

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: FÍSICA

FERNANDO CAMILOTTI

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA DENSIDADE VOLUMÉTRICA MÉDIA
DE ENERGIA EM PINOS ENDODÔNTICOS TRANSLÚCIDOS

PONTA GROSSA

2016

FERNANDO CAMILOTTI

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA DENSIDADE VOLUMÉTRICA MÉDIA
DE ENERGIA EM PINOS ENDODÔNTICOS TRANSLÚCIDOS

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Ciências - Área de concentração: Física – da Universidade Estadual de Ponta Grossa como requisito parcial para obtenção de título de Mestre em Física.

Orientador: Prof. Dr. Gerson Kniphoff da Cruz

PONTA GROSSA

2016

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG

Camilotti, Fernando
C183 Determinação experimental da densidade
 volumétrica média de energia em pinos
 endodônticos translúcidos/ Fernando
 Camilotti. Ponta Grossa, 2016.
 58f.

 Dissertação (Mestrado em Ciências -
 Área de Concentração: Física),
 Universidade Estadual de Ponta Grossa.
 Orientador: Prof. Dr. Gerson Kniphoff
 da Cruz.

 1.Pinos endodônticos. 2.Luz espalhada.
 3.Densidade de energia. I.Cruz, Gerson
 Kniphoff da. II. Universidade Estadual de
 Ponta Grossa. Mestrado em Ciências. III.
 T.

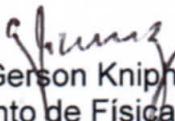
CDD: 535

TERMO DE APROVAÇÃO

Fernando Camilotti

“DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA DENSIDADE VOLUMÉTRICA MÉDIA DE ENERGIA EM PINOS ENDODÔNTICOS TRANSLÚCIDOS”

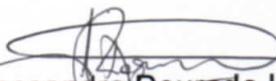
Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Ciências - Física da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela seguinte banca examinadora.



Prof. Dr. Gerson Kniphoff da Cruz
Departamento de Física – UEPG/PR



Prof. Dr. Pedro Pablo González Borrero
Departamento de Física – UNICENTRO/PR



Prof. Dr. Alessandro Dourado Loguercio
Departamento de Odontologia – UEPG/PR

Ponta Grossa, 11 de março de 2016.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo seu amor infinito e suas bênçãos durante este trabalho.

Ao professor Dr. Gerson Kniphoff da Cruz pelo incentivo, amizade e paciência.

À professora Dr. Cláudia Bonardi, pelas contribuições e incentivo durante este trabalho.

Aos meus colegas de laboratório, pela amizade e diversas ideias neste trabalho.

À minha família, pela força, confiança e apoio durante os últimos dois anos.

Às Irmãs do Instituto das Apóstolas do Sagrado Coração de Jesus, pelo apoio e orações.

Aos demais alunos e professores da física, pelas suas contribuições no meu crescimento profissional e pessoal.

RESUMO

O uso de pinos endodônticos em restaurações de dentes tem sido muito frequente. Estes pinos são formados, em geral, por fibras de vidro envolvidas e compactadas em epóxi, possuindo um formato cônico. Estudos de microscopia foram realizados para investigar a estrutura de quatro modelos de pinos de fibra de vidro do fabricante FGM (modelos DC 0.5, DC1, DC2 e DC3), e constatou-se falta de homogeneidade. Os modelos de pinos usados neste trabalho são transparentes e, no uso clínico, são cimentados no interior do dente com uma resina que tem a cura ativada por luz. No procedimento de cimentação de um pino no dente, a luz de um aparelho fotopolimerizador incide na base do pino transmitindo luz para seu interior. Parte desta luz é espalhada pela superfície lateral do pino. Este trabalho propõe um novo método para investigar o espalhamento da luz por pino endodônticos, na direção ortogonal ao seu eixo. Esta investigação atende uma demanda da odontologia, e como resultado do novo método, obtemos perfis de intensidade de luz espalhada ao longo do comprimento de um pino. O diferencial deste novo método, em relação aos métodos já publicados, é o emprego da detecção sensível à fase e a possibilidade de controlar a abertura ótica no experimento. Os perfis de espalhamento apontam para uma queda do tipo exponencial da luz ao longo do pino e isso possibilitou obter coeficientes de atenuação lineares para os diferentes modelos de pinos estudados. Com os resultados experimentais, é indicada uma forma de calcular a densidade volumétrica média de energia luminosa no interior do pino. As vantagens deste novo método são: (a) os resultados apresentam melhor caracterização das amostras por apresentar mais pontos de medida e (b) pela abertura ótica ser pequena ocorre a garantia de uma melhor resolução de medida.

Palavras-Chaves: Pinos endodônticos. Luz Espalhada. Densidade de Energia.

ABSTRACT

The use of fiber posts in endodontic teeth restorations has been very frequent. These posts have conical shape and it is usually formed by glass fibers packaged in epoxy resin. Microscopy studies were conducted to investigate the structure of four models of fiberglass posts manufactured by FGM (DC 0.5, DC1, DC2 and DC3 models), and it was possible to verify inhomogeneities. The models of posts used in this study are translucent and, in clinical use, it is cemented into the tooth with light curing activated resin. During the clinical procedure of cementing a post in the tooth, light from a curing light impinge at the base of the post transmitting light to its interior. Part of this light is spread out by the side surface of the post. This study proposes a new methodology in order to investigate the spreading of light by endodontic posts in the orthogonal direction to its axis. This methodology fills out an dentist demand, e by means of it, it is possible to obtain light intensity profiles spread out along the length of a post. Comparing to previously published methods, this one uses the phase sensitive detection and the possibility to control the optical aperture in the experiment. The resulting profiles show a like exponential decay of light along the post, which allow us to obtain an linear attenuation coefficient for the different posts models studied. From the experimental results it is shown a way to calculate the light density of volumetric energy inside the post. The advantages of this new method are: (a) the results lead to much better characterization of the samples with more measured points and (b) the small optical aperture that provides better resolution.

Key Words: Endodontic pins. Spread light. Energy density.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Radiografia de um dente despulpado usada para escolha de um pino endodôntico [15].....	11
Figura 1.2 - Esquema de medida empregado em experimento publicado em 2008 [11].	12
Figura 1.3 - Experimento utilizado em 2009 [12].	13
Figura 1.4 - Esquema do equipamento utilizado por Yi-Ching Ho e colaboradores para a medida da luz espalhada por um pino translúcido [13].	14
Figura 1.5 - Reprodução da figura 3, do artigo de Yi-Ching Ho e colaboradores, em 2011 [13]. Na figura, P-Lux e P- White são os pinos utilizado neste experimento.	14
Figura 1.6 - Exemplos de imagens publicadas em 2011 [13]. Em (a), imagem RGB do pino usado no estudo, e em (b) matriz formada a partir da imagem.	15
Figura 2.1 - Kit de pinos endodôntico do fabricante FGM [15].....	16
Figura 2.2 - Preparação dos pinos para MEV. Em (a), pinos fixados pela base em chapa de cobre e em (b), conjunto de pinos cimentados cortados transversalmente.....	18
Figura 2.3 - Corte transversal da região média do pino White Post DC 2. Em (a), disposição das fibras de vidro e do epóxi que as unem e em (b), inhomogeneidade das fibras em disposição e diâmetro.	19
Figura 2.4 - Pino White Post DC 3. Em (a), possíveis irregularidades estruturais no centro do pino e em (b), ampliação da região em destaque em (a).	20
Figura 2.5 - Pino White Post DC 3. Em (a), inhomogeneidade na distribuição de epóxi e em (b), fibras apresentando quebras devido à serra de corte.....	20
Figura 2.6 - Pino White Post DC 1. Em (a), corte transversal ilustrando interface de cimento dual e pino, e em (b), corte meridional ilustrando disposição das fibras ao longo do comprimento do pino.....	22
Figura 2.7 - Pino White Post DC 0.5 espalhando luz que incidiu em sua base (foto do autor).....	22
Figura 2.8 - Ponta do Pino White Post DC 0.5 (foto do autor).	23
Figura 2.9 - Um esquema mostrando um pino de fibra iluminado por um feixe de luz de intensidade I_0 . Num ponto no interior do pino, a intensidade se reduz a I_d e parte da luz é transmitida, I_t	24
Figura 2.10 - Um esquema mostrando as variáveis utilizadas no cálculo da densidade volumétrica de energia no interior do pino translúcido.....	25

Figura 2.11 - Esquema representativo das condições impostas ao sistema a ser desenvolvido (fonte: o autor).....	26
Figura 2.12 - Esquema simplificado do primeiro sistema de medida desenvolvido.	27
Figura 2.13 - Fotografia do primeiro tubo detector idealizado para o sistema (fonte o autor).....	28
Figura 2.14 - Exemplo de perfil de medida obtido com o primeiro sistema de medida desenvolvido.....	29
Figura 2.15 - Diagrama de elementos usados no cálculo da abertura óptica.....	30
Figura 2.16 - Segunda versão do equipamento de medida.	31
Figura 2.17 - Fenda de entrada. Em (a), destaque das ranhuras usinadas internamente para bloquear a luz indesejada; (b) a fenda sendo usada para medir a luz espalhada por um pino.	32
Figura 2.18 - (a) Uma simulação da perda de área iluminada da fenda de entrada; (b) a simulação do problema apresentado mostrando a necessidade de controle de abertura de fenda na direção horizontal e vertical.	33
Figura 2.19 - Fotografia da vista superior mostrando a fenda implementada ao sistema e que acompanhava o movimento de translado do pino.....	34
Figura 2.20 - Esquema simplificado da versão final do equipamento desenvolvido.	35
Figura 2.21 - Controle das aberturas óticas	36
Figura 3.1 - Resultado experimental do pino DC 0.5 obtido com o equipamento desenvolvido.....	37
Figura 3.2 - Uma fotografia em detalhe mostrando que no interior do pino existem pontos em que há uma maior concentração de luz espalhada. Esses pontos (indicados por um segmento de reta) acabam gerando um aparente ruído na medida.....	38
Figura 3.3 - Resultado experimental do perfil de espalhamento do pino DC 1 obtido com o equipamento desenvolvido.	39
Figura 3.4 - Resultado experimental do perfil de espalhamento do pino DC 2 obtido com o equipamento desenvolvido.	39
Figura 3.5 - Resultado experimental do perfil do pino DC 3 obtido com o equipamento desenvolvido.....	40
Figura 3.6 - Esquema geométrico simplificado obtido a partir do perfil de um dos pinos em estudo. A partir dele, pode-se mostrar como pode aparecer um aumento de intensidade na região da ponta do pino.	41

Figura 3.7 - Os resultados experimentais normalizados e ajustados para cada um dos pinos estudados nessa dissertação.	42
Figura 3.8 - Ajuste realizado considerando uma região ampliada para a mesma medida apresentada na figura 3.7.	43
Figura 3.9 - Apresentação dos resultados obtidos numa nova condição de análise através de um processo de linearização.	45
Figura 3.10 - Uma comparação dos resultados experimentais com dados gerados a partir de uma simulações obtidas com o auxílio do coeficiente de atenuação linear determinado.	46
Figura 3.11 - Resultado para a obtenção dos parâmetros sob uma visão mais criteriosa e através do uso do processo de linearização para o pino DC 3.	47
Figura 3.12 - Resultado do pino DC 3 simulado com os novos parâmetros.	48
Figura 3.13 - Uma imagem das dimensões do pino DC 2.	49
Figura 3.14 - Perfil de espalhamento White Post DC 2 indicando porcentagem de decaimento em dois pontos distintos.	49
Figura 3.15 - Medidas realizadas para o pino DC 0.5 mantendo-se a mesma abertura horizontal para a fenda de entrada e afastando-se a fenda da superfície do pino.	51
Figura 3.16 - Aplicação comparativa do método de análise desenvolvido para os três resultados apresentados na figura 3.15.	51
Figura 3.17 - Resultados obtidos para o pino DC 0.5 em que se manteve a separação entre a superfície do pino e a fenda de entrada constante e mudou-se a abertura da fenda horizontal.	52
Figura 3.18- Resultados obtidos nas condições apresentadas para a figura 3. Nesse caso foi aplicado o processo de análise de resultados implementado nessa dissertação.	52
Figura 3.19 - Os resultados da dependência do parâmetro de atenuação linear em função do afastamento da superfície do pino da fenda de entrada horizontal e em função da abertura da fenda horizontal.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1- Características geométricas dos pinos endodônticos FGM [15].	17
Tabela 3.1 - Resumo dos valores dos parâmetros de atenuação linear seguindo dois critérios distintos para a região de ajuste. Na coluna 2, os ajustes foram realizados na região (0,45 – 8,00) mm. Na coluna 3, a região foi de (1,00 – 7,00) mm.	43
Tabela 3.2 - Resumo dos valores dos parâmetros de atenuação linear seguindo dois critérios distintos para a região de ajuste. Na coluna 2, os ajustes foram realizados na região (0,45 – 8,00) mm. Na coluna 3, a região foi de (1,00 – 7,00) mm.	45

SUMÁRIO

1. Introdução.....	11
2. Amostras, cálculo da densidade média de energia e método de medida.....	16
2.1 Descrição das amostras	16
2.2 Análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV)	18
2.3 – A luz espalhada por um pino translúcido.....	22
2.4 Cálculo da densidade volumétrica de energia.....	23
2.5 Descrição experimental.....	26
3. Resultados e discussões.....	36
3.1 Resultados experimentais	37
3.2 Obtenção dos coeficientes de atenuação linear.....	41
3.3 Determinação da densidade volumétrica de energia para o pino DC 2	48
3.4 Estudo da relação existente entre o coeficiente de atenuação linear e o afastamento da fenda de entrada da superfície do pino	50
4. Conclusões	55
5. Referências	57

1. INTRODUÇÃO

Dentes tratados endodonticamente perdem parte da estrutura dentária, principalmente da dentina e, portanto, ficam enfraquecidos. Essa perda da estrutura ocorre devido a fraturas coronárias, a erosões ou até mesmo lesões cariosas [1-8]. Os pinos endodônticos são dispositivos intrarradiculares, empregados em restaurações, e atuam no reforço da estrutura do dente danificado. Há vários modelos diferentes de pinos endodônticos disponíveis comercialmente, sendo os mais comuns e utilizados atualmente os pinos translúcidos de fibra de vidro.

O uso de pinos translúcidos de fibra de vidro em restaurações de dentes é preferido por ser estético, apresentar menor incidência de fratura radicular e por possuir módulo de elasticidade próximo ao da dentina [1-3]. A figura 1.1 ilustra a escolha de um pino endodôntico na restauração de um dente. Pode-se observar a posição que o pino terá em seu interior, através de uma radiografia. A ponta do pino ocupa uma posição denominada como terço apical, seguida do terço médio e a base do pino ocupa a região coronal do dente

Figura 1.1 - Radiografia de um dente despolpado usada para escolha de um pino endodôntico [15].



A fixação desse dispositivo no interior do dente é feita por um cimento resinoso que tem sua cura por fotoativação. Por isso a luz que é transmitida por pinos de fibra de vidro tem sido investigada por diferentes técnicas nas últimas décadas.[1-8].

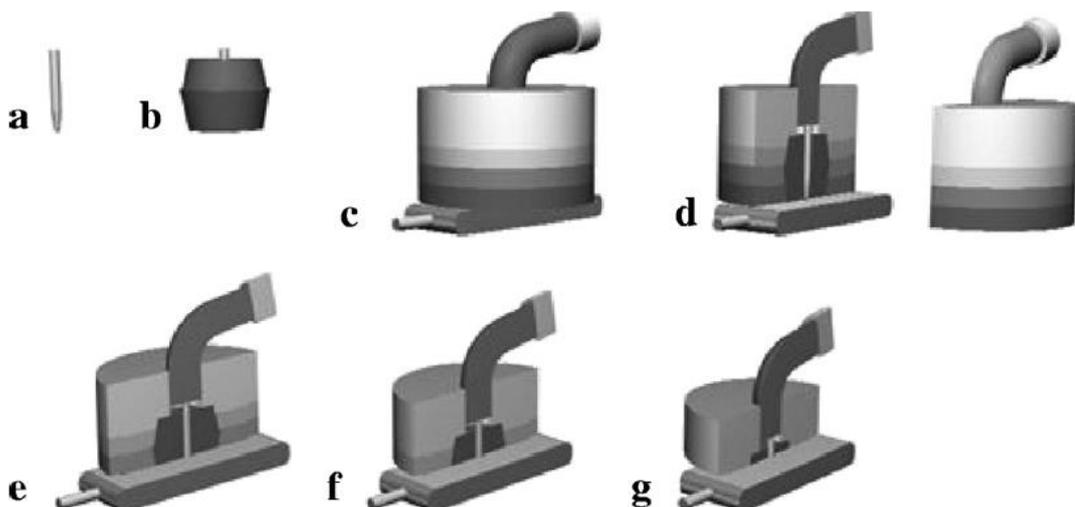
Em 2006, um microscópio ótico acoplado com um espectrômetro foi usado para medir a luz transmitida através do pino [9]. Nesse experimento, pinos de fibra foram cortados com aproximadamente 10 mm de comprimento e todas as amostras foram estudadas a partir de sua

extremidade inferior. Na técnica, somente a luz transmitida foi estudada e seus valores em porcentagem foram derivados para um comprimento de onda próximo a 470 nm. A escolha desse comprimento de onda se deve ao fato de os fotopolimerizadores empregados para a cura do cimento das restaurações dentárias utilizarem luz com esse comprimento de onda. Em geral, os aparelhos fotopolimerizadores modernos contém unidades de luz LED (Light Emitting Diode), e apresentam potências variadas.

Um estudo mais aprofundado desses tipos de pinos de fibra foi realizado em 2008, com medidas de espectrofotometria radial, em diferentes modelos de pinos, bem como na sua região apical [10]. Nesse estudo, o pino de fibra foi cortado com 15 mm de comprimento, tendo a ponta como referência, e medições da intensidade de luz espalhada foram realizadas a 2, 5 e 8 mm, medidos a partir da ponta. A quantidade de fótons transmitidos radialmente através dos pinos de fibra foi medida com um espectrofotômetro acoplado a uma fibra óptica de 50 μm . Todo o cuidado foi tomado para evitar interferências do ambiente.

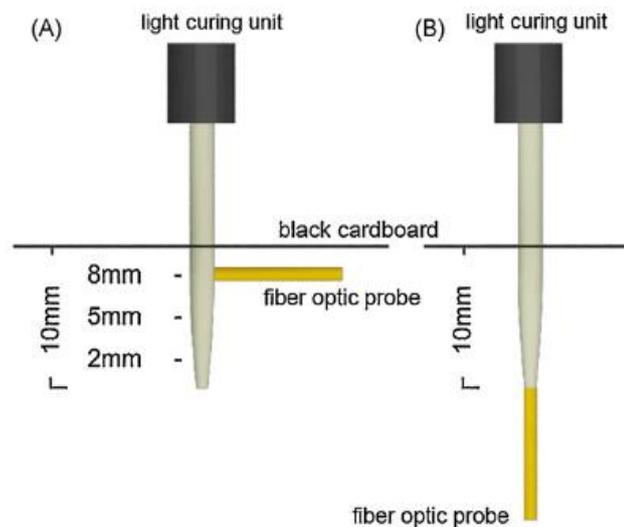
Também em 2008, foi publicada a avaliação quantitativa da energia luminosa transmitida através de diferentes pinos de fibra translúcidos [11]. No estudo, os espécimes foram inseridos num aparelho metálico (figura 1.2 b) especificamente construído para tais estudos. Neste equipamento, manteve-se a fixa a posição entre a fonte de luz, a amostra, e o leitor digital, para cada profundidade medida. Quatro posições radiais ao longo dos pinos de fibra, situadas a 4, 8, 12 e 16 mm de distância da ponta, foram investigadas. O aparelho foi construído de modo a evitar a entrada de qualquer luz externa que não fosse aquela intencionalmente introduzida através da extremidade superior do pino, na direção axial (figura 1.2 d).

