

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
Faculdade de Informática
Pós-Graduação em Ciência da Computação

**UMA METODOLOGIA PARA CAPTURA E EXIBIÇÃO
DOS MOVIMENTOS CINEMÁTICOS
ENDODÔNTICOS, BASEADA EM AMBIENTES
VIRTUAIS COM RETORNO HÁPTICO**

Tales Nereu Bogoni

Tese apresentada como requisito parcial
para a obtenção do grau de Doutor em
Ciência da Computação na Pontifícia
Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Sarroglia Pinho

Porto Alegre
2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

B675m Bogoni, Tales Nereu
Uma metodologia para captura e exibição dos movimentos cinemáticos endodônticos, baseada em ambientes virtuais com retorno háptico / Tales Nereu Bogoni. – Porto Alegre, 2014.
176 p.

Tese (Doutorado) – Fac. de Informática, PUCRS.
Orientador: Prof. Dr. Márcio Sarroglia Pinho.

1. Informática. 2. Realidade Virtual. 3. Informática na Odontologia. 4. Endodontia. 5. Simulação e Modelagem em Computadores. I. Pinho, Márcio Sarroglia. II. Título.

CDD 006.6

**Ficha Catalográfica elaborada pelo
Setor de Tratamento da Informação da BC-PUCRS**



Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
FACULDADE DE INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

TERMO DE APRESENTAÇÃO DE TESE DE DOUTORADO

Tese intitulada "Uma Metodologia para Captura e Exibição dos Movimentos Cinemáticos Endodônticos, Baseada em Ambientes Virtuais com Retorno Háptico", apresentada por Tales Nereu Bogoni, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Doutor em Ciência da Computação, aprovada em 28/04/2014 pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Márcio Sarroglia Pinho
Orientador

PPGCC/PUCRS

Profa. Dra. Milene Selbach Silveira

PPGCC/PUCRS

Profa. Dra. Luciana Porcher Nedel

UFRGS

Prof. Dr. Jose Antonio Poli de Figueiredo

FO/PUCRS

Homologada em 05/06/2014, conforme Ata No. 030 pela Comissão Coordenadora.

Prof. Dr. Luiz Gustavo Leão Fernandes
Coordenador.

PUCRS

Campus Central

Av. Ipiranga, 6681 – P. 32 – sala 507 – CEP: 90619-900

Fone: (51) 3320-3611 – Fax (51) 3320-3621

E-mail: ppgcc@pucrs.br

www.pucrs.br/facin/pos

AGRADECIMENTOS

À minha esposa, Marlei, meus filhos, Jéssica e Arthur, e a minha mãe, Clecy, que estiveram presentes durante todo o tempo dando força e ânimo, sempre acreditando no resultado do trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Márcio Pinho, pelo incentivo, amizade, auxílio e horas de dedicação dispensadas no acompanhamento e direcionamento das atividades realizadas durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas que passaram pelo GRV durante estes 4 anos de estudos sendo amigos nos momentos de descontração e companheiros de estudo. Com certeza estas amizades é o que fazem a vida valer a pena ser vivida.

À Profa. Dra. Roberta Scarparo, da Faculdade de Odontologia da PUCRS, por ter dedicado seu tempo ao acompanhamento do projeto.

Enfim, a todos os amigos e amigas que estiveram presentes durante este período de grande amadurecimento em minha vida.

UMA METODOLOGIA PARA CAPTURA E EXIBIÇÃO DOS MOVIMENTOS CINEMÁTICOS ENDODÔNTICOS, BASEADA EM AMBIENTES VIRTUAIS COM RETORNO HÁPTICO

RESUMO

A Endodontia é a especialidade da Odontologia responsável por tratar as doenças que ocorrem dentro das raízes do dente. O treinamento dos dentistas para atuarem na Endodontia é feito com o uso de dentes naturais extraídos, que nem sempre estão disponíveis, ou com dentes de resina, que não conseguem reproduzir todas as propriedades físicas de um dente natural. Devido ao tratamento ser realizado dentro do dente, os dentistas não tem visão de como o tratamento está evoluindo, necessitando para isto, desenvolver alta sensibilidade tátil para perceber se o tratamento está sendo realizado corretamente. Novos métodos de treinamento utilizando simuladores baseados em Realidade Virtual equipados com dispositivos hápticos vêm sendo utilizados para este tipo de treinamento. Entretanto, a maior parte dos simuladores preocupa-se em simular tarefas que utilizam instrumentos rotatórios para realizar o procedimento de abertura coronária, deixando de lado o treinamento da tarefa de limpeza e modelagem dos canais radiculares. Nesta tarefa os dentistas utilizam instrumentos manuais no formato de pequenas limas que são introduzidas nos canais do dente visando remover sua polpa e dilatar seu diâmetro. O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia de treinamento em endodontia que usa um simulador de realidade virtual com um dispositivo háptico. Este simulador permite imitar, de forma convincente, a sensação tátil percebida pelo dentista durante a etapa de limpeza e modelagem dos canais radiculares utilizando instrumental endodôntico manual. Além do simulador, a fim de apoiar a metodologia, foi construído um dispositivo háptico com quatro graus de liberdade. Durante a simulação, o sistema captura os movimentos e a força que o dentista emprega no dispositivo háptico. Depois disso, com o uso de um software de visualização, o usuário pode ver estes movimentos e analisar o próprio desempenho. Testes feitos com dentistas profissionais, professores e alunos de endodontia mostraram que o simulador é capaz de reproduzir de forma convincente a sensação tátil que ocorre em um ambiente real. Os resultados dos testes demonstram também que a

ferramenta de visualização da simulação desenvolvida é eficaz para ajudar o usuário a identificar possíveis erros que ocorrem durante as simulações.

Palavras Chave: Simulador de Endodontia. Realidade Virtual. Dispositivo Háptico.

A METHODOLOGY TO CAPTURE AND DISPLAY ENDODONTIC KINEMATIC MOVEMENTS BASED ON VIRTUAL ENVIRONMENTS WITH HAPTIC FEEDBACK

ABSTRACT

Endodontics is the branch of dentistry that deals with the treatment of the diseases within the tooth roots. The dentists training to work in Endodontics is done using extracted teeth, which are not always available, or using resin teeth, which doesn't reproduce all the natural tooth physical properties. Since the treatment is performed inside the tooth, dentists do not see how treatment is evolving, so that, they need to develop high tactile sensitivity to know if the treatment is being performed correctly. New training methods using Virtual Reality based simulators equipped with haptic devices have been used for this type of training. However, most simulators are designed to simulate tasks that uses rotary dental drill to perform the coronary opening procedure, leaving aside the training of cleaning and shaping of root canals. For this task dentists use endodontic hand tools in the form of small files that are inserted on the root channels targeting to remove the pulp and extend its diameter. The main goal of this work is to develop a methodology for endodontic training that uses a Virtual Reality based simulator with a haptic device. This simulator allows to convincingly mimic the tactile sensation perceived by the dentist during the task of cleaning and shaping of root canals using endodontic hand tools. Besides the simulator, in order to support the methodology, a haptic device with four degrees of freedom, was designed and built. During the simulation, the system captures the movements and forces the dentist applies on the haptic device. After that, using a visualization software, the user can see these moves and analyze his own performance. Tests performed with dentists and dental students shown that the simulator is able to convincingly represents the haptic sensation that occurs in a real environment. The test results also show that the visualization system is effective to help the users to identify potential errors that may happen during the simulation.

Palavras Chave: Endodontic simulator. Virtual Reality. Haptic Device.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Anatomia dos dentes	32
Figura 2 - Instrumental Clínico	33
Figura 3- Caneta Odontológica	34
Figura 4 – Modelos de brocas	34
Figura 5 - Partes de uma ferramenta endodôntica	35
Figura 6 - Processo de abertura coronária	36
Figura 7 – Uso de lima para limpeza e modelagem dos canais radiculares.....	37
Figura 8 - Isolamento absoluto	38
Figura 9 - Partes da raiz do dente	39
Figura 10 - Canal anatômico (A) e canal preparado com batente apical (B)	40
Figura 11 – Sequência de instrumentação utilizando a técnica escalonada	41
Figura 12 - Sequência de instrumentação utilizando a técnica coroa-ápice.....	42
Figura 13 - Movimento oscilatório	43
Figura 14 - Movimento de limagem	43
Figura 15 - Movimento de rotação.....	43
Figura 16 - Dispositivos hápticos comerciais.....	47
Figura 17 - Detecção de colisão com mapa de ocupação.....	51
Figura 18 - Processo de render háptico utilizando <i>proxy</i>	52
Figura 19 – Aplicação do método de <i>ray casting</i> para encontrar nova posição do <i>proxy</i>	53
Figura 20 - Dispositivo háptico <i>PenCat</i>	58
Figura 21 - Sistema de captura de força em limas	58
Figura 22 - <i>Robotic Endodontic Measured System</i> (REMS)	59
Figura 23 - Configuração do simulador proposto por Marras <i>et al</i> [47]	61
Figura 24 - Utilização do simulador com dois dispositivos hápticos	62
Figura 25 - AV do simulador. Em A,B,C com informações adicionais, D somente simulação	62
Figura 26 - Dispositivo háptico (A), configuração física do simulador (B) e AV (C)	65
Figura 27 - Protótipo para medir a força aplicada em limas endodônticas.....	65
Figura 28 - Protótipo para simulação de movimentos cinemáticos endodônticos.....	78

Figura 29 - <i>Falcon</i> na posição original e com o pedestal na posição vertical	79
Figura 30 - Potenciômetro com o eixo adaptado	80
Figura 31 - Sistema de freio.....	81
Figura 32 – Configuração física com o dispositivo sobre uma cadeira.....	82
Figura 33 - Protótipo do dispositivo háptico	82
Figura 34 - Suporte para a mão do usuário com a abertura limitadora de movimentos	83
Figura 35 - Esquema de comunicação entre o AV e o dispositivo háptico	84
Figura 36 - Posição do usuário e do monitor do simulador.....	85
Figura 37 - Tela principal de simulação do AV	86
Figura 38 – Anestesia.....	87
Figura 39 - Visualização da boca sem isolamento e com isolamento.....	87
Figura 40 - Remoção do curativo.....	88
Figura 41 - Irrigação e aspiração	88
Figura 42 - Cursores nas limas.....	89
Figura 43 - Modelos gráficos das limas	89
Figura 44 – Radiografia	90
Figura 45 - Odontometria. Do lado esquerdo sem colisão com o bordo do dente, do lado direito com colisão	91
Figura 46- Vizinhança-26 (a) e mapa de ocupação (b).....	93
Figura 47 - Representação poligonal e volumétrica das limas.....	94
Figura 48 - Detecção de colisões com os modelos poligonais	95
Figura 49 - Detecção de colisões	96
Figura 50 - Escolha do voxel do proxy.....	98
Figura 51 - Voxels candidatos a <i>proxy</i> em 2D	99
Figura 52 - Determinação do voxel que conterà o <i>proxy</i>	100
Figura 53 - Ajuste da posição do <i>proxy</i>	100
Figura 54 - Componentes do Cálculo do Retorno de Força.....	102
Figura 55 - Identificação de colisões para o retorno de força do giro	103
Figura 56 - Demonstrativo do cálculo do fator de multiplicação para remoção de voxels	105
Figura 57 - Remoção de voxels	106
Figura 58 - Subsistema para visualização do resultado da simulação	108

Figura 59 – Gráficos de movimentação e rotação, e sequência de instrumentação.....	109
Figura 60 - Gráfico da movimentação vertical da ferramenta.....	110
Figura 61 - Gráfico das rotações da ferramenta.....	111
Figura 62 - Classificação dos movimentos cinemáticos	112
Figura 63 - Sequência de instrumentação.....	112
Figura 64 - Animação do movimento da lima	113
Figura 65 - Visualização superior da força exercida pelo usuário durante a simulação	114
Figura 66 - Análise da remoção de voxels	115
Figura 67 - Distribuição das questões do formulário de pós-teste pelo tipo de análise.....	121
Figura 68 - Avaliação do realismo gráfico	125
Figura 69 - Avaliação do retorno háptico.....	129
Figura 70 - Avaliação da disposição dos dispositivos físicos	132
Figura 71 - Avaliação do tempo de adaptação	133
Figura 72 - Avaliação das tarefas/ações realizadas durante a simulação.....	135
Figura 73 - Avaliação da ferramenta de visualização.....	137
Figura 74 - Possibilidade de identificação de erros durante a simulação.....	138
Figura 75 - Quantitativo de respostas dos usuários sobre o retorno áptico	142
Figura 76 - Avaliação do Mecanismo de Giro Adicionado ao Dispositivo Háptico.....	143
Figura 77 - Frequência de respostas da avaliação do simulador	144
Figura 78 - Modo de Visualização com Gráficos e Sequência de Instrumentação	145
Figura 79 - Visualização da direção e amplitude da força aplicada.....	147
Figura 80 - Visão superior da amplitude e direção da força aplicada nas limas..	148
Figura 81 - Fatias de referência do dente	149
Figura 82 - Amostra da visualização de fatias do Usuário 02	150
Figura 83 - Amostra da visualização de fatias do Usuário 10	151

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características Simplificadas da Anatomia dos Dentes	32
Tabela 2 - Cores dos cabos das limas de acordo com seu diâmetro	35
Tabela 3 - Características técnicas de dispositivos hápticos comerciais	47
Tabela 4 - Pesquisas realizadas nas máquinas de busca das bibliotecas	56
Tabela 5 – Tabela comparativa dos trabalhos analisados na revisão sistemática	66
Tabela 6 - Dados do Arquivo de log	107
Tabela 7 - Respostas sobre o questionamento do uso do simulador como ferramenta de ensino em atividades práticas de pré-clínica	138

LISTA DE SIGLAS

AV – Ambiente Virtual

BDH – Bancos de Dentes Humanos

CAD - Comprimento Aparente do Dente

CT - Comprimento de Trabalho

DOF – Graus de Liberdade (*Degrees of Freedom*)

DVR – Renderização Direta de Volume (*Direct Volume Rendering*)

EDTA – Ácido etilenodiamino tetra-acético

HIP – Ponto de Háptico de Toque (*Haptic Interface Point*)

MEF – Método de Elementos Finitos

MIC – Medição intracanal

PRC - Preparo do Canal Radicular

REMS – *Robotic Endodontic Measured System*

RPM – Rotações por Minuto

RV – Realidade Virtual

SF – Método de Ajuste de Superfície (*Surface-Fitting*)

SHP – *Smoothed Particle Hydrodynamics*

VRML – Linguagem para Modelagem de Realidade Virtual

SUMÁRIO

1	Introdução	25
2	Conceitos básicos sobre tratamento endodôntico	31
2.1	Anatomia dos dentes	31
2.2	Instrumental Utilizado no Tratamento Endodôntico	33
2.2.1	Instrumental Clínico	33
2.2.2	Instrumental rotatório.....	33
2.2.3	Limas manuais	34
2.3	Tratamento Endodôntico.....	36
2.4	Técnicas de tratamento endodôntico.....	37
2.4.1	Etapas comuns.....	38
2.4.2	Técnica de instrumentação escalonada	39
2.4.3	Técnica de instrumentação coroa-ápice.....	41
2.5	Movimentos cinemáticos.....	42
3	Simuladores com Interfaces Hápticas.....	45
3.1	Dispositivos hápticos	46
3.2	Modelos gráficos.....	48
3.3	Algoritmos de simulação.....	50
3.3.1	Detecção de colisão	50
3.3.2	Cálculo do retorno de força	51
3.3.3	Técnicas de remoção de conteúdo.....	54
4	Trabalhos Relacionados	55
4.1	Protocolo da revisão sistemática	55
4.2	Resumo dos artigos da revisão sistemática.....	57
4.3	Análise comparativa	65
5	Metodologia de treinamento proposta.....	71
5.1	Etapas da metodologia	71
5.1.1	Procedimentos prévios ao preparo do canal	72
5.1.2	Odontometria.....	72
5.1.3	Determinação do instrumento anatômico	72
5.1.4	Preparo do batente apical	73
5.1.5	Determinação do instrumento memória.....	73
5.1.6	Escalonamento.....	73

5.1.7	Procedimentos clínicos pós-preparo.....	74
5.2	Visualização da simulação	74
5.2.1	Visualização da sequência de ações	74
5.2.2	Visualização dos movimentos cinemáticos e da força empregada.....	75
5.2.3	Resultado final do preparo do dente	75
6	O Simulador	77
6.1	Dispositivo de interação háptica para limas endodônticas.....	77
6.2	Comunicação entre o AV e o dispositivo háptico	83
6.3	Visualização	84
6.4	Ambiente Virtual.....	85
6.4.1	Ambiente da simulação.....	86
6.4.2	Radiografia e Odontometria.....	90
6.5	Método de <i>render</i> háptico	91
6.5.1	Representação do dente.....	92
6.5.2	Representação dos instrumentos endodônticos	93
6.5.3	Algoritmo de detecção de colisão	94
6.5.4	Algoritmo de escolha da posição do proxy.....	97
6.5.5	Algoritmo de cálculo do retorno de força	101
6.5.6	Algoritmo de remoção de volume	104
6.6	Geração de dados de controle da simulação	106
6.7	Visualização dos resultados da simulação.....	107
6.7.1	Visualização da sequência de instrumentação	108
6.7.2	Animação dos movimentos das limas.....	113
6.7.3	Visualização do resultado final do preparo	114
7	Metodologia de teste	117
7.1	Tarefa simulada no estudo de caso	118
7.2	Protocolo de testes.....	118
7.3	Distribuição das questões de pós-teste por tipo de análise	119
7.4	Caracterização dos participantes dos testes.....	120
8	Resultados dos testes	123
8.1	Validação do simulador	123
8.1.1	Avaliação do realismo gráfico	124
8.1.2	Avaliação do retorno háptico.....	126
8.1.3	Avaliações complementares	131

8.2	Análise da ferramenta de visualização	136
8.3	Ferramenta de ensino.....	138
9	Discussões.....	141
10	Conclusões	153
	REFERÊNCIAS.....	157
	APÊNDICE A – Termo de consentimento livre e esclarecimento.....	163
	APÊNDICE B – Termo de confidencialidade.....	164
	APÊNDICE C – Formulário de Pré-Teste.....	165
	APÊNDICE D – Instruções do experimento	166
	APÊNDICE E – Formulário de Pós-Teste	169
	ANEXO I – Projeto do Adaptador para o Dispositivo Háptico	175
	ANEXO II – Projeto da Haste do Mecanismo de Freio.....	176

1 Introdução

Recentemente, com os avanços da Realidade Virtual (RV), vem crescendo a utilização de simuladores voltados para o treinamento de pessoas que atuam na área de saúde [28, 51, 60, 67]. Estes simuladores buscam representar dentro de um Ambiente Virtual (AV) os principais componentes dos tecidos que formam o corpo humano e do instrumental utilizado, com modelos graficamente realísticos e com propriedades físicas semelhantes às reais.

No campo de treinamento em saúde, uma das áreas que se beneficia com o uso de simuladores é a Odontologia. Nestes AVs os dentistas podem realizar virtualmente o preparo de dentes e, com isto, aumentar sua habilidade no manuseio do instrumental odontológico. Com o objetivo de tornar a simulação mais realista, diversas pesquisas [3, 9, 32, 47] vêm adotando o uso de dispositivos hápticos nos simuladores, permitindo que o usuário sinta fisicamente o resultado das interações que acontecem dentro do AV quando ocorre alguma colisão entre o instrumental odontológico que o usuário está manipulando e os demais componentes do AV.

O treinamento de dentistas passa por 3 etapas: a **teórica**, na qual o aluno recebe a fundamentação teórica sobre o tratamento que é realizado; a **pré-clínica**, em que o aluno utiliza laboratório e manequins para praticar e adquirir as habilidades técnicas e motoras e; a **clínica**, na qual o aluno tem contato direto com o paciente. Os simuladores equipados com dispositivos hápticos voltados para o treinamento de habilidades motoras atuam na etapa de pré-clínica, pois pretendem melhorar tais habilidades motoras e cognitivas dos alunos.

No modelo tradicional de ensino, a pré-clínica é realizada com dentes humanos naturais ou com dentes produzidos em resina, acoplados em manequins ou manipulados nas mãos do aluno. Tanto um tipo de dente quanto outro trazem problemas ao processo de ensino. No caso de dentes humanos os alunos são instruídos a buscá-los junto a Bancos de Dentes Humanos (BDH) [49], presentes em muitas instituições de ensino. Porém, devido à pequena quantidade e variedade de dentes disponíveis, grande parte dos alunos recorre a meios antiéticos, como a compra em cemitérios, para sua obtenção. Já com relação aos dentes de resina, sua constituição é feita com material uniforme, sem que seja possível ao aluno,

identificar as diferentes resistências dos materiais que compõe um dente, como por exemplo, esmalte, dentina e polpa, dificultando assim o correto emprego da força para a remoção de cada material. Além disto, em ambos os tipos de dentes, nem sempre é possível colocar o aluno em situações específicas, pois os dentes que estão a sua disposição não possuem todas as características necessárias para o aprimoramento dos estudos, como por exemplo, dentes com calcificação interna, com raízes múltiplas ou com formação irregular.

A utilização de simuladores voltados para este tipo de treinamento tem o intuito de possibilitar ao aluno o acesso a uma grande variedade de modelos de dentes, com diferentes problemas para serem tratados, sem esbarrar em problemas éticos. Os simuladores também possibilitam que grande parte das propriedades físicas dos tecidos que formam os dentes sejam reproduzidas, fazendo com que o usuário precise utilizar a força correta para remover cada tipo de tecido.

Uma das especialidades da Odontologia é a Endodontia, que é responsável pelo tratamento das doenças que ocorrem dentro da raiz do dente. Resumidamente, os procedimentos endodônticos são divididos em 3 etapas. Na primeira é realizada a abertura coronária ou acesso, na qual são utilizados instrumentos rotatórios para remover as camadas de esmalte e dentina, permitindo o acesso aos canais radiculares. Na segunda etapa, denominada limpeza e modelagem dos canais radiculares, são utilizados instrumentos manuais de pequeno calibre, chamados de instrumental endodôntico manual, ou Limas Endodônticas, podendo também ser realizado com instrumentos rotatórios ou vibratórios, desde que o dentista já detenha larga experiência na utilização destes instrumentos. Esta etapa é responsável por remover a polpa do dente e alargar os canais radiculares, retirando pequenas camadas de dentina. A terceira etapa é denominada obturação, nela o dentista preenche os canais com algum tipo de material obturador e faz o selamento da coroa do dente. Em cada etapa os dentistas devem selecionar adequadamente os instrumentos que serão utilizados, esta seleção é denominada técnica de instrumentação. Além disto, deve ser seguida corretamente a sequência de instrumentos para o Preparo do Canal Radicular (PCR), denominado sequência de instrumentação.

Atualmente, os simuladores que atuam no treinamento de procedimentos endodônticos estão restritos à tarefa de abertura coronária [22, 42, 68, 69, 71], com exceção aos estudos apresentados por Min Li e Yun-Hui Liu [40–42, 44, 45] que estão relacionados ao comportamento das limas manuais dentro dos canais e ao comportamento físico das raspas de dentina que são removidas. Isto demonstra que a etapa do treinamento dos dentistas relacionada à limpeza e modelagem dos canais radiculares ainda é pouco explorada do ponto de vista de simulações.

Na tarefa de limpeza e modelagem do canal radicular podem ser empregadas diferentes técnicas de instrumentação, e, em todas elas, para que o tratamento seja bem sucedido é necessário que as paredes do canal do dente sejam desgastadas de forma uniforme, mantendo o formato original do canal, apenas aumentando seu diâmetro. A utilização correta da sequência de instrumentos e a realização de movimentos cinemáticos¹ apropriados para cada instrumento é de extrema importância, fazendo com que toda a extensão do canal seja tratada e não seja empregada força excessiva na manipulação do instrumental.

Durante a capacitação tradicional de um aluno em endodontia, o professor demonstra quais movimentos devem ser executados e a sequência de instrumentos utilizados. Em seguida, os alunos realizam o preparo do dente, buscando repetir os movimentos apresentados. Como o procedimento é realizado no interior do dente, o acompanhamento é feito com a utilização de radiografias obtidas antes e após o preparo do canal radicular e pela sensibilidade tátil do aluno ou do professor. Para isto, são feitas intervenções com instrumentos de exploração procurando por degraus deixados no canal radicular durante a modelagem. Assim, a avaliação da manutenção da trajetória original do canal, bem como seu diâmetro e a existência de irregularidades na superfície das paredes dentinárias podem ser identificadas.

Na instrumentação endodôntica², podem ocorrer erros que vão desde a seleção do calibre das ferramentas até o emprego de sequência técnica³ e de movimentos cinemáticos inadequados. Com o atual método de avaliação, os professores são capazes de identificar as falhas que ocorrem no tratamento, ainda

¹ Nome utilizado em Endodontia para o processo de movimentação dos instrumentos manuais (limas)

² Sequência de instrumentos utilizados durante o preparo do canal radicular

³ Sequência de passos que devem ser executados durante o tratamento

que, em muitos casos, já não seja possível corrigi-las, tão pouco identificar o momento em que os erros aconteceram.

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia de treinamento em endodontia, baseada em RV com o uso de um dispositivo háptico, que consiga reproduzir, de forma convincente, a sensação tátil percebida pelo dentista durante a etapa de limpeza e modelagem dos canais radiculares utilizando instrumental endodôntico manual, capturando os movimentos e a força que o dentista emprega no dispositivo háptico e, posteriormente, visualizar tais movimentos.

Assim, espera-se que seja possível identificar erros na aplicação da técnica de instrumentação utilizada e se os movimentos cinemáticos realizados durante o procedimento foram capazes de fazer com que o instrumental endodôntico tocasse todas as paredes do canal, com a força adequada, dilatando-o de maneira uniforme.

Para permitir a aplicação da metodologia, foi desenvolvido um simulador háptico para a tarefa de modelagem do canal radicular utilizando RV e um dispositivo háptico. Foi desenvolvida também uma ferramenta de visualização que permite acompanhar os movimentos realizados pelo dentista, a força aplicada durante este movimento e também identificar se todas as paredes do canal do dente foram tratadas, sendo este último um fator determinante para o sucesso do tratamento.

Por tratar-se de um trabalho multidisciplinar, o projeto contou com o apoio de professores da área de endodontia, fornecendo informações necessárias sobre os procedimentos que serão simulados. Para testar a metodologia, foram realizados testes funcionais e de validação do simulador, bem como, uma avaliação subjetiva do simulador e da ferramenta de visualização que permite identificar os movimentos e a força empregada pelo dentista, além de exibir o formato anatômico do canal do dente utilizado na simulação e a dilatação realizada pelo dentista. Os testes com usuários foram realizados com base no protocolo de testes de sistemas interativos aprovado pelo Comitê de Ética na Pesquisa da PUCRS, registrado sob número 11/05667 de 09/12/2011.

Esta proposta apresenta-se como inovadora uma vez que não foram localizados, na literatura, trabalhos que simulem o procedimento endodôntico utilizando limas manuais, tampouco que permitam a visualização como é apresentada neste trabalho.

O texto está estruturado em 10 capítulos. O segundo capítulo apresenta os conceitos básicos sobre endodontia e os detalhes técnicos dos tratamentos que se pretende simular. No capítulo 3 são descritos os conceitos utilizados em simuladores equipados com dispositivos hápticos e suas principais características. Em seguida, no capítulo 4, são apresentados trabalhos relacionados ao tema proposto, descrevendo o resultado de uma revisão sistemática realizada sobre o uso de simuladores de odontologia equipados com dispositivos hápticos. No capítulo 5, é descrita a metodologia de treinamento proposta. O capítulo 6 descreve o processo de construção do simulador utilizado para aplicar a metodologia. No capítulo 7 é apresentada a metodologia de testes utilizada, e no capítulo 8 o resultado dos testes. Para finalizar o capítulo 9 apresenta uma discussão sobre os resultados obtidos e o capítulo 10 as conclusões do trabalho.

[Página deixada propositalmente em branco]

2 Conceitos básicos sobre tratamento endodôntico

A Endodontia é a subárea da Odontologia que se preocupa com a prevenção e o tratamento das doenças da polpa dental que habita a cavidade pulpar. É uma atividade que exige muita habilidade manual e sensibilidade tátil no manuseio do instrumental, já que trabalha com instrumentos de pequeno calibre e necessita que seu operador realize movimentos de pouca amplitude e com precisão de décimos de milímetro [39].

Neste capítulo são descritos alguns tópicos básicos para embasar o leitor sobre os procedimentos endodônticos. Inicialmente é apresentada a anatomia dos dentes com as principais características necessárias para o tratamento endodôntico, em seguida são descritas as etapas básicas de um tratamento endodôntico, o instrumental e as principais técnicas de instrumentação utilizadas. Ao final, são descritos os movimentos cinemáticos realizados pelos dentistas quando utilizam o instrumental endodôntico manual.

2.1 Anatomia dos dentes

Grande parte dos tecidos que formam os dentes são constituídos por sais minerais, como cálcio, fósforo e magnésio. Basicamente os dentes são formados pela coroa e pela raiz, sendo que a coroa é a parte do dente que fica aparente e a raiz a parte que fica dentro da gengiva e serve para a fixação do dente ao osso do maxilar ou da mandíbula [84]. A Figura 1 apresenta a anatomia dos dentes destacando suas principais partes.

A parte interna dos dentes é formada pela polpa dentária, que fica situada dentro da câmara pulpar e do canal radicular. É constituída de tecido conjuntivo mole e altamente vascularizado. A polpa é envolvida por uma espessa camada de tecido conjuntivo mineralizado e moderadamente duro, denominado dentina. A camada mais externa do dente é formada por dois tipos especializados de tecido, o esmalte e o cimento. O esmalte é uma fina camada de tecido duro e mineralizado, com aproximadamente 2,5 mm de espessura na parte superior da coroa diminuindo quando se aproxima da raiz do dente. Por fim, o cimento, que também é um tecido mineralizado duro, se assemelha ao tecido dos ossos e reveste a raiz do dente

fixando-o aos alvéolos dos ossos da mandíbula e da maxila [6]. Na extremidade da raiz existe uma pequena abertura, chamada ápice ou forame, que serve como porta de entrada dos vasos sanguíneos e nervos para a polpa dentária [39].

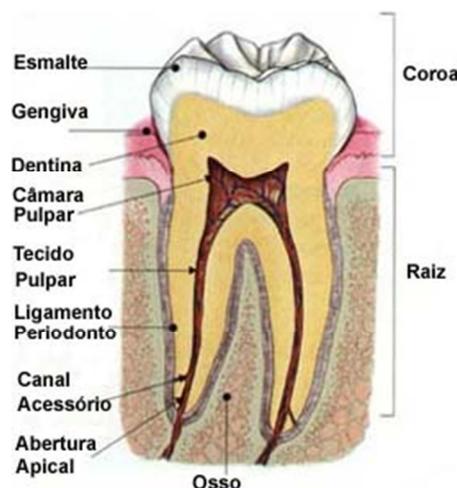


Figura 1 - Anatomia dos dentes

Fonte: <http://www.endomicro.com/endodontics.asp>

Para a escolha correta da sequência de instrumentos endodônticos manuais para o preparo do canal radicular deve ser considerado o tipo do dente, a quantidade de raízes, a quantidade de canais, que podem ser mais de um por raiz, e o formato dos canais. A Tabela 1, mostra as principais características anatômicas dos dentes que são utilizadas para selecionar os instrumentos que serão utilizados durante o tratamento.

Tabela 1 - Características Simplificadas da Anatomia dos Dentes

Fonte: [71]

Tipo do dente	Quantidade de Raízes	Quantidade de Canais	Tipo dos Canais
Incisivo Central Superior	1	1	Retos
Incisivo Lateral Superior	1	1 ou 2	Curvados
Incisivo Central Inferior	1	1 ou 2	Retos
Incisivo Lateral Inferior	1	1 ou 2	Retos
Canino Superior	1	1	Retos
Canino Inferior	1 ou 2	1 ou 2	Retos
Primeiro Pré-molar Superior	1, 2 ou 3	1, 2 ou 3	Retos
Segundo Pré-molar Superior	1 ou 2	1 ou 2	Retos
Primeiro Pré-molar Inferior	1 ou 2	1, 2 ou 3	Retos
Segundo Pré-molar Inferior	1 ou 2	1, 2 ou 3	Retos
Primeiro Molar Superior	3	3 ou 4	Curvados
Segundo Molar Superior	3	3 ou 4	Curvados
Primeiro Molar Inferior	2 ou 3	2, 3 ou 4	Curvados
Segundo Molar Inferior	2 ou 3	2, 3 ou 4	Curvados

2.2 Instrumental Utilizado no Tratamento Endodôntico

Para a realização dos procedimentos endodônticos é necessário que o dentista utilize um conjunto de instrumentos específicos para cada uma das tarefas. Para fins didáticos, neste documento será apresentado apenas o instrumental básico utilizado no tratamento, sendo este dividido nos tipos **clínicos**, **rotatórios** e **limas manuais**, que são descritos a seguir.

2.2.1 Instrumental Clínico

O instrumental clínico é utilizado em grande parte dos procedimentos odontológicos. A Figura 2 apresenta alguns destes instrumentos: (1) espelho, (2) pinça clínica, (3) sonda endodôntica, (4) sonda clínica, (5) escavador duplo, (6) tesoura, (7) placa de vidro, (8) espátula, (9) detalhe da ponta da sonda clínica e (10) detalhe da ponta da sonda reta. Destes instrumentos os mais utilizados em procedimentos endodônticos são as sondas, que possuem uma ponta aguda e flexível e servem para procurar lesões nos dentes ou imperfeições nos preparos [14].

