2015:1–6.
49. Walter R, Swift EJ, Sheikh H, Ferracane JL. Effects of temperature on composite resin shrinkage. *Quintessence Int Berl Ger* 1985. dezembro de 2009;40(10):843–7.