Figura 1.2 - Esquema de medida empregado em experimento publicado em 2008 [11].



No ano de 2009 [12], os efeitos da luz transmitida, medidos de forma espectrofotométrica, foram aplicadas para a determinação da transmissão da luz nas regiões cervical, médio e apical. Também estudou-se a transmissão de luz na ponta apical através do novo método [12]. Cada pino de fibra foi posicionado atravessando um cartão preto e a distância entre o cartão e a ponta apical de cada pino foi fixada em 10 mm (figura 1.3). A luz espalhada era coletada por uma sonda de fibra óptica de 50 μm orientada perpendicularmente ao pino.

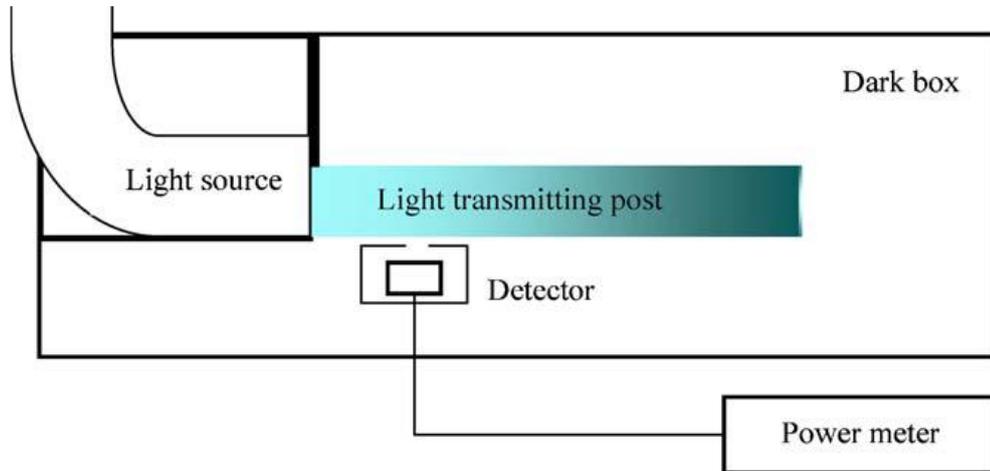
Figura 1.3 - Experimento utilizado em 2009 [12].



Três pontos diferentes ao longo dos pinos (medidos a 2, 5 e 8 mm a partir da extremidade apical) foram investigados. A luz captada pela fibra óptica era, então, analisada por um espectrofotômetro ligado a um computador que executava o software analisador de espectro, definido para operar no modo "Scope". A técnica avaliava a quantidade de luz que se correlacionava diretamente com o número de fótons recebidos no detector do espectrofotômetro, posicionado na região espectral de 470 nm.

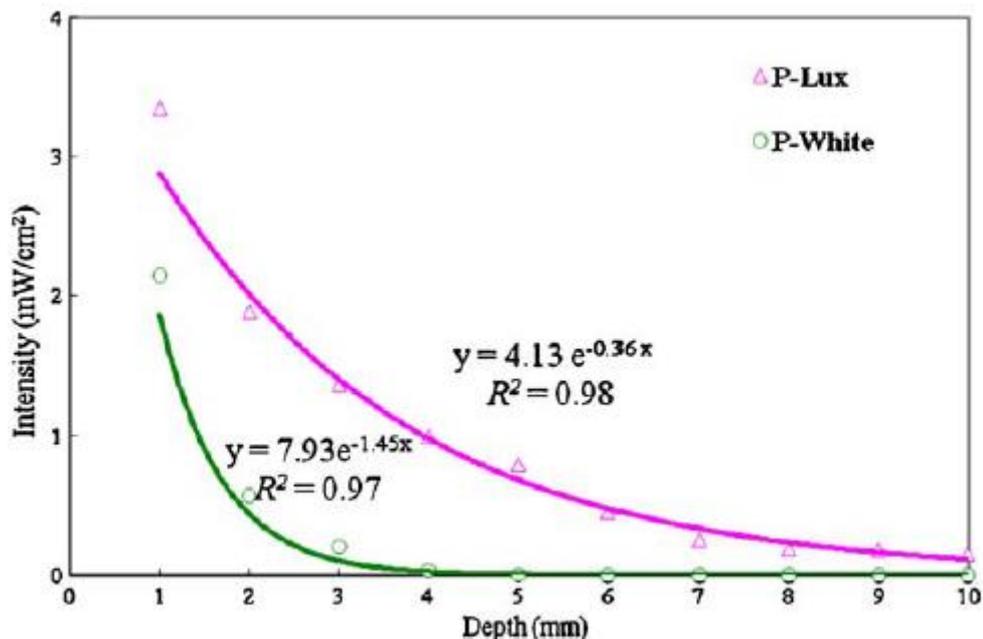
Em 2011, um novo trabalho investigou os efeitos de atenuação da luz em pinos de fibra na polimerização de um cimento resinoso dual-curado e em micro vazamento de dentes pós-restaurados [13]. O esquema utilizado é apresentado na figura 1.4.

Figura 1.4 - Esquema do equipamento utilizado por Yi-Ching Ho e colaboradores para a medida da luz espalhada por um pino translúcido [13].



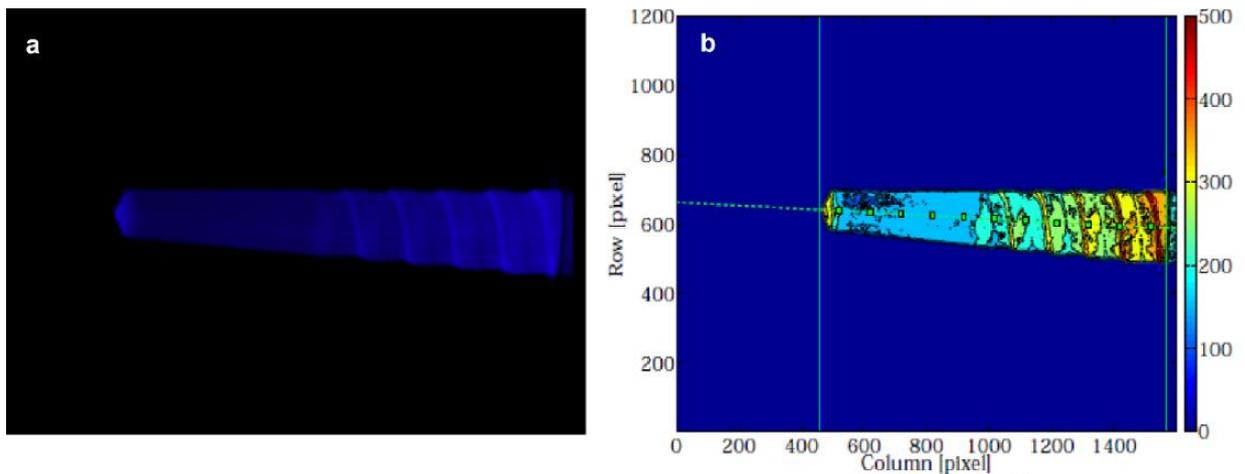
Um LED (Light Emitting Diode) fotopolimerizador foi usado como fonte de luz e os pinos foram cortados com 10 mm de comprimento. Cada pino foi colocado em uma caixa de plástico preta para medir a luz transmitida (figura 1.4). A irradiância da luz através do pino de fibra foi mensurada por um medidor de energia cujo detector de luz foi ajustado para detecção do comprimento de onda de 470 nm. Na técnica, o detector de luz foi coberto por uma capa escura com uma janela de abertura de 1,25 mm de diâmetro. A luz irradiada foi medida em intervalos de 1 mm ao longo do comprimento do pino, no sentido da base para ponta. A reprodução do resultado obtido é apresentada na figura 1.5. Os autores ajustaram os resultados a partir da utilização da lei de Lambert-Beer.

Figura 1.5 - Reprodução da figura 3, do artigo de Yi-Ching Ho e colaboradores, em 2011 [13]. Na figura, P-Lux e P-White são os pinos utilizados neste experimento.



Ainda em 2011, um novo método para estimar a quantidade de luz difundida por um pino de fibra foi apresentado [14]. Nesse trabalho foi feita a descrição de um procedimento de medição por técnica de análise de imagem. As imagens do pino eram registradas por meio de uma câmara digital acoplada a um microscópio (figura 1.6). Em seguida, as imagens eram analisadas.

Figura 1.6 - Exemplos de imagens publicadas em 2011 [13]. Em (a), imagem RGB do pino usado no estudo, e em (b) matriz formada a partir da imagem.



A grande semelhança entre a maioria dos experimentos descritos nas publicações sobre a transmissão e espalhamento da luz por pinos endodônticos, é o uso de fibras óticas na detecção. O problema em utilizar a fibra ótica para detectar a luz está na sua abertura ótica que capta radiação indesejada para os resultados. Também deve-se evidenciar a utilização apenas de técnicas com a utilização de detecção por espectrofotômetros e osciloscópios.

Este trabalho pretende contribuir para essa discussão e resolver alguns problemas apresentados pelos métodos previamente descritos. Assim, ele tem como propósito apresentar um novo método, baseado na técnica de detecção sensível à fase, para determinar o perfil da variação de intensidade de luz espalhada ao longo de um pino de fibra translúcido. Isso permitirá um aumento do conhecimento sobre pinos de fibra translúcidas comerciais, conseqüentemente, levando a melhores resultados em aplicações clínicas e solucionando uma demanda existente na odontologia que é a determinação da densidade de energia média presente em cada região do pino translúcido.

2. AMOSTRAS, CÁLCULO DA DENSIDADE MÉDIA DE ENERGIA E MÉTODO DE MEDIDA

Para atingir a versão final do equipamento proposto muito trabalho foi dispendido em atividades de caracterização. Foi necessário a identificação clara das necessidades a serem atendidas e dos problemas gerados por essas necessidades, e que teriam que ser solucionados. Este capítulo tem exatamente o propósito de explicitar essa trajetória. Inicialmente irá apresentar uma discussão sobre as amostras a serem estudadas e que são provenientes da demanda da odontologia. Em seguida, iniciar-se-á, então, uma viagem em busca do equipamento perfeito. Neste capítulo, cada uma das versões produzidas será descrita com a finalidade de registrar a evolução temporal e os motivos que levaram às modificações em busca da versão final e definitiva que atualmente está em uso.

2.1 Descrição das amostras

As amostras desse trabalho são pinos endodônticos fabricados pela empresa FGM (FGM, Joinville, SC, Brasil). Esses pinos são fabricados em compósito de fibra de vidro e resina epóxi de alta resistência mecânica. No uso clínico, possuem um papel básico de reforçar a estrutura intrarradicular e promover a retenção para o material restaurador definitivo [15]. Em geral, são comercializados em kits como ilustrado na figura 2.1

Figura 2.1 - Kit de pinos endodôntico do fabricante FGM [15]

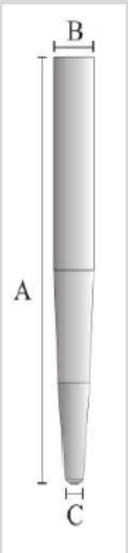


Num kit como o ilustrado, são encontrados pelo menos quatro tipos de pinos distintos. Neste trabalho, foram utilizados os seguintes: Whitepost DC 0.5, DC 1, DC 2 e DC 3. DC é a nomenclatura usada pelo fabricante para indicar que o pino tem dupla conicidade. São pinos

que, segundo o fabricante, facilitam a adaptação preservando ao máximo a dentina intrarradicular para o alojamento do pino e também ajudam a manter maior resistência na região cervical. Os modelos investigados possuem grandes diferenças em suas dimensões geométricas, que estão expostas na tabela 1.1 [15].

Tabela 1.1- Características geométricas dos pinos endodônticos FGM [15].

Whitepost DC	A (mm)	B (mm)	C (mm)	B/C	ΔR (mm)
0.5	20	1.4	0.65	2.15	0.375
1	20	1.6	0.85	1.88	0.375
2	20	1.8	1.05	1.71	0.375
3	20	2.0	1.25	1.60	0.375



Para um mesmo pino, há três regiões com formas bem definidas, uma primeira parte com formato cilíndrico, uma parte intermediária na forma de um tronco de cone e a terceira parte do pino com forma de cone. A ponta tem um acabamento arredondado e, em geral, os pinos apresentam simetria radial. Não há indicação precisa fornecida pelo fabricante que permita identificar o ponto em que começa ou termina cada uma das regiões que o formam.

Na tabela 1.1, inclui-se uma análise comparativa entre o diâmetro da base do pino endodôntico, medida “B”, e a sua ponta, indicada como medida “C”. Essa razão representa a conicidade do pino. Quanto mais próximo a um, mais o formato do pino se aproxima do formato cilíndrico. A razão B/C é, portanto, uma comparação entre o raio na ponta do pino endodôntico em relação ao raio de sua base.

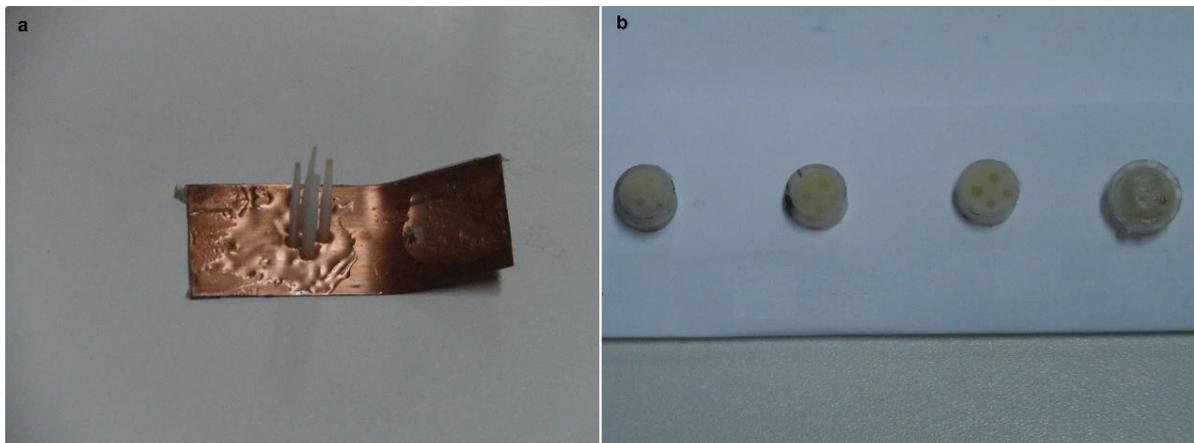
Na última coluna está indicada a variação ΔR . Esse parâmetro representa a diferença entre o raio da base do pino endodôntico e o raio de sua ponta. Percebe-se que para os quatro modelos de pinos utilizados, a variação do raio é a mesma. Logo, conclui-se que o que mudou de um modelo de pino para outro é a taxa com que essa perda de raio acontece no decorrer do comprimento do pino (medida A).

2.2 Análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Um estudo detalhado da estrutura dos pinos foi realizado por microscopia eletrônica de varredura (MEV-VEGA3 TESCAN). Para isso foram preparadas amostras de pinos para a investigação. Pinos de modelos diferentes foram cortados transversalmente para o estudo. Foram utilizados quatro pinos White Post sendo um pino de cada tipo: DC 0.5, 1, 2 e 3.

Cada pino foi limpo com papel toalha e álcool 46 GL. Os quatro modelos de pinos tiveram suas bases afixadas em uma pequena chapa de cobre, como ilustrado na figura 2.2-a. Um recipiente do tipo eppendorf, transparente, foi preenchido com cimento dual *Allcem* também do fabricante FGM (FGM, Joinville, SC, Brasil), e mergulhou-se o conjunto de pinos nesse recipiente. A fotoativação do cimento se deu com uso de um laser 473 nm. Após um período de 24h, reservado para garantir a cura do cimento, o recipiente contendo as amostras foi cortado transversalmente em quatro partes como ilustrado na figura 2.2b. Para o corte foi usando uma serra de disco diamantado. A seguir as superfícies cortadas foram polidas com lixa d'água de carboneto de silício de granulação 800 e 1200, respectivamente.

Figura 2.2 - Preparação dos pinos para MEV. Em (a), pinos fixados pela base em chapa de cobre e em (b), conjunto de pinos cimentados cortados transversalmente.

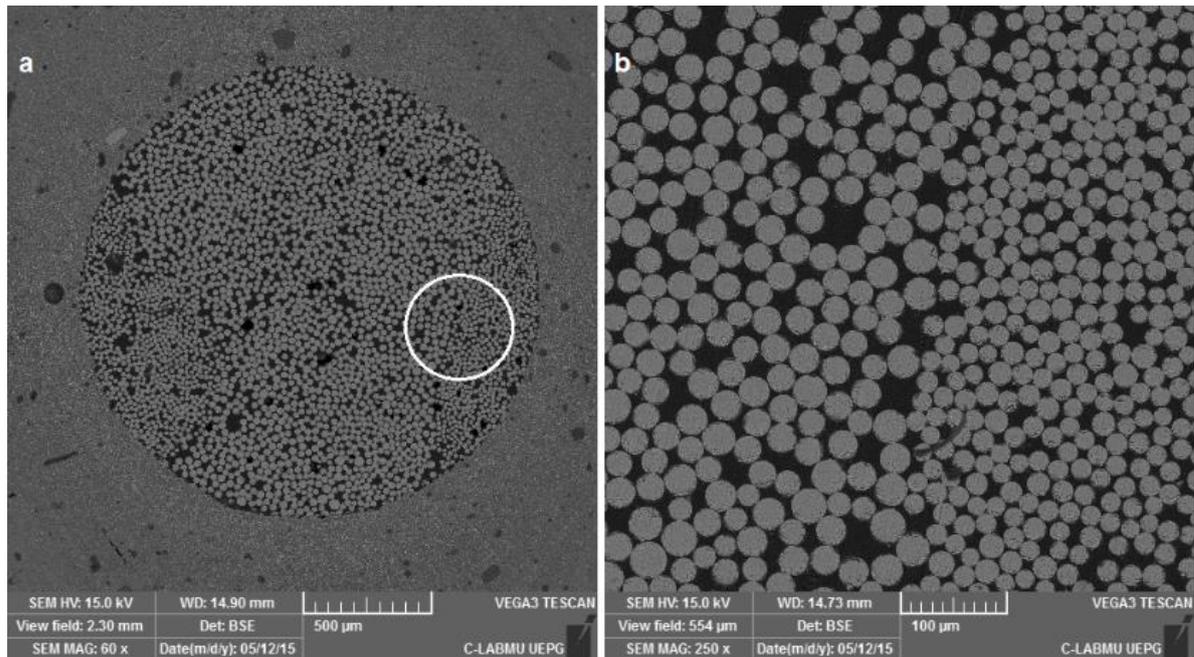


As amostras foram limpas com papel toalha umedecido em álcool e encaminhadas para análise por MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura). Por não serem condutoras, as amostras foram metalizadas, ou seja, passaram por um processo em que receberam sobre sua superfície uma fina camada metálica. Essa camada, em ouro, teve basicamente a função de eliminar campos elétricos estáticos durante o processo de produção de imagem. Dentre as imagens obtidas, aponta-se alguns detalhes estruturais que são destacados na figura 2.3.