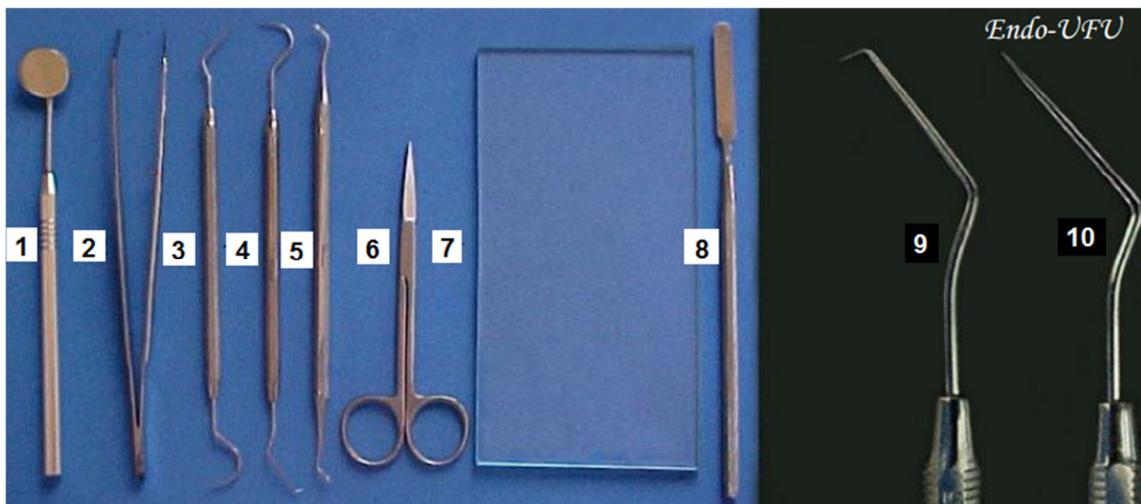


Figura 2 - Instrumental Clínico
Fonte: [7]

2.2.2 Instrumental rotatório

São utilizados para remoção de cáries, abertura coronária e modelagem de canais radiculares por dentistas experientes. Estes instrumentos são compostos por

uma peça de mão, também conhecida como caneta odontológica (Figura 3), acoplada a um motor de alta ou baixa rotação, na qual são acopladas brocas que fazem o desgaste do dente. As brocas são divididas de 3 partes, a **haste**, que prende a broca na peça de mão, a **ponta ativa**, que é composta por pequenas lâminas e realiza o desgaste de esmalte e dentina, e o **intermediário**, que une a haste na ponta ativa. As pontas podem ter diversos formatos, cada um deles indicado para um tipo de procedimento específico. Na Figura 4 são apresentados os principais modelos de brocas utilizados nos procedimentos endodônticos: (A) cilíndrica de alta rotação, (B) cilíndrica de baixa rotação, (C) tronco-cônica, (D) tronco-cônica diamantada, (E) tronco cônica *Batt* e (F) *Gates-Glidden*. As brocas esféricas possuem ponta ativa e são utilizadas para abrir buracos na camada de esmalte e também para pequenos desgastes dentro do dente. As brocas do tipo tronco-cônicas não possuem ponta ativa e são mais indicadas para realizar desgaste compensatório após a abertura inicial, feita pelas brocas esféricas. A broca do tipo *Gates-Glidden*, é indicada pra iniciar o preparo dos canais radiculares [50].



Figura 3- Caneta Odontológica
Fonte: [7]

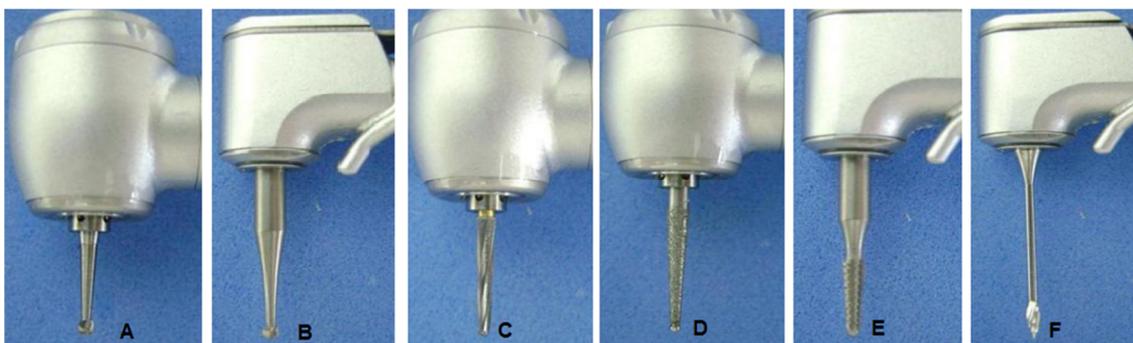


Figura 4 – Modelos de brocas
Fonte: [7]

2.2.3 Limas manuais

Para o tratamento dentro da cavidade pulpar é utilizado o instrumental endodôntico manual que faz o delineamento e preparo da cavidade pulpar nas

raízes do dente. Para isto são utilizadas limas para lixar as paredes internas das raízes do dente, removendo a polpa e pequenas porções de dentina. Basicamente, estas limas possuem comprimento que pode variar entre 21mm, 25mm ou 31mm e diferentes diâmetros. As limas são divididas em 4 partes, como mostra a Figura 5. O **cabo**, que é uma peça cilíndrica e de plástico com uma cor específica de acordo com o calibre da ferramenta; o **intermediário** é o segmento sem ação de corte entre o cabo e a parte ativa; a **parte ativa** é que realiza o trabalho de limagem do dente; e, a **guia de penetração** é a ponta da ferramenta e caracteriza a forma como ela se comporta quando penetra no canal do dente, podendo ser ativa, quando possui uma ponta que permite perfurar, ou não ativa, quando a ponta é arredondada e é utilizada apenas para dilatar do canal. Além disto, as limas podem ter um ou mais cursores, que são utilizados para determinar a profundidade que o instrumento deve penetrar no dente [71].

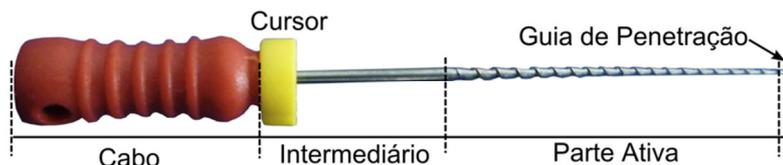


Figura 5 - Partes de uma ferramenta endodôntica
Fonte: [71]

O diâmetro dos instrumentos é identificado pela cor do cabo das limas e possui numeração de #06 a #140. O número da lima indica o diâmetro da ponta da lima, ou seja, a lima #06 possui a ponta com diâmetro 0,06mm, já a lima #15 possui a ponta com 0,15mm de diâmetro. Em todas as limas, a cada milímetro o diâmetro é aumentado em 0,02mm e a parte ativa da lima possui 16mm, com isso uma lima #06, possui em sua extremidade mais grossa 0,38mm. Os cabos das limas seguem o padrão de cores apresentado na Tabela 2, separados em 4 séries. Dependendo do tipo do canal que é tratado podem ser utilizadas limas de mais de uma série.

Tabela 2 - Cores dos cabos das limas de acordo com seu diâmetro
Fonte: [14]

Série	Calibre das limas					
Série Especial	06	08	10			
1ª Série	15	20	25	30	35	40
2ª Série	45	50	55	60	70	80
3ª Série	90	100	110	120	130	140

2.3 Tratamento Endodôntico

Antes de iniciar um procedimento endodôntico é necessário que haja um correto diagnóstico do dente a ser tratado, isto é obtido através de exames clínicos, radiológicos e de vitalidade pulpar [39]. Após a identificação da necessidade de tratamento endodôntico, a preparação do dente para receber uma obturação passa por duas grandes etapas, o acesso ou abertura coronária e a limpeza e modelagem dos canais radiculares.

No **acesso**, o dentista deve abrir uma cavidade na coroa do dente para ter acesso à cavidade pulpar. O processo de remoção de parte do material com desgaste realizado utilizando instrumentos rotatórios também pode ser chamado de *drilling*. Esta abertura deve possuir o tamanho e angulação necessários para que os instrumentos endodônticos possam atingir o canal radicular em toda sua extensão de forma livre, com o mínimo de interferência possível. Para esta tarefa são utilizados instrumentos rotatórios com tamanho compatível com o tipo do dente [71]. A Figura 6 ilustra o processo de abertura coronária, na qual é utilizado instrumental rotatório para remover o esmalte e a dentina da parte superior da coroa do dente, permitindo que posteriormente o instrumental endodôntico seja introduzido livremente.

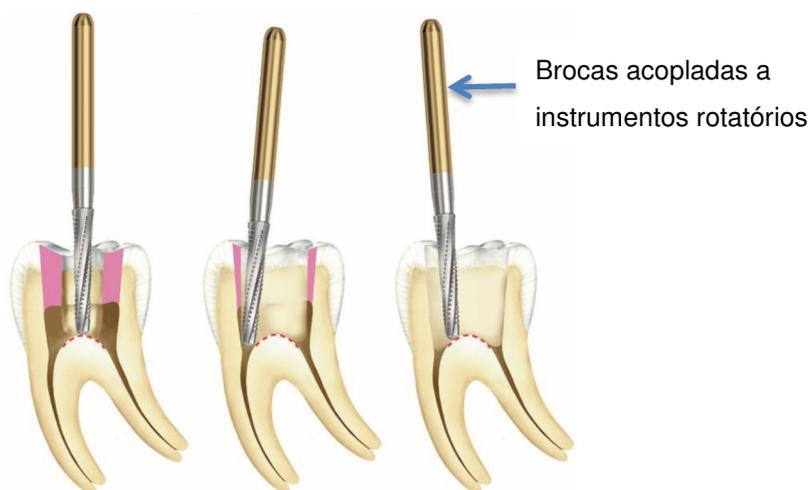


Figura 6 - Processo de abertura coronária
Fonte: <http://dr-miguelirala.blogspot.com.br>

A tarefa de **limpeza e modelagem dos canais radiculares** consiste em remover todos os resíduos de pulpa, bem como modelar os canais do dente para que possam receber a obturação (Figura 7). O processo é realizado química e

mecanicamente com o auxílio de instrumental endodôntico manual, no formato de pequenas limas, que raspam as paredes dos canais removendo pequena quantidade de dentina. Nesta fase do tratamento o dentista deve ter o cuidado de manter o formato original dos canais, para apenas promover sua dilatação [71].

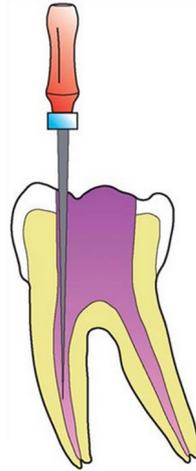


Figura 7 – Uso de lima para limpeza e modelagem dos canais radiculares
Fonte: <http://www.universodontologico.com.ar/practiquisimas/pracendo.htm>

2.4 Técnicas de tratamento endodôntico

Atualmente os tratamentos endodônticos são realizados utilizando basicamente duas técnicas, a **escalonada** e a **coroa-ápice**. Na técnica escalonada o preparo do dente é realizado a partir do ápice do dente em direção à coroa, sendo que a sequência de instrumentação é iniciada com limas finas aumentando seu calibre durante o tratamento e reduzindo o comprimento de trabalho da lima com a inclusão de mais cursores na lima, visando aumentar o diâmetro do canal na direção do ápice para a coroa. Na técnica **coroa-ápice**, o preparo é realizado a partir da porção da raiz mais próxima da coroa do dente, iniciando a instrumentação com limas mais grossas, e conforme vai penetrando em direção ao ápice do dente, são utilizadas limas mais finas, com menos cursores que a inicial, o que faz com que ela penetre mais fundo no dente.

A seguir serão detalhados os processos de cada técnica, primeiramente serão apresentados os procedimentos comuns em ambas às técnicas e posteriormente os detalhes específicos de cada uma.

2.4.1 Etapas comuns

Antes de iniciar o tratamento é aplicada a anestesia próxima do dente que será tratado, em seguida é feito o isolamento absoluto do dente, que é a colocação de um dique de borracha que envolve todo o dente evitando a contaminação da parte interna do dente (Figura 8).



Figura 8 - Isolamento absoluto

Fonte: <http://www.odontocasu.com.br/isolamento-absoluto>

A seguir é feita a abertura coronária com o uso de instrumentos rotatórios para deixar o caminho livre para a entrada do instrumental endodôntico e o Preparo do Canal Radicular (PCR). Antes de iniciar o PCR propriamente dito, é necessário obter uma radiografia do dente e determinar qual o Comprimento de Trabalho (CT). Este CT define a distância máxima que a lima deve penetrar no dente. Normalmente o CT é calculado através do Comprimento Aparente do Dente (CAD), medido com uma régua milimétrica na radiografia, menos 3mm, uma vez que podem haver distorções na radiografia e não se deve ultrapassar o ápice do dente. Logo após é feita a exploração no canal do dente com uma lima fina, buscando remover parte da polpa que está presa nas paredes do canal, liberando a passagem de instrumentos mais calibrosos [37].

Para a próxima etapa o dente é dividido em 3 partes, denominadas terço apical, terço médio e terço cervical (Figura 9). O PCR é iniciado com o preparo do terço cervical, normalmente utilizando instrumentos rotatórios com brocas *Gates-Glidden*, mas também pode ser realizado com limas manuais. Nos demais terços é altamente recomendável que iniciantes utilizem limas manuais, já dentistas mais experientes podem realizar o preparo com instrumentos rotatórios.



Figura 9 - Partes da raiz do dente
Fonte: [37]

Depois de realizado o preparo do terço cervical é feita a **odontometria**, que é uma nova tomada radiográfica com uma lima inserida no canal do dente. O objetivo é fazer com que se chegue o mais próximo possível do ápice do dente, entre 1 e 2mm de distância, para que toda a extensão do canal seja tratada, ajustando-se o tamanho CT e reposicionando os cursores das limas. Um detalhe importante que deve ser levado em consideração é que os canais do dente devem estar sempre inundados para facilitar a remoção de material e impedir o depósito de dentina removida no fundo do canal. Além disto, toda vez que for realizada a troca de limas deve-se irrigar e aspirar o canal com o auxílio de uma seringa e um sugador.

A partir desta etapa cada técnica possui uma sequência diferenciada de instrumentação. Ao final do preparo do canal, ambas as técnicas realizam a secagem do canal, a obturação e o selamento da coroa do dente.

2.4.2 Técnica de instrumentação escalonada

A técnica de instrumentação escalonada é mais indicada para o caso de polpa vital, ou seja, quando a polpa é vascularizada. Esta técnica consiste em realizar inicialmente o preparo do batente apical, que é uma espécie de degrau formado próximo ao ápice do dente que servirá como suporte para o material obturador (Figura 10). Para isto deve ser utilizada uma sequência de limas partindo da mais fina para a mais grossa, deixando o canal do dente no formato de um cone.

A primeira lima a ser utilizada deve ser aquela que atinja todo o CT e se encaixe de forma justa ao canal, esta lima é denominada de **instrumento anatômico**.

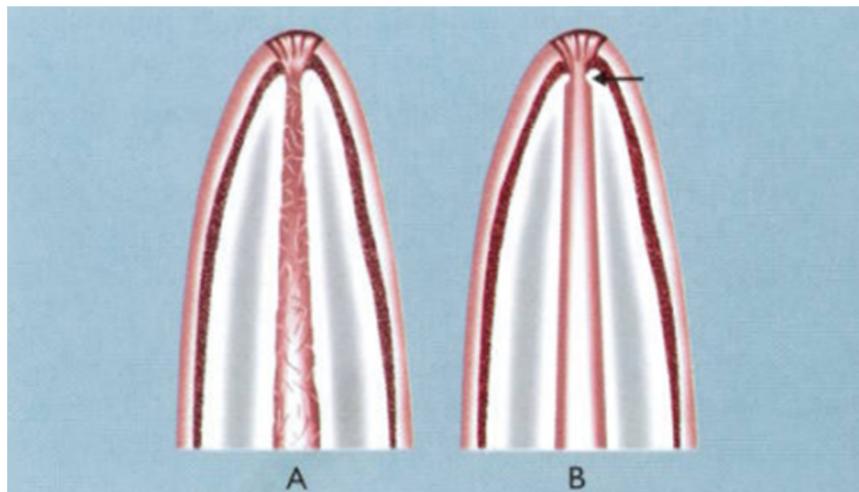


Figura 10 - Canal anatômico (A) e canal preparado com batente apical (B)
Fonte: [71]

A partir do instrumento anatômico devem ser utilizadas mais 3 ou 4 limas ajustadas ao CT. A sequência de limas deve ser de acordo com seu diâmetro, sem pular nenhuma lima. Por exemplo, caso seja determinado que o instrumento anatômico é a lima #15, as limas #20, #25 e #30, podendo chegar também a #35, devem ser utilizadas de forma sequencial e com os cursores posicionados de modo que seja atingido todo o CT. A última lima utilizada com o tamanho do CT, no exemplo acima a #30, é determinada como sendo o **instrumento memória**. Este instrumento é utilizado intercaladamente com as demais limas durante o processo de escalonamento.

Após a criação do batente apical é iniciada a etapa de escalonamento. Para isso devem ser selecionadas mais 4 ou 5 limas, na sequência das limas já utilizadas no preparo do batente apical, ou seja, considerando que a lima #30 é o instrumento memória, deve-se utilizar as limas #35, #40, #45 e #50, podendo chegar a #55, para concluir o preparo do canal radicular. A cada lima deve-se recuar o CT em 1mm, e, entre cada uma das limas deve-se utilizar o instrumento memória no CT.

A sequência de instrumentação utilizando a técnica de preparo escalonado é ilustrada na Figura 11, na qual inicialmente se escolhe o instrumento anatômico e faz-se o preparo no CT com mais 3 limas. Em seguida é realizado o escalonamento intercalando-se uma lima mais calibrosa com o instrumento memória, promovendo o

recuo do comprimento de trabalho de 1mm a cada novo instrumento. Quando é realizada a troca de lima sempre é necessário realizar a irrigação e aspiração dentro do canal.

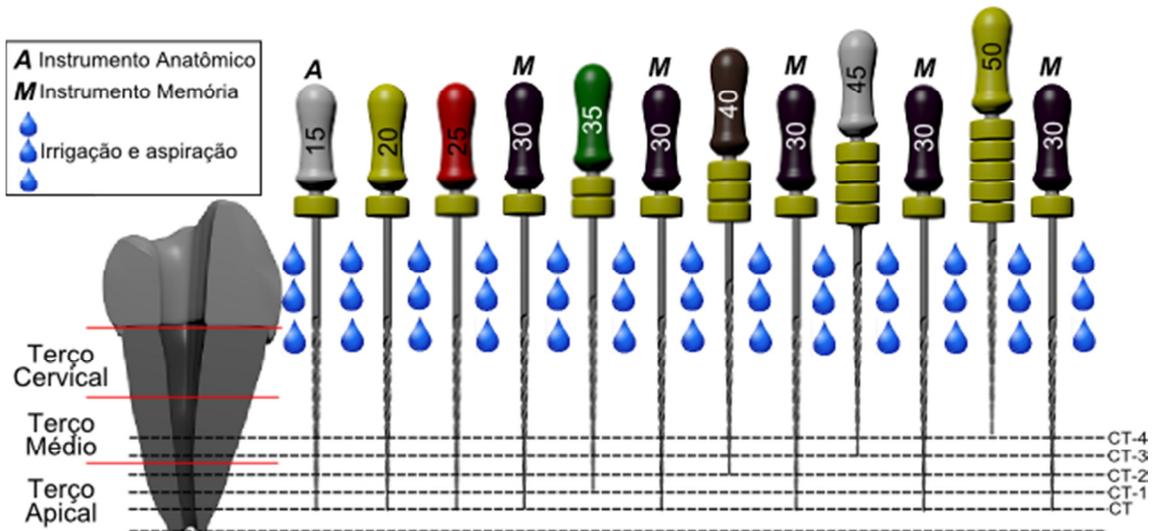


Figura 11 – Sequência de instrumentação utilizando a técnica escalonada
 Fonte: Adaptado de [71]

2.4.3 Técnica de instrumentação coroa-ápice

A técnica coroa-ápice é indicada no caso de dentes com a polpa necrosada, ou seja, a polpa não está mais vascularizada. A instrumentação com a aplicação desta técnica realiza o PCR a partir da porção mais próxima da coroa em direção do ápice do dente (Figura 12). Para isto são utilizados inicialmente limas mais calibrosas e com menor comprimento seguindo para limas mais finas e maior comprimento de trabalho, até se atingir o CT do dente. Por exemplo, após realizar o preparo cervical inicia-se a instrumentação manual com a lima #50 com comprimento dado pelo CT-4. A próxima lima é a #45, com comprimento CT-3, e assim sucessivamente até se atingir todo o CT e formar o batente apical.

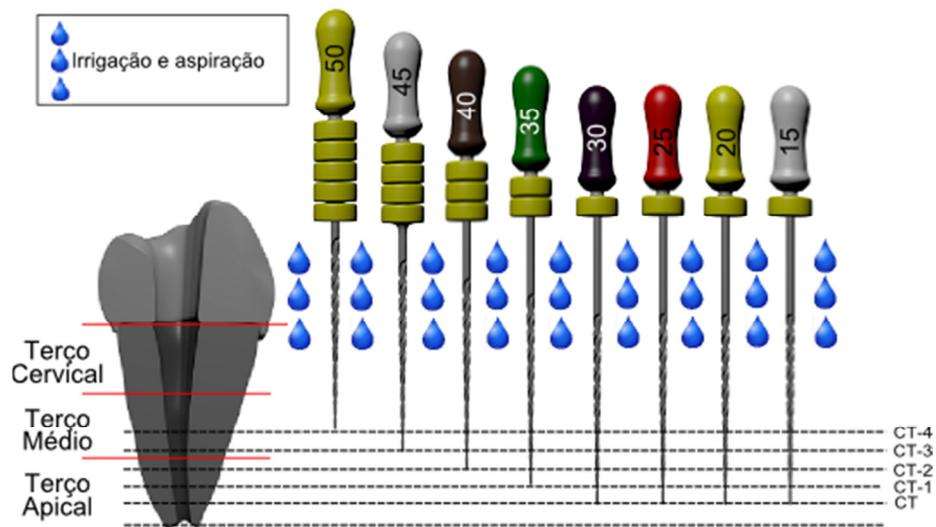


Figura 12 - Sequência de instrumentação utilizando a técnica coroa-ápice
Fonte: Adaptado de [71]

2.5 Movimentos cinemáticos

Chamam-se de movimentos cinemáticos, aqueles movimentos que são realizados pelo dentista com as limas no interior dos canais radiculares. São três os tipos de movimentos cinemáticos: **oscilatório**, **limagem** e **rotação** [71].

No **movimento oscilatório**, ilustrado na Figura 13, as limas são introduzidas na direção apical do dente com leves movimentos de rotação de $\frac{1}{4}$ de volta para a direita e $\frac{1}{4}$ de volta para a esquerda, aplicando-se força necessária para que a ferramenta siga em direção ao forame de forma justa, sem forçar demasiadamente o instrumento. Após atingir o comprimento de trabalho determinado para a lima, é realizado o movimento de tração, que puxa a lima para fora do dente. Este movimento deve ser repetido procurando fazer com que todas as paredes do canal sejam tocadas.

No movimento de **limagem** o instrumento é inserido até o final da parte preparada do canal e retirado em movimento vertical, oblíquo à parede que se pretende limar, fazendo com que a parte ativa da ferramenta toque as paredes do canal, como mostrado na sequência de imagens da Figura 14. Esta operação deve ser repetida em todas as paredes do canal do dente, ou, no caso de canais achatados, somente nas paredes que necessitem de limagem

No movimento de **rotação**, a ferramenta penetra no canal do dente e é rotacionada em 360° no sentido horário, depois a ferramenta é removida fazendo tração sobre uma das paredes do canal. Não é aconselhável utilizar este movimento em dentes com grande curvatura, pois podem promover a fratura do instrumento. Quando é sentida pressão para girar, a ferramenta deve ser retirada do canal. A Figura 15 ilustra o movimento de rotação.

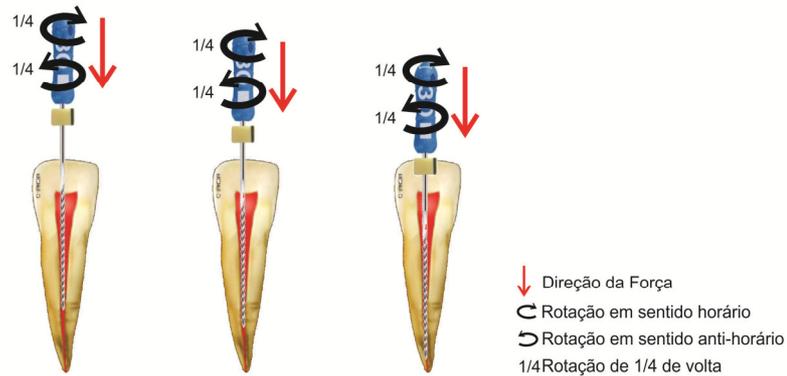


Figura 13 - Movimento oscilatório
Fonte: [71]

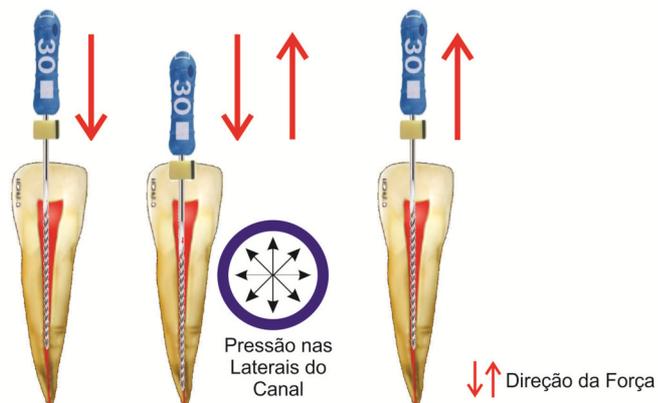


Figura 14 - Movimento de limagem
Fonte: [71]

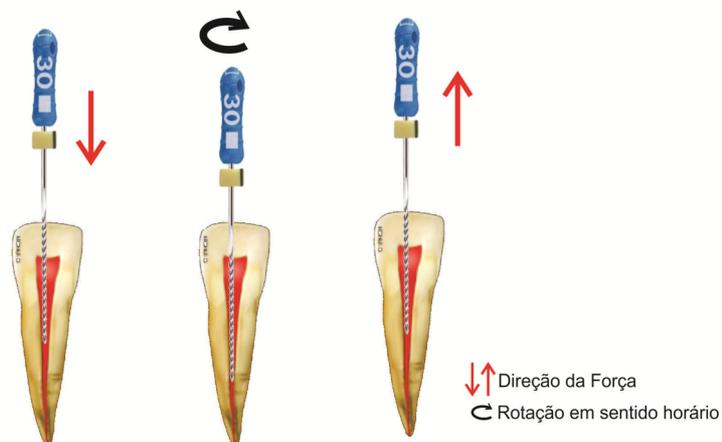


Figura 15 - Movimento de rotação
Fonte: [71]

[Página deixada propositalmente em branco]

3 Simuladores com Interfaces Hápticas

As interfaces hápticas buscam simular dois componentes básicos do tato humano, o cutâneo e o cinestésico. O cutâneo é responsável por fazer o usuário sentir na pele os objetos virtuais com base em suas propriedades de textura, temperatura e vibração. Já o componente cinestésico utiliza o retorno de força ou *force feedback* para representar peso, movimento e forma de objetos, quer sejam rígidos ou deformáveis, sendo que existe uma gama maior de dispositivos voltados a representar os efeitos cinestésicos que cutâneos [55].

Uma das características da comunicação entre dispositivos hápticos e o computador, é a existência de retroalimentação entre o sistema e os dispositivos. Neste caso, de um lado o usuário manipula um dispositivo háptico que informa ao sistema qual sua posição e a força empregada para realizar o movimento, o que faz com que o objeto que é controlado pelo dispositivo háptico se desloque no AV. De outro lado, quando ocorre alguma interação física entre o objeto virtual controlado pelo dispositivo háptico e algum componente da cena, o AV calcula as forças físicas resultantes desta interação e envia comandos para o dispositivo háptico, que aciona os atuadores do dispositivo fazendo com que o usuário tenha uma sensação tátil resultante desta interação [30].

Na área de saúde os simuladores hápticos são utilizados para treinamento de habilidades motoras de profissionais de diversas áreas, como por exemplo, endoscopia [57], laparoscopia [85], suturas [15], ortopedia [58], neurocirurgia [34], cirurgia do osso temporal [21] e odontologia [38]. Em comum em todos os simuladores está a necessidade de reproduzir, de forma convincente para o usuário, a sensação de toque quando ocorre algum tipo de colisão no AV.

O desenvolvimento de simuladores equipados com dispositivos hápticos passa pela escolha do **dispositivo** em si, pela definição dos **modelos gráficos** e pela escolha dos **algoritmos de simulação**. Estas etapas serão detalhadas a seguir.

3.1 Dispositivos hápticos

Os dispositivos hápticos são equipamentos acoplados ao computador que têm o objetivo de fazer com que o usuário receba dados das interações que ocorrem no AV através do sentido do tato. As sensações providas pelos dispositivos hápticos podem ser de 4 tipos: **retorno de aperto (*grip feedback*)** [67], que fornece ao usuário sensação de pressão; **retorno de apreensão (*grasp feedback*)** [86], que fornece limitação dos movimentos do usuário em algum grau de liberdade; **retorno tátil ou de toque (*tactile/touch feedback*)** [70], que produz estímulos em forma de sensação de calor, toque ou vibração; e **retorno de força (*force feedback*)**, que cria forças direcionais exigindo que o usuário empregue força para realizar os movimentos. Dos dispositivos hápticos existentes, tanto no mercado quanto nos laboratórios de pesquisa, a grande maioria utiliza o retorno de força como resposta aos estímulos que recebem do AV.

Entre os dispositivos hápticos de retorno de força disponíveis no mercado para aplicações gerais, os mais utilizados [28] são os modelos produzidos pela *Sensable Technologies (Phantom)* [68], pela *Novint Technologies (Novint Falcon Controller)* [54] e pela *Force Dimension (Delta e Omega)* [22]. Uma característica comum entre estes modelos é que possuem apenas um ponto háptico de toque (*Haptic Interface Point – HIP*), que representa a posição que o dispositivo está controlando dentro do AV.

Um dos grandes desafios dos sistemas hápticos que utilizam este tipo de dispositivo está em manter sua estabilidade fazendo com que responda corretamente aos eventos que ocorrem no AV, sem provocar trepidações ou movimentos bruscos para o usuário [5]. Para isto os dispositivos devem ser atualizados aproximadamente 1000 vezes por segundo (1 KHz), o que requer que a detecção de colisões e o cálculo de retorno de força sejam executados em menos de 1ms [59].

Outras características técnicas importantes para comparar os dispositivos hápticos são detalhadas por Popovici e colegas [59], que apresentam um quadro comparativo dos dispositivos (Tabela 3), considerando a resolução, a quantidade de graus de liberdade (*Degrees of Freedom - DOF*) para rastreamento, a quantidade de

graus de liberdade de retorno de força, a força máxima exercida e o tamanho da área trabalho do dispositivo.

Tabela 3 - Características técnicas de dispositivos hápticos comerciais
Fonte: [59]

Dispositivo	Resolução (DPI)	DOF de Rastreamento	DOF de Retorno de Força	Força Máxima (N)	Tamanho da Área de Trabalho (mm)
Phantom Omni	~450	6	3	3,3	160X120X70
Phantom Desktop	~1100	6	3	7,9	160X120X120
Phantom Premium 6DOF	>1000	6	3	22	281X267X191
Falcon	>400	3	3	8,9	101X101X101
Omega 3	>1000	3	3	12	160X160X110
Omega 6	>1000	6	3	12	160X160X110
Omega 7	>1000	6	3	12	160X160X110
Delta 3	>1500	3	3	20	400X400X260
Delta 6	>1500	6	6	20	200X400X260

As características físicas são fatores que podem influenciar na escolha de um dispositivo para equipar simuladores. Os modelos *Phantom* possuem um braço mecânico e um manipulador em forma de caneta acoplada na ponta, o que proporciona o rastreamento com 6 DOF. Já o dispositivo *Falcon* possui 3 hastes com uma esfera fixa em sua ponta, proporcionando 3 DOF para rastreamento. Dos dispositivos produzidos pela *Force Dimension* ambos os modelos, *Delta* e *Omega*, possuem 3 hastes para movimentação, proporcionando 3 DOF de rastreamento em todos os modelos. Os modelos com 6 DOF possuem um manipulador na ponta que permite tratar o giro, e, o modelo com 7 DOF possui um atuador em forma de bastão com *grasp feedback*. A Figura 16 mostra os modelos destes dispositivos, sendo que *A*, *B* e *C* são modelos produzidos pela *Sensable*, *D* é produzido pela *Novint*, *E* e *F* são modelos produzidos pela *Force Dimension*.



Figura 16 - Dispositivos hápticos comerciais
Fonte: [22, 54, 68]

Dependendo da aplicação é necessário modificar o dispositivo comercial para que se adapte às necessidades do projeto. Tais modificações podem ser feitas para aumentar o número de graus de liberdade [33, 69], substituir componentes visando imitar ferramentas reais [27] ou aumentar o retorno de força [23].

3.2 Modelos gráficos

No projeto de um simulador háptico devem ser considerados dois tipos de objetos: os **objetos** que serão explorados ou esculpidos, e as **ferramentas** de manipulação que são controlados pelo usuário, através de um dispositivo háptico. As interações que ocorrem entre estes dois tipos de objetos é que resultam na sensação tátil que é representada para o usuário.

Nos sistemas hápticos os objetos que compõem o AV podem ser modelados de forma **poligonal** ou **volumétrica**. Nos modelos poligonais cada objeto de cena é armazenado em uma lista de vértices ordenados que formam a superfície do objeto através de polígonos. Esta superfície deve ser totalmente fechada e todas as normais dos polígonos devem estar orientadas de forma homogênea, apontando para fora ou para dentro do objeto. Quando se utiliza a abordagem poligonal, os algoritmos de simulação para o *render* háptico são baseados nas propriedades físicas do objeto como um todo e, geralmente, utilizam soluções com modelos de massa-mola [20] ou elementos finitos [66] para representar o comportamento físico do objeto. Modelos poligonais são mais utilizados quando se pretende realizar uma deformação no objeto, sem trabalhar com remoção de partes do modelo, mas também podem ser utilizados para isto [82].

Por outro lado, os modelos volumétricos são mais usados quando se deseja realizar a remoção de partes do objeto ou quebrá-lo. O objeto é dividido em voxels que representam tanto as estruturas internas quanto externas do objeto. Cada voxel do modelo possui características próprias que são utilizadas para a definição do retorno de força que será calculado pelo sistema quando o voxel estiver em contato com o HIP. A quantidade de voxels presentes no modelo e o tamanho de cada voxel afetam diretamente a qualidade e a velocidade da simulação, pois a quantidade define o tempo de *render háptico* e o tamanho determina a qualidade deste

processo, em outras palavras, com voxels menores a simulação torna-se mais precisa, porém torna-se também mais lenta para ser executada. Desta forma é necessário encontrar um ponto de equilíbrio entre estes dois fatores a fim de manter o realismo do sistema.

A renderização de modelos poligonais é mais simples e possui baixo custo computacional, uma vez que basta percorrer a lista de vértices que formam o modelo para exibi-lo. Já a renderização de modelos volumétricos possui custo computacional elevado. Os métodos para renderização volumétrica podem ser de forma direta (*Direct Volume Rendering* - DVR) ou com métodos e ajuste de superfície (*Surface-Fitting* - SF) [17]. Os DVRs se caracterizam por renderizar os elementos gráficos diretamente no espaço de visualização, através de métodos como *ray-casting* [63], sem utilizar primitivas geométricas. Os métodos de SF caracterizam-se por gerar primitivas geométricas a partir de modelos volumétricos, como por exemplo, o algoritmo de *marching cubes* [46].

Quando são utilizados modelos poligonais os dados são armazenados em listas ordenadas que contém a posição dos vértices que devem ser renderizados. Já para o armazenamento de objetos volumétricos matrizes tridimensionais. Nestas matrizes, cada posição X,Y,Z representa um voxel do objeto, que possui características próprias com relação à amplitude de força que será utilizada para o cálculo do retorno de força no dispositivo háptico e para a visualização do objeto.

Já para a representação das ferramentas, são utilizadas 3 formas de armazenamento: **poligonal**, **volumétrica** ou **híbrida**. Quando são utilizados modelos poligonais a ferramenta é representada graficamente por um conjunto de vértices e faces, sendo utilizado o mesmo modelo para o render gráfico e háptico [2, 18, 51]. No caso de modelos volumétricos toda a ferramenta é armazenada em uma matriz tridimensional de voxels [36, 83], e, na abordagem híbrida a ferramenta é modelada de forma geométrica e a parte que é utilizada para esculpir o objeto é modelada volumetricamente [1, 61, 62].

3.3 Algoritmos de simulação

A simulação é composta por diversos algoritmos que são responsáveis pela execução das ações do sistema. A definição destes algoritmos depende dos dispositivos hápticos e dos modelos gráficos utilizados. Na simulação são executadas tarefas como **detecção de colisão**, **cálculo do retorno de força** e **atualização dos modelos**. A seguir serão detalhadas estas tarefas.

3.3.1 Detecção de colisão

No contexto da simulação háptica, a detecção de colisão tem o objetivo de determinar como estão se dando os contatos entre os objetos do AV. As formas de detecção de colisão dependem das técnicas de representação dos modelos gráficos escolhidas para o simulador. No caso de modelos poligonais a detecção de colisão entre dois objetos é feita através da verificação de intersecção de cada polígono de um objeto com os polígonos do segundo objeto. Dependendo da quantidade de polígonos isto pode se tornar uma tarefa de alto custo computacional. Já em modelos volumétricos a detecção de colisão é mais simples, bastando verificar se os voxels dos objetos estão ocupando o mesmo espaço.

Uma das técnicas empregadas para detectar colisões com objetos volumétricos é através da utilização de um mapa de ocupação (*occupancy map*) [25]. Esta técnica aloca uma matriz tridimensional composta por voxels que representam todo o volume do espaço virtual utilizado pelo sistema. Da mesma maneira que este espaço, cada objeto do AV é armazenado em uma matriz de voxels, e, quando o mapa de ocupação é inicializado, estes voxels são distribuídos pelo mapa. Toda vez que um objeto da cena sofre alguma transformação o mapa de ocupação é atualizado. Neste cenário, a detecção de colisão consiste em identificar quais posições estão ocupadas por mais de um objeto.

A Figura 17 ilustra o processo de colisão entre dois objetos. No tempo T_0 os dois objetos são representados no mapa de ocupação sem que um voxel seja ocupado por mais de um objeto. No tempo T_1 o **Objeto 2** sofre uma translação para a esquerda e um dos voxels do mapa de ocupação que está sendo ocupado pelo

Objeto 1 também passa a ser ocupado pelo **Objeto 2**, neste caso existe uma colisão entre os objetos.

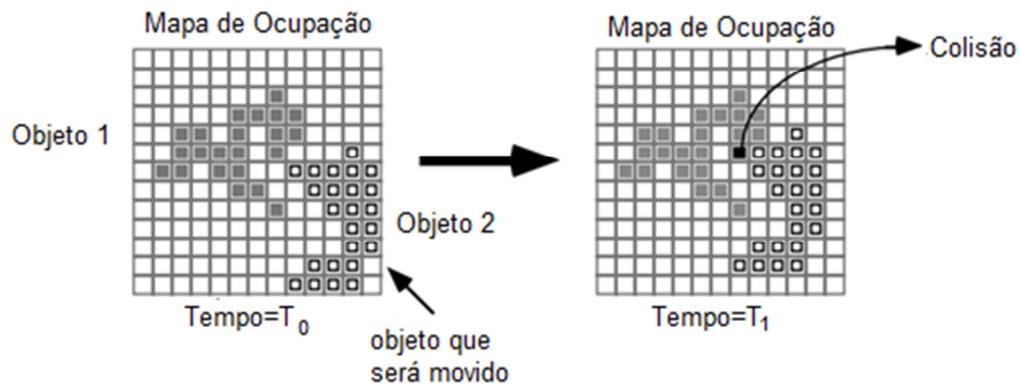


Figura 17 - Detecção de colisão com mapa de ocupação
Fonte: [25]

3.3.2 Cálculo do retorno de força

Após a detecção da colisão, para realizar o *render* háptico, é necessário simular os vetores de força resultantes do contato entre a ferramenta e o objeto que está sendo esculpido e enviá-los para o dispositivo háptico. Isto faz com que o usuário precise exercer mais ou menos força para mover, penetrar ou quebrar o objeto. Esta simulação utiliza dados intrínsecos aos objetos da cena, como dureza, textura e coeficientes de atrito, além de vetores referentes à movimentação executada no dispositivo háptico e à força empregada pelo usuário. Dada sua complexidade, a manutenção de uma taxa de atualização adequada desta simulação é o grande desafio dos sistemas hápticos.

No mundo real, quando se interage com um objeto rígido através de uma ferramenta, esta permanece na superfície do objeto quando ocorre o contato. Por outro lado, quando se utiliza um simulador equipado com um dispositivo háptico não é possível fazer com que o ponto controlado pelo dispositivo (HIP) permaneça fora do objeto e o dispositivo produza resistência à penetração. Para simular a resistência do objeto é necessário que o HIP penetre nele e, com base na força empregada pelo usuário no dispositivo háptico e a distância do HIP para a superfície do objeto, é calculado o vetor de retorno de força. A simulação da resistência do objeto é dada com a aplicação de força contrária a executada pelo usuário, forçando o HIP a retornar à superfície do objeto virtual. A abordagem mais comum para

calcular esta força é utilizar o método conhecido como *god-object* [87], que corresponde a determinar uma posição na superfície do objeto, denominada *proxy* ou *god-object*, que fica próxima da posição do HIP quando este penetra no objeto.

A determinação da correta posição do *proxy* é uma tarefa complexa e é fator determinante para que o sistema consiga manter a estabilidade do *render* háptico. A cada execução do *loop* do *render* háptico é necessário identificar a posição do HIP, encontrar a nova posição do *proxy* e calcular a força que será enviada para o dispositivo háptico. A Figura 18 ilustra o processo de *render* háptico. Pode-se observar que o HIP e o *proxy* possuem as mesmas coordenadas enquanto não existe colisão com o objeto, o que pode ser visto em $t-3$, $t-2$, $t-1$. No tempo t o HIP penetra no objeto e o *proxy* é mantido em sua superfície. A seguir ($t+1$), ao deslocar o HIP dentro do objeto uma nova posição é calculada para o *proxy*, visando mantê-lo sobre a superfície do objeto, porém acompanhando a movimentação do HIP, quando não existirem obstáculos para seu deslocamento.

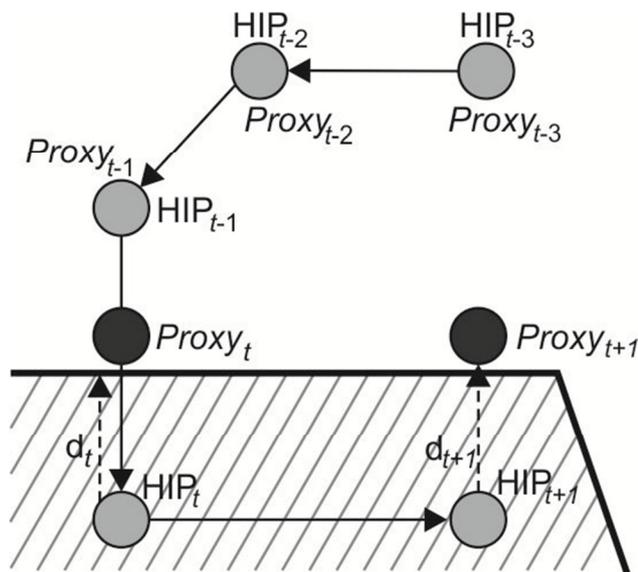


Figura 18 - Processo de render háptico utilizando *proxy*
Fonte: [31]

No caso de modelos poligonais são utilizados os vetores normais dos planos que formam o objeto para indicar o posicionamento do *proxy* e calcular o vetor de retorno de força. Uma vez que não se quer impedir o movimento tangencial a superfície, apenas em movimentos perpendiculares ao vetor normal do plano que

está sendo tratado é calculado. No caso de objetos volumétricos, estes vetores normais não existem de forma explícita, podendo ser criados implicitamente de acordo com as coordenadas dos voxels da superfície do objeto e do HIP [64], e, a partir delas, determinar seus vetores normais e aplicar a mesma técnica utilizada para modelos poligonais.

Outra solução é utilizar métodos que determinam a posição do *proxy* utilizando diretamente os voxels e as coordenadas do *proxy* e o HIP para encontrar a nova posição do *proxy* [77, 78]. Neste caso é utilizado um algoritmo de *ray casting*, ilustrado na Figura 19, no qual é lançado um raio da posição antiga do proxy (p_1) até a posição atual do HIP (p_2). Na Figura 19 em **A** é representado um movimento do HIP, no qual p_1 indica a posição anterior do HIP, que, por estar fora do objeto é a mesma posição do proxy, e p_2 que representa a posição atual do HIP. Com esta situação é feito um caminho entre os pontos p_1 e p_2 em pequenos passos (**B**) até que um voxel da borda do objeto seja tocado (**C**). Por fim é retornado um passo no raio, que passa a se a posição atual do proxy (**D**).

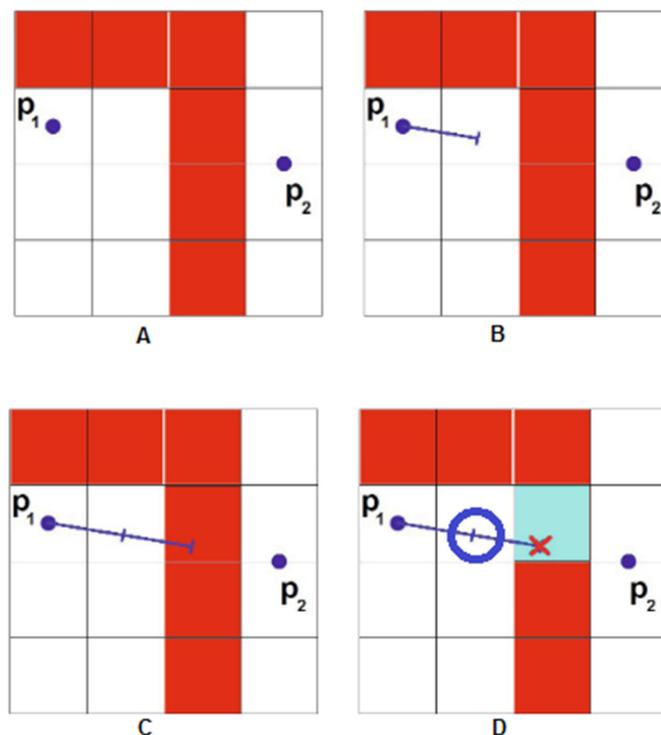


Figura 19 – Aplicação do método de *ray casting* para encontrar nova posição do *proxy*
Fonte: [77]

Após a definição do *proxy* é necessário calcular o vetor de força necessário para empurrar o dispositivo háptico para fora do objeto, exercendo uma força

contrária à movimentação do usuário. Normalmente este vetor é calculado utilizando a Lei de Hooke [52], $\mathbf{F}=\mathbf{k}\mathbf{x}$, onde, k é uma constante de rigidez do material e x é o vetor resultante entre a posição do *proxy* e do HIP [31]. Para ilustrar este cálculo a Figura 18 apresenta o vetor \mathbf{dt} como sendo o vetor resultante da distância entre o HIP e o *proxy*. Para obter o vetor do retorno de força basta multiplicar o vetor \mathbf{dt} pela constante de rigidez do material que está sendo simulado. Em $t+1$ um novo vetor de força é calculado utilizando as novas posições do HIP e do *proxy*. Este processo é repetido a cada *loop* do *render* háptico.

3.3.3 Técnicas de remoção de conteúdo

Além de simplesmente explorar os objetos, os sistemas hápticos podem ser usados para remover partes do material destes objetos, baseado na ação das ferramentas. Dependendo das propriedades de densidade do material e da força com que o operador utiliza o dispositivo háptico, a remoção pode ser feita de forma mais rápida ou mais lenta [49]. Na abordagem mais comum, a densidade do voxel vai sendo gradativamente reduzida até que seja igual a zero, quando o voxel é eliminado. Em geral, são utilizadas ferramentas rotatórias, com velocidades fixas [87] ou variáveis [80].

4 Trabalhos Relacionados

Para analisar o estado da arte em simuladores voltados para a área de endodontia foi realizada uma revisão sistemática no ano de 2010 e atualizada em 2013 com a inclusão de artigos publicados em revistas e conferências das áreas de computação, medicina e odontologia, com foco em simuladores de procedimentos endodônticos.

A seguir será apresentado protocolo da revisão sistemática, em seguida a sumarização dos resultados, uma tabela comparativa entre os trabalhos selecionados e um resumo crítico dos trabalhos analisados destacando a lacuna deixada pelos simuladores existentes.

4.1 Protocolo da revisão sistemática

Para a revisão sistemática foi adotada a metodologia proposta por Pai e colegas [56], que descreve os passos para a realização de uma revisão sistemática. Na primeira etapa desta metodologia foram definidas as perguntas de pesquisa, em seguida selecionadas as bibliotecas de interesse e as palavras chave que foram utilizadas nos motores de busca. Logo após foram definidos os critérios de inclusão e exclusão dos artigos. Na etapa seguinte foi iniciada a seleção dos artigos com a leitura do título e do *abstract*, descartando-se os artigos que não eram relacionados com o assunto da pesquisa. Em seguida foi feita a leitura da introdução e conclusão, e novamente descartados os artigos que não estavam relacionados com a pesquisa. Por fim foi feita a leitura completa e sumarização dos artigos selecionados gerando um quadro comparativo que visa responder as perguntas de pesquisa.

Como pergunta de pesquisa buscou-se identificar:

- Quais os tipos de dispositivos de interação háptica utilizados em simuladores de endodontia?
- Quais métodos de visualização são utilizados em simuladores de endodontia?
- Quais as ações simuladas?
- Qual a metodologia de testes empregada para validar os simuladores?

A pesquisa englobou as bibliotecas digitais disponíveis no portal da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) e liberadas para a utilização junto à Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), que possuem conteúdos relacionados às áreas de computação, odontologia e medicina. Para efetuar as buscas foram utilizados os mecanismos de pesquisa das bibliotecas IEEE, ACM *digital library*, *ScienceDirect* e *Springer*. Além destas bibliotecas foram feitas pesquisas no portal *Google Scholar* para localizar artigos publicados em outras bibliotecas, e, quando localizados, os artigos foram adicionados na revisão sistemática.

Como expressões de busca, foram utilizados pares de palavras, sendo uma fixa, “*Endodontic*”, e a outra variando entre “*Virtual Reality*”, “*Haptic*” e “*Force Feedback*”, com pesquisa realizada no título e no *abstract* dos artigos. Como cada máquina de busca trabalha com parâmetros diferentes, foi necessária a criação de diferentes *strings* de pesquisa, apresentadas na Tabela 4, que também apresenta a quantidade de artigos encontrados em cada uma das bibliotecas, totalizando 133 artigos.

Tabela 4 - Pesquisas realizadas nas máquinas de busca das bibliotecas
Fonte: O Autor

Biblioteca	Link para pesquisa	String de Pesquisa	#
IEEE Xplore	http://ieeexplore.ieee.org/search/advsearch.jsp	"endodontic" AND ("virtual reality" OR "haptic" OR "force feedback")	26
ACM digital library	http://portal.acm.org/	endodontic force feedback	2
		endodontic virtual reality	2
		endodontic haptic	3
ScienceDirect*	http://www.sciencedirect.com/science	endodontic and "virtual reality"	27
		endodontic and haptic	6
		endodontic and "force feedback"	3
Springer**	http://www.springerlink.com	endodontic and "virtual reality"	21
		endodontic and haptic	8
		endodontic and "force feedback"	35
Total			133

*Áreas de pesquisa: Ciência da Computação, Medicina e Odontologia. **Áreas de pesquisa: Ciência da Computação e Engenharia.

Foram definidos 3 critérios para a inclusão dos artigos dentro do conjunto de documentos de interesse:

- Estar disponível no formato de *short paper*, *full paper* ou *poster* em uma biblioteca digital online;

- Contemplar propriedades ou características de treinamento endodôntico auxiliado por dispositivos hápticos;
- Relatar a implementação, aplicação ou caso de uso de algum simulador ou técnica para ser utilizada em simuladores de endodontia ou similar.

Após a inclusão dos artigos em uma base de dados única e remoção dos artigos duplicados, restaram 31 artigos para serem avaliados. A primeira avaliação foi realizada através da leitura do título e do *abstract* dos artigos, sendo que, 12 artigos foram descartados por estarem fora da área de estudo, tratando de assuntos como, modelagem de dentes e dentística. Na segunda etapa foi feita a leitura da introdução e da conclusão dos demais artigos, sendo que, nesta etapa 6 artigos foram excluídos por tratarem de endodontia, porém apenas da reconstrução dos dentes ou de análise de imagens, sem utilizar dispositivos hápticos. Deste processo restaram 9 artigos. Além destes, outros 4 artigos foram inseridos localizados a partir do portal *Google Scholar* usando as mesmas expressões apresentadas na Tabela 4. Todos foram lidos na íntegra para a sumarização das informações.

4.2 Resumo dos artigos da revisão sistemática

Um dos trabalhos pioneiros voltados para o treinamento de endodontia com auxílio de dispositivos hápticos foi publicado por Arnold e colegas em 2000 [3]. Nele são apresentadas técnicas utilizadas para modelar as diferentes camadas do dente utilizando a linguagem *Virtual Reality Modelling Language (VRML)*. Cada camada possui rigidez específica que reage de forma diferente quando tocada por um instrumento virtual controlado por um dispositivo háptico do tipo *PenCat*, com 2 DOF para movimentação e retorno de força, que reflete a intensidade da força produzida na interação.



Figura 20 - Dispositivo háptico *PenCat*
Fonte: [29]

Em outro projeto, Min Li e Yun-Hui Liu, ambos da Universidade Chinesa de *Hong Kong* (*The Chinese University of Hong Kong*), produziram um conjunto de artigos sobre o desenvolvimento e testes de um simulador para treinamento endodôntico. No primeiro artigo [40] os autores propõem uma nova técnica para a modelagem de limas endodônticas e cálculo da estimativa do retorno de força que ocorre durante a interação da lima com os tecidos do canal do dente. Neste trabalho são coletados dados a partir de sensores instalados no cabo de uma lima durante o processo de limpeza e modelagem de um canal. Estes dados são utilizados para estimar a elasticidade da lima. A Figura 21 apresenta o sistema de captura de força aplicadas nas limas, em (a) são ilustradas as limas endodônticas, (b) o sensor de captura de força e (c) a lima adaptada ao sensor.

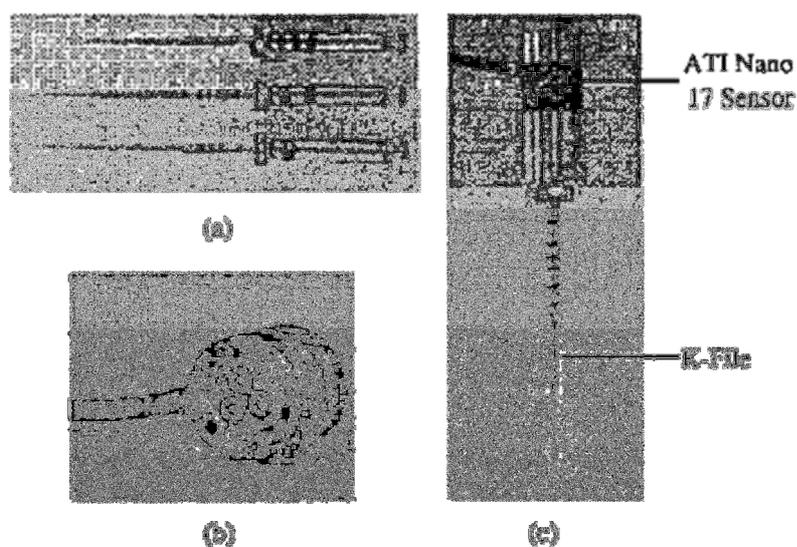


Figura 21 - Sistema de captura de força em limas
Fonte: [40]

Em outro trabalho [45], os mesmos autores apresentam um novo modelo para simulação do comportamento da interação entre o tecido pulpar e uma lima. Nesta abordagem a polpa do dente é representada por um sistema de partículas baseado em *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SHP) [8] e o corpo do instrumento endodôntico é modelado utilizando Método de Elementos Finitos (MEF). No método são utilizados cálculos baseados em mecânica de fluídos para estimar o retorno de força da interação do instrumento com a polpa do dente e com as paredes do canal. Foi utilizado um dispositivo do tipo *Phantom Desktop* para avaliar a qualidade do retorno de força das simulações.

Outra forma de avaliar o retorno de força é apresentada por Min Li e Yun-Hui Liu [43] utilizando um robô, denominado *Robotic Endodontic Measured System* (REMS), ilustrado na Figura 22, que mede as forças aplicadas sobre a lima, com isto obtém-se valores mais próximos do real. Tais valores são comparados com os simulados e, segundo os pesquisadores, o resultado das simulações é similar aos capturados pelo robô.

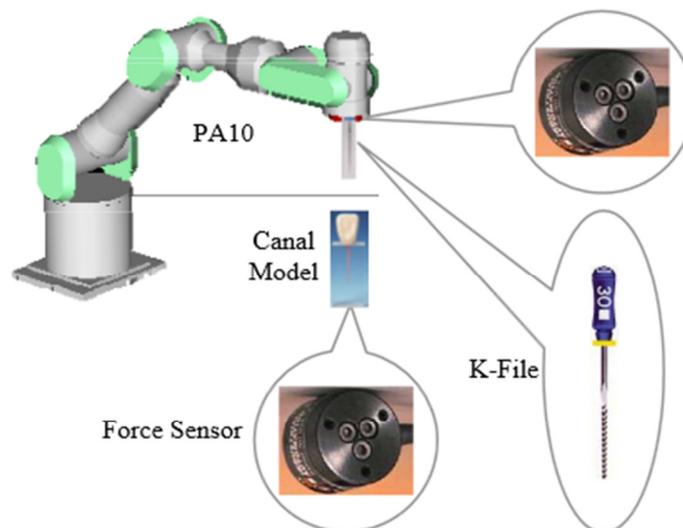


Figura 22 - Robotic Endodontic Measured System (REMS)

Fonte: [43]

Em um trabalho subsequente os mesmos autores realizam novos testes com o REMS. Nestes testes os participantes fazem o preparo de um dente com a utilização de um dispositivo *Phantom Desktop* e os dados são comparados com os coletados pelo robô. De acordo com os pesquisadores, o modelo háptico proposto pode proporcionar boa simulação global para o treinamento endodôntico, no entanto,

o modelo é menos preciso quando simula a força do instrumento ao se deslocar em direção ao ápice do dente, quando comparado aos movimentos laterais do instrumento. Mesmo assim, os pesquisadores concluíram que o simulador é capaz de gerar sensações de toque convincentes para o usuário, mesmo obtendo um retorno háptico a uma taxa de 60Hz.

Finalizando a série de artigos, Min Li e Yun-Hui Liu [41] apresentam uma revisão geral dos trabalhos já destacados aqui, incluindo os testes finais de avaliação da eficiência do simulador com relação aos dispositivos háptico e gráfico utilizados. Os autores descrevem que foi possível perceber que o uso de métodos de simulação de hidro dinâmica como o SHP, para representar a polpa do dente, e MEF, para representar a ferramenta, elevam o custo computacional a ponto de afetar a qualidade do retorno háptico, que deve ser mantido em torno de 1KHz. No experimento, conforme aumenta o número de partículas que compõe a polpa do dente, a taxa de atualização do *render* háptico e gráfico diminui, tornando o sistema instável e com oscilações no manipulador háptico, que, no teste com melhor qualidade atingiu 21Hz de *render* háptico e um tempo de mais de 6s para a atualização do modelo, caso o número de partículas da polpa fique entre 300 e 600 é possível manter o *render* háptico em aproximadamente 60Hz.

Outro simulador para a área de endodontia é apresentado por Marras e colegas [47]. Neste trabalho o objetivo principal é simular tarefas de abertura coronária. O sistema exibe toda a face de um paciente virtual sobre a qual pode ser colocada uma imagem do rosto de um paciente real. No início da simulação, é apresentada a arcada dentária completa e o usuário escolhe quais dentes ficarão visíveis para o treinamento. O sistema simula 4 tipos diferentes de brocas acopladas nos instrumentos rotatórios, que podem ser manipuladas com um mouse ou por um dispositivo háptico do tipo *Phantom Desktop* com 6 DOF. A configuração física do simulador é ilustrado na Figura 23, onde pode-se perceber que a visualização é feita utilizando-se um monitor convencional. Segundo os autores, também é possível utilizar o modo de visualização estereoscópica com o auxílio de óculos do tipo *Shutter Glasses*. Os dentes são representados de forma volumétrica para a realização do *render* háptico e para a reconstrução de sua superfície. Durante o processo de *drilling*, são executadas operações de erosão sobre o volume para

simular a remoção de material do dente. Uma seção de testes com usuários foi realizada com a participação de 50 voluntários, entre estudantes de odontologia e profissionais da área, que julgaram que o sistema é capaz de simular os procedimentos que um dentista necessita para ganhar experiência para desgaste de dentes. Segundo os autores foram detectados alguns erros nos procedimentos executados por parte dos usuários, o que exigia a intervenção do observador dos testes. O trabalho relata ainda a necessidade de melhorar aspectos relacionados à ergonomia, usabilidade e realismo do simulador melhorando a qualidade das interações físicas entre os instrumentos utilizados e o dente quando se trata de remoção de material.

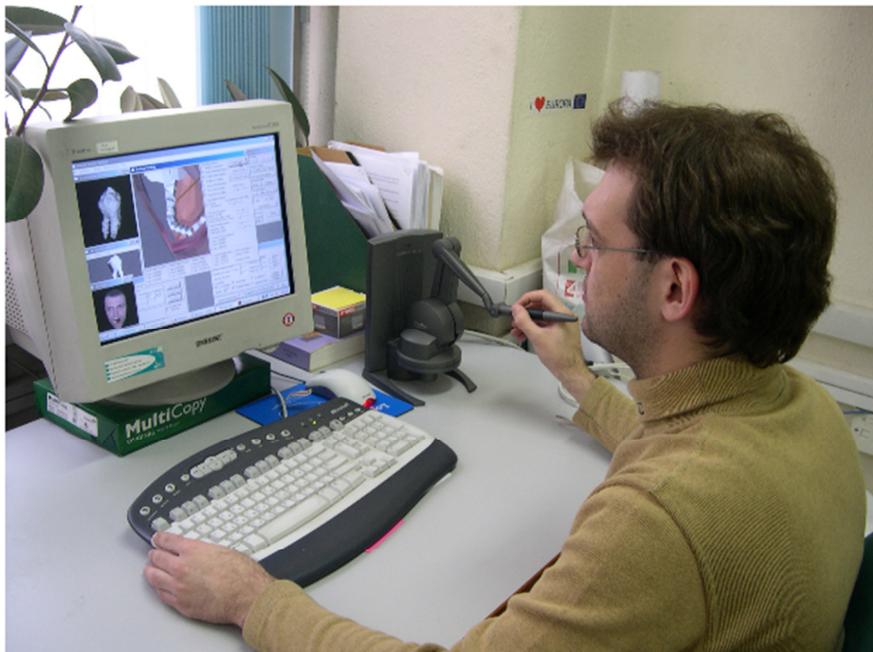


Figura 23 - Configuração do simulador proposto por Marras *et al* [47]
Fonte: [47]

Suebukarn e colegas [73] apresentam uma metodologia para avaliar a curva de aprendizado de usuários que utilizam um simulador para treinamento de acesso aos canais radiculares. No método proposto, o usuário utiliza dois dispositivos hápticos do tipo *Phantom Omni* (Figura 24), um para manipular o instrumento rotatório e outro para manipular o espelho, que proporciona uma visão indireta do dente para visualizar a abertura.

Foram realizados testes com 32 estudantes do 6º ano de odontologia. Nestes testes todos os sujeitos tiveram dois dias de treinamento, em que realizaram abertura coronária virtual de 10 dentes utilizando o simulador com retorno háptico e

com informações adicionais sobre a força e movimentos executados (Figura 25-A,B,C). Na segunda etapa, realizada uma semana após a primeira, os alunos fizeram o mesmo procedimento sem as informações adicionais (Figura 25-D). Após o treinamento, segundo os autores, foi possível perceber uma diferença significativa entre o primeiro e o último teste, tendo havido redução do tempo e dos movimentos realizados na simulação, além de melhorar a aplicação de força sobre o instrumento.



Figura 24 - Utilização do simulador com dois dispositivos hápticos
Fonte: [73]

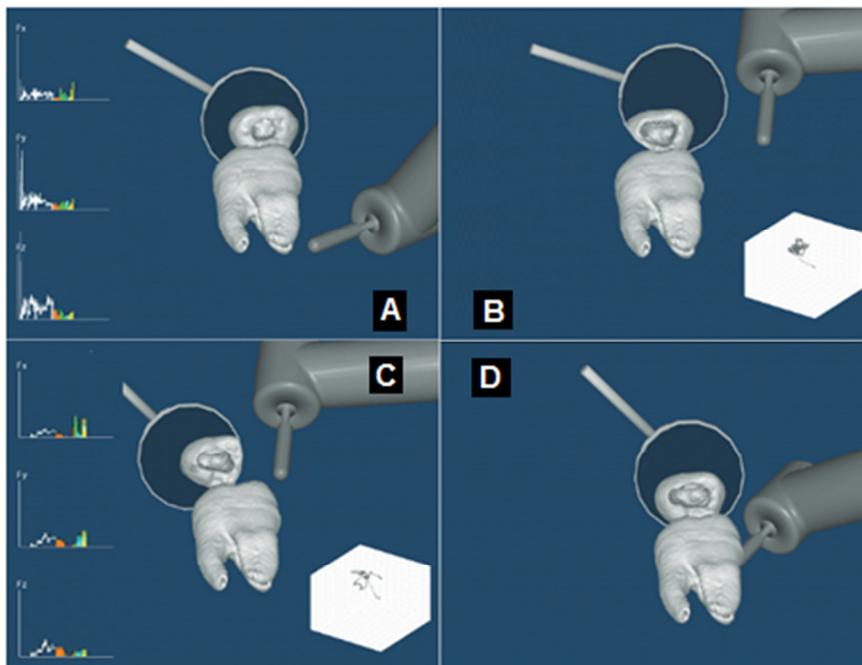


Figura 25 - AV do simulador. Em A,B,C com informações adicionais, D somente simulação
Fonte: [73]

Utilizando o mesmo simulador, Suebnukarn e colegas [72] realizaram outro experimento, desta vez com o objetivo de verificar se, em procedimentos de abertura coronária, alunos que utilizam o simulador teriam o mesmo resultado que alunos que não utilizam. Trinta e dois alunos foram divididos em 2 grupos com 16 membros cada. Inicialmente todos os alunos realizaram a abertura coronária de um dente natural utilizando um manequim. Na segunda etapa os grupos receberam treinamento de 2 horas por dia, durante 3 dias, o grupo 1 com o simulador e o grupo 2 com dentes naturais. Ao final do treinamento todos os alunos realizaram a abertura coronária de um dente natural. A avaliação do preparo do dente foi feita medindo a quantidade de material removida de cada dente. Isto foi feito comparando o peso dos dentes antes e depois do preparo. Além disto, foram utilizados outros critérios, como por exemplo, localização dos canais e ponto de eleição para perfuração. Após o experimento os autores concluíram que não existem diferenças significativas nos resultados de ambos os grupos e que os alunos que utilizaram o simulador cometeram menos erros e removeram menor quantidade de material do interior do dente que os alunos que fizeram o treinamento apenas com dentes naturais.