Na figura 2.3, percebem-se aspectos da distribuição de fibras de vidro, que são os círculos acinzentados em meio ao epóxi que as une (espaços pretos). Em (a) observa-se que não

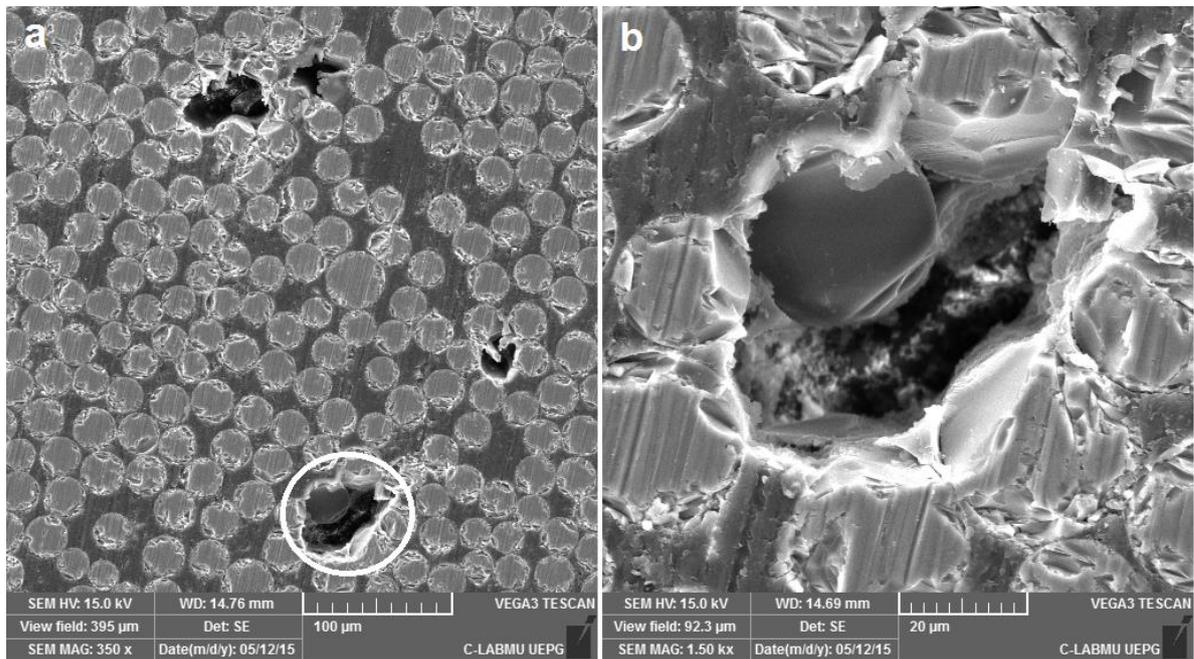
há regularidade na disposição das fibras, havendo regiões de maior concentração de fibras com diâmetro menor e outras regiões com menor concentração de fibras de vidro de diâmetros maiores, em relação a área total da secção do pino. Percebe-se ausência de fibras em vários pontos do corte desse pino.

Figura 2.3 - Corte transversal da região média do pino White Post DC 2. Em (a), disposição das fibras de vidro e do epóxi que as unem e em (b), inhomogeneidade das fibras em disposição e diâmetro.



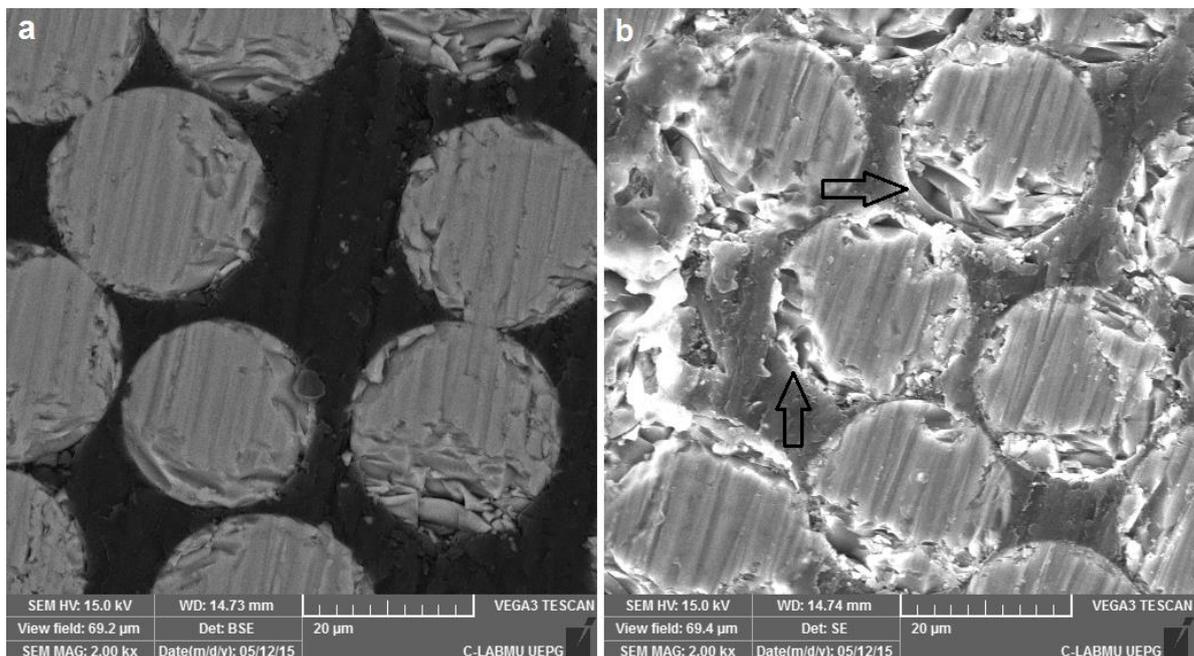
A região destacada pela circunferência branca na figura 2.3a, foi ampliada em 2.3b destacando-se a falta de homogeneidade na distribuição das fibras, e em relação ao diâmetro de cada fibra. Em geral, não se verifica padrão algum na forma com que a distribuição das fibras é feita ou nos diâmetros das mesmas.

Figura 2.4 - Pino White Post DC 3. Em (a), possíveis irregularidades estruturais no centro do pino e em (b), ampliação da região em destaque em (a).



Além de não ter um padrão estrutural em nível microscópico, há algumas irregularidades na superfície dos pinos endodônticos caracterizadas por ausência de material (figura 2.4). É possível que essas “bolhas” (figura 2.4b) sejam próprias do interior do pino e se comportem como centros espalhadores de luz, impactando, ao menos localmente, na quantidade de luz transmitida e espalhada. Essas irregularidades apontadas na figura 2.4 também podem ter surgido no processo de corte das amostras.

Figura 2.5 - Pino White Post DC 3. Em (a), inhomogeneidade na distribuição de epóxi e em (b), fibras apresentando quebras devido à serra de corte.

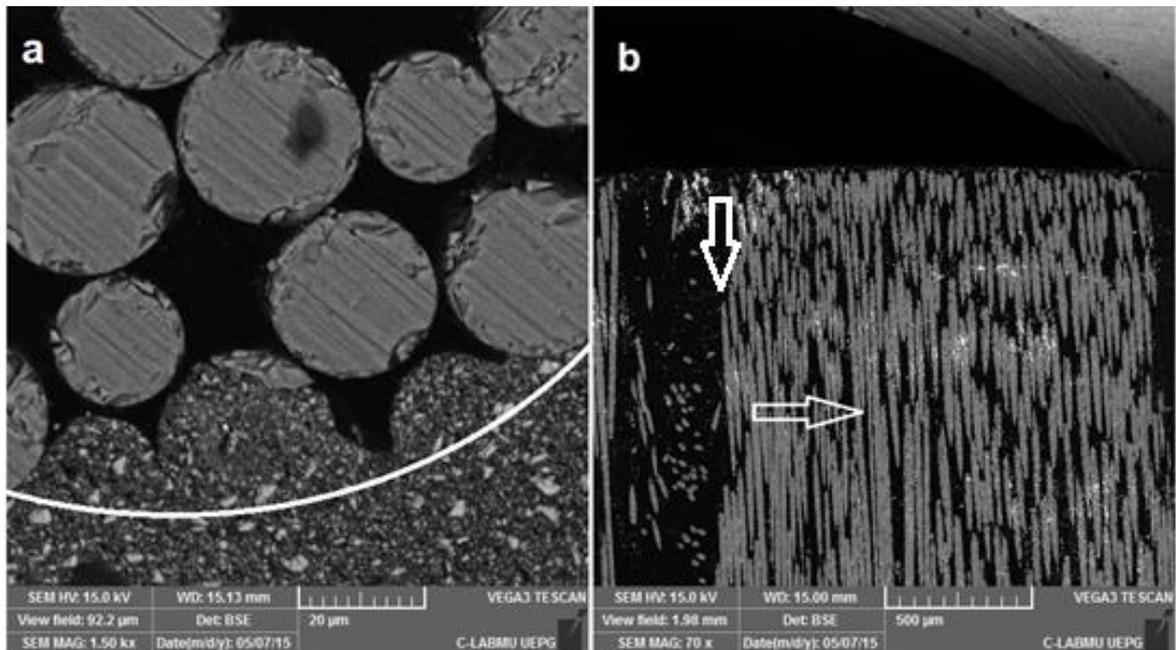


Outras irregularidades podem ser melhor observadas na figura 2.5. Em (a) temos ilustrada a distribuição sem uniformidade do epóxi. Observa-se que ele envolve as fibras do pino, ajudando a manter a rigidez do conjunto. Já na imagem (b), é possível evidenciar a existência de trincas nas fibras (indicadas pelas setas), provavelmente decorrentes do processo de corte das amostras. Irregularidades como essas também são elementos que podem se comportar como centros espalhadores de luz. A observação dessas irregularidades após o corte é também importante porque em uso clínico normalmente os pinos são cortados com serra de disco de desbaste antes da utilização. Esse corte é realizado para o ajuste do pino na cavidade do dente.

A parte (a) da Figura 2.6 mostra a imagem obtida para um corte transversal da região cônica de um dos pinos analisados. Observa-se a tendência circular na superfície, ilustrada pela linha branca. Contudo, há rompimentos não uniformes das fibras mais externas do pino na região da mudança da conicidade. Isso nos leva a hipótese de que, no processo de fabricação dos pinos, na retirada de material da superfície para moldar seu formato, há o aparecimento de “ranhuras” na superfície que, na restauração do dente acabam por ser preenchidas por cimento dual, ajudando a manter a adesão. Sendo assim, a superfície lateral dos pinos endodônticos apresenta superfícies localmente irregulares. Essa característica certamente influencia na distribuição de luz espalhada a partir do interior do pino.

Por último, temos uma imagem, da figura 2.6b, da estrutura do pino em corte meridional. Observam-se as fibras organizadas na direção do comprimento do pino endodôntico e envolvidas em epóxi (seta horizontal). Na interface do pino com o cimento dual, é verificado o rompimento de fibras (seta vertical).

Figura 2.6 - Pino White Post DC 1. Em (a), corte transversal ilustrando interface de cimento dual e pino, e em (b), corte meridional ilustrando disposição das fibras ao longo do comprimento do pino.

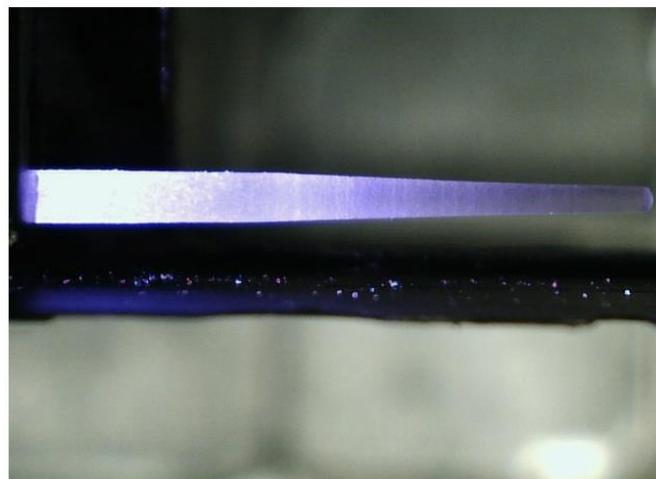


A partir das imagens de MEV, constata-se que os pinos endodônticos não são meios homogêneos, e possuem em sua estrutura variadas formas de centros espalhadores. Essa descrição da estrutura dos pinos White Post contribui ao entendimento dos resultados de luz espalhada que se apresentará nos próximos capítulos.

2.3 – A luz espalhada por um pino translúcido

A luz que incide na base deste tipo de pino endodôntico, é em parte transmitida e em parte espalhada. A Figura 2.7 ilustra o espalhamento de um feixe de laser de diodo de 473 nm.

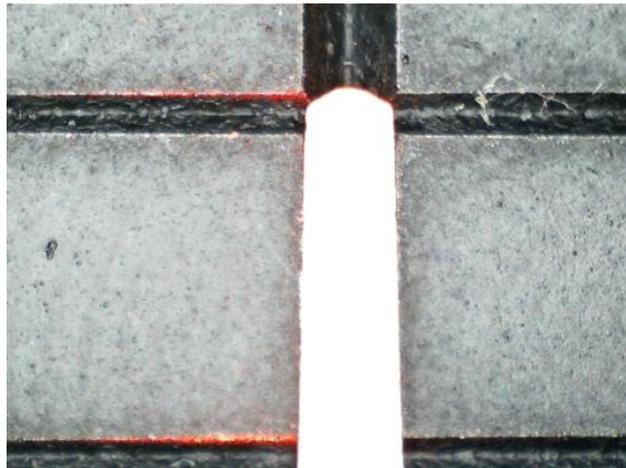
Figura 2.7 - Pino White Post DC 0.5 espalhando luz que incidiu em sua base (foto do autor).



Na parte cônica do pino representado na figura 2.7, observam-se ranhuras em sua superfície na forma de anéis. Elas se destacam devido à luz que o atravessa. Ainda na figura 2.7 percebe-se que os detalhes da geometria são bem tênues e quase não se identifica a dupla conicidade. Há um brilho intenso na região próxima a sua base e este brilho vai sendo atenuado ao longo do pino. Em sua ponta, percebemos novamente um brilho, contudo bem menos intenso se comparado à base. Esse brilho provém da reflexão interna gerada quando a luz incide sobre a interface pino/ar.

A ponta dos pinos White Post, como ilustrado na figura 2.8, é arredondada e isso causa um efeito de reflexão de parte da luz que chega no sentido de dentro para fora do pino endodôntico. Sendo assim, vista de um ponto interno do pino, sua ponta se assemelha a um espelho côncavo, fazendo a luz refletida reforçar a intensidade da luz espalhada nas proximidades da ponta do pino.

Figura 2.8 - Ponta do Pino White Post DC 0.5 (foto do autor).



2.4 Cálculo da densidade volumétrica de energia

Quando um feixe de luz refrata para o interior de um material homogêneo e isotrópico, a lei de Lambert-Beer permite determinar a intensidade do feixe no interior do material a uma distância d do ponto de refração. A lei estabelece que:

$$I_d(d) = I_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot d) \quad (1)$$

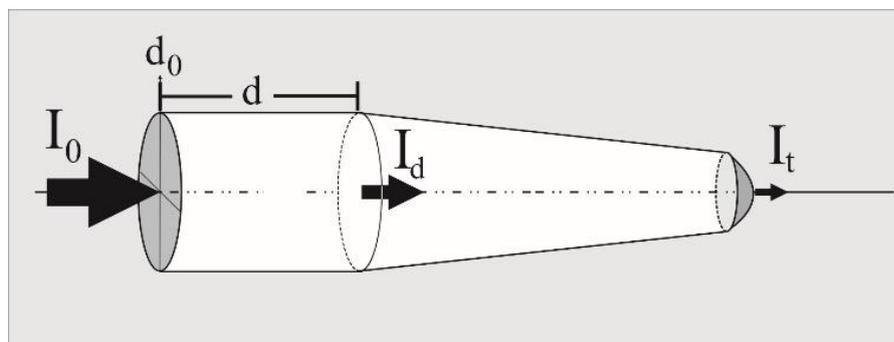
em que I_0 é a intensidade do feixe que incidiu sobre a superfície, I_d é a intensidade do feixe no ponto d no interior do material e medido a partir da superfície de incidência e λ é o coeficiente de atenuação linear.

Esse não é exatamente o tratamento neste caso. Entretanto, como uma primeira aproximação, essa ideia será utilizada para descrever os resultados. Não é um procedimento novo pois já foi adotado por Yi-Ching Ho e colaboradores em 2011 (13). O que se pretende, aqui, é dar uma solução mais específica à demanda dos profissionais que utilizam os pinos endodônticos translúcidos. Ou seja, a principal questão a ser respondida é como determinar a quantidade de energia luminosa que atinge cada região do pino translúcido. Essa determinação tem por objetivo definir o tempo de excitação necessário para a fotoativação do cimento dual e garantir o melhor desempenho e resultado clínico.

A lei de Lambert-Beer não pode ser aplicada exatamente porque o material em estudo não é homogêneo e nem isotrópico. No entanto, considerações obtidas a partir do emprego da lei de Lambert-Beer podem auxiliar na determinação da densidade volumétrica de energia no interior do pino translúcido. A lei intuitivamente diz que o processo de espalhamento é um processo que influencia na diminuição da intensidade de luz no interior do material. Ou seja, isso significa que a luz espalhada pelo pino transporta com ela a informação de quão grande é a intensidade do feixe em dado ponto d no interior do pino translúcido.

Na figura 2.9 é apresentada uma representação de pino translúcido no formato dos trabalhos desta dissertação. Uma quantidade de luz I_0 incide sobre a superfície da base do pino. O feixe que atravessa o pino vai perdendo intensidade e possui valor I_d em dado ponto. E parte do feixe é transmitido, com intensidade I_t .