Em um terceiro trabalho, Suebnukarn e colegas [75] apresentam um relato de pesquisa com os mesmos objetivos do anterior [72], porém com um método diferente. Os alunos foram separados em dois grupos com 5 estudantes em cada. Ambos os grupos recebem treinamento com vídeos demonstrativos sobre as tarefas que deviam ser executadas. Em um primeiro momento o grupo 1 realizou o treinamento virtual e o grupo 2 não. Em seguida ambos os grupos fizeram o preparo de um dente pré-molar. Na segunda etapa do teste o grupo 2 recebeu o treinamento virtual e o grupo 1 não. Logo após todos os participantes fizeram o procedimento em um dente molar. Após a conclusão dos preparos os dentes foram analisados por especialistas e os resultados demonstraram que houve melhora significativa nos escores dos grupos que utilizaram o treinamento virtual em ambos os dentes.

No estudo realizado por Gottlieb e colegas [26] o simulador *DentX Ltd.*⁴ é avaliado por professores de odontologia, comparando com o método tradicional de ensino utilizando manequins. Para este teste os professores responderam um questionário que englobava critérios como ergonomia, confiança, performance,

⁴ <http://image-navigation.com/>

preparação e autoavaliação, relatando o resultado de turmas que não utilizaram o simulador. Em seguida os professores receberam um treinamento de um dia com o simulador, e responderam novamente o questionário indicando suas expectativas com relação ao aprendizado dos alunos. Durante o decorrer do semestre letivo os alunos tiveram em torno de 23% da carga horária de pré-clínica feita no simulador, e, após 4 meses os professores responderam novamente ao questionário, desta vez avaliando o aprendizado dos alunos durante o curso. Quando comparadas as respostas dos questionários, os pesquisadores perceberam que as perspectivas dos professores com relação ao ganho de habilidades dos alunos eram maiores com a turma que utilizou o simulador comparado com turmas anteriores. Porém, ao final do curso foi constatado que houve ganho de habilidades com a utilização do simulador, mas, não tanto quanto os professores esperavam.

No trabalho descrito por Eriksson [19], é apresentado o desenvolvimento e teste de um novo dispositivo háptico com 6 DOF (Figura 26- A) para movimentação e para retorno de força. Para testar o dispositivo os autores desenvolveram um AV para simular a perfuração de dentes (Figura 26-C). A configuração física (Figura 26-B) utilizado no simulador esconde o dispositivo háptico e a visualização é feita através de uma tela semitransparente. Para testar o simulador 13 ortopedistas e 8 residentes participaram de uma seção de testes que buscava avaliar o retorno de força do dispositivo com relação a exploração da superfície do dente e durante a perfuração, além de verificar se o simulador tinha potencial como ferramenta de ensino. Após os testes os pesquisadores concluíram que a navegação em espaço livre é de boa qualidade e que o retorno de força durante a perfuração é similar ao que ocorre no mundo real. Já a tarefa de exploração apresenta pequenas vibrações e a localização espacial não foi bem avaliada, pois os usuários não conseguiam perceber a profundidade da ferramenta e do dente. Com relação ao uso do simulador como ferramenta de ensino os pesquisadores concluíram que é um bom método para melhorar as habilidades motoras de futuros profissionais.



Figura 26 - Dispositivo háptico (A), configuração física do simulador (B) e AV (C)
 Fonte: [19]

Diferente dos trabalhos descritos até este ponto, que tratam de simuladores, Tsao e colegas [76], descrevem um dispositivo capaz de identificar a curvatura das limas, a força apical e o torque empregados pelo dentista sobre a lima. Para testar o dispositivo (Figura 27), uma lima é encaixada na ponta do equipamento de medição e o dentista simula o preparo de uma raiz curva em um bloco de resina. Segundo os autores, analisando os dados fornecidos pelo dispositivo é possível identificar a curvatura da lima, a força empregada na rotação e na direção apical. Este protótipo não utiliza um AV, apenas lê e analisa os dados que recebe do dispositivo externo.

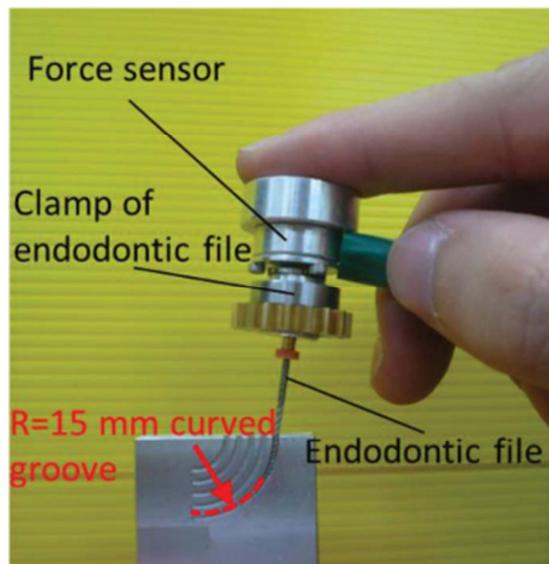


Figura 27 - Protótipo para medir a força aplicada em limas endodônticas
 Fonte: [76]

4.3 Análise comparativa

Nesta seção buscou-se responder às questões de pesquisa já apresentadas na seção 4.1 e demonstrar que não foram localizadas publicações de trabalhos que atuam dentro da área de pesquisa deste trabalho.

Inicialmente, na Tabela 5 pode-se comparar os principais aspectos dos trabalhos revisados.

Tabela 5 – Tabela comparativa dos trabalhos analisados na revisão sistemática
Fonte: O autor

Autores	Objetivo	Dispositivo Háptico	Visualização	Metodologia	Conclusões
Arnold e colegas (2000) [3]	Modelar dentes com as camadas de esmalte dentina e polpa com resistências diferenciadas para o render háptico	PenCat	Monitor convencional	O dente é modelado por um editor específico para mapear o contorno em camadas, em seguida algoritmos de render volumétrico e de reconstrução de superfícies são executados para se obter o modelo e o retorno de força do render háptico, que é feito através de uma PenCat com 2 DOF	É possível criar modelos de dentes em VRML, com suas partes separadas para interação háptica. A interação com o dente virtual é melhorada com o uso de dispositivo háptico que pode ser facilmente integrado a páginas em VRML
Min Li e Yun-Hui Liu (2004) [40]	Explorar a modelagem de instrumentos endodônticos e métodos de simulação em procedimentos na raiz do dente	Não identificado	Não identificado	São obtidas informações de força e torque medidas com sensores instalados em uma lima endodôntica. Os dados são coletados durante a limpeza do canal de um dente. Estes dados são utilizados para estimar a elasticidade do instrumento que será utilizado no ambiente virtual	Apresentam uma nova metodologia para estimar o comportamento dos instrumentos dentro da raiz do dente com modelagem híbrida, baseada na geometria do instrumento e nas interações físicas que ocorrem com os tecidos de dentro do canal
Min Li e Yun-Hui Liu (2005) [45]	Apresentar um novo modelo para simulação do comportamento da interação entre o tecido pulpar e uma lima endodôntica	Phantom Desktop	Monitor convencional	A polpa do dente é representada por um sistema de partículas baseado em SHP e o corpo do instrumento endodôntico é modelado utilizando MEF. São utilizados cálculos baseados em mecânica de fluidos para estimar o retorno de força da interação do instrumento com a polpa do dente e com as paredes do canal	Os pesquisadores afirmam que o modelo proposto é eficiente no que se refere a proporcionar sensação convincente de toque em procedimentos endodônticos com o uso de dispositivos hápticos de alta fidelidade
Min Li e Yun-Hui Liu (2006) [43]	Explorar a modelagem e métodos eficazes de simulação de operações de configuração do canal radicular para fornecer retorno de força háptico e tátil convincente	Robô específico	Não identificado	É executada a modelagem do canal do dente com o auxílio de um robô (REMS) que coleta os dados de força e torque utilizados na ferramenta e recebidos na ponta da raiz do dente. Estes dados são utilizados para gerar os vetores com valores utilizados para o retorno háptico, com base no treinamento realizado com o auxílio de uma SVR. A avaliação é feita através da comparação de resultados medidos com o REMS e os estimados pelo método	Com a utilização de SVR pode-se estimar de forma convincente as forças de interação existentes dentro do canal do dente
Min Li e Yun-Hui Liu (2006) [44]	Avaliar a qualidade do retorno háptico obtido com a utilização de modelos baseados em SHP e MEF para modelagem, comparando as estimativas de retorno com valores de	Phantom Desktop	Monitor convencional	Primeiro são adquiridos os dados com o uso do REMS e gerados os vetores do retorno de força, em seguida o mesmo procedimento é realizado no ambiente virtual e os dados referentes à força aplicada são comparados com os obtidos do modelo real. A comparação é feita utilizando métodos de erro médio absoluto e erro quadrático médio	O modelo háptico proposto pode proporcionar boa simulação global para o treinamento endodôntico, no entanto o modelo é menos preciso quando simula a força do instrumento quando se desloca em direção à raiz do dente (profundidade) quando comparado aos movimentos laterais

Autores	Objetivo	Dispositivo Háptico	Visualização	Metodologia	Conclusões
	referência.				
Min Li e Yun-Hui Liu (2007) [41]	Desenvolver um simulador para treinamento de modelagem e limpeza de canais radiculares com o uso de dispositivos hápticos, utilizando modelagem dinâmica para simular o comportamento dos instrumentos e tecidos.	Phantom Desktop	Monitor convencional	É apresentado todo o processo de desenvolvimento do simulador, desde a modelagem dos dentes até as metodologias adotadas para a criação dos instrumentos e a polpa do canal, bem como a interação entre eles durante o processo de limpeza do canal. Durante os experimentos são avaliados diversas quantidades de partículas que compõe a polpa do dente a fim de identificar qual oferece melhor retorno visual e háptico	O simulador é capaz de fornecer um retorno de força aceitável para etapas de treinamento. O número de partículas que compõe a polpa do dente influencia na qualidade do retorno háptico e visual, sendo necessário realizar ajustes para reduzir os solavancos causados no dispositivo háptico, que fica em torno de 60Hz com o número de partículas variando entre 300 e 600
Marras e colegas (2008) [47]	Desenvolver um simulador capaz de realizar tarefas de abertura coronária para tratamento endodôntico.	Phantom Desktop	Shutter Glasses	A partir de fotos colocam o rosto do paciente para personalizar o paciente virtual, em seguida são selecionados os dentes que estarão visíveis em uma arcada dentária aberta. Os dados do dente são armazenados de forma volumétrica e um algoritmo de Matching Cubes é utilizado para renderizar o dente. São utilizadas 4 brocas no processo de drilling. Foram realizados testes de abertura coronária com 50 pessoas, entre estudantes e profissionais.	O simulador pode ser utilizado para treinamento de estudantes e para planejamento de cirurgias. Segundo relato dos participantes dos testes o simulador oferece um ganho de experiência para o usuário. Segundo os pesquisadores ocorreram alguns erros na execução dos procedimentos por inexperiência dos usuários no manuseio do dispositivo háptico.
Suebnuakarn e colegas (2010) [73]	Avaliar a curva de aprendizado de alunos que utilizam simuladores para treinamento de abertura coronária e identificar as variáveis, que, quando exibidas durante o treinamento, auxiliam o aluno	2 Phantom Omni	Monitor convencional	Os estudantes recebiam um treinamento por 2 dias com o simulador,. Durante o treinamento eram exibidas informações adicionais para o usuário a respeito da força empregada e da trajetória dos movimentos realizados. Depois de uma semana realizavam o preparo de um dente com o simulador, desta vez sem o uso das informações adicionais	Observou-se no decorrer das seções de testes a diminuição do tempo necessário para o procedimento de abertura, redução da quantidade de movimentos, melhor uso da força em cada situação, melhor escore do resultado final do dente.
Suebnuakarn e colegas (2011) [72]	Comparar a abertura coronária de dentes feitas por alunos que utilizam o simulador e alunos que recebem o treinamento tradicional	2 Phantom Omni	Monitor convencional	Foram selecionados dois grupos de estudantes. Um recebeu treinamento com simulador e outro com dentes naturais. Ambos os grupos realizaram a abertura coronária de dentes naturais antes e depois do treinamento. Os dentes foram comparados antes e depois do prepara para verificar a quantidade de material removida.	Avaliando o resultado do preparo dos dentes antes e após o treinamento, os pesquisadores concluíram não houveram diferenças significativas no preparo dos dentes, porém, os alunos que utilizaram o simulador removeram menos material do dente e cometeram menos erros que os alunos que tiveram o treinamento convencional.

Autores	Objetivo	Dispositivo Háptico	Visualização	Metodologia	Conclusões
Suebnukar e colegas (2012) [75]	Avaliar se o uso de simuladores melhora as habilidades de alunos de odontologia	2 Phantom Omni	Monitor convencional	Estudantes recebiam um treinamento em vídeo e eram divididos em 2 grupos. Um grupo recebia treinamento virtual e o outro não. Ambos os grupos faziam exploração e abertura coronária em um dente molar e um pré-molar.	Os dentes preparados eram avaliados por especialistas. Em ambos os dentes preparados o grupo que obteve o treinamento virtual foi melhor ranqueado.
Gottlieb e colegas (2011) [26]	Avaliar o nível de aprendizado de turmas de odontologia que utilizam simuladores comparando com turmas tradicionais	DentX Ltd	Monitor específico do simulador, similar a um monitor convencional	Professores responderam 3 questionários sobre o aproveitamento de alunos. O primeiro sobre alunos que não tiveram treinamento virtual. O segundo com suas expectativas com relação ao uso de simuladores e, o terceiro após a conclusão do curso.	Analisando os questionários constatou-se que houve ganho no aprendizado quando comparados os resultados de turmas que não utilizaram o simulador com a turma que utilizou, porém antes de iniciar o curso a expectativa dos professores era de ganho maior.
Eriksson e colegas (2012) [19]	Testar um novo dispositivo háptico com 6 DOF para perfuração de dentes	Customizado	Monitor semitransparente	Ortopedistas e residentes utilizaram o simulador para perfurar um dente. Em seguida avaliaram o dispositivo háptico com relação à movimentação, exploração, perfuração e como ferramenta de ensino.	Concluiu-se que as tarefas de navegação e perfuração são de boa qualidade. Já a tarefa de exploração provoca trepidações. O simulador foi bem avaliado com relação a sua utilização como ferramenta de ensino.
Tsao e colegas (2013) [76]	Identificar a angulação, a força empregada na rotação e no movimento apical aplicado sobre limas endodônticas	Customizado	Não Utiliza	Desenvolvimento de um pequeno sensor que recebe um lima endodôntica em sua ponta. É simulado o preparo de um canal curvo em um bloco de resina e os dados referentes às forças aplicadas na lima são coletados pelo sistema.	Por ser pequeno o dispositivo pode ser utilizado com modelos diferentes de limas, incluindo instrumentos rotatórios. O dispositivo identifica a força aplicada na lima e sua curvatura

No quesito relacionado ao tipo de dispositivo háptico utilizado nos trabalhos identificou-se que um trabalho utiliza um *PenCat* com 2 DOF [3], quatro utilizam dispositivos *Phantom Desktop* com 6 DOF [41, 44, 45, 47] e três utilizam dois dispositivos do tipo *Phantom Omni* com 6DOF de rastreamento e 3 DOF de retorno de força [72–74]. Além dos dispositivos convencionais quatro trabalhos utilizam dispositivos específicos em seus experimentos [19, 26, 42, 76].

Em aspectos relacionados com o método de visualização, nove trabalhos utilizam monitores convencionais [3, 26, 41, 44, 45, 72, 73, 75], um utiliza visualização tridimensional [47], um faz uso de um monitor semitransparente [19] e um não possui AV para visualizar realisticamente a simulação [76].

Com relação à questão sobre as ações que os simuladores realizam pode-se perceber que três deles se preocupam em representar as diferentes partes de

dentes para obter mais qualidade no render háptico [3, 42, 44], dois buscam modelar os instrumentos endodônticos e simular sua interação com a polpa do dente [40, 45], outros cinco trabalhos dão ênfase a tarefa de abertura coronária [19, 47, 72, 73, 75], três trabalhos realizam testes empíricos com usuários para avaliar o nível de aprendizado dos alunos que utilizam simuladores [26, 72, 75] e três trabalhos descrevem dispositivos hápticos customizados [16, 26, 76].

Por fim, ao analisar as metodologias de teste utilizadas nos experimentos, constatou-se que quatro trabalhos realizam avaliações subjetivas para verificar a qualidade do retorno de força [19, 26, 47, 74], e em oito trabalhos a avaliação é objetiva, comparando-se os resultados do simulador com algum padrão ouro, como por exemplo, a comparação com procedimentos reais [19, 41, 42, 44, 72, 73, 75, 76].

Dentre os trabalhos analisados, não foi encontrado trabalho algum que permitisse aos alunos interagirem com o AV utilizando limas manuais para o preparo do canal do dente e nem que possibilitasse a visualização do resultado do preparo do dente. Também não foi possível identificar trabalhos que apresentassem os movimentos que foram realizados pelos usuários durante a manipulação do instrumental endodôntico.

No aspecto de visualização, apenas os apresentados por Suebnukarn e colegas [63, 64, 66] apresentam gráficos indicando a força que é empregada no dispositivo háptico e o caminho que a ferramenta percorreu durante a simulação, porém este trabalho utiliza instrumentos rotatórios. Já os trabalhos que utilizam limas manuais preocupam-se apenas em comparar a força empregada em simuladores com a força real, sem aplicar o simulador como parte do treinamento de dentistas [40, 43–45, 45, 76].

[Página deixada propositalmente em branco]

5 Metodologia de treinamento proposta

A metodologia de treinamento aqui proposta visa fazer com que estudantes de endodontia possam praticar as ações envolvidas na etapa de limpeza e modelagem dos canais radiculares com limas manuais, utilizando um simulador de RV com um dispositivo háptico. Conforme já mencionado na seção 4.3, até o ponto em que se pode pesquisar na literatura, este tipo de simulação computacional é inédita, configurando-se em uma das inovações deste trabalho.

Além da simulação em si, após a realização da simulação o estudante pode visualizar os movimentos que realizou com as limas e a força que empregou no dispositivo háptico. Tal visualização permite que o próprio estudante detecte erros no manuseio do instrumento e na sequência de instrumentação. Da mesma forma que no caso da simulação, este também é um aspecto inovador deste trabalho, pois não foram encontrados trabalhos que permitissem a visualização do movimento das limas endodônticas posteriormente à simulação.

A metodologia consiste em fazer com que o usuário aplique corretamente a técnica de instrumentação escalonada para o PCR. Como o treinamento é baseado na limpeza e modelagem dos canais radiculares utilizando limas manuais, é considerado que a etapa de abertura coronária foi previamente realizada.

A seguir serão detalhadas as etapas da metodologia de treinamento e a forma de análise da simulação.

5.1 Etapas da metodologia

O treinamento utilizando o simulador é dividido em 7 etapas que devem ser realizadas pelos usuários, são elas:

- procedimentos prévios ao preparo do canal;
- odontometria;
- determinação do instrumento anatômico;
- preparo do batente apical;
- determinação do instrumento memória;
- escalonamento;

- procedimentos clínicos pós-preparo.

As seções a seguir apresentam o detalhamento destas etapas.

5.1.1 Procedimentos prévios ao preparo do canal

Antes de iniciar a instrumentação do PCR com as limas manuais é necessário realizar alguns procedimentos para ter acesso aos canais radiculares. O objetivo desta etapa é verificar se o usuário realiza a sequência correta de tarefas, sem se preocupar com os procedimentos propriamente ditos.

Conforme já mencionado, considera-se que já foi feita a abertura coronária do dente em uma seção de tratamento anterior, na qual foi colocado um curativo para o selamento da coroa do dente. A sequência de tratamento que deve ser adotada nesta situação consiste na aplicação da anestesia, colocação do isolamento absoluto e remoção do curativo do dente com o uso de instrumentos rotatórios. Tais ações estão disponíveis no simulador e o usuário pode ou não utilizá-las, bem como utilizar a sequência de instrumentação que acreditar ser a mais correta para o caso clínico simulado.

5.1.2 Odontometria

Após realizar os procedimentos prévios do preparo do canal é necessário fazer a odontometria para determinar o CT do dente e ajustar o tamanho das limas. A odontometria é realizada através da exploração dos canais radiculares com instrumentos de pequeno calibre. Com a lima dentro do canal radicular é feita uma tomada radiográfica e a posição dos cursores da lima são ajustados.

5.1.3 Determinação do instrumento anatômico

A próxima etapa consiste na identificação de qual é o instrumento anatômico que será utilizado no preparo do dente. É considerado como instrumento anatômico a primeira lima que se encaixa de forma justa ao canal radicular e consegue atingir o CT. Para sua escolha o usuário deve explorar o dente com limas finas até que perceba resistência à penetração ou ao giro, então esta lima deve ser definida como

instrumento anatômico. O instrumento anatômico é importante, pois a partir dele é que se define toda a sequência de instrumentação.

5.1.4 Preparo do batente apical

O preparo do batente apical é etapa em que se cria o degrau apical no dente. Este procedimento é realizado com a utilização de 4 ou 5 limas, a partir do instrumento anatômico. Todas as limas devem atingir o CT e realizar os movimentos cinemáticos adequados, podendo ser limagem, oscilatório ou rotação, dependendo do formato do canal que está sendo preparado.

A força empregada nos movimentos e a direção em que as limas são pressionadas influenciam no resultado do preparo do canal. Caso seja aplicada força excessiva podem ocorrer fraturas na lima e com a realização de movimentos cinemáticos inadequados o canal pode ser modelado de forma incorreta, modificando seu formato original.

Para o preparo do batente apical e para todas as demais tarefas em que uma lima é introduzida no canal, este deve estar irrigado, permitindo assim que os movimentos sejam executados de forma mais suave e que as raspas de dentina sejam retiradas do canal.

5.1.5 Determinação do instrumento memória

Ao final do preparo do batente apical deve-se determinar o instrumento memória que será utilizado na etapa de escalonamento. O instrumento memória é considerado o último instrumento utilizado no preparo do batente apical. Este instrumento é utilizado para intercalar com os demais instrumentos utilizados no preparo dos terços médio e cervical do dente.

5.1.6 Escalonamento

Quando é empregada a técnica escalonada, após o preparo do batente apical e da determinação do instrumento memória é realizado o escalonamento. De forma similar ao preparo do batente apical, no escalonamento são utilizadas de

quatro a cinco limas, com calibre maior que o instrumento memória e com numeração sequencial. A cada lima o comprimento deve ser ajustado e reduzido em 1mm, fazendo com que seja formada uma espécie de cone no canal do dente.

Intercaladamente com as limas utilizadas para o escalonamento deve ser utilizado o instrumento memória, a fim de verificar se é mantido o CT sem bloqueio por material depositado no fundo do canal ou desvio de direção. Por utilizar uma lima, todo procedimento deve ser realizado com os canais irrigados.

5.1.7 Procedimentos clínicos pós-preparo

Após o término do escalonamento o preparo do dente está concluído e devem ser realizados os chamados procedimentos clínicos pós-preparo. Nesta metodologia, são consideradas a visualização da radiografia pós-preparo, a colocação do curativo e selamento no dente e, por fim, a remoção do isolamento absoluto.

5.2 Visualização da simulação

A metodologia desenvolvida neste trabalho permite que o usuário analise sua simulação através de três formas de visualização da simulação:

- a sequência das ações realizadas pelo usuário;
- os movimentos cinemáticos e a força empregados durante a simulação;
- o resultado final do preparo do dente.

A seguir serão detalhadas as formas de visualizações disponíveis.

5.2.1 Visualização da sequência de ações

Durante a simulação todas as ações realizadas pelo usuário, como por exemplo, aplicação de anestesia, irrigação, troca de lima e determinação de instrumento memória, são identificadas e sua sequência é apresentada para o usuário. Com isto, ele pode analisar a sequência de ações que realizou e comparar com a sequência que é considerada correta. Esta avaliação é subjetiva, pois

depende da forma como recebeu o treinamento, que pode variar de instituição para instituição e, até mesmo entre professores da mesma instituição.

Para esta análise pode-se comparar a sequência de ações que o usuário realizou com as de um professor ou de outros usuários do sistema, permitindo assim identificar possíveis equívocos.

5.2.2 Visualização dos movimentos cinemáticos e da força empregada

Um diferencial do uso de simuladores equipados com dispositivos hápticos com relação ao treinamento convencional é a possibilidade de capturar os movimentos realizados pelo usuário e a força que foi empregada durante todo o treinamento. De posse destes dados é possível reproduzir os movimentos mostrando ao usuário se ele executa movimentos cinemáticos de forma correta, como por exemplo, o ângulo de giro em movimentos oscilatórios e de rotação, a força empregada sobre a lima e quais paredes do dente que são tocadas durante os movimentos. Com isto é possível que o usuário perceba se está realizando o tratamento de forma adequada em todas as paredes do canal.

5.2.3 Resultado final do preparo do dente

Por fim, é necessário avaliar o resultado do preparo do dente. Em um procedimento real tal ação só pode ser feita através de uma tomada radiográfica. Com o simulador é possível dividir o dente em diversas fatias e exibir em cada uma delas o formato anatômico original do canal do dente e o formato após o preparo.

[Página deixada propositalmente em branco]

6 O Simulador

Para aplicar a metodologia proposta neste trabalho foi desenvolvido um simulador baseado em RV com o uso de um dispositivo háptico. Para interação do usuário com o simulador foi adaptado um dispositivo háptico convencional com 3DOF (translação nos 3 eixos coordenados) para trabalhar com 4DOF, permitindo assim controlar a rotação das limas manuais. Além disto, foi desenvolvido um AV que simula o procedimento do PCR.

A seguir será descrito o desenvolvimento do dispositivo de interação háptica para limas endodônticas. Em seguida é apresentado o mecanismo de comunicação entre o AV e o dispositivo háptico. Logo após, é descrita a forma de visualização utilizada no simulador seguida da descrição detalhada do AV da simulação. Depois, são apresentados os métodos de *render* háptico utilizados no simulador e a geração dos dados de controle da simulação. Para finalizar, são descritos os modos de visualização dos resultados da simulação.

6.1 Dispositivo de interação háptica para limas endodônticas

Para simular os movimentos cinemáticos realizados com limas endodônticas, descritos na seção 2.5, é necessário que o dispositivo tenha três DOF para movimentar a lima pelo AV, mais um DOF que permita que a lima seja rotacionada sobre seu eixo longitudinal. Além disto, é de extrema importância que os quatro DOF tenham retorno de força, já que o usuário deve empregar mais força quando a lima está justa no canal do dente e vai ficando mais leve na medida em que a ação dos movimentos da lima promove a remoção de material do interior do canal radicular. Com os quatro DOF é possível deslocar a lima no ambiente virtual, lixar as paredes do dente e realizar os movimentos oscilatórios e de rotação, necessários para a realização dos movimentos cinemáticos endodônticos.

Considerando as características de rastreamento e retorno de força e, o custo e a disponibilidade dos equipamentos, optou-se por utilizar um dispositivo *Novint Falcon Controller*, que já dispõe de 3 DOF para controlar a translação, e adaptá-lo para permitir a fixação de uma lima e receber mais um DOF, referente ao giro da lima. O protótipo desenvolvido pode ser visto na Figura 28.



Figura 28 - Protótipo para simulação de movimentos cinemáticos endodônticos
Fonte: O autor

Para a construção do protótipo, inicialmente, foi necessário adaptar a posição de funcionamento do *Falcon*, pois este foi projetado para operar em movimentos horizontais, enquanto os movimentos endodônticos são predominantemente verticais. Para tanto, foi criado um **pedestal** em forma de esquadro, composto por duas placas de alumínio que são fixadas em forma de “L” no lugar do pedestal original do *Falcon*. A Figura 29 apresenta, na esquerda, o *Falcon* em sua posição original e, na direita, o dispositivo montado sobre o pedestal, na posição vertical.

Após o reposicionamento do *Falcon*, foi feita uma adaptação para permitir a conexão de uma lima endodôntica no joystick. Para tanto, foi criado um adaptador em forma de cilindro, que em uma extremidade encaixa-se na manopla de comando do joystick e na outra permite a fixação de uma lima. Este adaptador foi confeccionado com material plástico leve para não afetar demasiadamente o retorno

de força e o peso da movimentação do manipulador como um todo. O projeto do adaptador é apresentado no Anexo I.



Figura 29 - Falcon na posição original e com o pedestal na posição vertical
Fonte: O autor

Para permitir a leitura do giro feito pelo usuário com a lima, o adaptador possui em seu interior um sensor capaz de medir o ângulo de giro. Este sensor foi construído com um potenciômetro multivolta capaz de realizar 10 voltas (Figura 30). Este potenciômetro é alimentado com 5V de energia e o sistema é capaz de identificar 1024 posições de giro.

Para fixar a lima endodôntica no potenciômetro foi necessário colocar um eixo metálico para aumentar seu tamanho e permitir colocação dos demais equipamentos que fazem o retorno de força no eixo longitudinal.

Para reproduzir de maneira realista a sensação de toque na ponta dos dedos dos dentistas, idealmente deveria ser utilizada uma lima para ser manipulada, porém, com a fixação de uma lima no eixo não produziu bons resultados, devido à flexibilidade da lima. Nesta configuração, quando o dispositivo gerava o retorno de força a lima se curvava, não reproduzindo este retorno de força no momento correto. A solução para isto foi utilizar somente a cabeça da lima colada no eixo, que é rígido. Esta abordagem, entretanto, gerou um segundo problema, pois, a lima se soltava do eixo com frequência, uma vez que a área utilizada para colá-la era pequena.

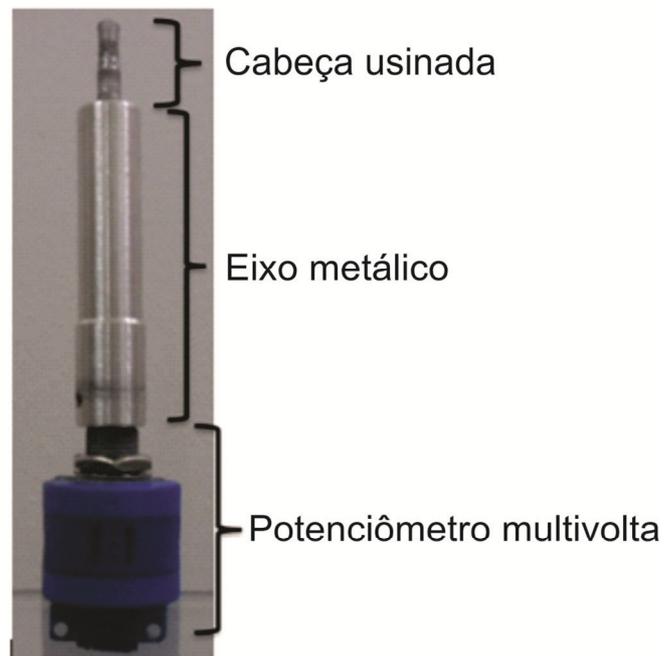


Figura 30 - Potenciômetro com o eixo adaptado
Fonte: O autor

Para resolver estes problemas foi então usinada uma peça diretamente no eixo metálico, com o formato de uma cabeça de lima. A Figura 30 mostra, na parte superior do eixo, a cabeça da lima usinada.

Para gerar o retorno de força no grau de liberdade referente ao giro, foi colocado na parte externa do adaptador um **mecanismo de freio**. Tal mecanismo é composto por um servomotor com uma haste (Anexo II) que, quando toca o eixo de rotação da lima, produz atrito entre as peças, fazendo com que fique mais pesada a realização do movimento de rotação. A Figura 31 mostra o sistema de freio. Na esquerda com movimentos livres e na direita com o freio acionado.

Com o objetivo de tornar a simulação mais natural, o posicionamento do dispositivo deve ser similar ao que os dentistas estão acostumados a trabalhar. Além da reorientação do joystick, já apresentada no início desta seção, foi necessário:

- ajustar a altura do dispositivo em relação ao chão de maneira que o a posição do usuário quando manipula o dispositivo háptico seja semelhante àquela que faz no mundo real;
- criar um apoio para o posicionamento da mão do usuário quando este manipula as limas.

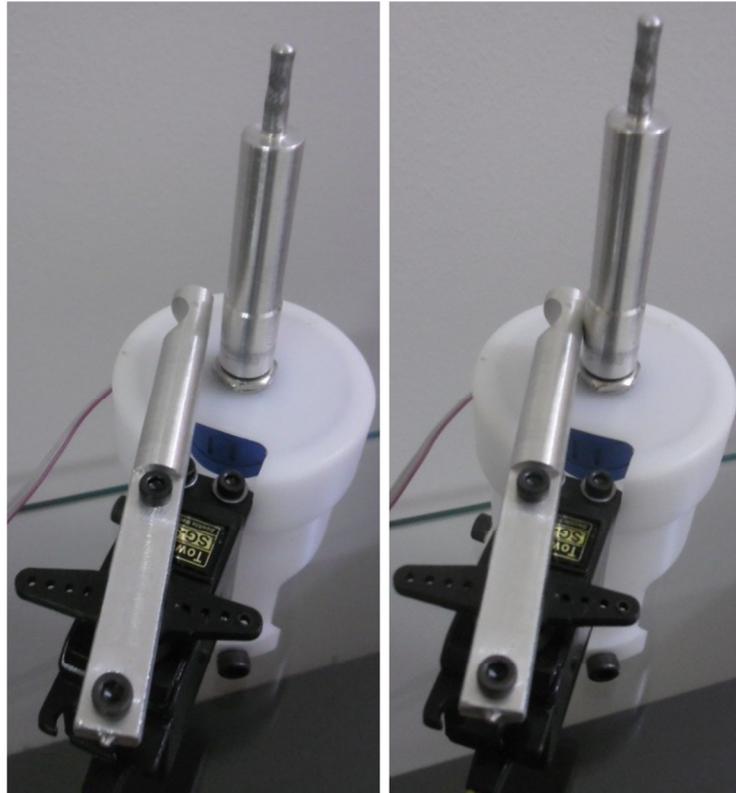


Figura 31 - Sistema de freio
Fonte: O autor

Inicialmente, o dispositivo foi colocado sobre uma cadeira (Figura 32), que o deixava em uma altura similar a da cabeça de um paciente quando é realizado o tratamento. Entretanto, esta configuração não dispunha de local para posicionar a mão do usuário, que em um procedimento real fica apoiada sobre os dentes do paciente.

Em testes preliminares, com três endodontistas experientes, observou-se que os profissionais não conseguiam posicionar a lima dentro do dente, pois não eram capazes de controlar o manipulador háptico com facilidade, ficando desorientados dentro do AV. Uma das hipóteses para isto foi a falta de apoio para a mão.

Pensando em resolver o problema de navegação, observou-se que os dentistas fazem movimentos pequenos dentro do dente, e não necessitam movimentar as limas longe do dente que está sendo tratado. Por este motivo optou-se por limitar os movimentos laterais do eixo a uma circunferência de 3,0cm de diâmetro. Com esta premissa, uma segunda configuração física foi desenvolvida.

Nesta configuração optou-se por utilizar uma base de apoio para a mão do dentista, simulando o que seria o rosto do paciente e nesta base criar uma abertura, simulando a boca. Esta montagem foi feita utilizando-se um banco de madeira, conforme a Figura 33. O assento do banco, com 25cm de diâmetro, foi usado como base de apoio, na qual foi feita uma abertura de 3,0cm de diâmetro, por onde passa o eixo de manipulação (Figura 34).



Figura 32 – Configuração física com o dispositivo sobre uma cadeira
Fonte: O autor



Figura 33 - Protótipo do dispositivo háptico
Fonte: O autor

Com o uso do banco foi possível aos usuários posicionarem a mão de forma mais semelhante àquela usada nos procedimentos reais o que possibilitou realizar os movimentos de forma mais precisa. A Figura 34 ilustra a mão de um usuário apoiada sobre um suporte enquanto manipula o dispositivo. A limitação dos movimentos laterais se dá pelo contato físico do eixo de manipulação com as bordas da base do banco e, dos movimentos verticais, na parte superior, pelo contato físico do dispositivo com o suporte do banco, e na parte inferior com o limitador do próprio joystick.



Figura 34 - Suporte para a mão do usuário com a abertura limitadora de movimentos
Fonte: O autor

6.2 Comunicação entre o AV e o dispositivo háptico

A comunicação entre o dispositivo háptico e o sistema é feita através de duas conexões USB. Em uma delas é ligado o *Falcon* e na outra é ligada a interface de comunicação do adaptador. É utilizado um controlador do tipo Arduino⁵ para fazer todo o controle dos dispositivos físicos presentes no adaptador.

Com relação à velocidade de comunicação dos dispositivos, o *Falcon* trabalha com frequência superior a 1000Hz, o que é necessário para garantir a estabilidade do dispositivo, porém, os dispositivos adaptados não são capazes de trabalhar nesta velocidade devido às suas características físicas. O controle do mecanismo de freio e do potenciômetro que lê o giro da lima precisam de 10ms para

⁵ <http://arduino.cc/>

serem acionados o que faz com que a comunicação seja limitada a 100Hz. A Figura 35 representa o esquema de comunicação utilizado entre o AV e os dispositivos.

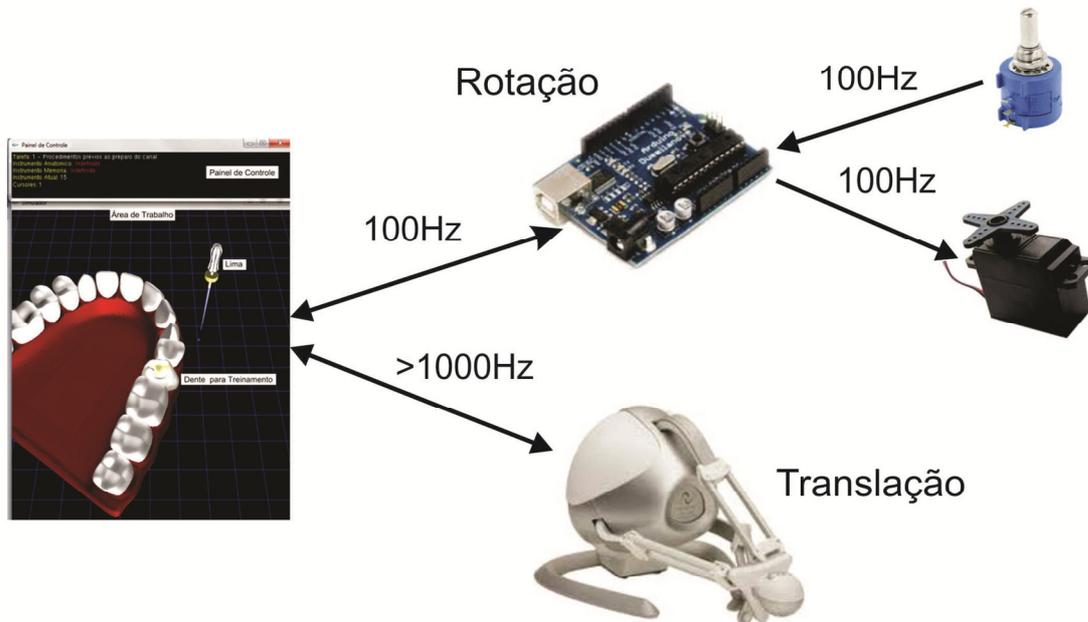


Figura 35 - Esquema de comunicação entre o AV e o dispositivo háptico
Fonte: O autor

6.3 Visualização

Os dispositivos de visualização em simuladores podem ser imersivos, nos casos em que os usuários não tem contato com o mundo real, ou não imersivos, quando o usuário tem contato com o mundo real. Para o simulador aqui apresentado optou-se por utilizar sistema de visualização não imersivo, uma vez que o usuário interage com o AV utilizando equipamentos reais e, por este motivo ele precisa visualizá-los.

Como dispositivo de visualização, foi adotado um monitor convencional, posicionado próximo ao dispositivo. Para facilitar a visualização do AV por parte do usuário, enquanto este opera o dispositivo, o monitor é colocado horizontalmente sobre uma mesa, com um pequeno ângulo de inclinação que pode ser alterado para permitir mais conforto ao usuário. Isto proporciona um melhor ângulo de visualização, similar ao que um dentista vivencia quando está realizando o tratamento em um paciente real. A Figura 36 apresenta o usuário interagindo com o sistema e o posicionamento do monitor.



Figura 36 - Posição do usuário e do monitor do simulador
Fonte: O autor

6.4 Ambiente Virtual

O AV é o responsável pelas interações da simulação. A tela é dividida em duas partes, o **painel de controle** e a **área de trabalho** (Figura 37). No painel de controle são exibidas informações para orientar o usuário sobre o andamento da simulação, como:

- a tarefa em uso, que equivale às etapas da metodologia já descritas na seção 5.1;
- o **instrumento anatômico**, que é a primeira lima que se encaixa de forma justa no canal;
- o **instrumento memória**, que é a última lima a ser trabalhada até o CT;
- o **instrumento atual**, quem indica o calibre da lima em uso;
- e **cursores**, que indica a quantidade de cursores colocados na lima.

Na área de trabalho é que acontece a interação entre a lima e os demais objetos presentes na cena. Esta tela varia de acordo com a tarefa que está sendo realizada.

A seguir serão exibidas as diferentes visões da área de trabalho e as ações que são visualizadas em cada visão, iniciando pelo ambiente da simulação, seguido da radiografia e da odontometria.

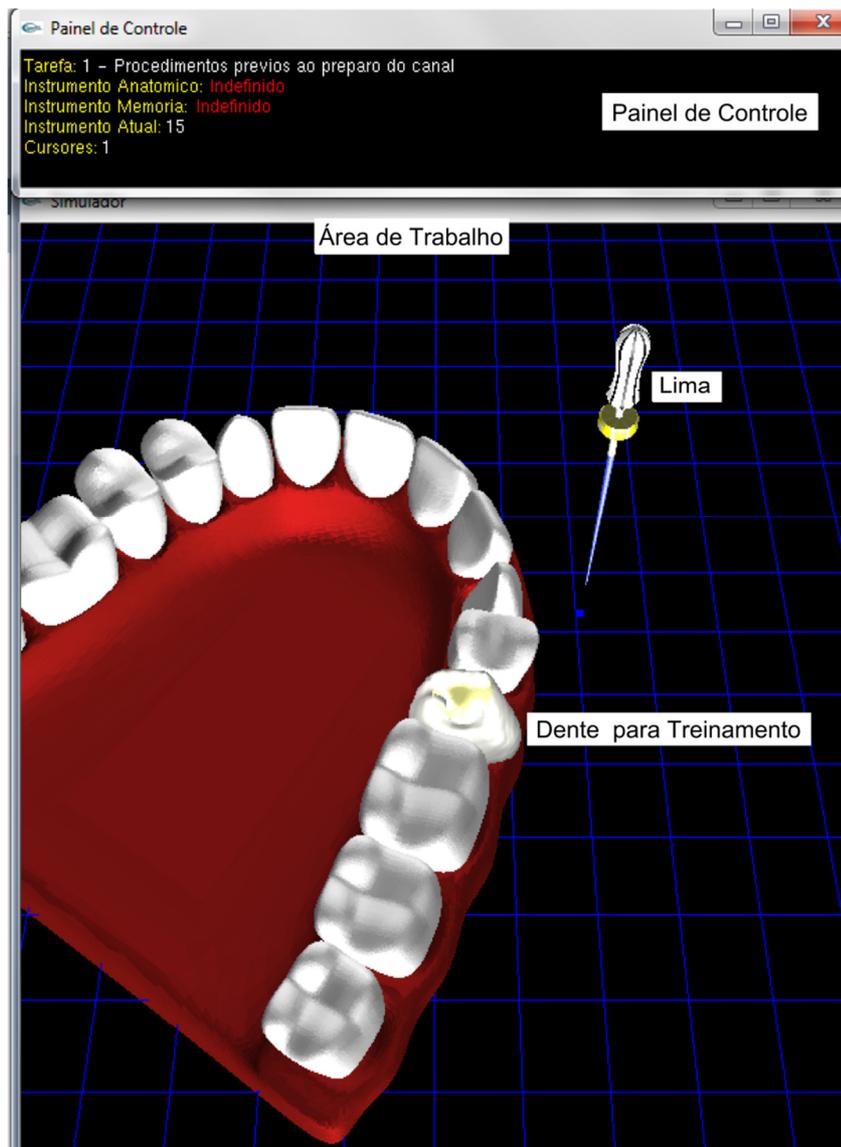


Figura 37 - Tela principal de simulação do AV
Fonte: O autor

6.4.1 Ambiente da simulação

A parte inferior da Figura 37 ilustra a principal visão que se tem do AV para a execução da simulação. Nesta tela é apresentada a arcada dentária com um dente em destaque, indicando qual será o dente utilizado na simulação, e a lima de trabalho atualmente selecionada.

Para dar completude à simulação do PCR algumas ações são realizadas pelo simulador a partir de comandos emitidos pelo usuário do sistema. Estas ações são importantes do ponto de vista de acompanhamento da sequência do tratamento, sem que seja levado em consideração o realismo na execução destas ações.

A seguir serão detalhadas as ações que são executadas durante o PCR na tela do ambiente da simulação.

Na **Anestesia**, o simulador apresenta uma animação de uma seringa aplicando a anestesia próxima ao dente que é tratado, como mostra a Figura 38.

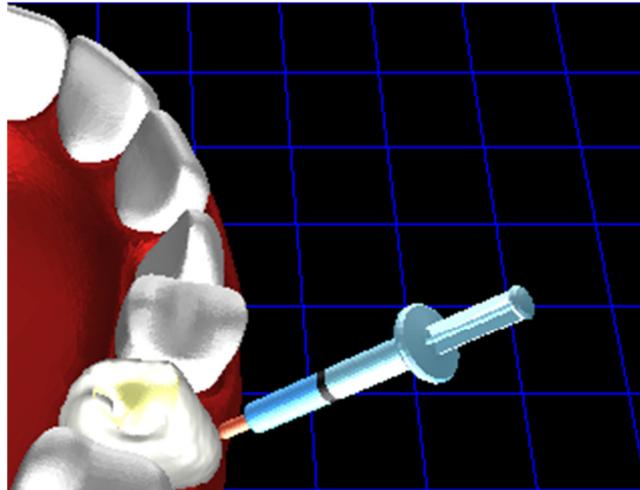


Figura 38 – Anestesia
Fonte: O autor

No **isolamento absoluto**, é colocada uma capa de borracha sobre os dentes do paciente, deixando aparente apenas o dente que está sendo tratado. Para isto o usuário pode colocá-lo ou retirá-lo, através da execução de comandos. A Figura 39, na esquerda, mostra o AV sem o uso do isolamento absoluto e na direita com este isolamento.

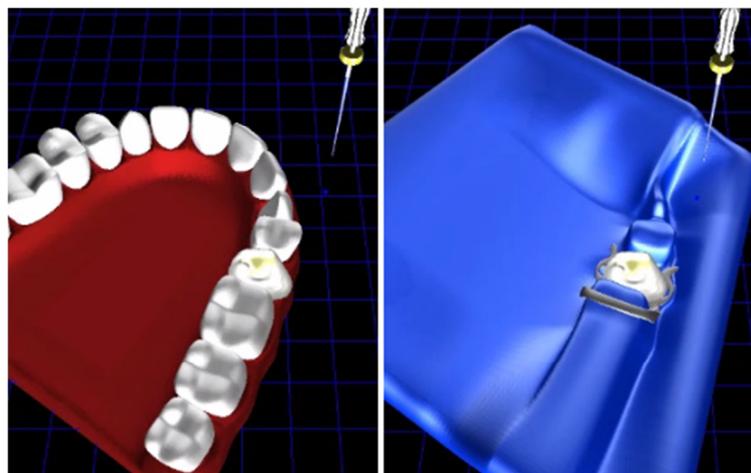


Figura 39 - Visualização da boca sem isolamento e com isolamento
Fonte: O autor

O **curativo** fecha o dente após ter sido realizada a abertura coronária. A remoção do curativo é feita com a utilização de instrumentos rotatórios. Nesta ação

é executada uma animação com um instrumento rotatório que remove o curativo, como mostra a Figura 40.

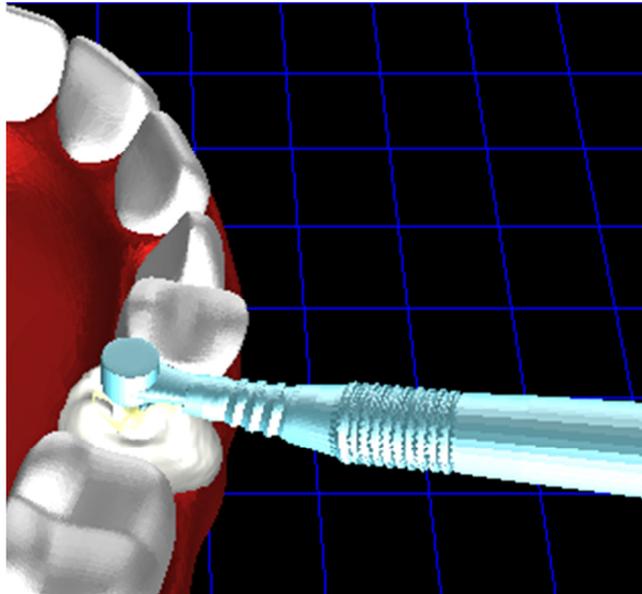


Figura 40 - Remoção do curativo
Fonte: O autor

A **irrigação e aspiração** são utilizadas para limpar e lubrificar os canais do dente. Para isto são utilizados uma seringa e um aspirador, respectivamente. Sempre que o usuário desejar realizar a tarefa é executada uma animação com os dois instrumentos, como mostra a Figura 41.

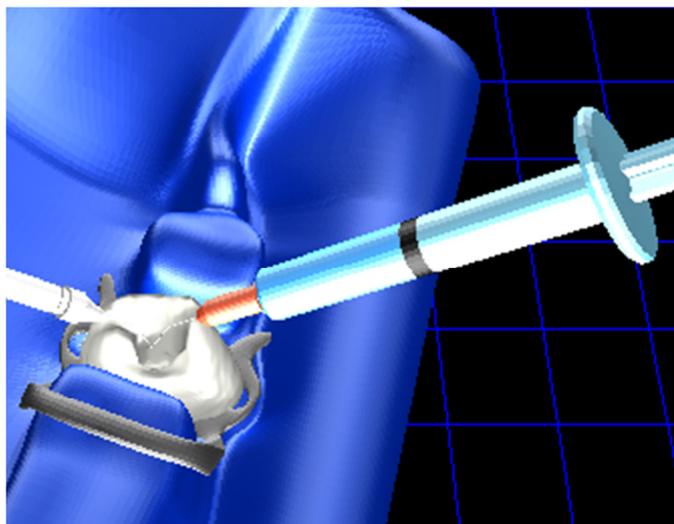


Figura 41 - Irrigação e aspiração
Fonte: O autor

Os **cursores** determinam a profundidade que uma lima pode penetrar no dente. Durante o tratamento o usuário deve modificar esta profundidade inserindo ou removendo cursores da lima. O simulador permite colocar até 5 cursores, com 1mm

cada (Figura 42). A posição do primeiro cursor é definida na odontometria e os demais cursores são empilhados na lima.

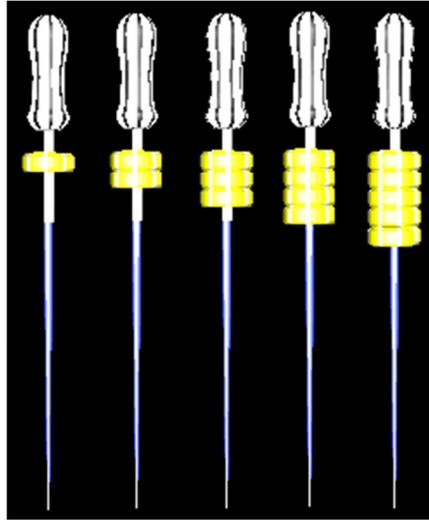


Figura 42 - Cursores nas limas
Fonte: O autor

As **limas endodônticas**, são identificadas de acordo com a cor de seu cabo, que seguem as cores padrão dos equipamentos reais, variando de acordo com seu calibre. Foi necessário colocar linhas verticais de cores diferenciadas nos cabos das limas para permitir a visualização das rotações. O sistema foi configurado para trabalhar com as limas de numeração entre o #10 e o #55, que são as limas necessárias para o tratamento do dente que é simulado. A Figura 43 mostra os modelos gráficos das limas, com a indicação de seu calibre e a cor dos cabos.

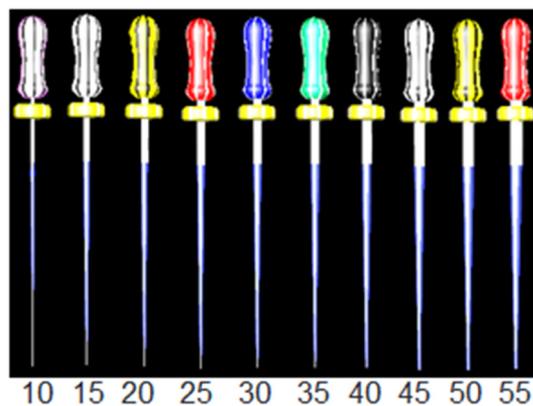


Figura 43 - Modelos gráficos das limas
Fonte: O autor

6.4.2 Radiografia e Odontometria

Para a realização de um tratamento endodôntico é necessário que o dentista possa visualizar o formato anatômico da parte interna do dente. Em um ambiente real isto é feito com uma radiografia. No AV é disponibilizada uma opção para o usuário visualizar um corte vertical do dente que mostra o formato dos canais. A Figura 44 ilustra a radiografia apresentada pelo simulador. Uma lima é posicionada ao lado do dente para dar uma melhor noção do tamanho do dente, uma vez que os objetos virtuais são exibidos em tamanho maior que os reais.

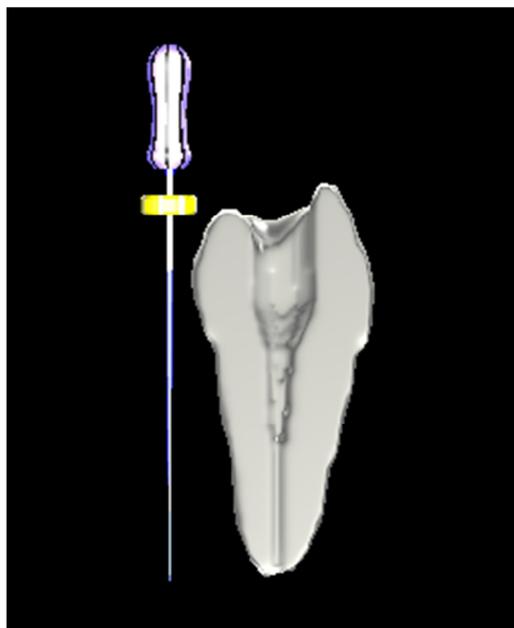


Figura 44 – Radiografia
Fonte: O autor

Outra ação importante durante o PCR é a odontometria. Na odontometria o usuário deve determinar qual o CT do dente. Para isto são colocadas linhas horizontais com a medida do dente sobre uma imagem radiográfica, facilitando assim o cálculo do CT. Para realizar a odontometria no AV o usuário posiciona a lima próxima ao dente e ajusta a posição dos cursores para que a ponta da lima atinja o CT desejado. Para mudar a posição dos cursores o usuário utiliza as teclas de movimentação, para cima e para baixo, para deslocar os cursores. Para inserir ou remover cursores são utilizadas as teclas de 0 a 5, indicando a quantidade de cursores que o usuário deseja colocar na lima. A Figura 45 apresenta duas imagens de odontometria. Um ponto vermelho é apresentado para indicar mais claramente a posição da ponta da lima.

Durante a odontometria o usuário deve posicionar corretamente o cursor de forma que a ponta atinja o CT desejado e que o cursor toque no bordo do dente. A identificação se o cursor toca o bordo do dente é feita através da mudança de sua cor. Quando está amarelo, como na Figura 45 à esquerda, indica que não está em contato e quando está vermelho indica que houve o contato, como ilustra a Figura 45 à direita. No exemplo apresentado na Figura 45, ao final do processo da odontometria o usuário posicionou o cursor fazendo com que a ponta da ferramenta atinja o CT de 19,5mm. Após a realização da odontometria, todas as limas ficam pré-configuradas para iniciarem com o cursor na mesma posição.

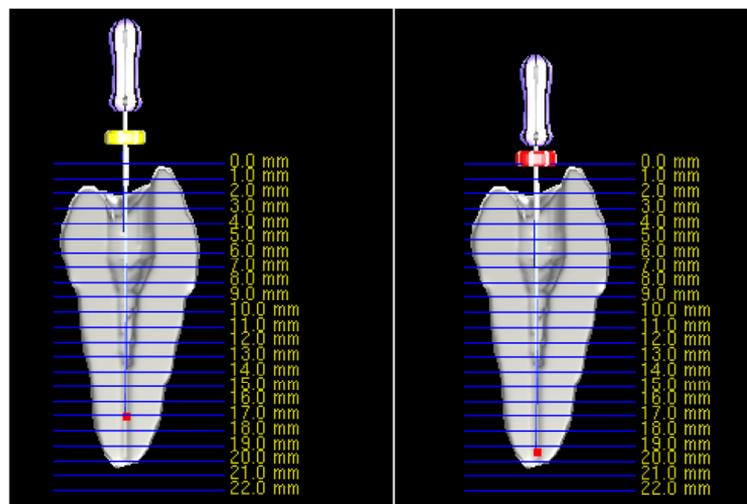


Figura 45 - Odontometria. Do lado esquerdo sem colisão com o bordo do dente, do lado direito com colisão

Fonte: O autor

6.5 Método de *render* háptico

O método de *render* háptico utilizado neste trabalho foi elaborado visando a utilização de objetos volumétricos com múltiplos materiais para representar estruturas rígidas. Os métodos de cálculo de colisão, de retorno de força e de remoção de material estão baseados no trabalho de Bogoni e Pinho [11], com adequações feitas para trabalhar com limas manuais ao invés de instrumentos rotatórios.

A seguir serão detalhadas as técnicas utilizadas para representação do dente que é tratado e dos instrumentos endodônticos. Além disto, serão detalhados os algoritmos utilizados para detecção de colisão, escolha da posição do *proxy*, cálculo do retorno de força e remoção de volume.

6.5.1 Representação do dente

O dente a ser tratado é armazenado de forma volumétrica em uma matriz tridimensional, na qual, cada entrada representa um voxel. Os voxels possuem um atributo que indica sua densidade, determinando o tipo de material que está representando, como por exemplo, esmalte, dentina e polpa. A densidade tem como objetivo informar ao *render* gráfico se o voxel é visível ou não e, ao *render* háptico a quantidade de material que resta para ser removido. Com esta metodologia, materiais mais duros, como o esmalte, possuem densidades maiores e materiais mais moles, como a polpa, possuem densidade menor. Quando o voxel possui densidade positiva ele é utilizado nos algoritmos de *render* gráfico e háptico, caso seja zero, o voxel é ignorado.

Outro atributo presente no voxel diz respeito ao seu posicionamento com relação a seus vizinhos. As classes possíveis são **externo**, quando possui densidade nula, **interno**, quando possui densidade e não tem vizinhos externos, ou, de **borda**, quando o voxel tem uma densidade positiva e pelo menos um vizinho externo. A classificação dos voxels externos e internos é simples, bastando verificar sua densidade. Para a classificação dos voxels de borda é necessário percorrer e analisar os 26 voxels vizinhos a ele, gerando a chamada **vizinhança-26** (Figura 46a) de cada voxel. Caso os voxels desta vizinhança não sejam todos do mesmo tipo (internos ou externos), o voxel é classificado como de borda.

Com estas informações obtém-se uma matriz 3D indicando o tipo de cada voxel que forma o objeto, que é ilustrada de forma bidimensional na Figura 46b, indicando quais são os voxels externos (0), internos (2) e de borda (1).

Outras informações importantes sobre os voxels dizem respeito às coordenadas que este ocupa. São utilizados dois sistemas de coordenadas, um local e outro global. No local, a coordenada representa a posição do voxel dentro da matriz 3D, que é utilizada para facilitar a localização dos vizinhos do voxel. No global, são armazenadas as coordenadas do voxel dentro do sistema de coordenadas do dispositivo háptico, que são utilizadas no algoritmo de render háptico para a detecção de colisão e cálculo do retorno de força. Para concluir a

construção do objeto é inserido um envelope que delimita a área da matriz que é ocupada pelos voxels que formam o objeto.

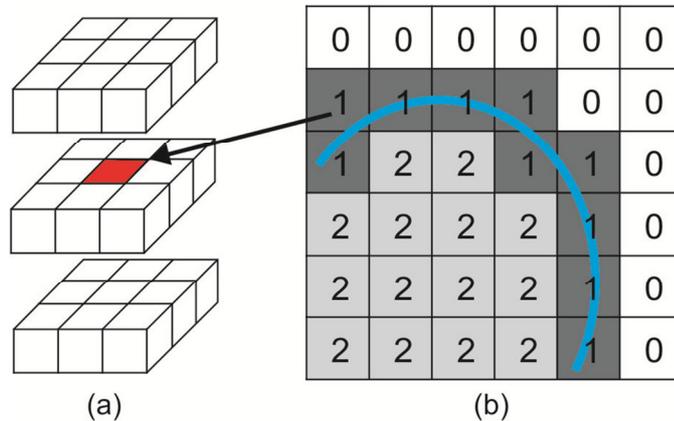


Figura 46- Vizinhança-26 (a) e mapa de ocupação (b)
Fonte: O autor

Os modelos são armazenados em uma matriz 3D com dimensões de 128x128x128 voxels. Para a visualização do modelo do dente é utilizado um algoritmo de *marching cubes* [46] executado na GPU do computador, tornando assim possível a visualização com taxas de amostragem acima de 30Hz. A implementação utilizada baseia-se no trabalho de Eisemann e Décoret [16].

6.5.2 Representação dos instrumentos endodônticos

A modelagem das limas é feita de forma híbrida, com um modelo geométrico para toda a ferramenta, utilizado no render gráfico, e outro volumétrico para a parte responsável pela interação com o dente e remoção de material, utilizado no render háptico.

Para o modelo volumétrico, os voxels são classificados de duas formas, uma para a parte cortante da lima, responsável pela remoção de material do dente, representados na Figura 47 pela cor escura, e outra, em vermelho, que representa a haste da lima. Esta parte não remove material, serve apenas para a detecção de colisão e retorno de força. Além destes voxels, existe um voxel que é utilizado como pivô da ferramenta, representado em azul. Este voxel é controlado pelo dispositivo háptico e é a referência para posicionar a representação gráfica da lima dentro do AV.

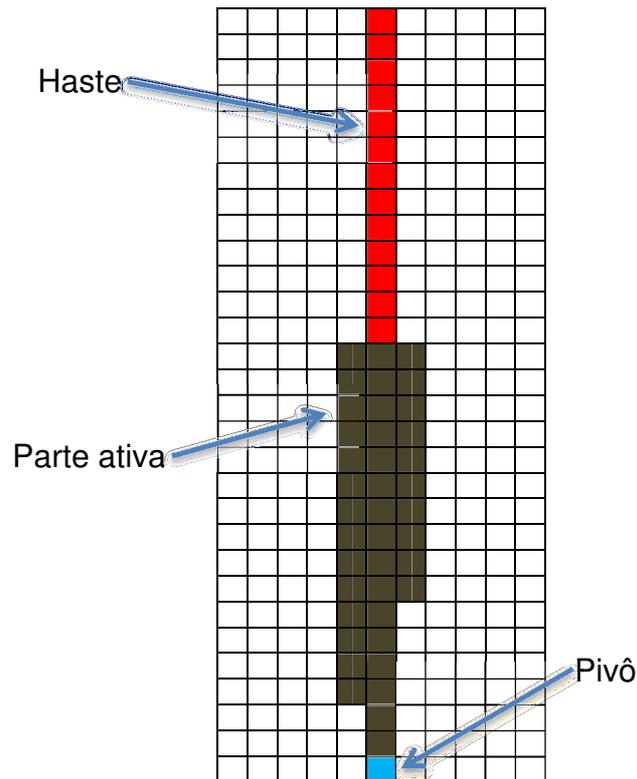


Figura 47 - Representação poligonal e volumétrica das limas
Fonte: O autor

6.5.3 Algoritmo de detecção de colisão

São utilizados dois métodos para detectar colisões e, posteriormente, calcular o retorno de força. O primeiro é utilizado na cena como um todo, envolvendo os modelos poligonais dos objetos. Neste caso, quando a lima toca algum objeto que não é o dente que está sendo tratado na simulação, os modelos gráficos trocam de cor indicando para o usuário que houve uma colisão, entretanto, neste caso, o retorno de força não é calculado.

A Figura 48 exibe, na esquerda, os modelos poligonais sem colisão entre a lima e os demais modelos, no lado direito, os modelos aparecem com cores em tonalidades avermelhadas, indicando que houve colisão entre os modelos.