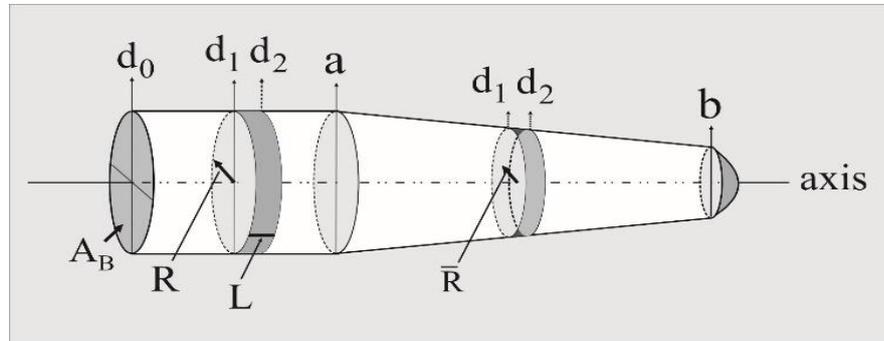
Figura 2.9 - Um esquema mostrando um pino de fibra iluminado por um feixe de luz de intensidade I_0 . Num ponto no interior do pino, a intensidade se reduz a I_d e parte da luz é transmitida, I_t .



Levando em consideração o que já foi dito, pode-se calcular a densidade volumétrica média de energia no interior do pino. Seja $I_1(d_1)$ a intensidade do feixe no ponto d_1 , $I_2(d_2)$ a intensidade do feixe no ponto d_2 (figura 2.10). Seja também V o volume de pino definido pelas superfícies perpendiculares em relação ao eixo nos pontos d_1 e d_2 . O volume pode ser calculado por:

$$V = (\pi R^2) \cdot L \quad (2)$$

Figura 2.10 - Um esquema mostrando as variáveis utilizadas no cálculo da densidade volumétrica de energia no interior do pino translúcido.



Dessa maneira a densidade volumétrica de energia pode ser calculada como:

$$\rho = \frac{|I_1(d_1) - I_2(d_2)|}{V} \quad (3)$$

Na figura 2.10 o ponto a identifica o ponto a partir do qual o pino translúcido começa a variar da forma cilíndrica para a cônica. A partir desse ponto é necessário considerar-se um valor médio para o raio que é utilizado no cálculo do volume de pino, como indicado na figura.

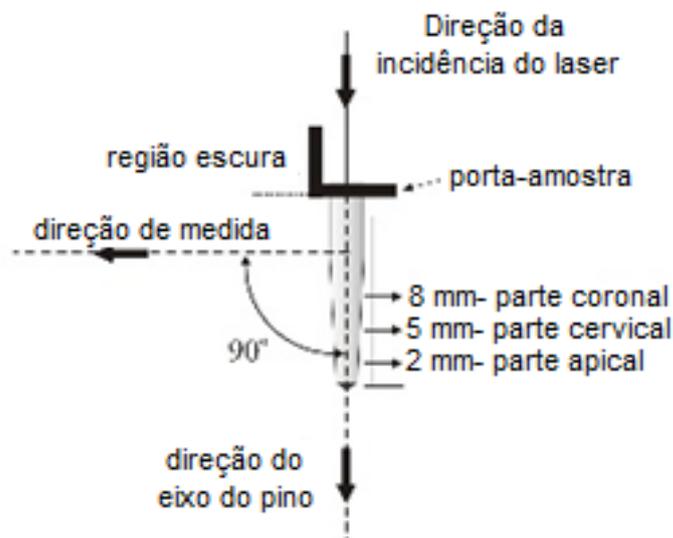
No ponto d_2 , a intensidade I_2 é menor que a intensidade I_1 no ponto d_1 . Isso significa que dentro deste volume de pino o feixe de luz teve sua intensidade reduzida de I_1 para I_2 . Portanto, conclui-se que essa intensidade foi perdida no interior desse volume de pino. É impossível sabermos como essa energia foi perdida, mas é possível afirmarmos que parte dela é espalhada na direção normal à direção do eixo do pino. Assim, essa luz possui a informação de quão intenso está o feixe no interior desse volume. Sabendo-se medir o valor de intensidade em cada ponto no interior do pino, pode-se, a partir da equação 3, determinar a densidade volumétrica média de energia em parte do volume ao longo do pino translúcido. Esse é o objetivo a que se propõe este trabalho.

2.5 Descrição experimental

Anteriormente à preparação do projeto para a confecção do equipamento de medida, foram examinadas as características que seriam necessárias ao equipamento. As condições adotadas seguiram os modelos utilizados em estudos previamente publicados em revistas internacionais da área. A primeira e principal condição referia-se à direção da detecção e determinação da intensidade de luz espalhada como sendo a direção ortogonal à direção do eixo do pino endodôntico.

Um segundo ponto a ser considerado era que o sistema deveria mensurar a intensidade em pelo menos três posições, quais sejam, 2, 5 e 8 mm medidos a partir da ponta do pino (figura 2.11). Com base nesta condição, decidiu-se pelo desenvolvimento de um sistema de detecção ponto-a-ponto com resolução espacial de deslocamento de sistema de translado inferior a 0,1 mm, de forma que não apenas as três posições pudessem ser avaliadas, mas todo o comprimento do pino.

Figura 2.11 - Esquema representativo das condições impostas ao sistema a ser desenvolvido (fonte: o autor).



Por fim, ficou definida a utilização, como fonte de excitação, de um laser pulsado em 480 Hz, de comprimento de onda nominal em 473 nm. Essa escolha se deve ao comprimento de onda escolhido estar dentro da banda espectral de emissão dos aparelhos fotopolimerizadores comercializados e utilizados em aplicações clínicas.

Na figura 2.12 tem-se um esquema simplificado da primeira versão proposta para o equipamento. Uma base foi automatizada com o uso de um motor de passos (1,8 graus/passos) para permitir o translado e posicionamento do pino em frente à fenda de entrada do sistema de detecção. Sobre essa base foram fixados o laser pulsado (Modelo DHOM-T-473) e o porta

amostras (porta pinos). O posicionamento foi feito de modo que o feixe do laser incide diretamente sobre a base do pino endodôntico e na direção paralela ao seu eixo. Não há movimento relativo entre o laser e a amostra. Nesse projeto, devido ao dimensionamento dos equipamentos, a separação entre o laser e a amostra era em torno de 200 mm. Na direção ortogonal ao eixo do pino foi posicionado o tubo detector criado especificamente para o equipamento (Figura 2.12).

Um tubo de 720 mm de comprimento foi desenvolvido contendo em uma de suas extremidades a fenda de entrada e na outra a fotomultiplicadora (EMI 9558). Ao longo do tubo, além da fenda de entrada (de abertura variável de 0 – 2 mm), foram instaladas três fendas de bloqueio (“blocking stop”) e uma fenda de saída (de abertura variável de 0 – 2 mm). A fenda de entrada define a abertura ótica do sistema. A fenda de saída tem papel de auxiliar no controle de intensidade de luz incidente sobre o detector. As fendas de bloqueio auxiliam no bloqueio de sinais luminosos indesejados e que podem diminuir a relação sinal/ruído do sistema de detecção. Devido ao dimensionamento das peças, foi necessário instalar uma fenda de bloqueio lateral, de formato retangular, cujo objetivo era barrar luz espalhada não proveniente diretamente da fatia de pino que estava sendo medida.

Figura 2.12 - Esquema simplificado do primeiro sistema de medida desenvolvido.

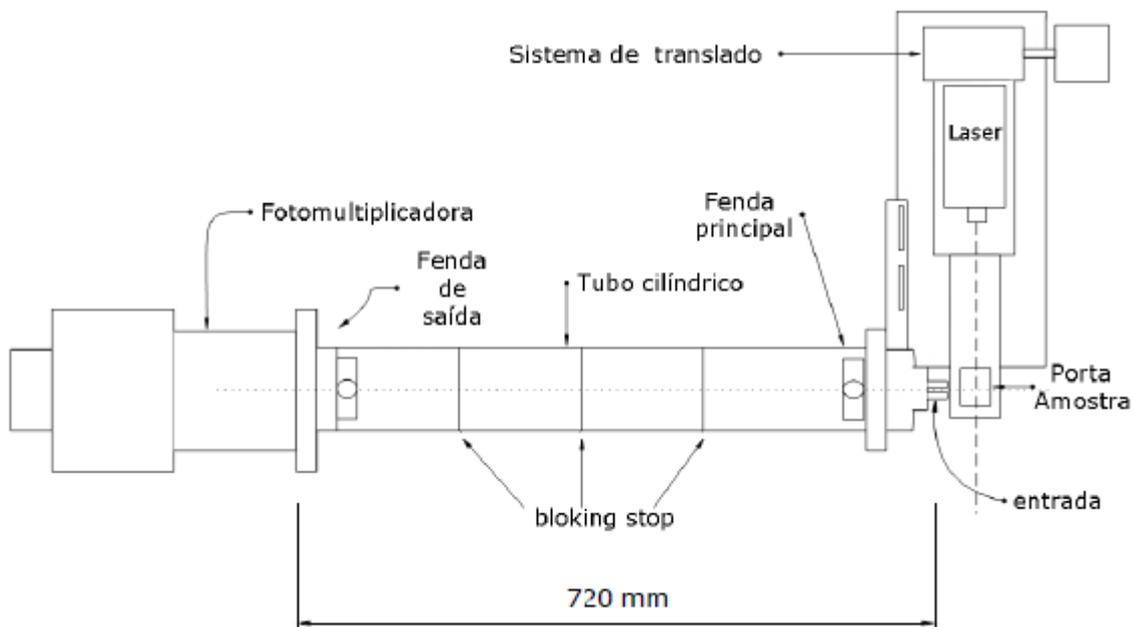


Figura 2.13 - Fotografia do primeiro tubo detector idealizado para o sistema (fonte o autor).

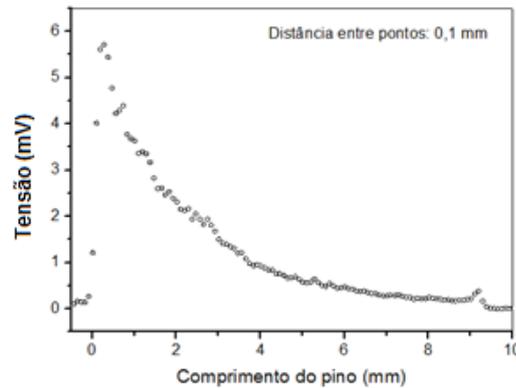


A figura 2.13, mostra o tubo cilíndrico acoplado a fotomultiplicadora e a disposição das fendas no equipamento. Esse arranjo pertencia a primeira versão do sistema de medida proposto neste trabalho, e foi aperfeiçoado durante o trabalho com o objetivo de melhorar a qualidade dos resultados experimentais.

De forma geral, o sistema possui o seguinte funcionamento: o feixe de laser pulsado incide sobre a base do pino. Uma parte da luz é transmitida ao longo do pino e dessa luz transmitida, parte é espalhada na direção radial do pino. Uma amostragem dessa luz espalhada, na direção ortogonal ao eixo do pino, entra no tubo de detecção e cruza através dele incidindo sobre o fotocatodo da fotomultiplicadora. O sinal luminoso é então convertido num sinal elétrico diretamente proporcional à intensidade de luz incidente no fotocatodo. Esse sinal elétrico pode ser mensurado e obtém-se o resultado pretendido.

É nessa fase que está a grande diferença entre os métodos de medida até então empregados e o novo método de medida aplicado ao sistema proposto. No sistema proposto está sendo empregada a técnica de detecção de fase com o uso de um amplificador do tipo “lock-in” (modelo SR 530) para se determinar a amplitude do sinal elétrico a ser medido [16]. O funcionamento do lock-in necessita de um sinal de referência, que é determinado pela frequência de modulação do laser, neste caso 490 Hz. Como resultado final, tem-se o gráfico apresentado na figura 2.14.

Figura 2.14 - Exemplo de perfil de medida obtido com o primeiro sistema de medida desenvolvido.



O gráfico da figura 2.14 mostra que para cada posição medida em milímetros (eixo das abscissas) temos uma mensuração da intensidade de luz espalhada medida em volts (eixo das ordenadas), sendo esse valor diretamente proporcional à intensidade de luz que incidiu sobre o fotocátodo da fotomultiplicadora. Portanto, o gráfico acima mostra um perfil de como muda a intensidade de luz espalhada ao longo do pino. Esse é o típico resultado que é registrado no equipamento de medida desenvolvido.

No exemplo, os pontos registrados estão separados por uma distância de 0,1 mm. Esse avanço de deslocamento do pino e o armazenamento do resultado mensurado de cada ponto são tarefas realizadas pelo computador que gerencia todo o sistema. Um programa foi especificamente desenvolvido para esse gerenciamento.

Deve-se ressaltar que o porta amostras (figura 2.11) foi constituído de maneira que a luz de excitação não é detectada pelo sistema de detecção na posição inicial de medida. Dessa forma, preservamos no próprio resultado (gráfico) o ponto de referência de medida, ou região escura, quando não há qualquer luz espalhada chegando ao detector. À medida que o pino começa a ser transladado em frente à fenda de entrada, a fenda passa a ser iluminada pela luz espalhada. A translação é feita a partir da base e em direção à ponta do pino. Assim sendo, quando a fenda é completamente iluminada, atinge-se o ponto de máxima intensidade de luz a ser medida. A luz espalhada sofre redução de intensidade ao longo do comprimento do pino, em direção à ponta. Ao passar a ponta do pino não há mais luz espalhada e o sistema de detecção volta a indicar um valor medido igual a zero.

Da descrição acima, dois pontos devem ser evidenciados: (i) o resultado registra um referencial de medida na própria medida que é o nível de zero de intensidade; (ii) em função

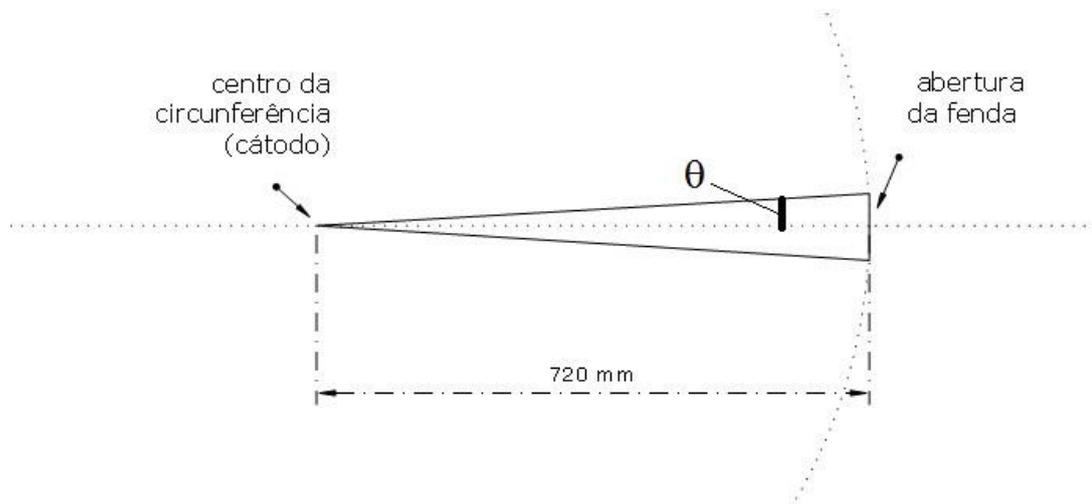
das mensurações de zero de intensidade no início e no final da medida, criou-se uma maneira de determinação do tamanho do pino que está em análise.

Essa foi a primeira versão do equipamento que entrou em operação no laboratório. Como característica a ressaltar temos que as fendas utilizadas no sistema foram todas posicionadas na direção vertical, ou seja, com abertura na direção horizontal. Esse detalhe é importante porque através da abertura da fenda obtém-se a abertura óptica horizontal (A.O.) do tubo detector (equação 4).

$$A. O. = n. \text{sen}(\theta) \quad (4)$$

Na equação (4), n é o índice de refração do meio e $\text{sen}(\theta)$ é definido na figura 2.15.

Figura 2.15 - Diagrama de elementos usados no cálculo da abertura óptica



Utilizando o valor de distância entre o fotocátodo e a fenda indicado na figura 2.15, e considerando a abertura da fenda de entrada igual a 0,10 mm, pode-se calcular o valor da abertura óptica horizontal para o tubo detector como sendo de:

$$A. O. = 1. \text{sen}(\theta) \approx \theta = \frac{0,5 \cdot 0,10 \text{ mm}}{720 \text{ mm}} = 0,000069 \quad (5)$$

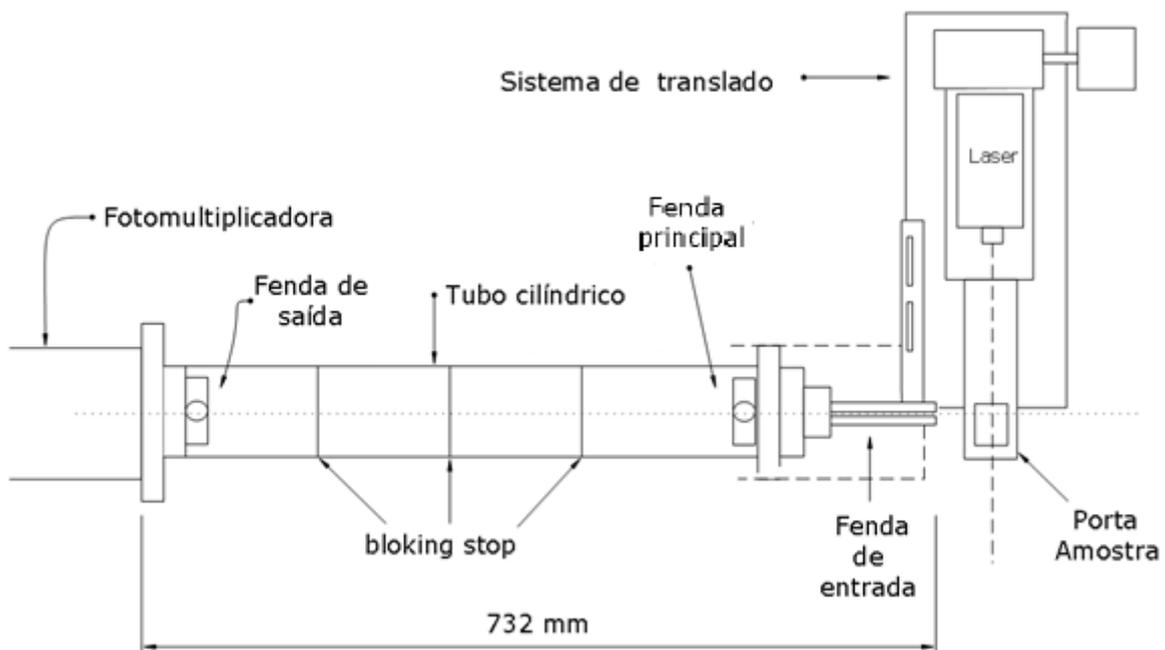
A abertura óptica é um número importante para o sistema porque ele define qual é a dimensão da “fatia” de pino que está espalhando luz na direção do detector. Segundo o valor acima, teríamos uma fatia de pino igual a 0,101 mm selecionada pela abertura de fenda de 0,10 mm. Isto é devido à pequena abertura óptica do sistema e pelo fato da fenda de entrada ficar a uma distância de apenas 10 mm da superfície do pino. Ou seja, a definição da fatia de pino

analisada fica quase que aproximadamente igual à dimensão da fenda de entrada. É uma boa estimativa.