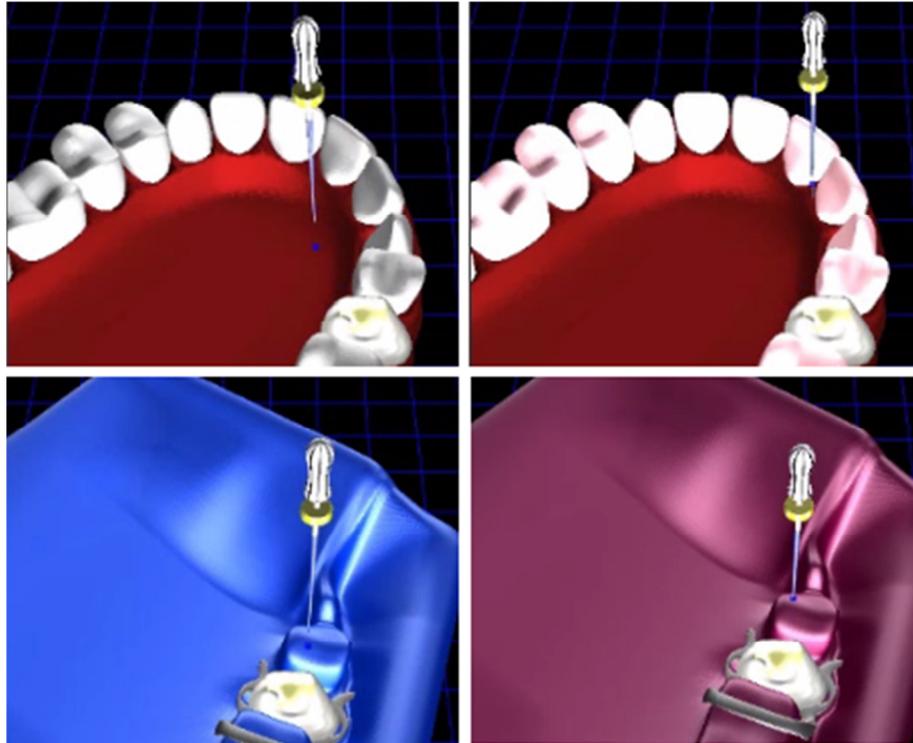


Figura 48 - Detecção de colisões com os modelos poligonais
Fonte: O autor

O segundo método considera apenas o dente que é tratado e a lima. Neste caso, é feita a verificação se o pivô da ferramenta está dentro do envelope do dente. Caso esteja, é utilizado o mapa de ocupação para verificar se existe colisão entre os modelos volumétricos do dente e da ferramenta.

Na abordagem utilizada para detectar colisões, que utiliza um mapa de ocupação, inicialmente os voxels do dente e da ferramenta são distribuídos no mapa. Em seguida, os voxels da ferramenta são transladados no mapa de ocupação de acordo com a movimentação realizada pelo usuário no dispositivo háptico. Após isto, o algoritmo de detecção procura por voxels da ferramenta que estejam sobrepostos a voxels do dente que possuem densidade não nula. Com isto, se verifica quais voxels da ferramenta estão tocando os voxels internos ou da borda do dente.

Com base nas colisões detectadas é possível que a lima deslize pela superfície do dente ou fique presa em algum obstáculo, o que pode ocorrer no caso de ser utilizada uma lima que, em alguma porção longitudinal, seja mais grossa que a abertura do canal. Para impedir que a lima penetre em espaços menores que seu diâmetro é necessário saber qual porção da lima ficou presa. Isto é feito

identificando-se os voxels com colisão e organizando-os em uma lista para facilitar a identificação de quais lados da ferramenta estão em contato com o dente.

A Figura 49 ilustra o processo de detecção de colisões, neste exemplo em 2D um dente é exibido cortado e é verificado apenas o contato com as bordas internas do canal do dente, que é representado em vermelho. Na imagem “A” não existem colisões, em “B” as colisões ocorrem apenas de um lado da ferramenta. Em “C” existem colisões com os dois lados da ferramenta, neste caso, os algoritmos de cálculo da posição do proxy e de retorno de força devem impedir seu movimento na direção apical, pois a ferramenta está presa no canal.

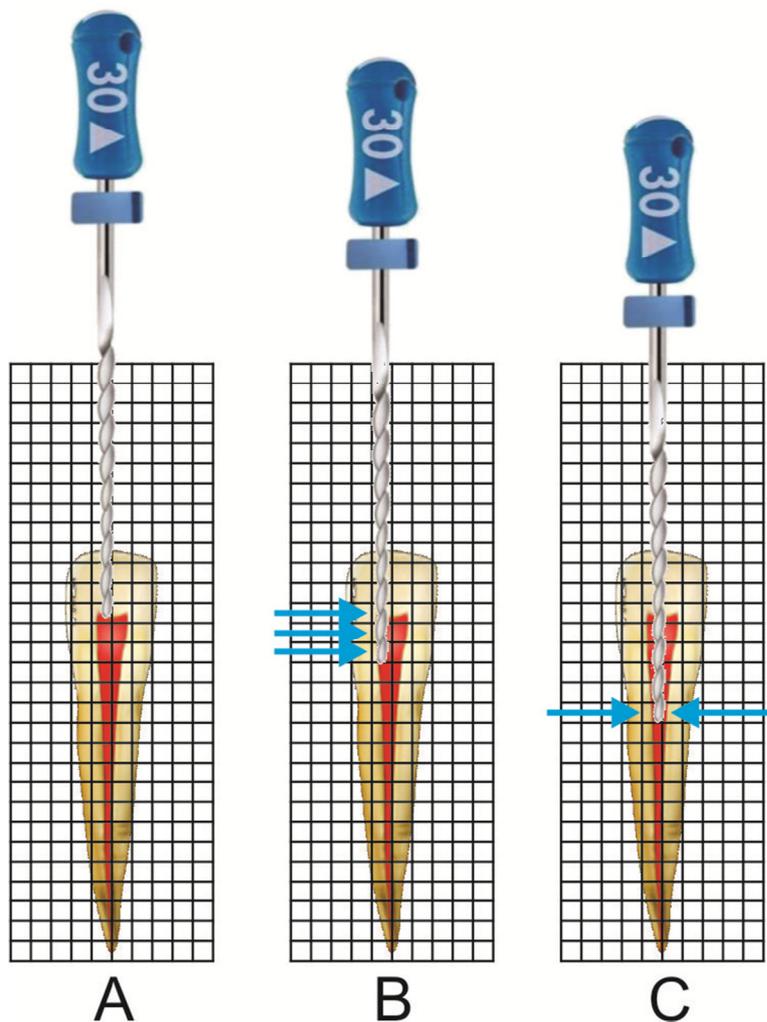


Figura 49 - Detecção de colisões
Fonte: O Autor

6.5.4 Algoritmo de escolha da posição do proxy

Conforme foi comentado na seção 3.3.2, para gerar o retorno de força é preciso existir um ponto na superfície do objeto que servirá como referência, conhecido como *proxy* ou *god-object*. O *proxy* é utilizado para calcular o vetor de força que é enviado para o dispositivo háptico quando o HIP penetra do objeto. Este vetor de força tem como objetivo empurrar o HIP em direção ao *proxy*, fazendo com que os atuadores do dispositivo háptico façam força contrária a movimentação do usuário forçando o HIP para a superfície do objeto.

Neste trabalho o método utilizado para escolha da posição do *proxy* tem como base a técnica apresentada por Vlasov e colegas [77], utilizando um algoritmo de *ray Casting* para determinar a posição do *proxy*. Porém, é necessário fazer alguns ajustes devido ao formato da ferramenta que está sendo utilizada. No algoritmo descrito por Vlasov e colegas [77] são utilizadas ferramentas esféricas para interação com o AV, com isto é utilizado apenas o pivô da ferramenta, envolto por um envelope esférico, para detectar as colisões e calcular posição do *proxy*. Neste caso, quando existe espaço para a esfera passar, toda a ferramenta a acompanha.

Como no método proposto por este trabalho, as ferramentas têm o formato similar a um cone, mesmo que a ponta da ferramenta passe por algum espaço, isto não garante que alguma porção dela não fique presa por ser mais grossa que o espaço aberto.

Quando a lima fica livre dentro do canal, é utilizado o pivô da ferramenta para escolher a posição do *proxy*. Neste caso a escolha da posição do *proxy* é feita em duas etapas, de maneira similar ao trabalho de Vlasov. Na primeira etapa, é eleito o voxel em que o *proxy* estará, e na segunda é identificada uma posição dentro deste voxel que esteja mais próxima possível da borda do dente.

A Figura 50 ilustra o algoritmo de escolha do voxel que receberá o *proxy*. Antes da ferramenta entrar na área do dente o HIP e o *proxy* estão na mesma posição (A). Quando a ferramenta entra no envelope do dente (B) inicia-se o processo de escolha do voxel do *proxy*. Neste momento, é utilizado o mapa de ocupação para criar uma lista com todos os voxels do dente, classificados como

externos e que fazem parte da vizinhança-26 do voxel que contém do *proxy* (C).
Dentre estes voxels é encontrado o voxel mais próximo da atual posição do HIP,
sendo este o voxel que conterá a nova posição do *proxy* (D).

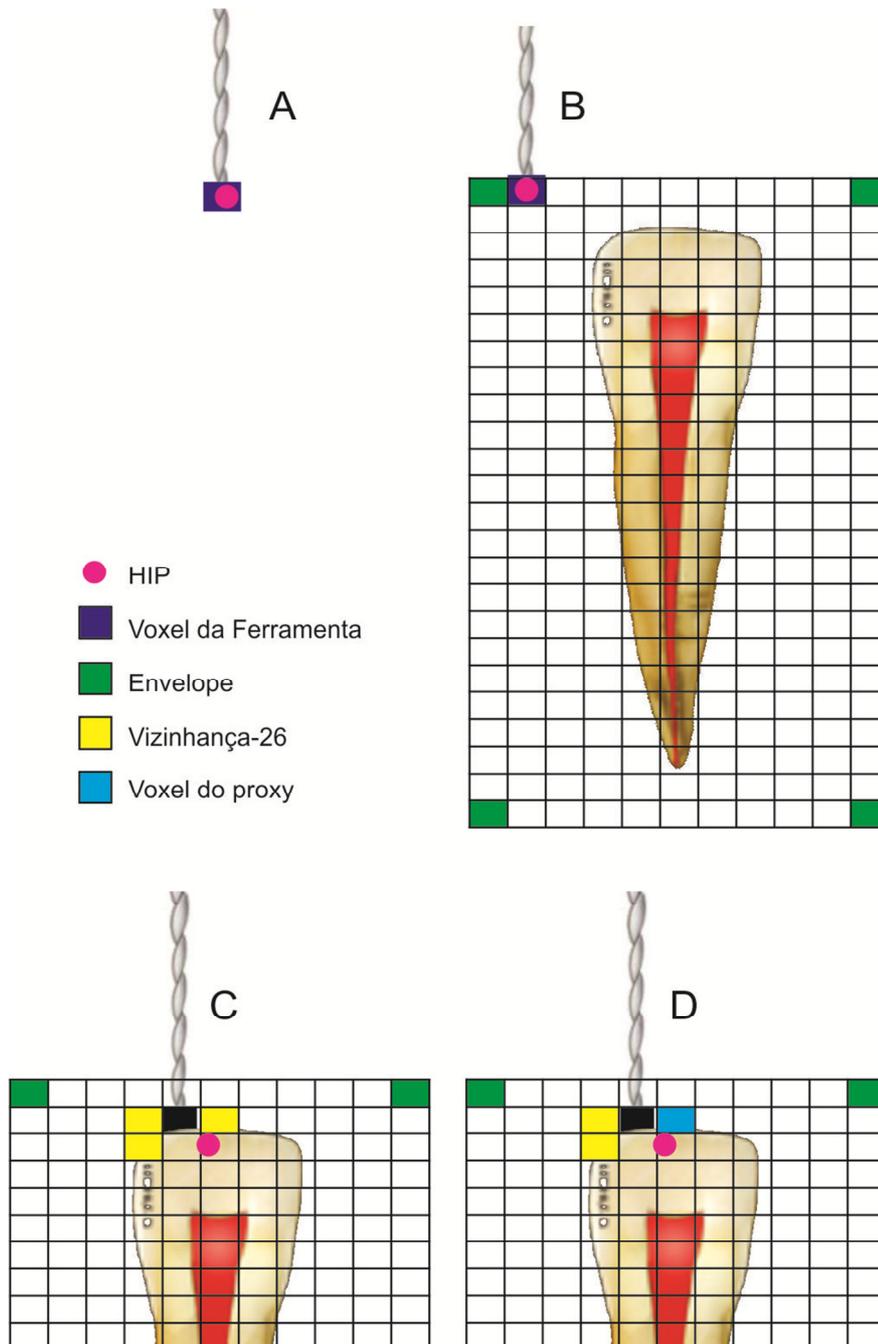


Figura 50 - Escolha do voxel do proxy
Fonte: O autor

Quando alguma porção da ferramenta, que não seja o pivô, ficar presa no canal por possuir diâmetro maior que o do canal, a lima não poderá mais se deslocar para dentro do canal. Neste caso é necessário calcular a posição do proxy de forma

diferenciada, sem considerar os voxels que estão na direção apical do dente, mesmo que estes estejam vazios. Isto faz com que o *proxy* possa deslocar-se apenas em direção a coroa do dente, o que ocorre quando a lima é retirada do canal.

A Figura 51 apresenta quatro situações que podem ocorrer para a escolha do *proxy*. Nestas imagens, o *proxy* é representado em cinza e os voxels candidatos a *proxy* estão em amarelo. Em “**A**”, a ferramenta está fora do dente e o *proxy* acompanha o HIP. Em “**B**”, a ferramenta está dentro da área do dente e possui vizinhos vazios de todos os lados. Já em “**C**”, o *proxy* está em colisão com as paredes de um lado do canal, por isso apenas os vizinhos dos outros lados podem ser candidatos a *proxy*, e, em “**D**” a ferramenta está presa no canal, neste caso os candidatos a *proxy* serão os voxels no sentido da coroa do dente.

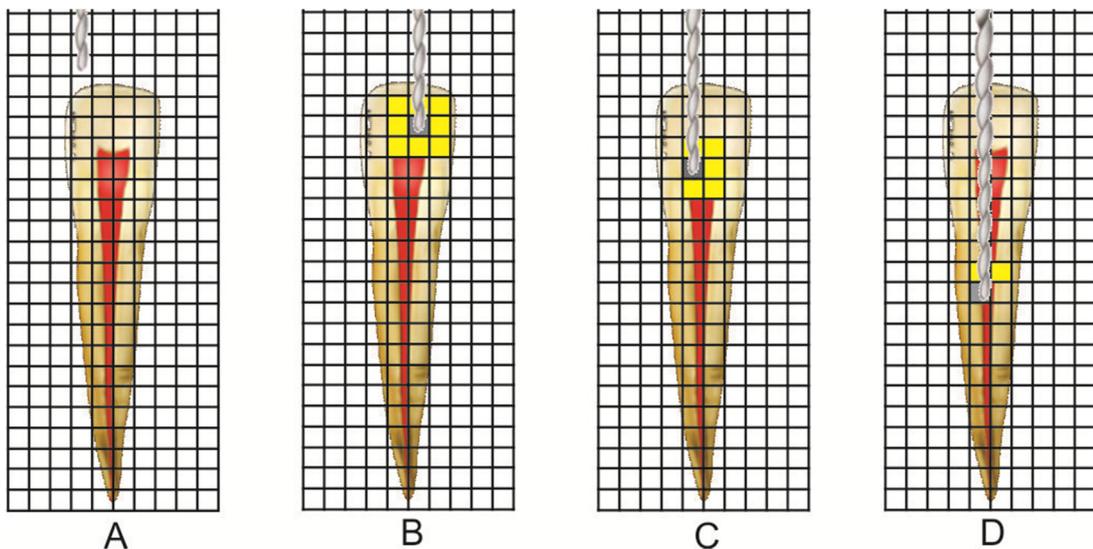


Figura 51 - Voxels candidatos a *proxy* em 2D
Fonte: O autor

Considerando os voxels candidatos a *proxy*, a Figura 52 ilustra o processo de escolha de qual deles é o escolhido. No tempo $t-1$ é apresentado o voxel atual com o *proxy* (em cinza) e os vizinhos externos deste voxel (amarelo). No tempo t o HIP é movimentado dentro do objeto e verifica-se, qual dos voxels vizinhos do atual voxel do *proxy* está mais próximo do HIP, e este é eleito como sendo o voxel do novo *proxy*.

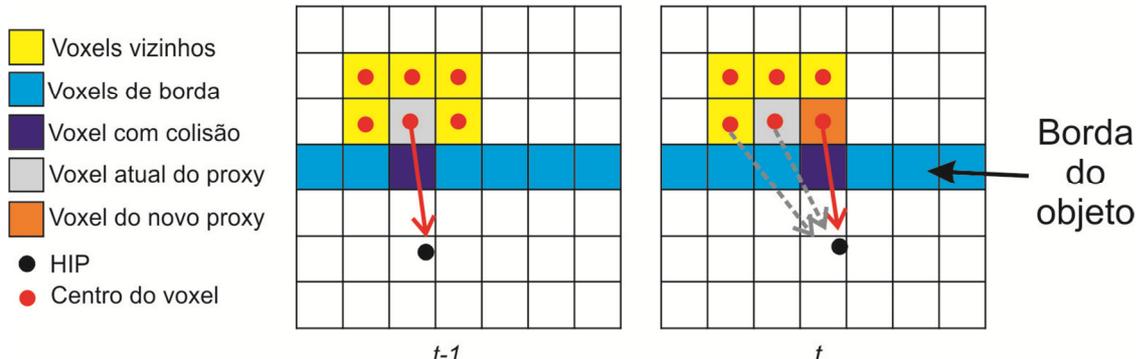


Figura 52 - Determinação do voxel que conterá o proxy

Fonte: O autor

Dependendo do tamanho de cada voxel, a simples escolha do voxel do *proxy* e a utilização de seu centro como sendo a posição do proxy pode causar instabilidade do dispositivo háptico, uma vez que o deslocamento do HIP, entre dois ciclos de render háptico, deve ser inferior a 0.1mm [81]. Como neste trabalho os voxels possuem dimensão de 0,35mm, faz-se necessário refinar a posição do *proxy* para tornar o deslocamento mais suave. Este refinamento é realizado lançando-se um raio do centro do voxel do *proxy* até a posição do HIP. Este raio é percorrido em pequenos passos até atingir um voxel de borda. Quando isto ocorre a posição anterior do caminhamento é definida como sendo a posição do novo *proxy*. O caminhamento ao longo do raio é realizado utilizando-se um passo constante, que deve ser determinado de acordo com o tamanho do voxel e que não deve ultrapassar 0,1mm. A Figura 53 mostra o caminho que é percorrido pelo *proxy* desde o centro do voxel escolhido até a posição do HIP, com pequenos passos, até atingir um voxel de borda, sendo então determinado o ponto anterior como a posição ajustada do *proxy* e que será utilizada nos algoritmos de retorno de força.

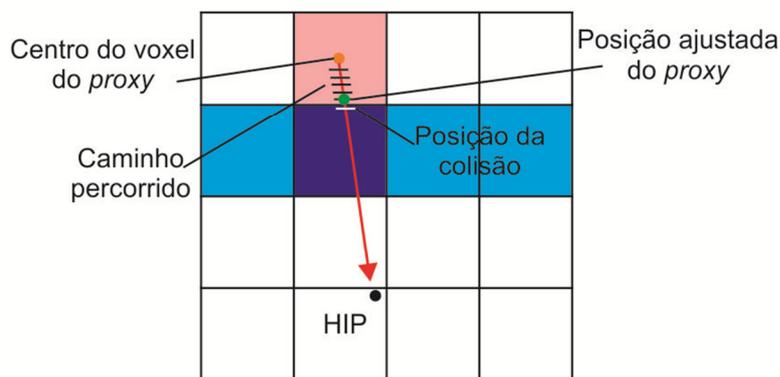


Figura 53 - Ajuste da posição do proxy

Fonte: O autor

6.5.5 Algoritmo de cálculo do retorno de força

Com as adaptações feitas no dispositivo háptico são necessários dois algoritmos distintos para calcular o retorno de força. O primeiro é o retorno de força para a translação da ferramenta, que é feito diretamente no joystick. O segundo trata do giro da lima, e é feito através do sistema de freio adaptado ao joystick.

6.5.5.1 Retorno de força para a translação da ferramenta

O retorno de força referente às translações utiliza as posições do proxy e do HIP para calcular o retorno de força. Neste caso, dentro do AV a ferramenta sempre acompanha o *proxy* e não pode penetrar nos voxels de borda ou internos do dente. Assim, a ferramenta pode navegar apenas pelos voxels classificados como externos e deslizar sobre a borda do dente. Já o HIP, como descrito por McNeely e colegas [49], pode penetrar no objeto e sua posição e distância com relação ao *proxy* são utilizadas para indicar, respectivamente, a direção e a magnitude da força que será enviada para o dispositivo háptico.

Dependendo do deslocamento do HIP em relação à borda do objeto, a ferramenta pode deslizar sobre o objeto, desde que não existam obstáculos que impeçam este movimento. Ou, no caso de haver obstáculos, o *proxy* permanece fixo e o retorno de força fará com que o dispositivo exerça força para empurrar o HIP para fora do objeto em direção ao *proxy*.

A Figura 54 ilustra a movimentação do HIP e do *proxy*, sendo que em “**A**” é mostrado o HIP e o *proxy* juntos e em “**B**” o *proxy* fica na borda e o HIP dentro no objeto. A partir do momento em que o HIP penetra no objeto é possível calcular o vetor de força (\vec{F}) que será enviado para o dispositivo háptico. Esta força terá mesma direção e sentido oposto ao vetor que liga o *proxy* e o HIP. A magnitude do vetor é dada pela distância entre o *proxy* e o HIP.

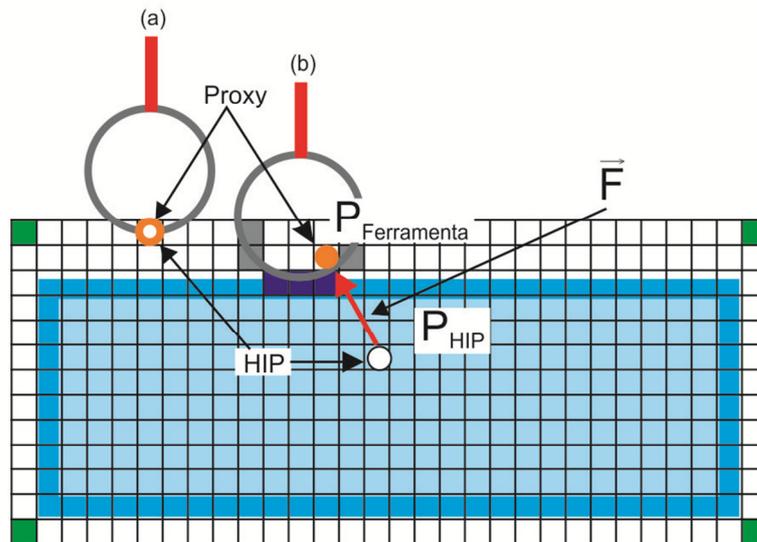


Figura 54 - Componentes do Cálculo do Retorno de Força
Fonte: O autor

Para determinar a força resultante (\vec{F}) que será enviada para o dispositivo háptico, são utilizados um vetor e um valor constante. O vetor indica a distância entre o HIP e o *proxy*, representados respectivamente por P_{HIP} e $P_{Ferramenta}$ na Figura 54. A constante representa a resistência do material que constitui a borda do dente em que o *proxy* está colidindo. A força resultante \vec{F} é obtida utilizando-se a Lei de Hooke [52] pela Equação (1), onde, P_{Proxy} é a posição do *proxy* nas coordenadas do dispositivo háptico, P_{HIP} é a posição atual do apontador do dispositivo háptico, e K é uma constante de rigidez do material do voxel.

$$\vec{F} = (P_{Proxy} - P_{HIP}) * K \quad (1)$$

6.5.5.2 Retorno de força para o giro

O retorno de força para o giro da lima é utilizado para que o usuário perceba quando a lima está presa nas paredes do canal. Neste caso são avaliados quais voxels da lima estão em colisão com o dente. Isto é feito tomando-se a lima no sentido vertical e percorrendo-a longitudinalmente, identificando, a cada camada de voxels, quais deles estão em colisão. Dependendo da quantidade e da posição dos voxels que estão em colisão é acionado o freio produzindo mais resistência para o giro.

A Figura 55 ilustra como é feita a detecção de colisões para calcular o retorno de força que será gerado para o giro. Na esquerda é apresentada a lima

posicionada verticalmente com os voxels da parte de corte, que removem material, e os voxels da haste, que não remove material. A cada camada de voxels é verificado quais voxels da ferramenta estão em colisão com os voxels do dente. Nas imagens da direita, em “A” somente um lado da ferramenta está em colisão, neste caso o freio é acionado para produzir um pouco de resistência. Em “B”, dois lados estão em colisão, portanto o freio é acionado para produzir mais atrito, conseqüentemente mais resistência. O mesmo acontece em “C” e “D”, que possuem mais resistência ao giro.

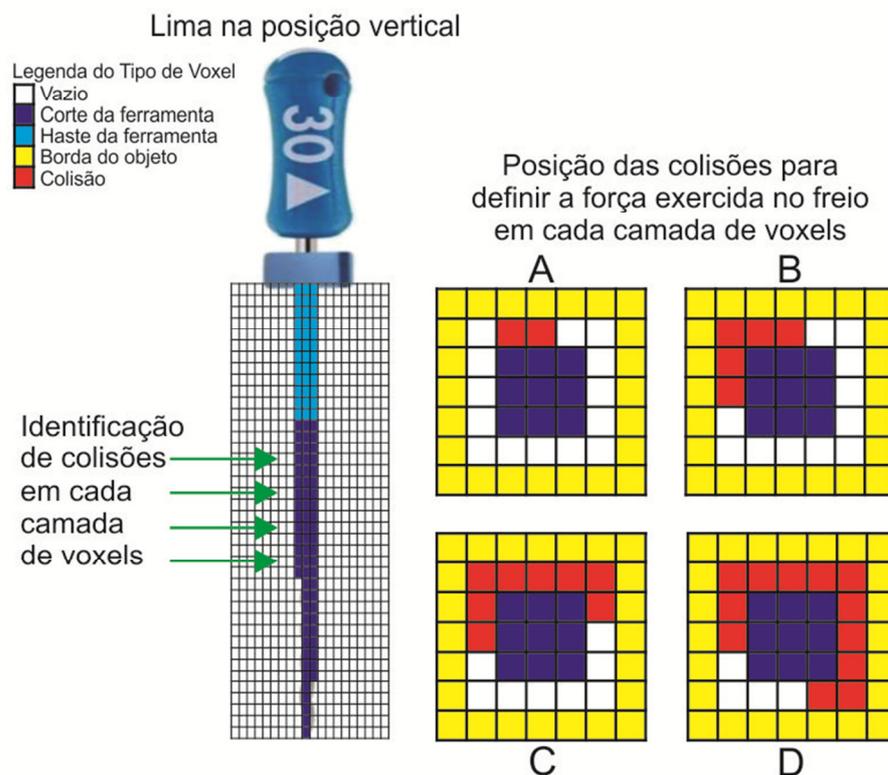


Figura 55 - Identificação de colisões para o retorno de força do giro
 Fonte: O autor

Para determinar o nível do freio, todas as camadas de voxels da ferramenta são verificadas e o nível utilizado é o da camada que possui mais lados da ferramenta com colisão, pois, com apenas um lado em colisão, a ferramenta pode deslizar pelo canal do dente e girar facilmente, porém, com todos os lados em colisão a ferramenta está presa e precisa que seja exercida mais força para poder girá-la.

6.5.6 Algoritmo de remoção de volume

Os efeitos sobre a estrutura do dente, decorrentes das colisões das partes cortantes da ferramenta com as bordas do dente, provocam a remoção de voxels e, conseqüentemente, o alargamento dos canais radiculares. Com isto, a forma do objeto é alterada através da eliminação de alguns voxels da borda, o que faz com que voxels internos passem a ser classificados como de borda.

A metodologia utilizada neste trabalho é inspirada no modelo de remoção de material proposto por Wang e colegas [80] que utiliza ferramentas rotatórias para realizar a perfuração de dentes. Em seu método a quantidade de material que é removido é calculada com base na velocidade tangencial da ferramenta e em seu deslocamento. Além disto, Wang e colegas [80] destacam que, caso seja utilizada força excessiva durante o processo de perfuração, isto não irá aumentar a quantidade de material removido do objeto, devido ao limite físico do dispositivo háptico em uso.

Na metodologia aqui apresentada um voxel é removido quando sua densidade é zerada. A redução da densidade dos voxels se dá de forma gradativa levando-se em conta a força empregada pelo usuário sobre o dispositivo háptico, respeitando o limite do retorno de força configurado no sistema como sendo a máxima força permitida para realizar o desgaste e o tipo de movimento cinemático realizado.

Considerando os movimentos cinemáticos realizados pelo dentista quando a lima está descendo pelo canal, devido ao formato das lâminas de corte, não há remoção de material, independentemente de estar tocando nas bordas do canal. Quando a lima é girada ela remove uma pequena quantidade de material, ou seja, reduz um pouco a densidade dos voxels em colisão. E, quando a lima é tracionada para fora do canal, ocorre maior remoção de material, e, com isto, a redução da densidade dos voxels é maior.

Outro fator que influencia na redução da densidade dos voxels é a força aplicada sobre as paredes do canal quando é feita a tração da lima para fora do canal, removendo-se mais densidade do lado para o qual esta força é aplicada.

Para quantificar a porção de material que é removido é utilizado um coeficiente de desgaste (α), calculado utilizando a Equação 2. Para este cálculo é necessário determinar o valor máximo de força que é considerado para a remoção de material (d_{max}), e a distância entre o *proxy* e o HIP (Δd), indicando quando será realizado o desgaste máximo de material. Com isto, caso o usuário aplique pouca força estará removendo pouco material e caso aplique força acima do limite definido, não removerá mais material.

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{se } \Delta d \geq d_{max} \\ \frac{\Delta d}{d_{max}} & \text{se } \Delta d < d_{max} \end{cases} \quad (2)$$

A Figura 56 ilustra a forma como é calculado o coeficiente de desgaste. Na imagem da esquerda, o HIP está dentro do limite de força aceito pelo sistema (d_{max}), portanto α é calculado. Na imagem da direita o HIP ultrapassa o limite e α assume o valor máximo permitido, com isto, a força excedente executada pelo usuário é desprezada.

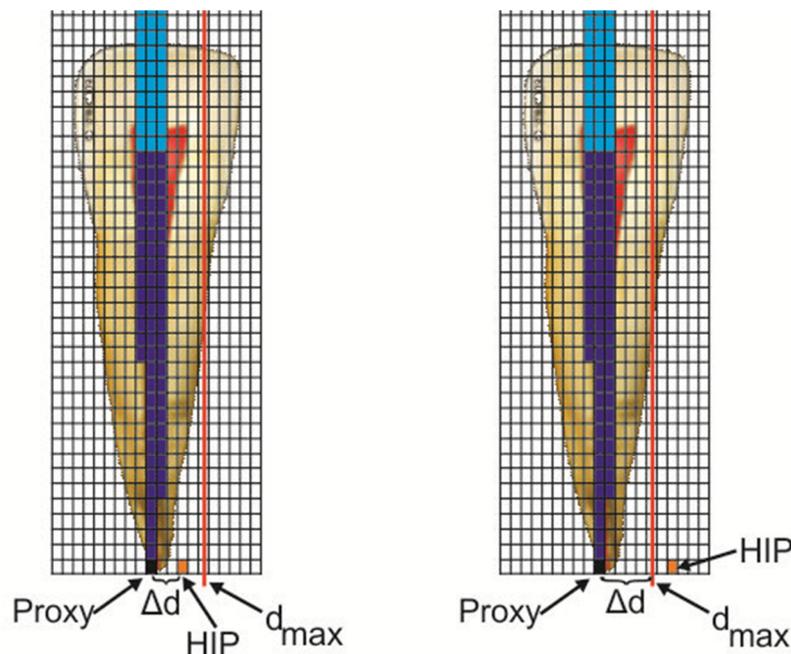


Figura 56 - Demonstrativo do cálculo do fator de multiplicação para remoção de voxels
 Fonte: O autor

Além do coeficiente de desgaste, é utilizada uma constante que representa o material do qual é constituída a ferramenta, que pode desgastar o objeto com maior ou menor intensidade. O cálculo final que definirá a nova densidade dos voxels do objeto é executado a cada 25ms, utilizando a Equação (3), onde, D é a densidade

atual do voxel, $K_{Ferramenta}$ é a constante que representa o material da ferramenta, e, α é o coeficiente de desgaste.

$$D' = D - k_{Ferramenta} * \alpha \quad (3)$$

Quando a densidade de um voxel torna-se nula o voxel é eliminado do *render* háptico e gráfico. Além disto, a borda do objeto deve ser redefinida, reclassificando os vizinhos do voxel removido. Neste processo são selecionados os voxels internos da vizinhança-26 do voxel que foi removido, atualizando a classificação de cada um deles. A Figura 57, do lado esquerdo mostra a colisão entre os voxels da ferramenta e do objeto, e do lado direito é demonstrado como fica a borda após a remoção dos voxels que estavam em colisão.

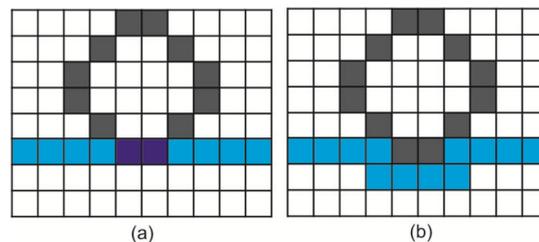


Figura 57 - Remoção de voxels
Fonte: O autor

6.6 Geração de dados de controle da simulação

Ao iniciar a simulação, o sistema inicia o monitoramento das ações que são realizadas pelo usuário, ações estas já apresentadas na seção 5.1. O controle é realizado através da captura dos comandos executados pelo operador do sistema, dos movimentos feitos pelo usuário com o dispositivo háptico e de dados gerados pelo próprio sistema.