Apesar da pequena abertura ótica, esse sistema mostrou-se instável. A fenda de entrada permitia a criação de múltiplas reflexões de luz provenientes de outras regiões espalhadoras do pino, mesmo tendo sido implementada uma fenda de bloqueio lateral na entrada do tubo. Essa luz era espalhada para o interior do tubo. Como consequência, tínhamos um resultado que possuía contribuições das reflexões na fenda de entrada e, portanto, era não reproduzível.

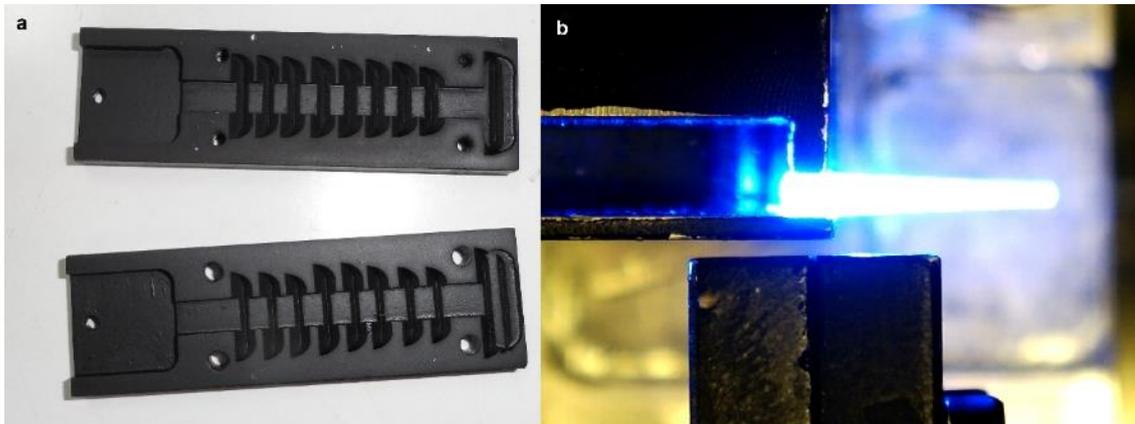
Surgia a segunda versão do equipamento (figura 2.16). A principal modificação para a segunda versão foi o projeto da fenda de entrada. Na figura 2.17a, uma fotografia mostra a parte interior da nova fenda de entrada projetada. Várias ranhuras foram feitas ao longo da fenda que possuía um comprimento de 120 mm. Um valor fixo de abertura de fenda foi estipulado e dimensionado em função dos processos de usinagem. Essa abertura ficou ajustada em 0,6 mm.

Figura 2.16 - Segunda versão do equipamento de medida.



Na figura 2.17-b, uma visão de como a fenda ficava posicionada em relação à amostra.

Figura 2.17 - Fenda de entrada. Em (a), destaque das ranhuras usinadas internamente para bloquear a luz indesejada; (b) a fenda sendo usada para medir a luz espalhada por um pino.



Quando instalada, essa nova fenda alterou a abertura ótica do sistema para o valor igual a:

$$A. O. = 1. \text{sen}(\theta) \approx \theta = \frac{0,5 \cdot 0,6 \text{ mm}}{840 \text{ mm}} = 0,00036 \quad (6)$$

O equipamento nessa versão apresentou bons resultados porque, além de solucionar o problema de entrada de luz, também permitiu maior aproximação entre a superfície do pino e a fenda de entrada. Por outro lado, tivemos perda espacial. Como a nova fenda elevou a abertura ótica horizontal do sistema, a fatia de pino que espalha luz para o interior do tubo também foi aumentada. Seguindo o mesmo raciocínio de estimativa apresentado anteriormente, podemos estimar uma fatia de 0,6 mm de pino espalhando luz para o interior do tubo detector.

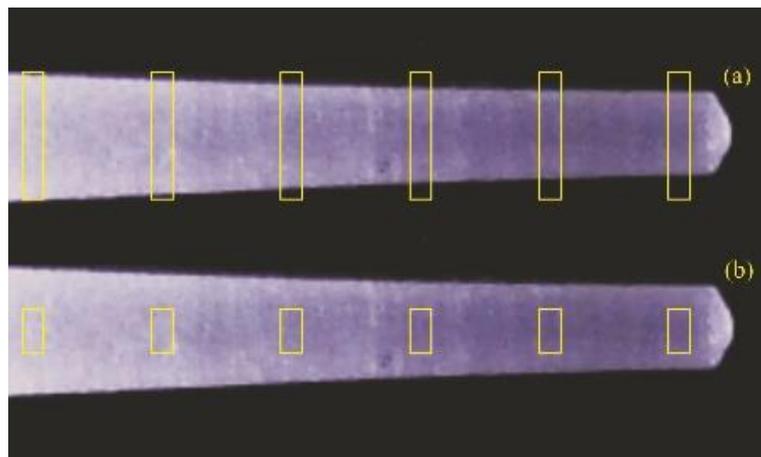
Da fotografia da figura 2.17b, percebe-se também como ocorria a fixação do pino para a medida nesta segunda versão. O processo de fixação acabava utilizando aproximadamente 4 mm do pino em estudo. Por outro lado, a fenda no início da medida ficava escondida atrás do porta-amostras. Nessa região a fenda de entrada está obstruída para a luz e é a região que permite criar o referencial de medida, que denominamos de zona escura.

Apesar dos avanços conquistados, nesta segunda versão um novo problema apareceu: o alinhamento do sistema. O laser de excitação e o pino estavam acoplados a uma mesma base, movendo-se conjuntamente, de forma que o alinhamento do laser em relação ao posicionamento do pino podia ser garantido. No entanto, o sistema de translado do pino não estava acoplado ao tubo de detecção. Ambas as partes eram unidas apenas pelas suas bases de fixação. O que

acontecias, por vezes, é que, durante a medida, o pino, ao se deslocar em frente à fenda de entrada, alterava seu posicionamento em relação ao eixo ótico do tubo de detecção. Com isso perdia-se o alinhamento do sistema. Esse desalinhamento influenciava diretamente na medida e gerava uma não reprodutibilidade dos resultados.

Além disso, ao se tentar solucionar esse problema, descobriu-se que a perda de massa espalhadora (diminuição do volume do pino) influenciava diretamente no resultado. Na figura 2.18a temos uma representação desse novo problema a ser solucionado. Como o pino tem um perfil cônico, e a medida é feita da base em direção à ponta, à medida que o pino translada na frente da fenda de entrada, um volume menor do pino espalha luz. Se a fenda de entrada, no sentido vertical, for grande o suficiente para “perceber” essa diferença, a intensidade de luz espalhada medida estará influenciada por essa diminuição de massa, ou seja, haverá menos luz chegando à fotomultiplicadora por falta de material do pino. O gráfico mostrará uma queda de intensidade por esse efeito, adicionado juntamente com o que realmente se quer avaliar. Na figura 2.18b está ilustrada uma simulação da possível solução para o problema com a delimitação de entrada de luz no tubo através de uma fenda com abertura na direção horizontal e vertical.

Figura 2.18 - (a) Uma simulação da perda de área iluminada da fenda de entrada; (b) a simulação do problema apresentado mostrando a necessidade de controle de abertura de fenda na direção horizontal e vertical.



Para tentar solucionar os dois novos problemas presentes, foi confeccionada uma fenda de abertura de 0,2 mm com comprimento maior do que o tamanho do pino em estudo. Essa fenda foi manualmente presa no suporte de fixação de medida de maneira a garantir o alinhamento ótico do sistema. Na figura 2.19 é apresentada uma fotografia da vista superior da nova composição. Veja que ao lado do pino e ao longo dele há uma estrutura metálica que é

maior do que o tamanho do pino. Nesta estrutura metálica foi confeccionada a fenda de abertura fixa de 0,2 mm.

Figura 2.19 - Fotografia da vista superior mostrando a fenda implementada ao sistema e que acompanhava o movimento de translado do pino.



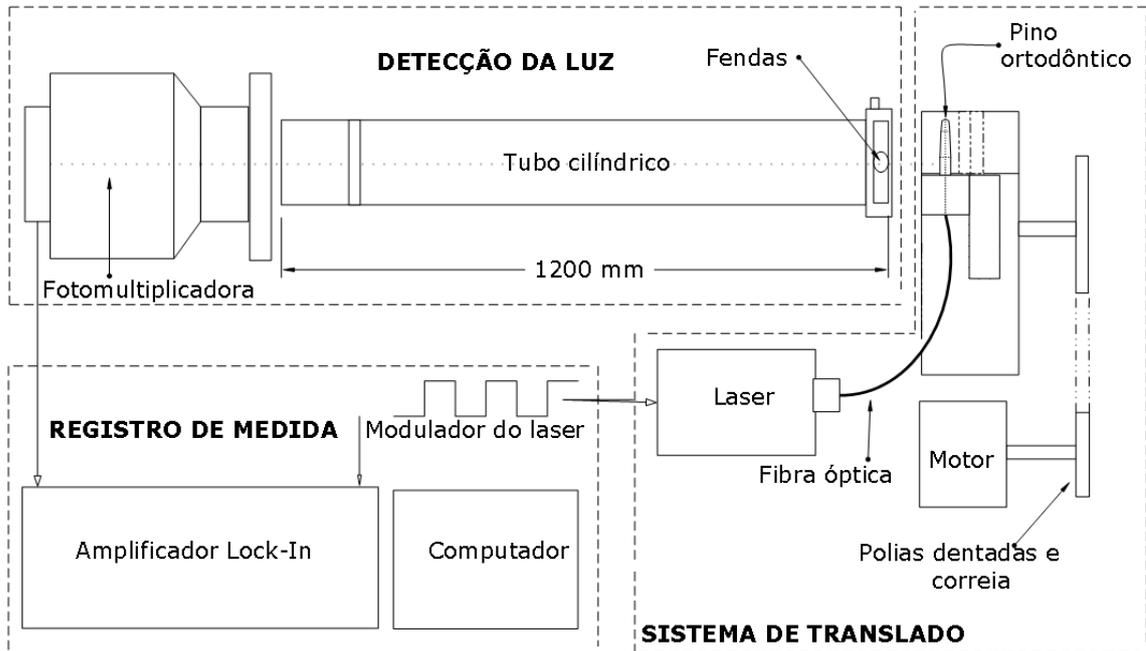
Com essa nova configuração, o sistema apresentou melhoras, mas não suficientes para eliminar completamente o problema relativo ao alinhamento ótico necessário entre a direção de deslocamento do pino e o eixo ótico do tubo de detecção. Um novo projeto seria necessário e é o que será apresentado a partir de agora.

Para a terceira versão todos os problemas a serem solucionados eram conhecidos, em especial aquele referente ao alinhamento ótico. Sendo assim, o novo projeto teve três grandes mudanças em sua concepção: (i) a fixação do sistema de translado no mesmo referencial (base) das fendas de entrada; (ii) a composição de um sistema de entrada com definições de aberturas óticas vertical e horizontal e; (iii) a excitação da amostra através do uso de fibra ótica.

Ao acoplarmos o tubo de detecção ao sistema de translado, tivemos como ganho o alinhamento ótico gerado no processo de usinagem das peças. O mesmo ocorrendo para o posicionamento das fendas de entrada. E, de fato, a nova composição das peças de sustentação permitiu e facilitou o processo de alinhamento do sistema. Por fim, a implementação da excitação por fibra ótica permitiu que o sistema fosse miniaturizado facilitando a automação do translado. Nesse novo desenvolvimento a fonte de excitação (ponta da fibra) estava presa à base do pino, fazendo com que o feixe de excitação fosse completamente direcionado para dentro do pino.

Na figura 2.20 é apresentado o esquema da terceira versão ou versão definitiva para o sistema proposto. Ela pode ser dividida basicamente em três partes: o sistema de translado; o sistema de detecção e o sistema de medida e gerenciamento.

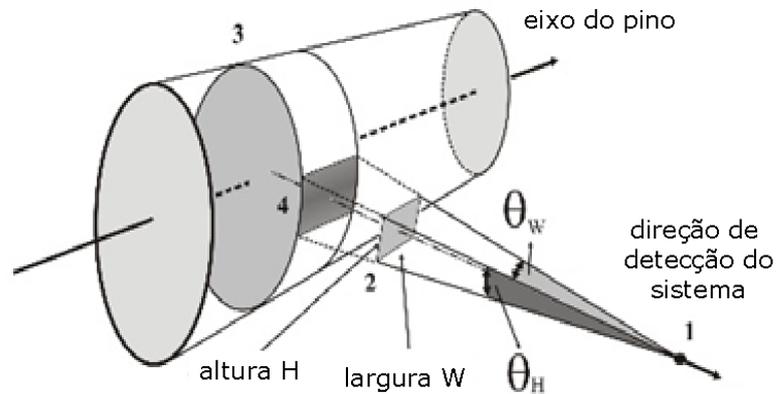
Figura 2.20 - Esquema simplificado da versão final do equipamento desenvolvido.



A excitação é feita através de fibra ótica e por isso, foi possível desenvolver um porta-amostras que possui possibilidade de ajuste do alinhamento do pino em frente à fenda de entrada do tubo de detecção. Essa nova forma de excitação permitiu manter em 2 mm a distância entre a fenda de entrada e a superfície do pino em estudo e resolveu o problema de perda de alinhamento horizontal. O sistema de translação permitiu uma resolução espacial de 0,018 mm por passo do motor, valor cinco vezes menor do que aquele pretendido no projeto original, que era de 0,10 mm. Apenas para esclarecer essa resolução não está relacionada com a fatia de pino que é selecionada através da abertura ótica do tubo detector. Está sendo definido aqui o menor passo de translação que o sistema de translação pode ter. Em outras palavras, pode-se medir um valor de intensidade espalhada a cada 0,018 mm.

O sistema de detecção teve uma forte alteração em relação aos anteriores. Tinha-se a necessidade de controle das aberturas óticas vertical e horizontal do novo sistema (Figura 2.20).

Figura 2.21 - Controle das aberturas óticas



Por esse motivo o tubo de detecção foi ampliado para uma nova composição de 1200 mm de comprimento. Dessa maneira, e considerando que a abertura das fendas como estimativa inicial seja de 0,15 mm, pode-se calcular as seguintes aberturas óticas para o tubo de detecção:

$$A.O. (vertical) = 1. \text{sen}(\theta) \approx \theta = \frac{0,5 \cdot 0,15 \text{ mm}}{1200 \text{ mm}} = 0,000062 \quad (7)$$

$$A.O. (horizontal) = 1. \text{sen}(\theta) \approx \theta = \frac{0,5 \cdot 0,15 \text{ mm}}{1200 \text{ mm}} = 0,000062 \quad (8)$$

Na figura 2.21 está a representação dessas aberturas óticas. Dela percebe-se que, na composição de ambas as aberturas, é definida uma área de abertura de fenda que é projetada sobre a superfície do pino em estudo. É através dessa área que sairá do interior do pino o fluxo de energia que permitirá determinar a intensidade de luz espalhada pelo pino.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.

Um novo método de aquisição de dados para detectar a intensidade de luz espalhada por pinos translúcidos é proposto. Os resultados são gráficos de intensidade da luz espalhadas ao longo do comprimento dos pinos. Nesse capítulo são apresentados resultados para pinos White Post DC 0.5, 1, 2 e 3. Embora os pinos sejam comercializados com 20 mm de comprimento, para fins das aplicações clínicas eles são cortados. Neste trabalho, apresentam-se resultado para pinos cortados com comprimento de 13 mm. Esse tamanho também se ajusta às publicações

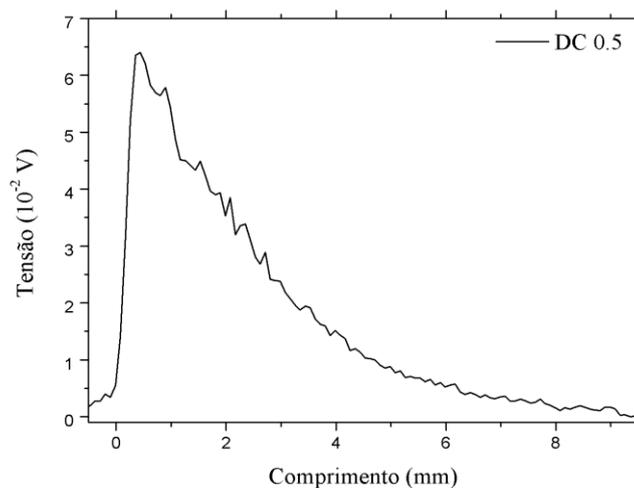
internacionais da área, nas quais usualmente os pinos são analisados a 2, 5 e 8 mm de distância da ponta.

Inicialmente será feita uma breve apresentação dos resultados, evidenciando detalhes que se considera importantes e que somente foram possíveis de serem obtidos devido ao novo método adotado. Em seguida, os resultados serão linearizados com o objetivo de determinar o parâmetro de atenuação linear em cada caso. Então, é feita uma comparação entre os resultados experimentais e o resultado de exponenciais simuladas a partir dos parâmetros de atenuação linear obtidos no processo de análise. A finalidade desse procedimento é a validação da qualidade do ajuste experimental obtido. Na sequência, é introduzido um exemplo do cálculo da densidade volumétrica de energia, principal objetivo dessa dissertação. Finalizando, um estudo para demonstrarmos a dependência do parâmetro de atenuação linear com as condições de medida será apresentado, sugerindo a necessidade de cautela na análise dos resultados obtidos neste tipo de mensuração.

3.1 Resultados experimentais

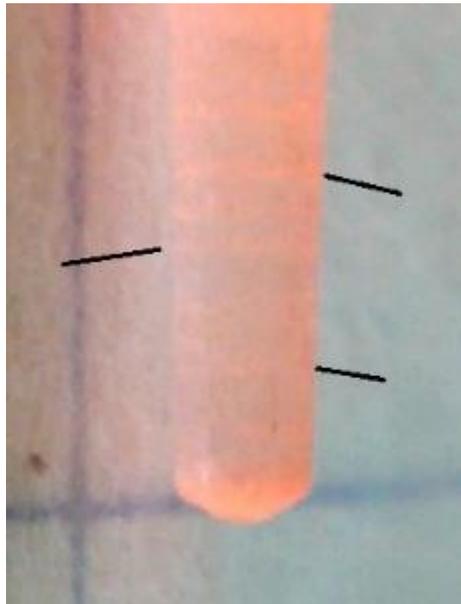
Todos os pinos utilizados nesse trabalho foram cortados com comprimento de 13 mm. Desse comprimento, 4 mm são utilizados para a fixação do pino no porta-amostras, de forma que todos os espectros que serão apresentados possuem cerca de 9 mm de comprimento de pino em análise. Esses quatro primeiros milímetros são perdidos na fixação, mas são importantes para a medida porque criam a zona escura que gera o sinal de referência de zero de sinal a ser medido. Na figura 3.1 é apresentado o resultado do perfil típico do pino DC 0.5.

Figura 3.1 - Resultado experimental do pino DC 0.5 obtido com o equipamento desenvolvido



Do resultado apresentado na figura 3.1 ressalta-se que no início da medida tem-se o referencial de zero de intensidade de luz. Em seguida, o pino começa a ser transladado em frente à fenda de entrada; a fenda passa a ser iluminada, atingindo seu valor máximo de iluminação logo a seguir. A partir desse ponto, a intensidade vai reduzindo seu valor até atingir o menor valor de intensidade na região da ponta do pino. Após cruzar pela ponta do pino, o sinal volta a indicar o valor zero porque não há mais luz espalhada. Na figura, outras duas coisas podem ser ressaltadas: tem-se condições de identificar o tamanho de pino que foi analisado e observa-se um aparente ruído na medida. Esse ruído aparece devido à falta de homogeneidade na estrutura dos pinos, conforme se observou nas imagens de MEV. Ele é gerado por oscilações da intensidade de luz espalhada sendo, portanto, uma característica própria de cada amostra. Na figura 3.2 temos em detalhe esse efeito mostrado a partir de uma fotografia da região da ponta do pino.

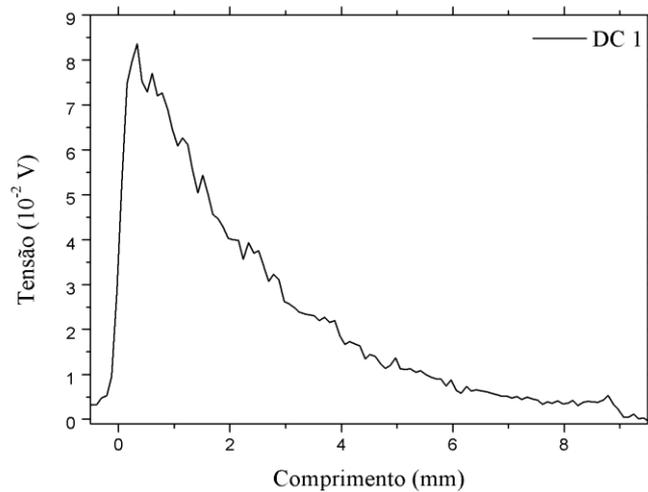
Figura 3.2 - Uma fotografia em detalhe mostrando que no interior do pino existem pontos em que há uma maior concentração de luz espalhada. Esses pontos (indicados por um segmento de reta) acabam gerando um aparente ruído na medida.



Na figura 3.3 é apresentado o resultado obtido para o perfil de espalhamento para o pino DC 1. Percebe-se no resultado as mesmas características já identificadas anteriormente, ou seja, no início da medida temos um sinal de referência que também é observado no final da medida. O que se tem de diferente é um aumento do sinal na região final da medida em comparação ao resultado obtido para o pino DC 0.5. Esse aumento é um indicativo que uma maior quantidade de luz está chegando até a ponta do pino. Também se percebe um aumento de intensidade na

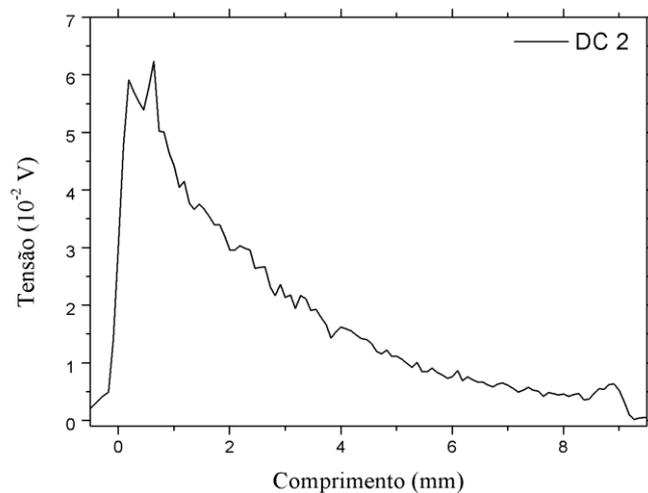
extremidade do pino. Na fotografia da figura 3.2 é visualmente perceptível esse resultado de espalhamento.

Figura 3.3 - Resultado experimental do perfil de espalhamento do pino DC 1 obtido com o equipamento desenvolvido.



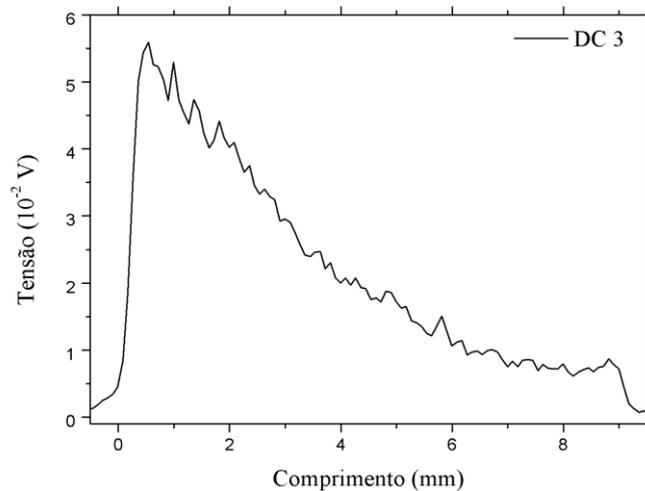
Na figura 3.4 é apresentado um resultado para o pino DC 2. As mesmas características estão presentes. Entretanto, agora temos uma característica marcante na ponta do pino. Inicialmente percebe-se um aumento de nível na intensidade comparativamente aos pinos anteriores. Esse resultado demonstra definitivamente que mais luz está chegando até a ponta do pino. Em segundo lugar, percebe-se com mais clareza um aumento de intensidade de luz espalhada ao passar pela ponta do pino.

Figura 3.4 - Resultado experimental do perfil de espalhamento do pino DC 2 obtido com o equipamento desenvolvido.



Por fim tem-se o perfil de intensidade de luz espalhada pelo pino DC 3, que é apresentado na figura 3.5. Desse resultado o que se tem a ressaltar é o ganho de intensidade na região da ponta do pino e novamente um aumento de intensidade ao passar pela ponta do pino.

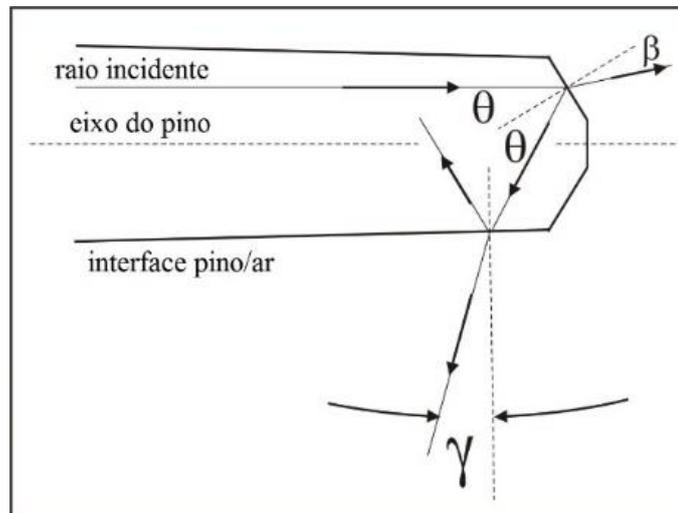
Figura 3.5 - Resultado experimental do perfil do pino DC 3 obtido com o equipamento desenvolvido.



Em geral, as comparações dos resultados indicam que as mudanças nas dimensões geométricas dos pinos influenciam diretamente no resultado da intensidade de luz espalhada. Pinos com maior diâmetro na sua ponta possuem maior valor de intensidade chegando até a sua ponta e pinos com diâmetros maiores espalham maior intensidade de luz. Essas observações permitem uma conclusão direta de que a quantidade de luz espalhada está relacionada ao volume de material espalhador.

Uma consequência direta da chegada de maior quantidade de luz na ponta do pino foi evidenciada na apresentação dos resultados dos pinos DC 2 e DC 3. Em ambos, observou-se um aumento na intensidade de luz espalhada ao se cruzar pela região da ponta do pino. A explicação para esse aumento de intensidade de luz pode ser obtida analisando a representação apresentada na figura 3.6.

Figura 3.6 - Esquema geométrico simplificado obtido a partir do perfil de um dos pinos em estudo. A partir dele, pode-se mostrar como pode aparecer um aumento de intensidade na região da ponta do pino.

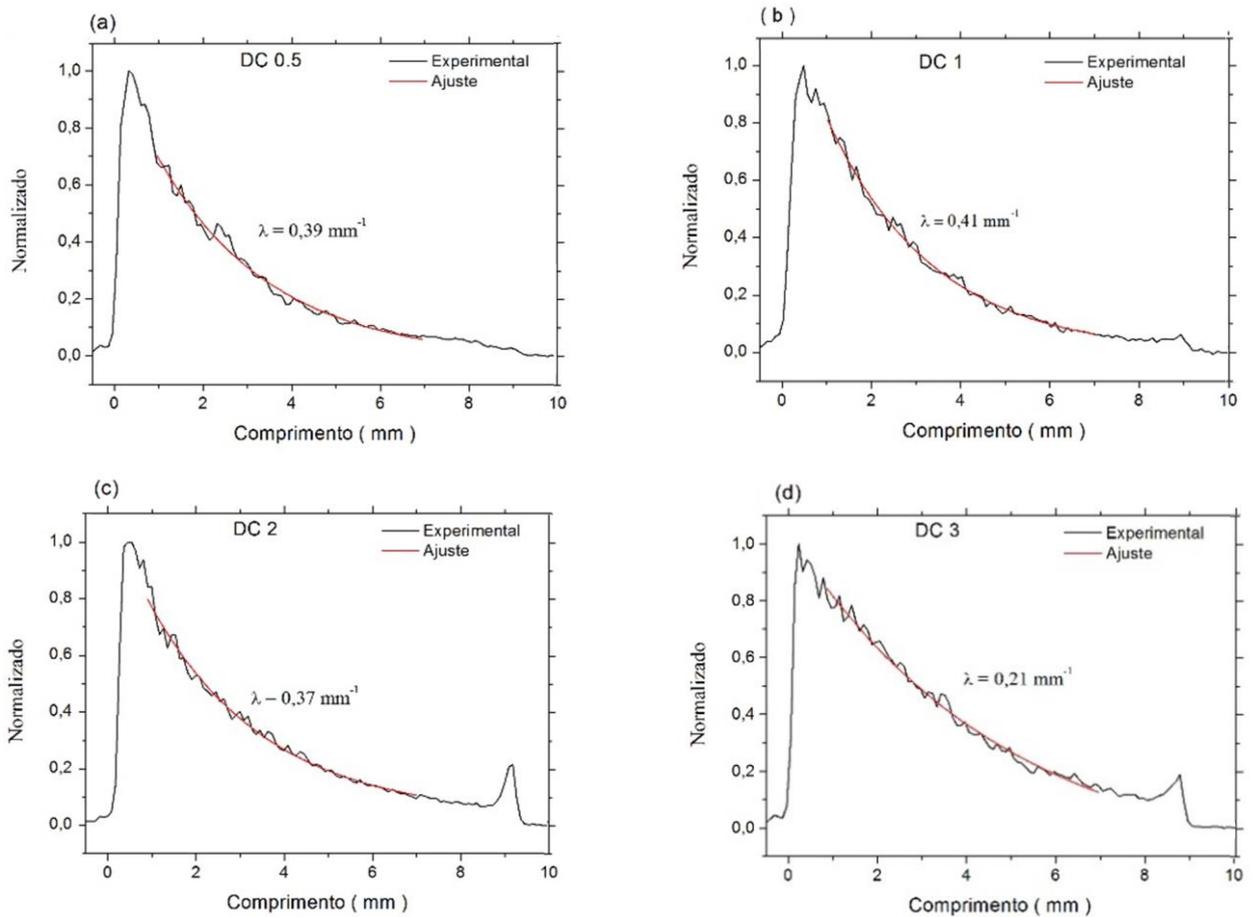


Na figura 3.6 é representado um feixe de luz incidente na interface pino/ar formada na ponta do pino. Esse feixe, ao incidir na interface, sofrerá dois processos: parte será transmitida (refratando para o ar) e parte será refletida pela interface retornando para o interior do pino. Essa parte refletida pode percorrer o pino numa nova direção até incidir novamente numa interface pino/ar. Nessa nova incidência, os processos de reflexão e refração se repetem. O que se tem de diferente é um aumento na intensidade medida se a luz desse feixe refratado estiver dentro do ângulo da abertura ótica do tubo de detecção, quando o tubo cruzar por esse ponto. É o que se observa experimentalmente. E tanto maior será essa reflexão quanto maior a intensidade de luz incidente sobre a superfície pino/ar formada na ponta do pino.

3.2 Obtenção dos coeficientes de atenuação linear

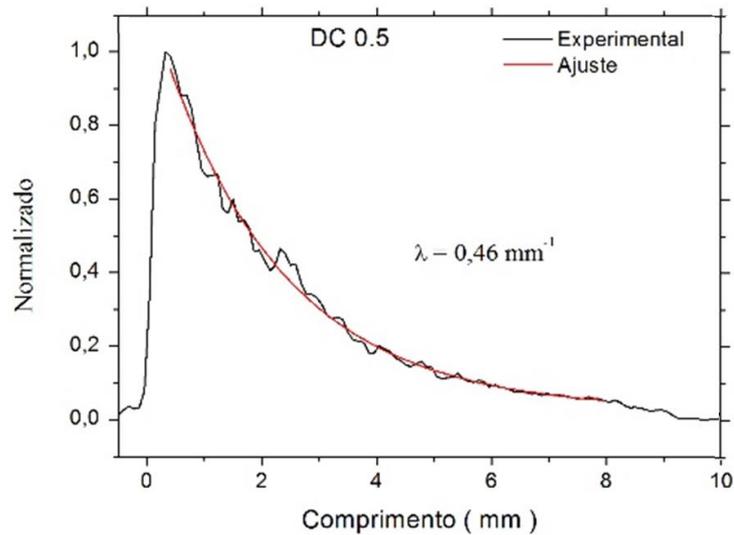
Este trabalho quer aumentar a qualidade de informações e/ou caracterizar com mais detalhes a transmissão e o decaimento da energia luminosa através desses pinos. Na figura 3.7 são apresentadas medidas realizadas com o equipamento desenvolvido para cada um dos pinos estudados; DC 0.5, 1, 2 e 3. Cada resultado foi ajustado utilizando uma função do tipo exponencial decrescente.

Figura 3.7 - Os resultados experimentais normalizados e ajustados para cada um dos pinos estudados nessa dissertação.



Os ajustes apresentados em cada caso são de boa qualidade. No entanto, nessa análise há um problema a ser resolvido e que surge a cada nova medida realizada. Qual é o critério para se determinar os pontos inicial e final de ajuste? Nos resultados acima foi aplicado o critério de se ajustar entre os pontos de 1 e 7 mm. Esse critério tenta eliminar possíveis interferências causados no início ou final da medida e segue os limites dos pontos estudados na literatura que são 2 e 8 mm medidos a partir da ponta do pino. Outro critério poderia ser usado, por exemplo, na figura 3.8 é apresentado um resultado que considera um critério de utilizar o máximo de pontos possíveis deixando 1 mm na ponta devido ao efeito já explicado no item 3.1.

Figura 3.8 - Ajuste realizado considerando uma região ampliada para a mesma medida apresentada na figura 3.7.



Nesse caso, o ajuste também é bom, mas agora o parâmetro de atenuação linear é igual a $0,46 \text{ mm}^{-1}$. Surge a questão: quais dos dois parâmetros é o correto? Na tabela 3.1 temos um resumo dos resultados de ajustes considerando os dois critérios para cada um dos pinos estudados.

Tabela 3.1 - Resumo dos valores dos parâmetros de atenuação linear seguindo dois critérios distintos para a região de ajuste. Na coluna 2, os ajustes foram realizados na região (0,45 – 8,00) mm. Na coluna 3, a região foi de (1,00 – 7,00) mm.

Tipo de pino	(0,45 – 8,00) mm	(1,00 – 7,00) mm
	$\lambda \text{ (mm}^{-1}\text{)}$	$\lambda \text{ (mm}^{-1}\text{)}$
DC 0.5	$0,46 \pm 0,06$	$0,39 \pm 0,13$
DC 1	$0,40 \pm 0,05$	$0,42 \pm 0,08$
DC 2	$0,42 \pm 0,07$	$0,36 \pm 0,09$
DC 3	$0,20 \pm 0,21$	$0,21 \pm 0,39$

Percebe-se que para o pino DC 0.5 os valores são mais distantes entre os ajustes, porém estariam dentro dos erros considerados. Para os demais casos o mesmo não ocorre e os valores estão bastante próximos. Como resultado final deste estudo chega-se à conclusão que os valores dos parâmetros dependerão do critério adotado para a indicação dos valores inicial e final para o ajuste.

Entretanto, numa rápida interpretação dos valores obtidos, percebe-se que estão coerentes com os resultados esperados. Para o pino DC 0.5 a figura 3.7 demonstra que pouca luz atinge a ponta desse pino. Resultado que se traduz no coeficiente de atenuação com um valor mais elevado. Para o pino DC 1 temos a mesma situação. Fica a dúvida em relação a este resultado porque a variação do parâmetro na escolha do critério define o parâmetro. Já para os pinos DC 2 e 3 há confirmação de que na medida que o diâmetro da ponta do pino fica maior, temos uma maior quantidade de luz chegando até a região apical pois o coeficientes de atenuação linear possuem valores menores.

Para solucionar essa questão de critério, implementou-se uma nova maneira de análise de resultados. Na tabela 3.1 são apresentados os resultados obtidos a partir do equipamento desenvolvido neste trabalho. O objetivo na interpretação dos resultados da tabela 3.1 é a obtenção do coeficiente de atenuação linear λ porque é a partir dele que se pode confirmar os valores relativos de intensidade em cada ponto no interior do pino.

Assim sendo, assumiu-se que a dependência na atenuação é de fato exponencial decrescente e na forma:

$$I = I_0 e^{-\lambda.d} \quad (9)$$

Tomando o logaritmo Neperiano de ambos os membros da equação 9, pode-se escrever que:

$$\ln(I) = \ln(I_0) - \lambda.d \quad (10)$$

Ou seja, no processo de linearização pode-se traçar um gráfico de $\ln(I)$ em função do comprimento do pino e a região será identificada por uma região linear com coeficiente linear λ . Na figura 3.9 é aplicada essa nova condição de análise a cada um dos resultados apresentados na tabela 3.1. Os resultados, seguindo os mesmos critérios aplicados na análise de resultados que gerou a tabela 3.1, estão apresentados na tabela 3.2.

Figura 3.9 - Apresentação dos resultados obtidos numa nova condição de análise através de um processo de linearização.