O sistema gera um arquivo de log que é lido posteriormente pelo subsistema responsável pela análise e visualização da simulação. As linhas do arquivo são inseridas a cada 25ms e contém as informações descritas na Tabela 6.

Tabela 6 - Dados do Arquivo de log
Fonte: O autor

Informação	Descrição
Tempo	Tempo atual da simulação
Proxy	Coordenadas (X,Y,Z) da posição atual do proxy
Força	Coordenadas (X,Y,Z) do vetor de força enviado ao dispositivo háptico
HIP	Coordenadas (X,Y,Z) da posição atual do HIP
Rotação	Ângulo atual da leitura do giro da ferramenta
Posição sem Colisão	Posição do servomotor do freio quando não está acionado
Posição do freio	Posição atual do servomotor
Lima em uso	Identificação da lima em uso
Movimento cinemático	Classificação do movimento cinemático identificado pelo sistema
Quantidade de cursores	A quantidade de cursores colocados na lima
Colisão com o batente	Identifica se o cursor está em colisão com o bordo do dente
Posição do curso	Identifica a posição do primeiro cursor colocado na lima
Tarefa	Identifica a tarefa que está sendo realizada
Comando	Identifica o comando executado pelo usuário
FPS	Velocidade da simulação háptica, medida em <i>Frames</i> por Segundo

Além deste arquivo e log, o sistema cria, ao ser inicializado, um arquivo com a matriz tridimensional do dente utilizado na simulação com a densidade de cada voxel da matriz.

Com o objetivo de identificar a situação das densidades do dente simulado, a qualquer momento, o operador pode gerar um arquivo com a densidade dos voxels. Isto pode ser utilizado, por exemplo, para avaliar o andamento da simulação, gerando um arquivo a cada troca de limas, ou, somente no final da simulação para verificar os voxels que foram removidos.

6.7 Visualização dos resultados da simulação

Para visualizar o resultado das simulações foi desenvolvido um subsistema que lê os arquivos de log criados durante a simulação e exibe os dados de forma interativa para o usuário.

A visualização é composta por quatro janelas que se complementam. A Figura 58 apresenta estas janelas, em “A” são exibidos gráficos de movimentação vertical e de rotação, além da sequência de instrumentação, em “B” a visualização interativa dos movimentos com a força aplicada pelo usuário, em “C” a visão superior da animação e, em “D” o resultado final do preparo.

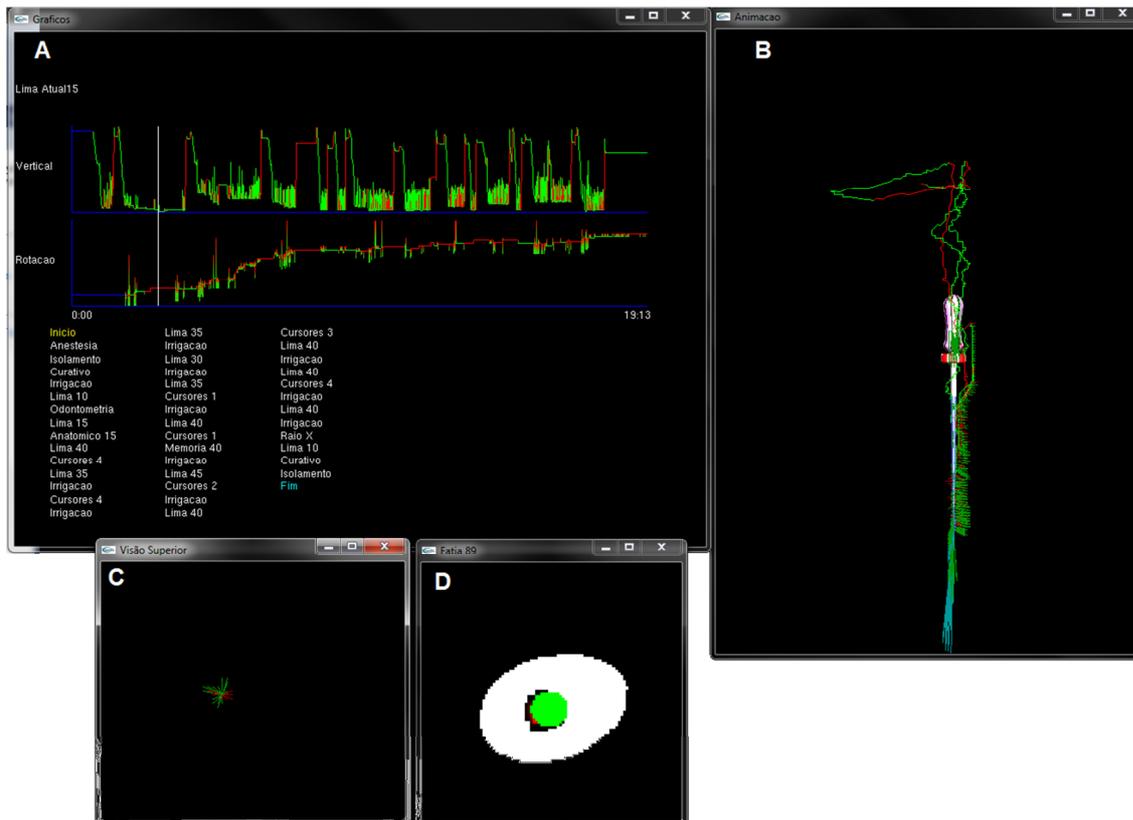


Figura 58 - Subsistema para visualização do resultado da simulação
Fonte: O autor

A seguir serão detalhados todos os modos de visualização.

6.7.1 Visualização da sequência de instrumentação

Esta janela tem por objetivo mostrar a amplitude dos movimentos verticais da lima, as rotações feitas pelo usuário e a sequência de instrumentação utilizada na simulação. A Figura 59 exibe a janela de visualização com os gráficos dos movimentos verticais da ferramenta, o gráfico de rotação e a sequência de instrumentação.

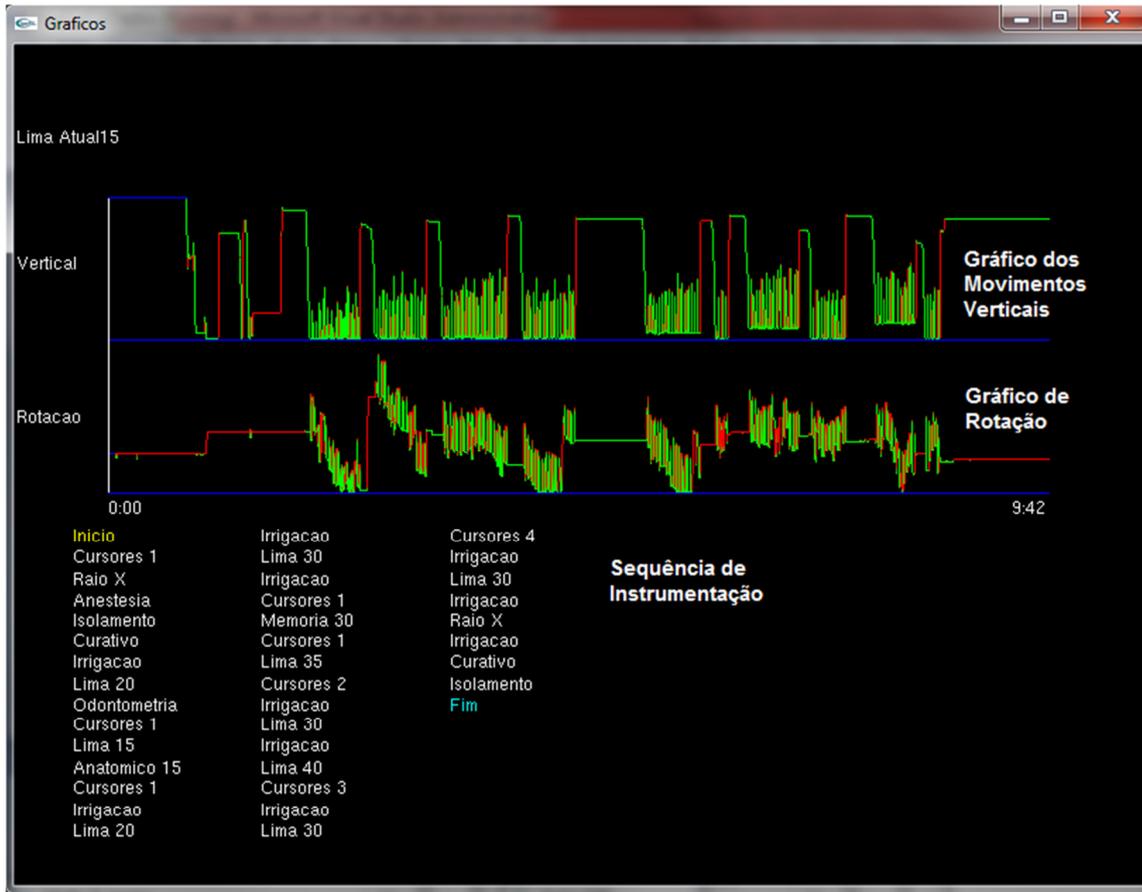


Figura 59 – Gráficos de movimentação e rotação, e sequência de instrumentação
Fonte: O autor

O gráfico dos movimentos verticais da ferramenta tem o objetivo de mostrar ao usuário a amplitude dos movimentos realizados com as limas. No gráfico apresentado na Figura 60, o eixo X representa o tempo e o eixo Y a amplitude dos movimentos. A escala do eixo Y é feita automaticamente considerando os pontos de movimentação vertical menor e maior como extremidades da escala. As linhas exibidas na cor vermelha indicam que a lima está sendo tracionada no sentido ápice-coroa e as linhas verdes indicam que a lima está sendo inserida no canal no sentido coroa-ápice.

Os picos superiores que aparecem no gráfico indicam que a lima está fora do canal do dente, isto acontece quando é feita a troca de lima ou quando o usuário está irrigando o canal. Outra situação que pode ser identificada no gráfico são os movimentos de vai-e-vem, que ocorrem quando a lima está sendo inserida e removida do canal, realizando a modelagem do canal propriamente dita. Além disto, é possível identificar quando é realizado o escalonamento, o que acontece na parte

mais à direita do gráfico quando o limite inferior só é atingido por algumas limas, enquanto outras ficam cada vez mais distantes da borda inferior.

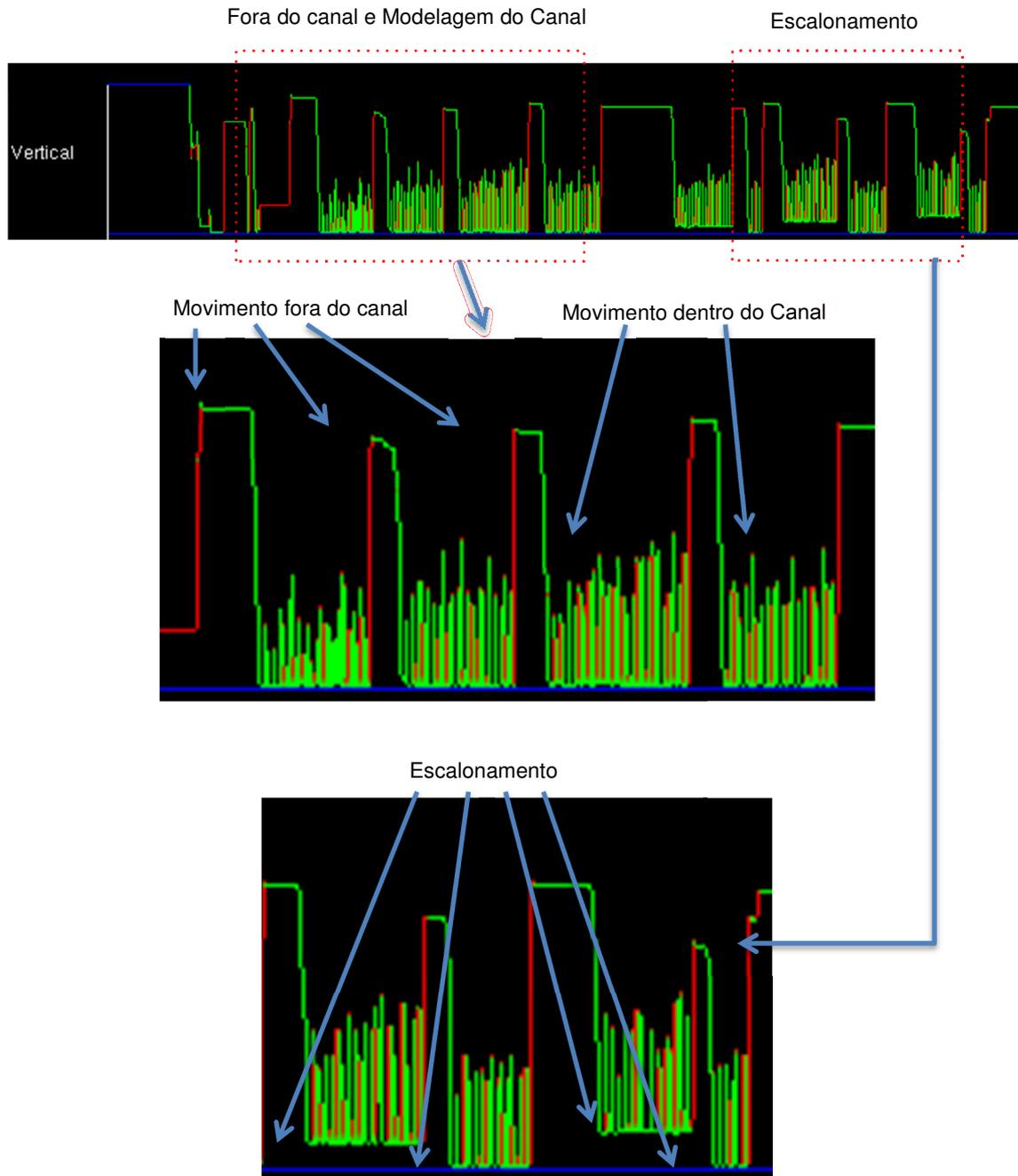


Figura 60 - Gráfico da movimentação vertical da ferramenta
Fonte: O autor

O segundo gráfico representa as rotações feitas pelo usuário com a lima. No exemplo apresentado na Figura 61, o eixo X do gráfico é o tempo e o eixo Y o ângulo de giro. As linhas verdes representam rotações no sentido horário e as vermelhas no sentido anti-horário. Com este gráfico o usuário pode identificar se

realiza as rotações corretamente ou se gira a lima demasiadamente para algum dos lados.

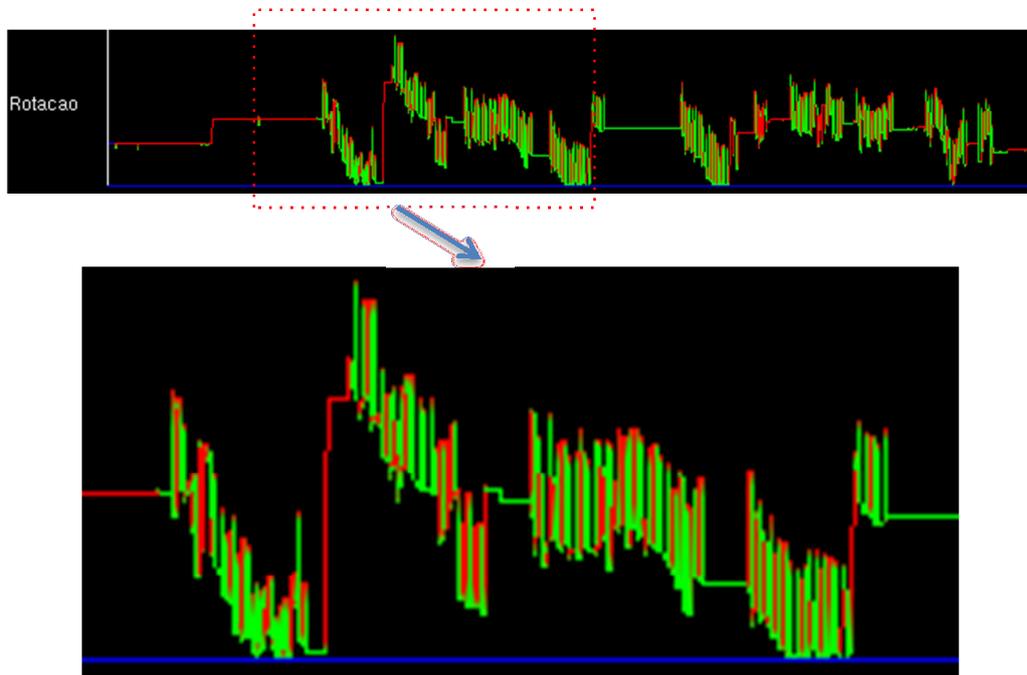


Figura 61 - Gráfico das rotações da ferramenta
Fonte: O autor

Com a análise conjunta do gráfico de movimentos verticais e do gráfico das rotações é possível identificar o tipo de movimento que foi realizado pelo usuário, de acordo com as características dos movimentos cinemáticos, apresentados na seção 2.5. Na Figura 62, por exemplo, é possível identificar que o usuário está realizando o movimento de rotação quando a lima se movimenta verticalmente e ao mesmo tempo as rotações são realizadas mais em sentido horário que anti-horário.

Já o movimento oscilatório é percebido quando as rotações são alternadas entre o sentido horário e anti-horário. E, o movimento de limagem, é percebido quando não são feitas rotações. Em todas as situações ocorrem movimentos verticais de vai-e-vem com a lima.

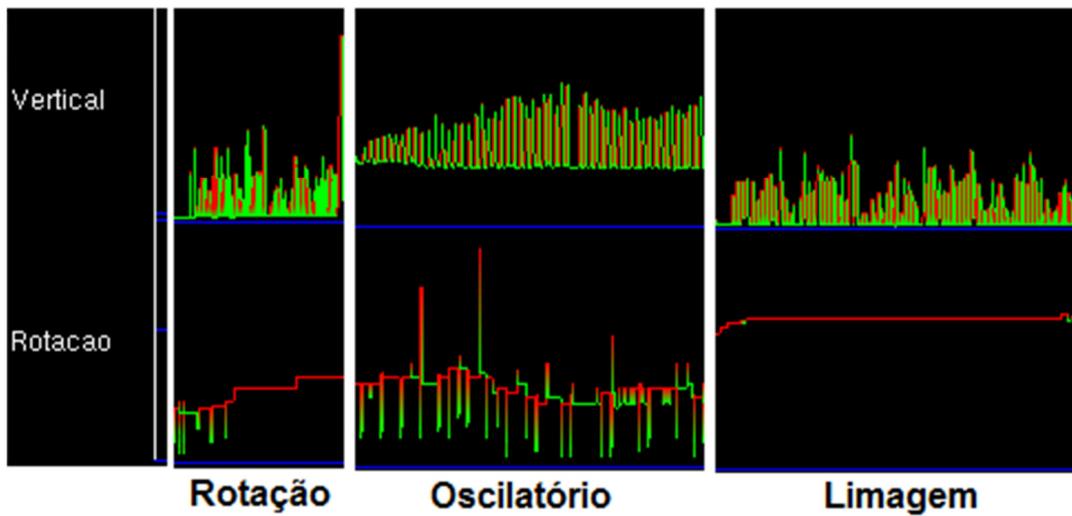


Figura 62 - Classificação dos movimentos cinemáticos
Fonte: O autor

Por fim, é exibida a sequência de instrumentação realizada na simulação. Esta sequência é utilizada para identificar possíveis erros na sequência técnica empregada, como por exemplo, pular algum calibre de lima, deixar de irrigar e aspirar quando é feita a troca de lima, definir incorretamente o instrumento anatômico e/ou de memória. A Figura 63 apresenta um exemplo de sequência de instrumentação utilizada.

Inicio	Lima 35	Irrigacao
Anestesia	Irrigacao	Lima 40
Isolamento	Lima 40	Irrigacao
Curativo	Memoria 40	Curativo
Lima 10	Irrigacao	Isolamento
Odontometria	Lima 45	Raio X
Lima 15	Cursors 2	Fim
Anatomico 15	Irrigacao	
Irrigacao	Lima 40	
Lima 20	Irrigacao	
Irrigacao	Lima 50	
Lima 25	Cursors 3	
Irrigacao	Irrigacao	
Lima 30	Lima 40	
Irrigacao	Cursors 4	

Figura 63 - Sequência de instrumentação
Fonte: O autor

A sequência de instrumentação também é utilizada para controlar o trecho da simulação que é exibido para o usuário. Esta seleção é feita através da definição de um ponto inicial e um ponto final para a exibição dos gráficos. Esta seleção afeta as demais janelas de visualização, pois são exibidos apenas os movimentos da lima

para a área selecionada. Como pode ser visto na Figura 63 a ação representada em amarelo sinaliza para o usuário o início da visualização dos movimentos e a ação em azul indica o ponto final.

6.7.2 Animação dos movimentos das limas

A segunda ferramenta de visualização é responsável por mostrar os movimentos que são realizados pelo usuário com a lima. Nesta visualização a lima é animada de acordo com os dados lidos do arquivo de log da simulação. Durante esta animação são traçadas linhas que representam a força executada pelo usuário sobre o dispositivo háptico. Um exemplo desta visualização é mostrado na Figura 64, na qual podem ser vistas linhas verdes, que representam os movimentos no sentido coroa-ápice, linhas vermelhas, que são os movimentos feitos no sentido ápice-coroa, e, linhas azuis, que representam as rotações da lima. O tamanho e a direção das linhas representam, respectivamente, a força exercida pelo usuário sobre o dispositivo háptico e a direção que a lima é forçada nas paredes do canal.

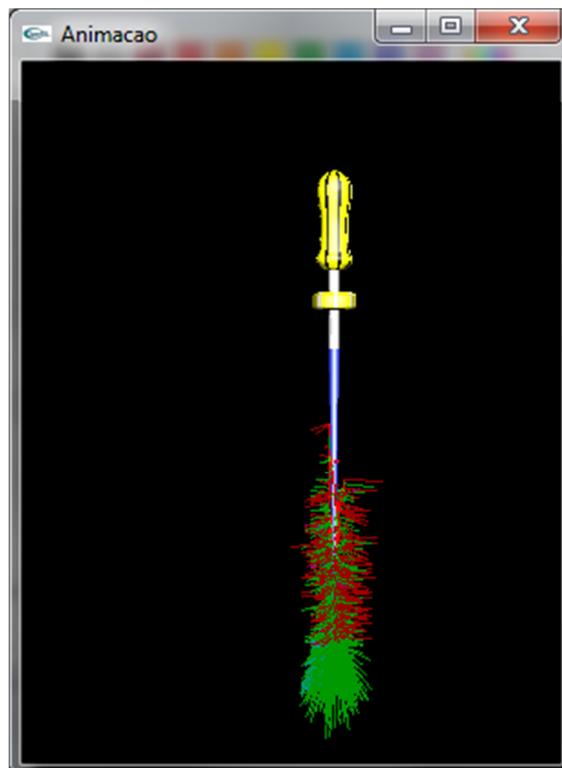


Figura 64 - Animação do movimento da lima
Fonte: O autor

Esta visualização exibe a mesma configuração da lima que é utilizada na simulação, permitindo identificar se foi utilizada a lima correta e se ela atinge a profundidade do dente que se deveria trabalhar.

Para complementar a visualização dos movimentos é exibida uma visão superior da animação sem a presença da lima, ou seja, é mostrado apenas a direção e a amplitude da força aplicada sobre as limas. Esta visualização permite ao usuário identificar se realizou pressão lateral adequada em todas as paredes do dente. A Figura 65 mostra duas situações, na imagem da esquerda é exibido o uso de uma lima que trata todas as paredes do canal, e, na imagem da direita, pode-se ver que algumas paredes não foram tratadas.

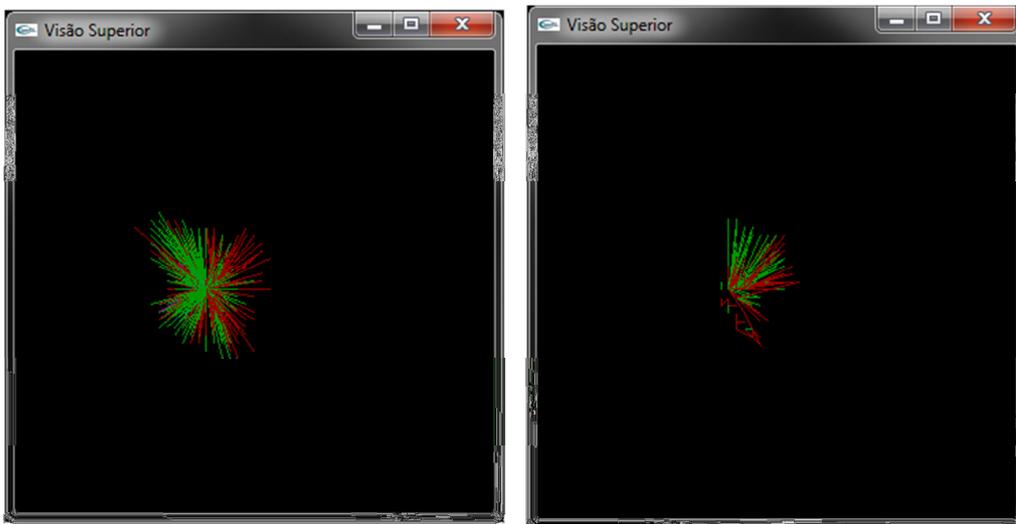


Figura 65 - Visualização superior da força exercida pelo usuário durante a simulação
Fonte: O autor

6.7.3 Visualização do resultado final do preparo

Uma das técnicas utilizadas para análise da qualidade do preparo de um dente para tratamento endodôntico consiste em avaliar imagens tridimensionais do dente tratado [24]. Estas imagens são obtidas a partir de microtomografias computadorizadas, uma antes do preparo e outra após sua conclusão. Em seguida as imagens são sobrepostas para verificar se o formato do canal foi mantido e se todas as paredes do dente foram tratadas. Devido à quantidade de radiação emitida pelas microtomografias e pela falta de precisão para se tomar duas imagens do mesmo ângulo, estas imagens só podem ser obtidas a partir de dentes extraídos.

Com o simulador é possível analisar a quantidade de desgaste realizada em cada voxel, utilizando para isto os dados do modelo original do dente que é simulado e os dados referentes ao desgaste dos voxels do dente. Neste método de avaliação o modelo do dente tridimensional é dividido em fatias, que são visualizadas individualmente de forma bidimensional. A Figura 66 mostra esta visualização. Em branco é exibida a dentina do dente, em verde o formato anatômico original do canal do dente, em vermelho os voxels que foram totalmente removidos e em preto, no centro do dente, os voxels que tiveram sua densidade reduzida. Esta diferenciação de cores entre vermelho e preto é adotada devido à baixa resolução utilizada nos modelos volumétricos. Na prática, ambas as cores representam que aquela região do dente foi tratada, porém os voxels em vermelho indicam que toda a região representada pelo voxel foi removida e os voxels pretos indicam que apenas uma porção daquela região foi removida.

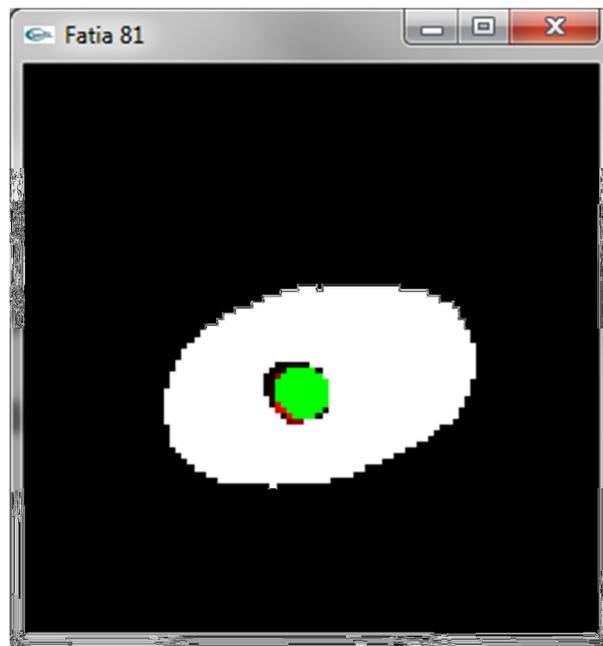


Figura 66 - Análise da remoção de voxels
Fonte: O autor

[Página deixada propositalmente em branco]

7 Metodologia de teste

Com base na revisão da literatura, apresentada no Capítulo 4, observou-se que o método mais empregado para a análise dos resultados dos simuladores está baseada em estudos de caso. Nestes estudos de caso são criados AVs e um grupo de usuários realiza tarefas pré-determinadas. Durante as simulações as ações dos usuários são analisadas pelo próprio sistema ou por especialistas. A avaliação pode ser qualitativa, quando é dada ênfase às opiniões dos usuários e especialistas, ou quantitativa, quando se analisam puramente os dados que são coletados durante o experimento [35].

Em sistemas de simulação háptica, a abordagem quantitativa é empregada quando se deseja medir as habilidades dos usuários ou a performance do sistema. Dados básicos para avaliações quantitativas são o tempo e a precisão [65]. Com estes dados pode-se comparar quanto tempo o usuário demorou para realizar a tarefa proposta, ou a quantidade de erros cometidos e o deslocamento do dispositivo háptico [60].

Já a abordagem qualitativa é utilizada quando se deseja avaliar o AV e identificar suas potencialidades. Nestes casos, são utilizados questionários ou entrevistas após a realização dos testes para se obter a opinião dos usuários nos quesitos que se deseja avaliar.

Neste trabalho são feitas avaliações qualitativas que visam avaliar dois aspectos da metodologia, como expresso no objetivo geral do trabalho. Primeiro, verificar se o simulador é capaz de reproduzir de forma convincente a sensação tátil percebida pelos usuários quando realizam a tarefa, e, segundo, verificar se a ferramenta de visualização da simulação é uma ferramenta útil para o usuário identificar erros de instrumentação ocorridos durante a simulação. Além disto, são feitas análises complementares sobre as ações que são simuladas e a possibilidade de utilizar o simulador como ferramenta de ensino.

A seguir será apresentada a tarefa simulada no estudo de caso (seção 7.1), em seguida o protocolo de testes utilizado no experimento (seção 7.2), as questões classificadas pelo tipo de análise (seção 7.3), e, para finalizar, a caracterização dos participantes dos testes (seção 7.4).

7.1 Tarefa simulada no estudo de caso

Para validar o simulador e a ferramenta de visualização, foi realizado um experimento que contou com a participação de professores, alunos e profissionais da área de endodontia.

O experimento utilizado neste estudo de caso consistiu em fazer com que o participante fizesse o tratamento virtual de um dente pré-molar inferior direito, que possuía uma raiz e um canal reto. O participante devia considerar que o dente havia sido diagnosticado com pulpite sintomática irreversível e necessitava de tratamento endodôntico. Para os testes considerou-se que já havia sido realizada a abertura coronária e o acesso ao canal radicular já havia sido feito. O participante foi instruído a utilizar a técnica de instrumentação escalonada para o preparo do dente e a mesma sequência de instrumentação que utilizaria em um procedimento real.

7.2 Protocolo de testes

Para atingir aos objetivos descritos anteriormente, foi desenvolvido um protocolo de testes que foi aplicado para todos os participantes. Este protocolo foi dividido em nove etapas:

- **Descrição do experimento:** antes de iniciar os testes é feita uma pequena explanação dos objetivos do teste, a fim de contextualizar o participante e verificar se este está disposto a participar do experimento;
- **Aplicação de questionários e pré-teste:** nesta etapa do teste é fornecido ao usuário o termo de consentimento (Apêndice A), o termo de confidencialidade (Apêndice B) e o formulário de pré-teste para coleta de dados demográficos (Apêndice C) do participante;
- **Explicação das funcionalidades do simulador:** nesta etapa são apresentados slides para o usuário (Apêndice D), nos quais são descritas as telas do simulador, as ações que podem ser realizadas e a forma de como executá-las, as instruções para movimentação dentro do AV e utilização do dispositivo háptico;

- **Adaptação ao dispositivo háptico:** o usuário utiliza o dispositivo háptico para explorar o AV e identificar como suas ações com este dispositivo háptico afetam o AV;
- **Explicação do caso clínico:** é fornecido ao usuário o caso clínico que deve ser executado na simulação. Este caso clínico foi descrito por um especialista em endodontia visando fazer com que o usuário utilize o método de instrumentação escalonada;
- **Realização do experimento:** o usuário realiza o procedimento de preparo do dente para com a limpeza e modelagem do canal radicular utilizando limas manuais;
- **Aplicação do formulário de pós-teste:** preenchimento do formulário de pós-teste, com oito questões (Apêndice E), que visa avaliar a qualidade do simulador e das simulações, tanto gráficas quanto hápticas e compará-las com suas experiências em ambientes reais;
- **Apresentação da ferramenta de visualização:** nesta etapa são descritos os modos de visualização disponíveis na ferramenta, usando os dados coletados de sua própria simulação, explicando o que o simulador identificou em sua técnica;
- **Complemento do formulário de pós-teste:** preenchimento do formulário de pós-teste (Apêndice E), com 3 questões, que visa avaliar a ferramenta de visualização e sua aplicabilidade do simulador como ferramenta de treinamento.

7.3 Distribuição das questões de pós-teste por tipo de análise

As questões do formulário de pós-teste foram distribuídas em cinco grupos:

- questões relacionadas ao realismo gráfico dos modelos e animações do AV;
- questões relacionadas ao realismo háptico;
- questões referentes a análises complementares, como a disposição dos dispositivos físicos, o tempo necessário para adaptação ao simulador e análise das tarefas que foram executadas;

- questões a respeito da ferramenta de visualização, com os métodos de exibição e a percepção de erros ocorridos durante a simulação que podem ser visualizados;
- questão relativa à utilização do simulador como ferramenta de ensino.