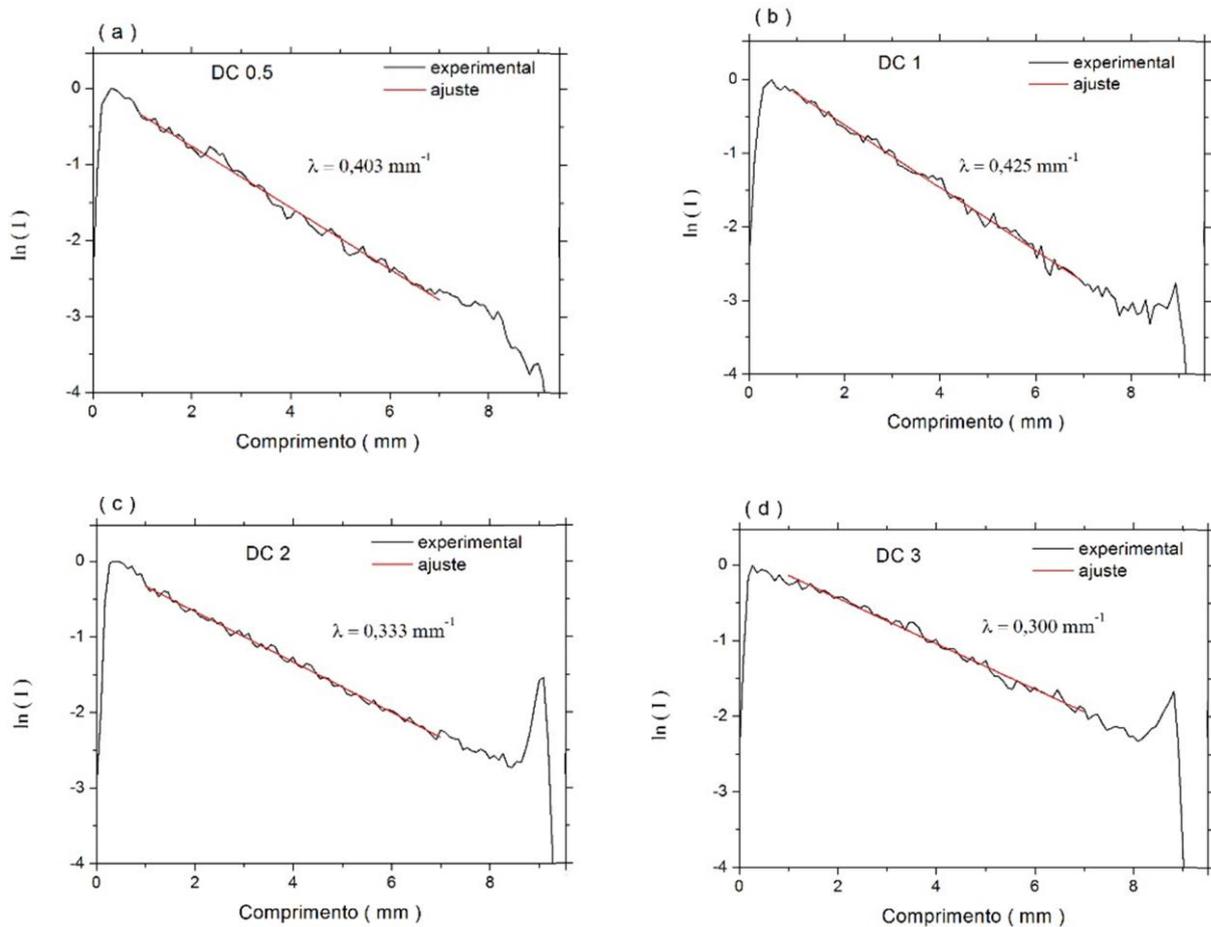


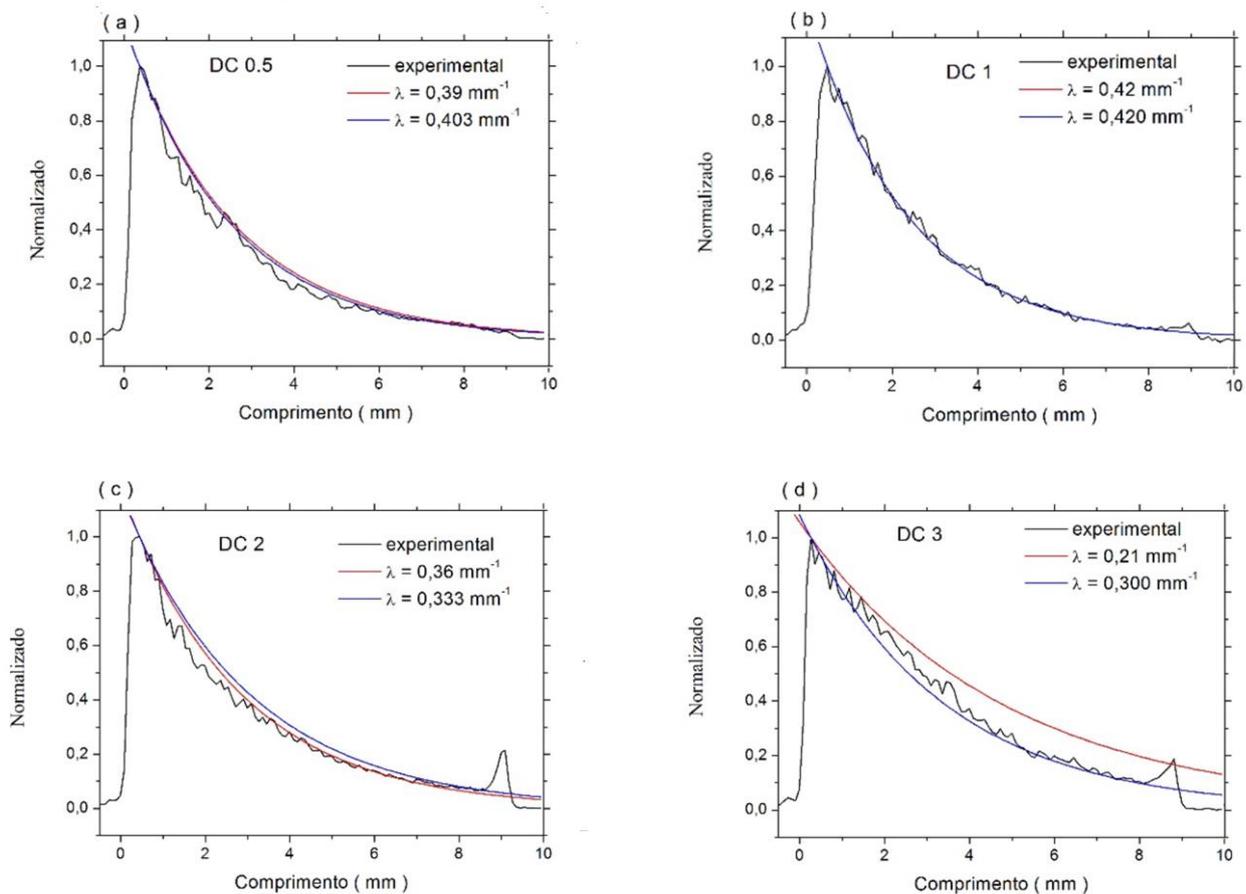
Tabela 3.2 - Resumo dos valores dos parâmetros de atenuação linear seguindo dois critérios distintos para a região de ajuste. Na coluna 2, os ajustes foram realizados na região (0,45 – 8,00) mm. Na coluna 3, a região foi de (1,00 – 7,00) mm.

	(0,45 – 8,00) mm	(1,00 – 7,00) mm
Tipo de pino	λ (mm ⁻¹)	λ (mm ⁻¹)
DC 0.5	0,398 ± 0,004	0,403 ± 0,005
DC 1	0,421 ± 0,003	0,425 ± 0,004
DC 2	0,333 ± 0,002	0,333 ± 0,003
DC 3	0,297 ± 0,003	0,300 ± 0,004

O que se percebe ao observar os gráficos da figura 3.9 é que os ajustes lineares dos dados são todos de boa qualidade. E, de fato, os valores resumidos na tabela 3.2 indicam uma imprecisão no ajuste na terceira casa decimal após a vírgula. Em outras palavras, conseguiu-se através dessa nova análise aumentar a precisão de medida.

Para confrontar a veracidade dos parâmetros de atenuação linear obtidos foram realizadas comparações entre as curvas experimentais e exponenciais simuladas com os coeficientes de atenuação obtidos pelas análises empregadas. Isso é feito para cada pino tanto para os resultados obtidos a partir da simulação através da função exponencial bem como para os resultados obtidos a partir do processo de linearização (Figura 3.10).

Figura 3.10 - Uma comparação dos resultados experimentais com dados gerados a partir de uma simulações obtidas com o auxílio do coeficiente de atenuação linear determinado.

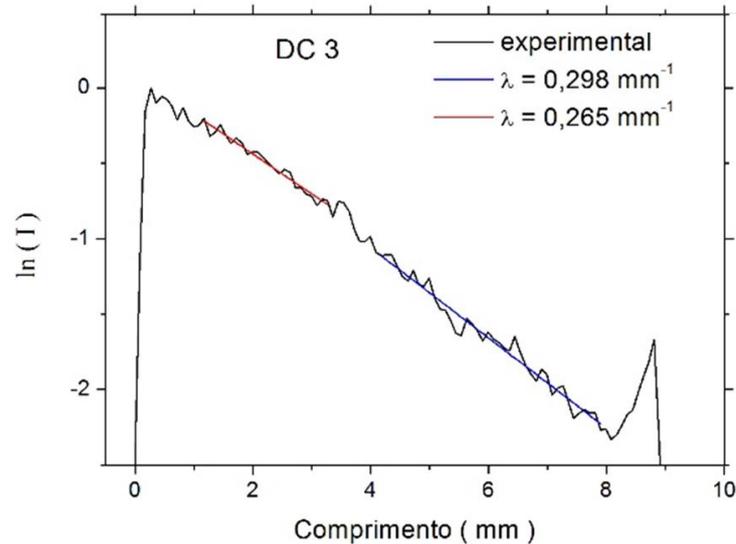


Nos gráficos da figura 3.10 é possível perceber uma boa qualidade de obtenção nos resultados. Discrepâncias são percebidas em menor valor nos gráficos dos pinos DC 0.5 e DC 2. O pino DC 1 teve bom ajuste. Porém, nos resultados obtidos para o pino DC 3 é evidente a discrepância entre o valor obtido a partir do ajuste exponencial e o de linearização. E mesmo o ajuste por linearização indica que existe algum outro fator com característica que não possui dependência do tipo exponencial pois o ajuste não é de boa qualidade na região intermediária.

Para tentar dar uma explicação a essas discrepâncias deve-se lembrar que fatores geométricos estão envolvidos na obtenção dos resultados e, conseqüentemente, na

determinação dos parâmetros. Por esse motivo, na figura 3.11, é apresentada uma nova análise, mais criteriosa, para o resultado obtido para o pino DC 3.

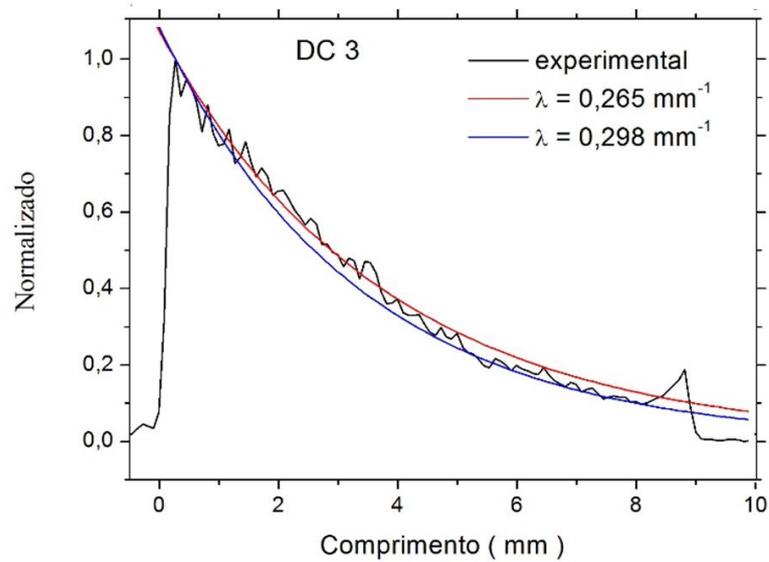
Figura 3.11 - Resultado para a obtenção dos parâmetros sob uma visão mais criteriosa e através do uso do processo de linearização para o pino DC 3



Observa-se que é possível a distinção clara de duas regiões lineares ao longo do perfil de intensidade. Na primeira região foi obtido o parâmetro $\lambda = (0,265 \pm 0,010) \text{ mm}^{-1}$ enquanto que para a segunda região o valor foi de $\lambda = (0,298 \pm 0,007) \text{ mm}^{-1}$. Ou seja, existem duas regiões com dependências diferentes e que são percebidas pela mensuração realizada. Para justificar essas duas regiões deve-se chamar à atenção de que DC 3 é um pino com dupla conicidade. O que leva à conclusão que essa discrepância de resultados é devida à dupla conicidade do pino DC 3, que é percebida pelo sistema desenvolvido.

Para confirmar essa possibilidade na figura 3.12. Nela é apresentado o mesmo resultado da figura 3.10 (d) apenas substituindo na simulação os parâmetros λ pelos novos parâmetros simulados no resultado da figura 3.11.

Figura 3.12 - Resultado do pino DC 3 simulado com os novos parâmetros.



O que se percebe nessa nova simulação é que a curva em vermelho ajusta melhor a parte inicial do perfil enquanto que a curva azul possui um melhor ajuste na parte de menor intensidade.

3.3 Determinação da densidade volumétrica de energia para o pino DC 2

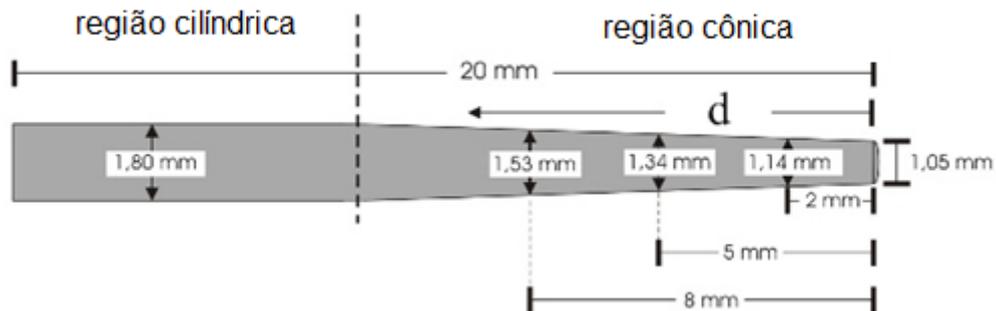
Como deduzido no capítulo 2, pode-se obter a densidade volumétrica de energia no interior do pino por meio da equação (3);

$$\rho = \frac{|I_1(d_1) - I_2(d_2)|}{V} \quad (3)$$

Nessa equação, $I_1(d_1)$ é a intensidade do feixe medida no ponto onde começamos a medir o volume dentro do qual se quer determinar a densidade de energia e $I_2(d_2)$ é a intensidade do feixe medida no ponto em que finalizamos a determinação do volume.

Para a determinação do valor da intensidade basta realizar-se a leitura diretamente no gráfico do perfil de intensidade luminosa espalhada pelo pino em estudo. Para isso é preciso definir o ponto inicial e o ponto final de medida. Como exemplo, calcula-se a densidade de energia a 5 mm da ponta do pino DC 2. Considera-se que o volume seja formado por 1 mm de comprimento de pino. Na figura 3.13 está uma representação real das medidas realizadas a partir de uma imagem de microscópio do pino DC 2.

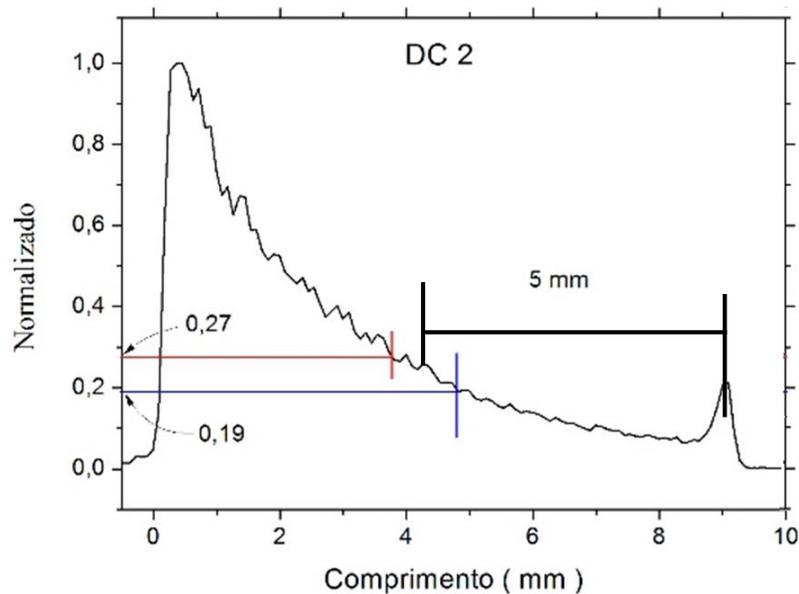
Figura 3.13 - Uma imagem das dimensões do pino DC 2.



Da figura 3.13, pode-se medir o diâmetro do pino na região de 5 mm de distância da ponta do pino. Esse diâmetro permitirá calcular o valor do raio médio que será igual a $R_m = 0,67$ mm. Como pretende-se definir um volume que vai de 5,5 mm até 4,5 mm do comprimento do pino medido a partir da ponta, pode-se calcular o volume desejado que terá valor igual a $1,40$ mm³.

Na figura 3.14 tem-se a indicação das medidas realizadas da intensidade do feixe em cada um dos pontos em questão.

Figura 3.14 - Perfil de espalhamento White Post DC 2 indicando porcentagem de decaimento em dois pontos distintos.



Da figura 3.14 mede-se que a intensidade do feixe no ponto d_1 (5,5mm) é igual a 0,27, ou seja, o feixe atinge esse ponto com apenas 27% de seu valor inicial. Para o segundo ponto d_2 (4,5mm) a intensidade vale 19% de seu valor inicial. Isso significa que a densidade de energia pode ser calculada como:

$$\rho = \frac{I_0 |0,27 - 0,19|}{1,40 \text{ mm}^3}$$

Uma variante para o cálculo, caso não se possua o gráfico para realizar a medida da intensidade diretamente, é determinar o valor a partir do uso do coeficiente de atenuação linear. Nesse caso o valor de I_d seria igual a: $I_d = I_0 \cdot \exp(-0,333 \cdot d)$, em que d seria o ponto de cálculo medido a partir do ponto de máxima intensidade.

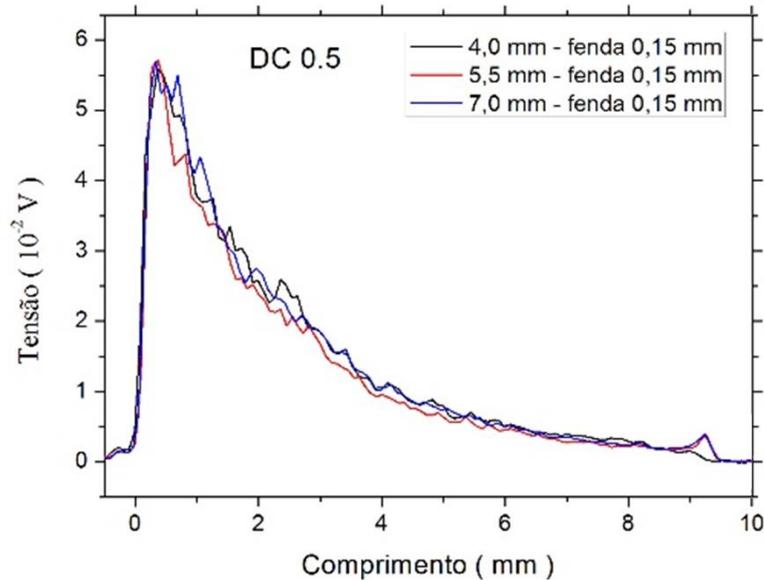
3.4 Estudo da relação existente entre o coeficiente de atenuação linear e o afastamento da fenda de entrada da superfície do pino

Durante todos os trabalhos experimentais várias perguntas surgiram em relação as características do sistema de medida e principalmente da dependência existente entre o resultado obtido e a distância de afastamento entre a superfície do pino e a fenda de entrada. Esse é um problema recorrente porque já concluiu-se anteriormente que existe uma dependência clara do parâmetro de atenuação linear com a forma geométrica do pino em estudo. Essa dependência existe devido à perda de material espalhador e que determina a tendência do parâmetro.

Entretanto, decorrente dessa mesma característica de perda de material espalhador, surge outro problema. O problema associado tem a ver com o fato de que a fenda de entrada se afasta da superfície do pino na medida em que o sistema caminha na direção da ponta do pino pois o pino possui forma cônica. Assim, para averiguar essa questão decidiu-se realizar um teste de afastamento da fenda de entrada em relação à superfície do pino. Foram testadas três posições de afastamento: 4,0; 5,5 e 7,0 mm. Além disso, aproveitou-se o trabalho para um segundo teste de averiguação em relação à perda de material espalhador. Por exemplo, na posição de 4,0 mm de afastamento foram feitas medidas para aberturas de fenda horizontal nos seguintes valores: 0,15; 0,35; 0,50; 0,75; 1,00; 1,25; 1,50; 1,75 e 2,00 mm. O mesmo procedimento foi realizado para os demais afastamentos. Importante registrar que, em todas as mensurações realizadas, a abertura da fenda vertical ficou fixa no valor de 0,15 mm.

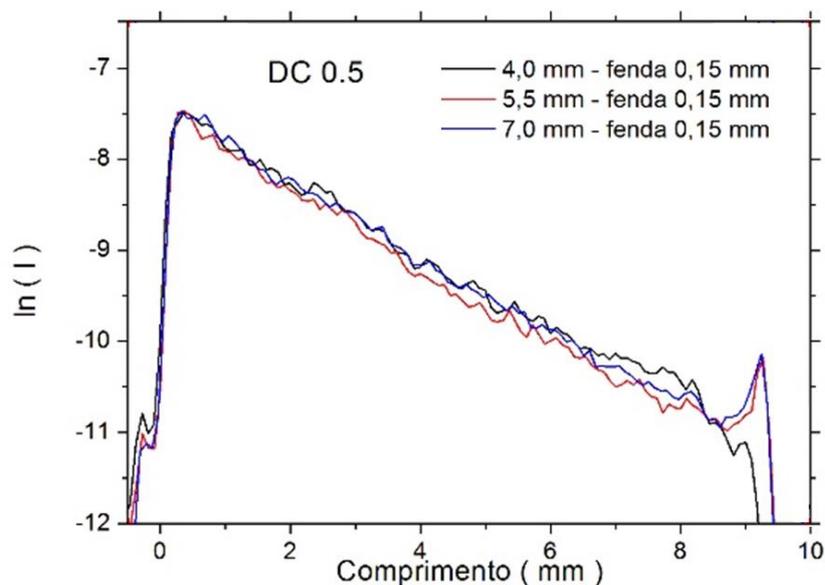
No resultado da figura 3.15 tem-se um exemplo de medidas realizadas para os três afastamentos entre a superfície do pino e a fenda de entrada. O que se observa é uma variação maior na região da ponta do pino, onde se percebe o espelhamento da luz devido à reflexão causada na interface pino/ar da ponta do pino.

Figura 3.15 - Medidas realizadas para o pino DC 0.5 mantendo-se a mesma abertura horizontal para a fenda de entrada e afastando-se a fenda da superfície do pino.



O que já foi concluído a partir da figura 3.15 pode ser confirmado pelo gráfico apresentado na figura 3.16. Nessa figura vê-se que os três gráficos possuem aproximadamente a mesma declividade, mostrando que os parâmetros são praticamente iguais. Ou seja, pode-se concluir, a partir desse primeiro resultado, que o afastamento da fenda em relação à superfície do pino não é de fundamental importância, estando essa diferença, se existir, abaixo da sensibilidade mensurável do sistema experimental desenvolvido.

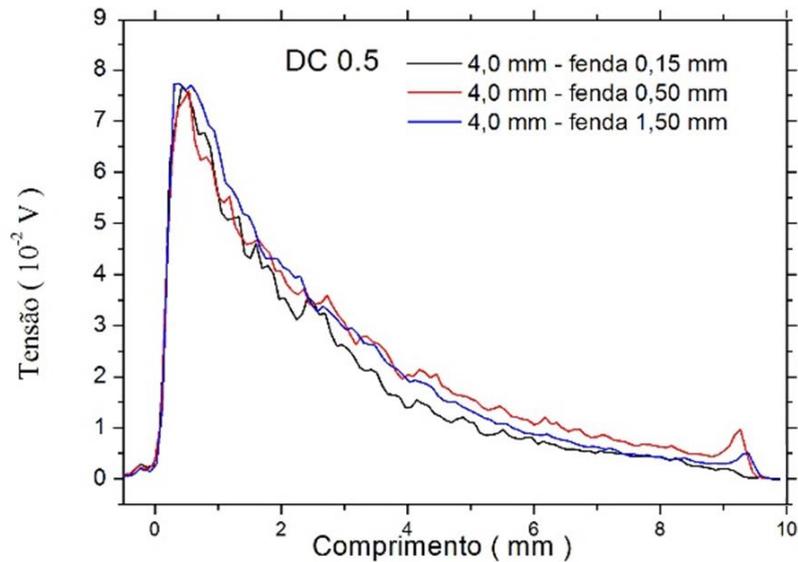
Figura 3.16 - Aplicação comparativa do método de análise desenvolvido para os três resultados apresentados na figura 3.15.



Entretanto, resultado surpreendente ocorreu no segundo teste realizado. Na figura 3.17 são apresentados três resultados das medidas realizadas. Para a obtenção dos resultados da

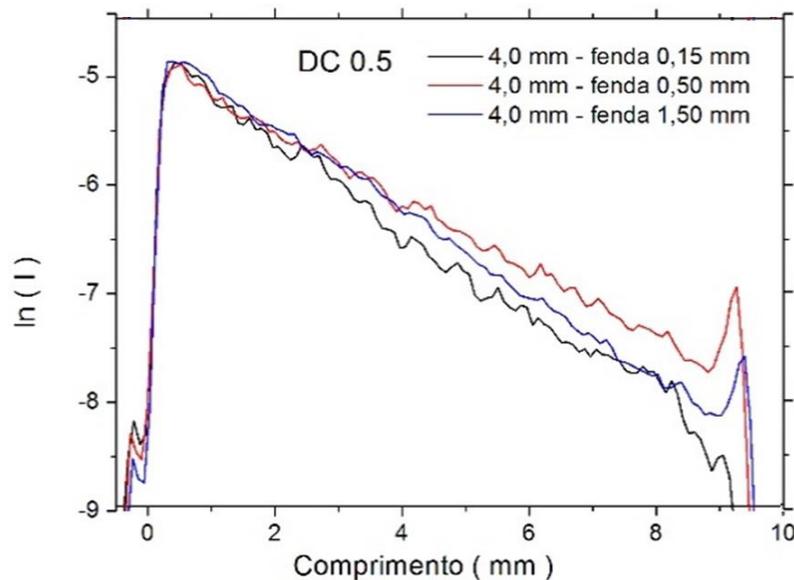
figura foi mantida uma distância fixa entre a superfície do pino e a fenda de entrada. Agora o que se mudou foi a abertura da fenda de entrada horizontal. No exemplo, estão apresentados os resultados para aberturas de fenda horizontal de 0,15; 0,50 e 1,50 mm. É possível perceber claramente a diferença entre os três resultados.

Figura 3.17 - Resultados obtidos para o pino DC 0.5 em que se manteve a separação entre a superfície do pino e a fenda de entrada constante e mudou-se a abertura da fenda horizontal.



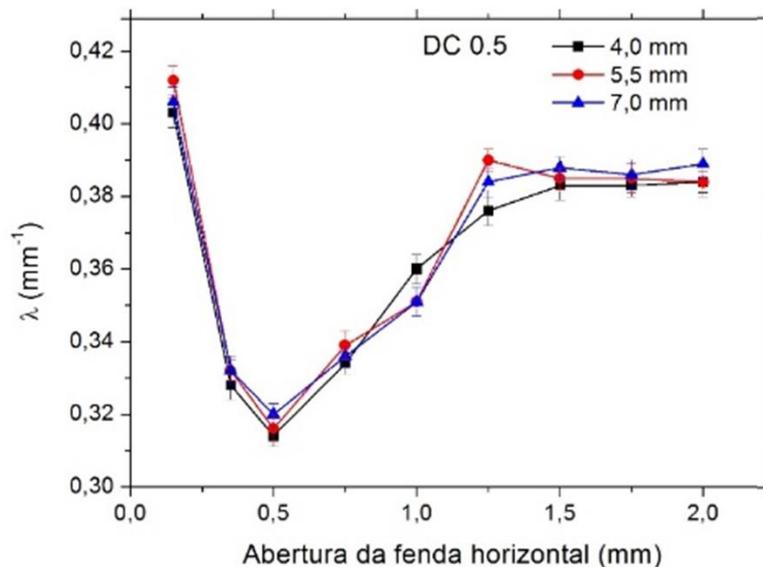
Para confirmar a observação visual realizada na comparação dos resultados apresentados na figura 3.17, são apresentados na figura 3.18 os resultados submetidos ao processo de análise implementado nessa dissertação. Agora percebe-se claramente a alteração no parâmetro de atenuação linear para cada situação de medida.

Figura 3.18- Resultados obtidos nas condições apresentadas para a figura 3. Nesse caso foi aplicado o processo de análise de resultados implementado nessa dissertação.



Um estudo detalhado em relação à abertura da fenda horizontal e ao afastamento da superfície do pino em relação a fenda de entrada foi feito. Os resultados obtidos para o estudo realizado para o pino DC 0.5 são apresentados na figura 3.19. Na figura são apresentados resultados para três posições de afastamentos e para 9 aberturas de fenda em cada ponto de afastamento.

Figura 3.19 - Os resultados da dependência do parâmetro de atenuação linear em função do afastamento da superfície do pino da fenda de entrada horizontal e em função da abertura da fenda horizontal.



Para o pino DC 0.5, a análise do gráfico da figura 3.19, indica claramente que o comportamento da variação do parâmetro de atenuação linear é o mesmo independentemente do afastamento existente entre a fenda de entrada e a superfície do pino. Entretanto, percebe-se uma clara queda em função da abertura da fenda de entrada horizontal e voltando a crescer na medida em que essa fenda atinge valores de aberturas maiores.

A explicação para esses resultados pode ser dada se considerarmos que a superfície do pino é circular. Isso quer dizer que a luz espalhada ao incidir na interface lateral do pino/ar (na direção do tubo detector) sofre convergência aumentando a contribuição na intensidade de luz que será detectada pelo tubo detector. O parâmetro de atenuação linear conseqüentemente diminui seu valor porque se percebe menos a variação no perfil de intensidade ao longo do pino. Isso acontece na medida que caminhamos para aberturas de fenda da ordem de 0,50 mm. Em seguida, o parâmetro torna a crescer. Agora, acrescenta-se um segundo efeito importante para a determinação do parâmetro de atenuação linear. A fenda de abertura horizontal começa a atingir valores maiores do que as dimensões diamétricas do pino. O efeito discutido e apresentado na figura 3.19 começa a influenciar no resultado e o coeficiente de atenuação linear

começa a subir. Em outras palavras, quer dizer que existe uma compensação entre o efeito de lente causado pela superfície lateral curva do pino e o aumento de área que não possui centros espalhadores de luz. Na medida que caminha-se para valores maiores esses dois efeitos se estabilizam. Conclui-se, portanto, que a abertura de fenda na obtenção das medidas, é de fundamental importância para a definição dos resultados.

4. CONCLUSÕES

A partir de imagens de MEV, constatou-se que os pinos estudados neste trabalho, denominados White Post DC, da marca FGM, são inomogêneos, e as diferentes irregularidades internas podem agir como centros espalhadores de luz.

Em primeira aproximação, considerando como efeitos médios a dissipação de energia por espalhamento, utilizou-se o decaimento exponencial para descrever a atenuação da luz ao longo do comprimento dos diferentes modelos de pino. Para poder medir essa luz espalhada, elaborou-se um novo método, distinto das técnicas até então empregadas.

O novo método permite medir a intensidade de luz espalhada ao longo de todo o comprimento dos pinos, ao invés de apenas em três pontos distintos. Além disso, o novo método possui resolução muito superior. Os resultados obtidos são perfis de intensidade em função do comprimento dos pinos, e descrevem características próprias para cada modelo de pino estudado.

O equipamento de medida foi usinado e aperfeiçoado para fornecer medidas que atendam a demanda da odontologia. A ideia básica do método é empregar a detecção sensível à fase, isso permite medir somente o sinal que esteja em fase com a referência do amplificador lock-in. Diferentemente da maior parte dos estudos anteriores, que utilizavam espectrômetros acoplados a fibra óticas. Nesta nova técnica, a abertura ótica é controlada por fendas, podendo ser regulada de forma a detectar apenas radiação proveniente do pino. Na implementação desta técnica, o sistema sofreu adaptações que ajudaram a melhorar a qualidade dos resultados.

Os resultados aqui apresentados têm potencial para influenciar nos estudos sobre cimentação de resina dual aplicados em tratamentos endodônticos. Também se aponta neste trabalho como obter a densidade volumétrica média de energia local de uma região do pino, baseada nos resultados experimentais.

As análises dos perfis permitiu descrever, qualitativamente e quantitativamente, o decaimento de energia para cada modelo de pino, destacando-se os seguintes fatores de influência: centros espalhadores na estrutura dos pinos, sua geometria e fenômenos luminosos que ocorrem em seu interior, como absorção, reflexão e refração.

Os resultados demonstram que a perda de volume de material espalhador, devido à dupla conicidade do pino, é determinante na descrição do decaimento de energia. O método aplicado

neste trabalho foi capaz de detectar a influência dessa perda de material no espalhamento da luz, caracterizando-a com eficiência.

Assumiu-se que a variação de intensidade segue uma lei exponencial em que se define um parâmetro de atenuação linear ao sistema. Entretanto, devemos ressaltar que esse coeficiente deve levar em consideração pelo menos duas contribuições, quais sejam:

$$\lambda = \lambda_{\text{processos físicos}} + \lambda_{\text{geométrico}} \quad (11)$$

Conclui-se, por fim, que a abertura ótica do sistema é de fundamental importância para a definição dos resultados experimentais.

Sugestão para trabalhos futuros

- 1) Medir o pino inteiro e determinar como a perda de massa contribui para a atenuação da intensidade de luz espalhada.
- 2) Avaliar o espalhamento em função das dimensões geométricas do pino
- 3) Repetir os estudos realizados para o pino DC 0.5, em função da abertura de fenda, para os demais pinos.

5. REFERÊNCIAS

- 1 Roberts, H.W.; Leonard, D.L.; et al. The effect of a translucent post on resin composite depth of cure. **Dental Materials**, v. 20, n. 7, p. 617–622, 2004.
- 2 Giachetti, L.; Grandini, S.; et al. Translucent fiber post cementation using light- and dual-curing adhesive techniques and a self-adhesive material: Push-out test. **Journal of Dentistry**, v. 37, n. 8, p. 638–642, 2009.
- 3 Zorba, Y.O.; Erdemir, A.; et al. Effects of different curing units and luting agents on push-out bond strength of translucent posts. **Journal of endodontics**, v. 36, n. 9, p. 1521–5, 2010.
- 4 Giachetti, L.; Scaminaci Russo, D.; et al. Push-out strength of translucent fibre posts cemented using a dual-curing technique or a light-curing self-adhering material. **International Endodontic Journal**, v. 45, n. 3, p. 249–256, 2012.
- 5 Zorba, Y.O.; Erdemir, A.; et al. Effect of different light sources in combination with a light-transmitting post on the degree of conversion of resin composite at different depths of simulated root canals. **Dental Traumatology**, v. 27, n. 3, p. 195–198, 2011.
- 6 Zicari, F.; Coutinho, E.; et al. Mechanical properties and micro-morphology of fiber posts. **Dental Materials**, v. 29, n. 4, p. e45–e52, 2015.
- 7 Baena, E.; Fuentes, M. V; et al. Influence of Post-cure Time on the Microhardness of Self-Adhesive Resin Cements Inside the Root Canal. **Operative Dentistry**, v. 37, n. 5, p. 548–556, 2012.
- 8 Dogar, A.; Altintas, S.C.; et al. Determining the influence of fibre post light transmission on polymerization depth and viscoelastic behaviour of dual-cured resin cement. **International Endodontic Journal**, v. 45, n. 12, p. 1135–1140, 2012.
- 9 Teixeira, E.C.N.; Teixeira, F.B.; et al. An in vitro assessment of prefabricated fiber post systems. **The Journal of the American Dental Association**, v. 137, n. 7, p. 1006–1012, 2006.
- 10 Goracci C, Corciolani G, Vichi A, Ferrari M. Light-transmitting ability of marketed fiber posts. **Journal of Dental Research**, v. 87, n. 12, p. 1122–1126, 2008.
- 11 Santos Alves Morgan L.F., dos; R.T.R.d.C., P.; et al. Light Transmission through a Translucent Fiber Post. **Journal of Endodontics**, v. 34, n. 3, p. 299–302, 2008.

- 12 Radovic I, Corciolani G, Magni E, Krstanovic G, Pavilovc V, Vulicevic ZR, Ferrari M. Light transmission through fiber post: The effect on adhesion, elastic modulus and hardness of dual-cure resin cement. **Dental Materials**, v. 25, n. 7, p. 837–844, 2009.
- 13 Ho YC, Lai YL, Chou IC, Yang SF, Lee SF Effects of light attenuation by fibre posts on polymerization of a dual-cured resin cement and microleakage of post-restored teeth. **Journal of Dentistry**, v. 39, n. 4, p. 309–315, 2011.
- 14 Cattini S, Rovati L. An optical method for the analysis of the exitance diffused by light-transmitting fiber post. In: **Progress in Biomedical Optics and Imaging - Proceedings of SPIE**. v.7884.2011,
- 15 MSDS34_____ White Post _2014 FGM. Disponivel em:
<<http://www.fgm.ind.br/site/produtos.php?prd=32>>. Acesso em: <08/01/2016>
- 16 _____. **Model SR510 - DSP Lock-In Amplifier**. Stanford Research Systems, 1993