Nas questões dos quatro primeiros grupos os usuários atribuíram notas variando entre 1 e 5 seguido uma escala Likert apropriada para cada questionamento. Além disto, os usuários podiam expressar suas opiniões de forma descritiva deixando suas impressões, críticas e sugestões sobre os quesitos avaliados. A última questão era aberta, permitindo ao usuário deixar suas impressões de forma descritiva, sem atribuição de nota. A Figura 67, apresenta as questões agrupadas e os quesitos que são avaliados.

7.4 Caracterização dos participantes dos testes

Por tratar-se de um estudo de caso com avaliação qualitativa, foram convidados para os testes apenas pessoas que já detinham bons conhecimentos a respeito de tratamento endodôntico, tanto teóricos quanto práticos. Para isto, foram convidados professores de disciplinas de endodontia, alunos que já concluíram as disciplinas de endodontia e profissionais que atuam com endodontia em seu dia-a-dia.

Foram realizados testes com doze voluntários. De acordo com o formulário de pré-teste respondido pelos participantes 16,7% deles eram do sexo masculino e 83,7% do sexo feminino. A idade média dos participantes foi de 29,2 anos. Com relação ao tempo de experiência na área de endodontia, a média foi de 5,47 anos, sendo que o participante com menos experiência tinha 3 meses e o mais experiente 17 anos. Dentre os participantes, 91,7% eram destros e 8,3% canhotos. Com relação a sua classificação por categoria profissional, 16,7% dos participantes se declararam professores, 33,3% como alunos e 50% como profissionais. Com relação à utilização prévia de dispositivos hápticos, 33,3% disseram já ter utilizado algum tipo de dispositivo com retorno de força, como joysticks de videogame, e 66,7% responderam nunca ter tido experiências prévias com dispositivos hápticos. Por fim,

nenhum dos participantes utilizou previamente nenhum tipo de simulador de odontologia.

Análise do Realismo Gráfico	1. De acordo com sua percepção do AV, atribua uma nota relacionada aos modelos gráficos utilizados, seguindo a classificação: 1-Ruim, 2-Regular, 3-Bom, 4-Muito Bom e 5-Excelente						
		<i>Boca</i>	<i>Isolamento</i>	<i>Dente</i>	<i>Limas</i>	<i>Radiografia</i>	
Análise do Realismo Háptico	2. De acordo com sua percepção do Ambiente Virtual, atribua uma nota relacionada às animações apresentadas, seguindo a classificação: 1-Ruim, 2-Regular, 3-Bom, 4-Muito Bom e 5-Excelente						
		<i>Anestesia</i>	<i>Curativo</i>	<i>Irrigação e Aspiração</i>	<i>Rotação da Lima</i>	<i>Referencial da lima</i>	
Análise do Realismo Háptico	3. De acordo com sua percepção do Ambiente Virtual, atribua uma nota relacionada ao Retorno Háptico proporcionado pelo dispositivo, seguindo a classificação: 1-Ruim, 2-Regular, 3-Bom, 4-Muito Bom e 5-Excelente						
		<i>Movimentação em Espaço Livre</i>	<i>Toque na superfície do dente</i>	<i>Penetração no canal</i>	<i>Movimento oscilatório e de rotação</i>	<i>Movimento de imagem</i>	
	4. Foi possível perceber diferenças na resistência à penetração do instrumento quando realizada os movimentos? Siga a classificação: 1-Nunca, 2-Raramente, 3-Algumas Vezes, 4-Quase Sempre e 5-Sempre (0 caso não se aplique ou não saiba)						
		<i>Parede externa</i>	<i>Penetração da lima</i>	<i>Mov. Oscilatório e Rotação</i>	<i>Mov. Limagem</i>	<i>Sem Irrigação</i>	<i>Sem Memória</i>
Análise do Realismo Háptico	5. Com relação à similaridade do retorno de força proporcionado pelo simulador e a sensação real, atribua uma nota para cada quesito seguindo a classificação: 1-Nada similar, 2-Pouco similar, 3-Similar, 4-Muito Similar e 5-Igual. (0 caso não se aplique ou não saiba)						
		<i>Parede externa</i>	<i>Penetração da lima</i>	<i>Mov. Oscilatório e Rotação</i>	<i>Mov. Limagem</i>	<i>Sem Irrigação</i>	<i>Sem Memória</i>
Análises Complementares	6. Com relação à disposição dos dispositivos físicos, atribua uma nota para cada componente do simulador. Siga a classificação: 1-Nada adequada, 2-Pouco adequada, 3-Adequada, 4-Muito adequada e 5-Excelente.						
		<i>Mãos</i>	<i>Monitor</i>	<i>Cadeira</i>	<i>Área de movimentação</i>		
	7. Aproximadamente quanto tempo precisou para se adaptar ao simulador? Siga a classificação: 1-Não me adaptei, 2-Mais de 15 minutos, 3-Entre 10 e 15 minutos, 4-Entre 5 e 10 minutos e 5-Manos de 5 minutos.						
		<i>Localização Espacial</i>		<i>Manipulação do Dispositivo</i>	<i>Retorno de Força</i>		
	8. Com relação às tarefas, indique quais você realizou e atribua uma nota para cada uma delas, levando em consideração o procedimento realizado. Siga a classificação: 1-Ruim, 2-Regular, 3-Bom, 4-Muito bom e 5-Excelente (0 caso não tenha realizado)						
Análises Complementares		<i>Anestesia</i>	<i>Isolamento</i>	<i>Curativo</i>	<i>Radiografia</i>	<i>Odontometria</i>	<i>Troca de Limas</i>
		<i>Cursosores</i>		<i>Memória</i>	<i>Irrigação e Aspiração</i>	<i>Preparo do 1/3 apical</i>	<i>Escalonamento</i>
Análise da Ferramenta de Visualização	9. Com relação à ferramenta de visualização apresentada ao final do experimento, atribua uma nota para cada método de exibição considerando a sua percepção com relação a simulação feita e o resultado apresentado pela ferramenta. Siga a classificação: 1-Ruim, 2-Regular, 3-Bom, 4-Muito bom e 5-Excelente (0 caso não tenha realizado). Caso ache interessante a combinação de duas ou mais técnicas para avaliar a simulação acrescente na linha em branco da tabela e atribua uma nota a ela.						
		<i>Gráficos</i>	<i>Movimentos Frente</i>	<i>Movimentos Superior</i>	<i>Fatias do Dente</i>		
	10. Em sua opinião, observando a ferramenta de visualização, é possível perceber se alguma ação é executada com imperfeição? Indique na tabela abaixo quais foram essas atividades, seguindo a classificação: 1-Nunca, 2-Raramente, 3-Algumas Vezes, 4-Quase Sempre e 5-Sempre (0 caso não se aplique ou não saiba). Caso tenha outros itens a destacar, preencha as linhas da tabela.						
Análise da Ferramenta de Visualização		<i>Sequência de Instrumentação</i>	<i>Movimentos Cinemáticos</i>	<i>Seleção de Limas e Cursosores</i>	<i>Preparo do Batente Apical</i>		
	11. Em sua opinião, o simulador poderia ser utilizado como ferramenta de ensino para atividades práticas de pré-clínica? Justifique sua resposta.						
Ferramenta de Ensino							

Figura 67 - Distribuição das questões do formulário de pós-teste pelo tipo de análise

Fonte: O autor

[Página deixada propositalmente em branco]

8 Resultados dos testes

A análise dos resultados do questionário de pós-teste foi separada em três partes. Na primeira são analisadas as respostas dos usuários nas questões referentes à **validação do simulador**, com as questões dos três primeiros grupos apresentadas na Figura 67. Em seguida, é feita a **análise da ferramenta de visualização**, com as questões do quarto grupo apresentadas na Figura 67, e, para finalizar, são apresentadas as impressões do usuário sobre a utilização do simulador como ferramenta de ensino.

8.1 Validação do simulador

A validação do simulador tem a finalidade de verificar se ele é capaz de simular o que se espera dele, ou seja, o realismo do simulador. Este tipo de validação é classificada por McDougall [48] como “*face validity*”, ou validação de face, que é feita através de pesquisas subjetivas, com a aplicação de questionários aos utilizadores do simulador. Este tipo de validação é a mais encontrada em trabalhos que avaliam simuladores da área de saúde [4].

O método de avaliação qualitativa empregado utilizou uma escala Likert com 5 pontos, dos quais, dois eram negativos, um neutro e 2 positivos. Em cada questão o usuário devia atribuir uma nota para cada quesito avaliado. Na análise dos resultados dos testes foi utilizada a frequência de respostas atribuídas a cada item, e, com esta frequência, os quesitos foram classificados de acordo com a resposta de maior ocorrência, conhecida como Moda, como descrito por Wainer [79]. Além da avaliação com a nota, os usuários tinham um espaço para colocar suas observações sobre os quesitos que estavam sendo avaliados.

Para validar o simulador, inicialmente foi analisado o realismo gráfico, através da avaliação dos modelos gráficos e das animações presentes no simulador. Em seguida, analisou-se o realismo do retorno de força proporcionado pelo simulador, e, para finalizar, foram feitas avaliações complementares do simulador, com aspectos como: a disposição dos dispositivos físicos, o tempo de adaptação dos usuários ao sistema e a realização da sequência de tarefas durante a simulação.

8.1.1 Avaliação do realismo gráfico

Para análise do realismo gráfico são considerados os modelos gráficos e as animações feitas pelo simulador. Nesta avaliação os usuários responderam a duas questões no formulário de pós-teste.

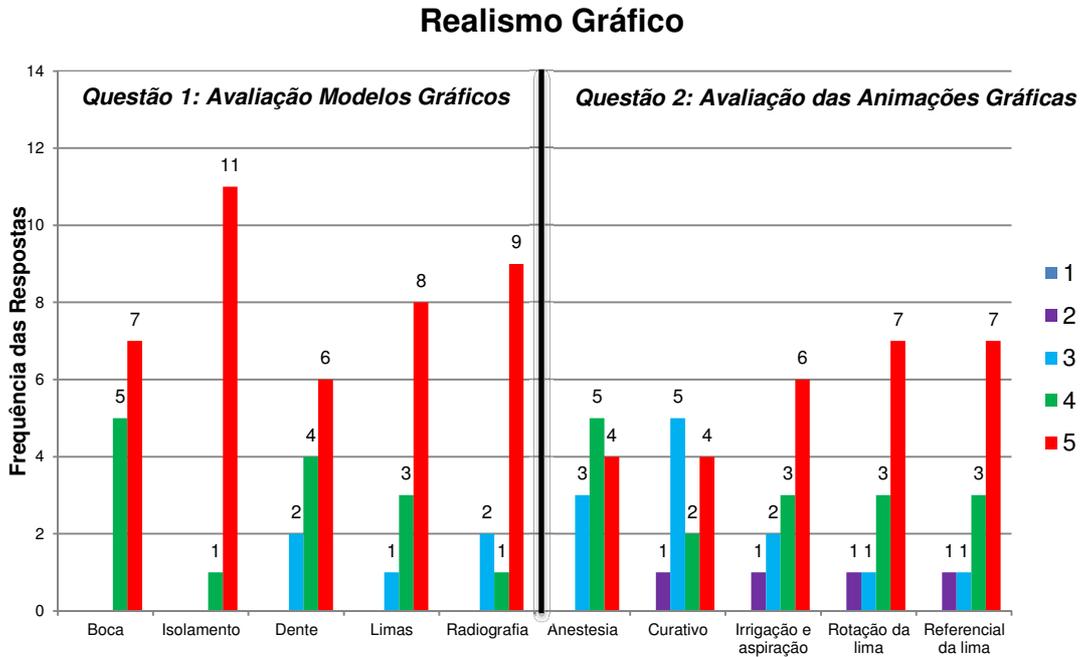
Na primeira, que tinha como objetivo verificar se os usuários conseguiam identificar os modelos e comparar sua similaridade com o real, os usuários deviam avaliar os modelos gráficos de boca, isolamento absoluto, dente que está sendo tratado, limas e radiografia.

Na segunda, foi solicitado que os usuários avaliassem as animações de anestesia, remoção/colocação e curativo, irrigação e aspiração, rotação da lima e do referencial que representa a posição da lima na superfície do dente. O objetivo desta questão foi verificar se o usuário identificava a semelhança das animações com as ações que ele executa em um ambiente real.

A Figura 68 apresenta um gráfico com a frequência das notas atribuídas pelos usuários aos quesitos relacionados ao realismo dos modelos gráficos e das animações gráficas utilizados no simulador. Após a compilação dos resultados observou-se que em 8 dos 10 quesitos avaliados a nota com maior número de incidências foi “5”, ou seja, para a maioria dos usuários os modelos e animações utilizados no simulador foram considerados “excelentes”. No quesito relacionado à animação da anestesia a nota com maior quantidade de ocorrências foi a “4”, portanto este item foi classificado como “muito bom”, e, no quesito relacionado com a remoção e colocação do curativo, a nota com maior ocorrência foi a “3”, considerado “bom”.

Na questão aberta sobre os modelos gráficos, os usuários, de modo geral, consideraram os modelos parecidos com os reais, como descreve o Usuário 01 que comenta que “os modelos gráficos possuem muito boa apresentação e representam a realidade com proximidade”. Alguns usuários propõem melhorias nos modelos, como o Usuário 03 que detalha que “poderia melhorar a forma de contorno específica para abertura de cada elemento dental”, e, o Usuário 04 indica que “os dentes poderiam estar menos inclinados para ter certeza de estar atingindo todas as

faces do dente, principalmente vestibular e mesial”. Já o Usuário 05 e o Usuário 10 indicam que poderia ser utilizada a visão oclusal durante a simulação. Por fim, o Usuário 06 descreve que “as radiografias poderiam ser mais próximas do original, simulando as dificuldades que se pode encontrar na odontometria”.



Questão 1. De acordo com sua percepção do Ambiente Virtual, atribua uma nota relacionada aos modelos gráficos utilizados, seguindo a classificação: 1-Ruim, 2-Regular, 3-Bom, 4-Muito Bom e 5-Excelente.

Questão 2. De acordo com sua percepção do Ambiente Virtual, atribua uma nota relacionada às animações apresentadas, seguindo a classificação: 1-Ruim, 2-Regular, 3-Bom, 4-Muito Bom e 5-Excelente.

Figura 68 - Avaliação do realismo gráfico
Fonte: O autor

Com relação ao posicionamento dos modelos, levantados pelos usuários 04, 05 e 10, o sistema permite rotacionar o AV podendo deixá-lo com a visão oclusal ou com inclinação diferente. Embora este recurso tenha sido apresentado a todos os usuários durante a apresentação do simulador, os usuários não solicitaram esta mudança nas simulações. Já a respeito do contorno específico dos elementos dentais, como a simulação é feita somente em um dente e não é realizada a abertura coronária, optou-se por utilizar modelos gráficos mais simplificados, por este motivo os contornos não estão evidenciados.

Sobre as animações, de modo geral os usuários teceram comentários positivos, como por exemplo, o Usuário 03, que diz que “as animações apresentadas

reforçam a necessidade da sequência técnica adequada”. A respeito da animação de irrigação e aspiração, o Usuário 01 comenta que “poderiam ser acrescentados efeitos sonoros”, e, o Usuário 06, indica que “a irrigação deveria ser mais prolongada e o movimento poderia ser feito pelo operador”. Na animação da anestesia, os Usuários 07 e 12, gostariam que fosse possível escolher o ponto onde ela seria aplicada.

Com relação aos efeitos sonoros, o simulador não foi equipado com equipamentos de áudio, uma vez que seu objetivo é simular instrumentos manuais, que não emitem sons. A respeito do tempo de execução da aspiração e irrigação, seu objetivo é apenas indicar para o usuário que a operação foi feita, sem preocupação com o realismo desta operação. Já a escolha do ponto para aplicação da anestesia não foi incluído no simulador, pois seria necessário colocar uma seringa para ser manipulada pelo usuário, o que seria uma tarefa demorada para trocar de manipulador, mas pode ser implementada em futuras versões.

8.1.2 Avaliação do retorno háptico

Um dos quesitos mais importantes para validação do simulador diz respeito à sensação de toque percebida pelo usuário quando manipula o dispositivo háptico.

Para isto, foram avaliados os seguintes aspectos, divididos em questões:

- o retorno háptico proporcionado pelo simulador (questão 3);
- a possibilidade de identificação de diferenças de resistência em situações distintas (questão 4); e,
- a similaridade do retorno de força percebido no simulador com as sensações reais (questão 5).

No que se refere ao retorno háptico, os quesitos avaliados foram: a movimentação em espaço livre, o toque da lima na superfície do dente, a penetração da lima no canal do dente, os movimentos oscilatórios e de rotação e, para finalizar, o movimento de limagem.

Com relação à percepção das diferentes resistências ao toque da lima quando realizados os movimentos cinemáticos, os quesitos avaliados foram: colisão da lima com as paredes externas do dente; penetração da lima no canal; movimentos

oscilatórios e de rotação; movimentos de limagem; falta de irrigação; e falta do uso do instrumento memória. Os dois últimos quesitos ocorrem apenas quando o usuário executa a sequência de instrumentação de forma incorreta, portanto nem todos os usuários tiveram contato com estas situações.

Para finalizar esta etapa da avaliação foi solicitado que os usuários atribuíssem uma nota referente à similaridade do retorno de força proporcionado pelo simulador, relacionado com o retorno de força que ocorre em um ambiente real. Para isto foram utilizados os mesmos quesitos da questão anterior.

A Figura 69 apresenta um gráfico com a frequência das notas atribuídas pelos usuários em cada quesito avaliado. Destas notas os itens referentes às questões 4 e 5, que falam sobre a falta de uso das limas de memória e a falta de irrigação, não serão avaliados, devido a pequena quantidade de usuários que responderam aos questionamentos, tornando a avaliação inconsistente. Com relação à questão 3, que questiona sobre o retorno háptico, dois quesitos foram avaliados pela maioria dos usuários com nota 4, o que caracteriza a resposta como “muito bom”. Outros três quesitos foram avaliados com nota 5, “excelente”, pela maioria dos usuários.

Já com relação à quarta questão, os quesitos relacionados aos movimentos da lima, tanto oscilatório e de rotação, quanto de limagem, a nota 4 foi que obteve maior número de ocorrências, o que indica que “quase sempre” os usuários eram capazes de identificar a diferença de resistência à penetração em locais diferentes do dente. Nos outros dois quesitos avaliados, colisão com a parte externa do dente e penetração no canal do dente, 5 foi a nota com maior frequência, ou seja, “sempre” foi possível perceber a diferença de resistência nestas duas situações.

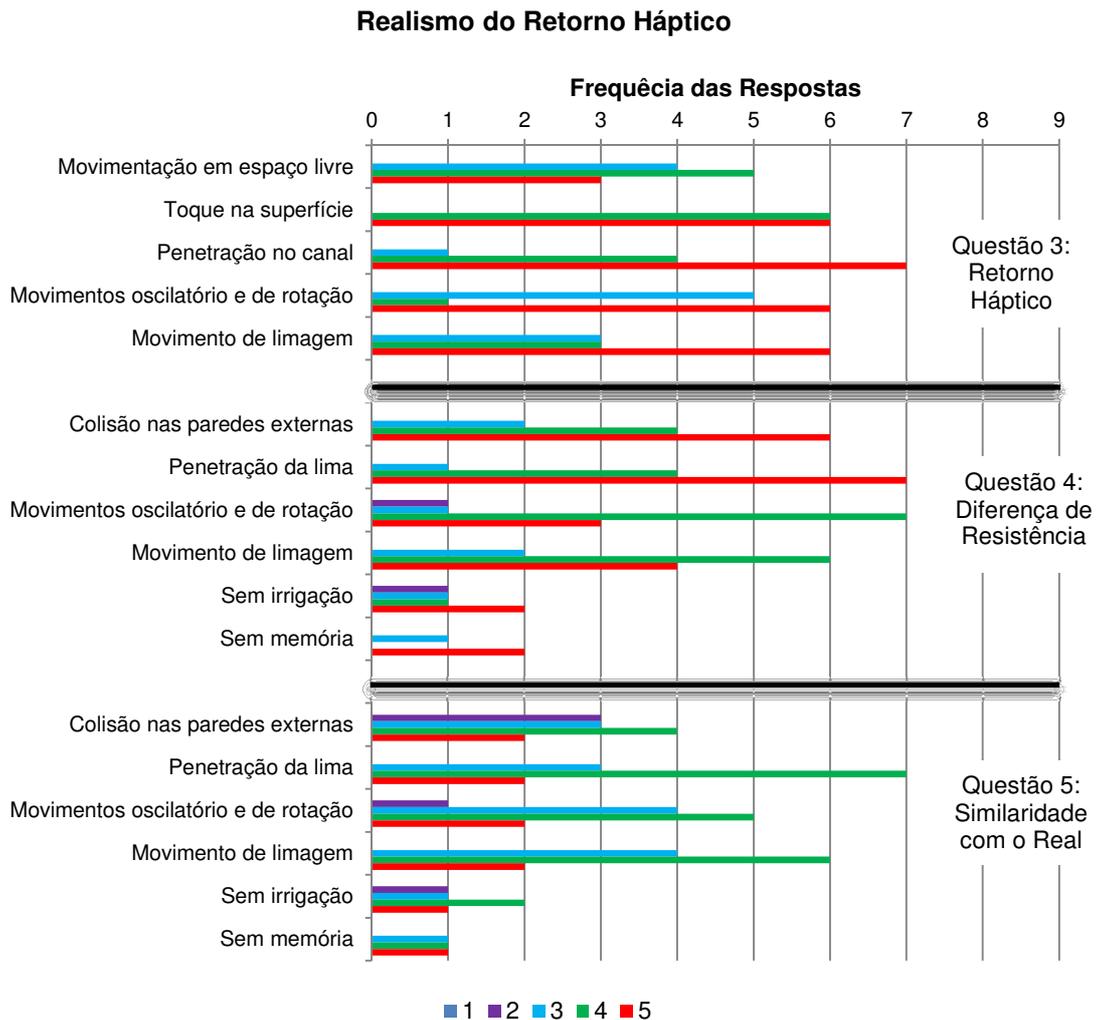
Na quinta questão, de acordo com as notas atribuídas pelos usuários, em todos os quesitos a nota com maior frequência foi 4, o que representa que o retorno de força proporcionado pelo dispositivo háptico é “muito similar” ao que ocorre em uma situação real.

Nas questões abertas foram feitos comentários pelos usuários em todas as questões.

Com relação à questão três, sobre o movimento de limagem, o Usuário 01 sentiu que “estava pesado demais para mover a lima” e o Usuário 07 achou que “os

movimentos ficaram com muita amplitude”, enquanto o Usuário 11 achou os “movimentos muito curtos”. Com relação à rotação, o Usuário 12 destaca que “a rotação estava pesada demais nos instrumentos mais finos e muito parecido com o real quando utilizava instrumentos mais calibrosos”. No quesito de movimentação pelo espaço livre, os Usuários 02 e 03 declararam que sentiram muito peso para movimentar a lima e, por este motivo, perdiam a noção de força que deviam aplicar. O Usuário 01 comentou que “sentiu um bom retorno de força em todos os quesitos”, e o Usuário 03 descreve que “é necessário executar mais força no início do preparo com cada instrumento e na medida que o mesmo ia sendo empregado, precisava fazer menos força”. Por fim, o Usuário 06 indica que achou o retorno de força “bastante próximo da realidade”.

Com relação ao peso para movimentação, apontado pelos usuários 01, 02 e 03, deve ser considerado que quando se está realizando uma operação real, o dentista utiliza uma lima com aproximadamente 15g de peso, e, quando manipula o dispositivo háptico está movendo aproximadamente 600g. Mesmo com a compensação da gravidade, que é implementada nos algoritmos de movimentação, é necessário realizar mais força para tirar o equipamento do estado de inércia, o que pode ser observado no segundo comentário do Usuário 3. Sobre o comentário do Usuário 12, que reclamou sobre o peso para rotação, analisando sua simulação, percebeu-se que foi o único usuário que utilizou uma sequência de instrumentação diferente dos demais usuários, iniciando o preparo do batente apical com 3 cursores, isto fez com que o CT do dente não fosse atingido em toda sua amplitude. Com relação aos comentários sobre a amplitude dos movimentos, buscou-se manter a mesma relação existente entre uma lima e um dente real, com movimentos de pequena amplitude, mas estes movimentos variam entre os usuários.



Questão 3. De acordo com sua percepção do Ambiente Virtual, atribua uma nota relacionada ao Retorno Háptico proporcionado pelo dispositivo, seguindo a classificação: 1-Ruim, 2-Regular, 3-Bom, 4-Muito Bom e 5-Excelente

Questão 4. Foi possível perceber diferenças na resistência à penetração do instrumento quando realizava os movimentos? Siga a classificação: 1-Nunca, 2-Raramente, 3-Algumas Vezes, 4-Quase Sempre e 5-Sempre (0 caso não se aplique ou não saiba)

Questão 5. Com relação à similaridade do retorno de força proporcionado pelo simulador e a sensação real, atribua uma nota para cada quesito seguindo a classificação: 1-Nada similar, 2-Pouco similar, 3-Similar, 4-Muito Similar e 5-Igual. (0 caso não se aplique ou não saiba)

Figura 69 - Avaliação do retorno háptico

Fonte: O autor

Nos comentários referentes à questão quatro, grande parte dos usuários teceu comentários positivos em relação ao sistema, como o Usuário 04 que relata que “a resistência à penetração do instrumento vai diminuindo à medida que o mesmo é usado”, e o Usuário 06 destaca que é “muito próximo a realidade”. Pensando em melhorias do sistema, o Usuário 05 indica que “no movimento de rotação quando a lima está em contato com as paredes do canal tem uma ligeira

introdução do instrumento, como se fosse um parafuso na situação clínica, o que não ocorre na simulação”. E, o Usuário 12 aponta que “a sensação de toque é sempre percebida, excelente, porém, quando a resistência é vencida, a sensação de toque diminui”.

Considerando os apontamentos dos usuários, a redução da resistência ocorre devido à remoção de material, que faz com que o canal fique maior, por isto a resistência é vencida com mais facilidade. Com relação à introdução da lima no movimento de rotação, isto não está implementado e é uma situação que poderá ser inserida em trabalhos futuros.

Nos comentários da questão cinco, o Usuário 01 descreve que “o simulador apresentou resposta bastante similar na maioria dos itens, exceto na parede externa do dente”, e destaca ainda que “os movimentos oscilatórios e de rotação mostraram muito boa percepção em relação à sensação real”. Para o Usuário 10, “é muito boa a simulação da entrada da lima quando a lima anterior não foi trabalhada, simula bem a realidade”, ou seja, quando se trabalhou pouco com uma lima, a seguinte fica mais pesada para realizar os movimentos. O Usuário 02 precisou “fazer mais força no simulador do que faço na vida real, às vezes foi difícil perceber que o instrumento estava solto no canal”. Para o Usuário 05 “o simulador está muito pesado”, e para o Usuário 06 “o simulador é muito próximo da realidade, sendo muitas vezes igual”. Como sugestão o Usuário 07 aponta que é necessário “melhorar a sensibilidade de raspagem da dentina”.

Como apresentado anteriormente, o peso da movimentação, relatado pelo Usuário 02, deve-se à diferença de peso entre o instrumento real, que o usuário está acostumado a utilizar, e o simulador. Com relação à simulação da raspagem de dentina, esta funcionalidade está implementada no simulador, em trabalhos futuros pode-se criar mecanismos para calibrar o quanto o usuário deseja de retorno de força neste quesito, visto que esta sensação depende do tipo de lima utilizada e da força de tração aplicada nas paredes, que varia de pessoa para pessoa. Com relação à percepção do instrumento ficar solto no canal, a simulação remove a dentina de acordo com a utilização das limas, caso não seja realizada a instrumentação de forma correta o canal não será dilatado, proporcionando a necessidade de aplicar mais força. Analisando a simulação do Usuário 02 pode-se

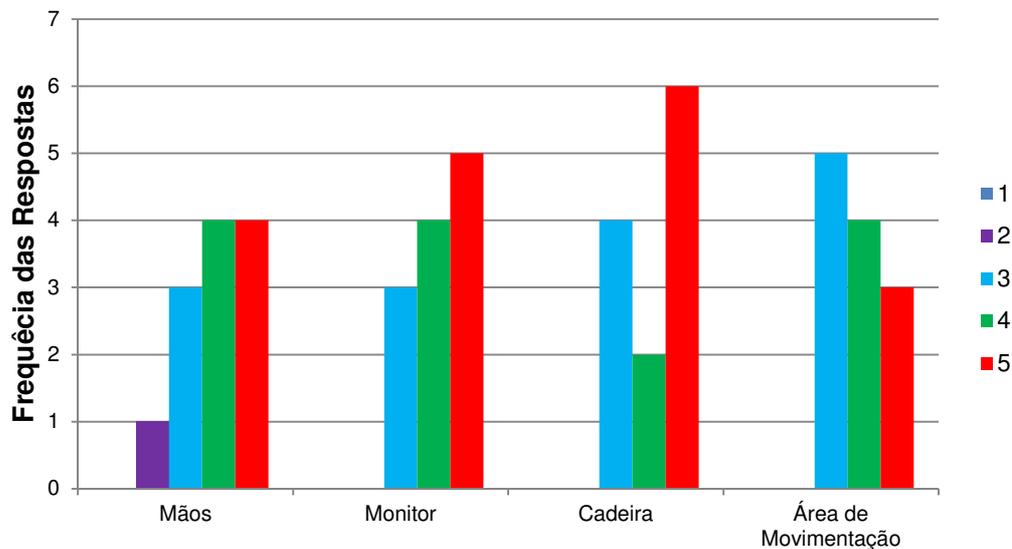
perceber que foi utilizado predominantemente o movimento de imagem, talvez por este motivo não tenham sido removidos os voxels de todo o diâmetro do canal, por isto a sensação da lima estar solta não fosse sempre percebida. Outra hipótese para o comentário do usuário é que sendo o dispositivo composto por peças encaixadas, que geram atrito entre si, é necessário aplicar mais força para a realização dos movimentos de giro, dando a impressão de estar preso.

8.1.3 Avaliações complementares

Para complementar a avaliação do simulador foram levantados dados sobre a disposição dos dispositivos físicos, fator que pode influenciar na simulação, uma vez que se pretende deixar o usuário confortável ao utilizar o sistema, tornando a simulação algo natural. Para isto foi solicitado que os usuários atribuíssem notas para cada um dos dispositivos físicos presentes no simulador. Os quesitos analisados foram: a posição da mão, e conseqüentemente do dispositivo háptico; a posição do monitor; a posição da cadeira; e a área de movimentação das limas.

Na Figura 70, é apresentado um gráfico com a frequência das notas atribuídas pelos usuários em cada quesito avaliado. Pode-se perceber que houve um empate no quesito relacionado à posição das mãos do usuário, com isto deve ser considerada a nota mais baixa [79], ou seja, para este quesito é considerada a nota 4, que representa que a posição das mãos quando se utiliza o simulador é “muito adequada”. Em outros dois quesitos, referentes à posição do monitor e da cadeira, a nota mais frequente foi 5, ou seja, a disposição destes equipamentos foi considerada “excelente” pela maioria dos usuários. Apenas a área de movimentação da ferramenta ficou classificada como “adequada”, uma vez que a nota com maior frequência foi 3.

Disposição dos Dispositivos Físicos



Questão 6. Com relação à disposição dos dispositivos físicos, atribua uma nota para cada componente do simulador. Siga a classificação: 1-Nada adequada, 2-Pouco adequada, 3-Adequada, 4-Muito adequada e 5-Excelente.

Figura 70 - Avaliação da disposição dos dispositivos físicos

Fonte: O autor

Na questão abertas, o Usuário 01 destaca que “os dispositivos físicos estão bem distribuídos, talvez alguma modificação em relação ao monitor”, já o Usuário 10 relata que “na realidade da clínica, a posição do dentista não é muito confortável, e na realização dos testes estavam adequadas”. Para o Usuário 07, “a posição das mãos poderia ser mais para cima, simulando a altura do paciente”. O comentário do Usuário 07 reforça a posição do Usuário 03, para quem “a posição das mãos não é adequada ... gerou cansaço muscular”.

Com relação ao posicionamento do monitor, procurou-se deixá-lo em uma posição que imitasse a cabeça de um paciente. Esta posição pode ser adaptada para cada usuário. Com relação ao posicionamento da mão do usuário, o dispositivo háptico foi desenvolvido para se encaixar sob uma mesa de 70cm de altura. Durante os testes foi utilizada uma cadeira com regulagem de altura para o usuário, a fim de permitir que este se adaptasse à altura fixa da bancada. Porém nenhum dos usuários mexeu na altura da cadeira. Com relação ao cansaço muscular provocado, acredita-se que seja devido ao peso do dispositivo háptico, que faz com que, para a realização dos movimentos de imagem, seja necessário aplicar mais força para movê-lo até vencer a inércia do equipamento.

Outro fator levantado nos testes diz respeito à adaptação dos usuários ao uso do simulador. Para isto foi perguntado quanto tempo foi necessário para se adaptarem a três quesitos: localização espacial dentro do AV; manipulação do dispositivo; e, identificação do retorno de força.

A Figura 71 apresenta o resultado da avaliação, nele é possível perceber que em todos os quesitos as notas mais atribuídas pelos usuários foi a nota 5, que indica que foram necessários menos de 5 minutos para os usuários se adaptassem ao simulador.

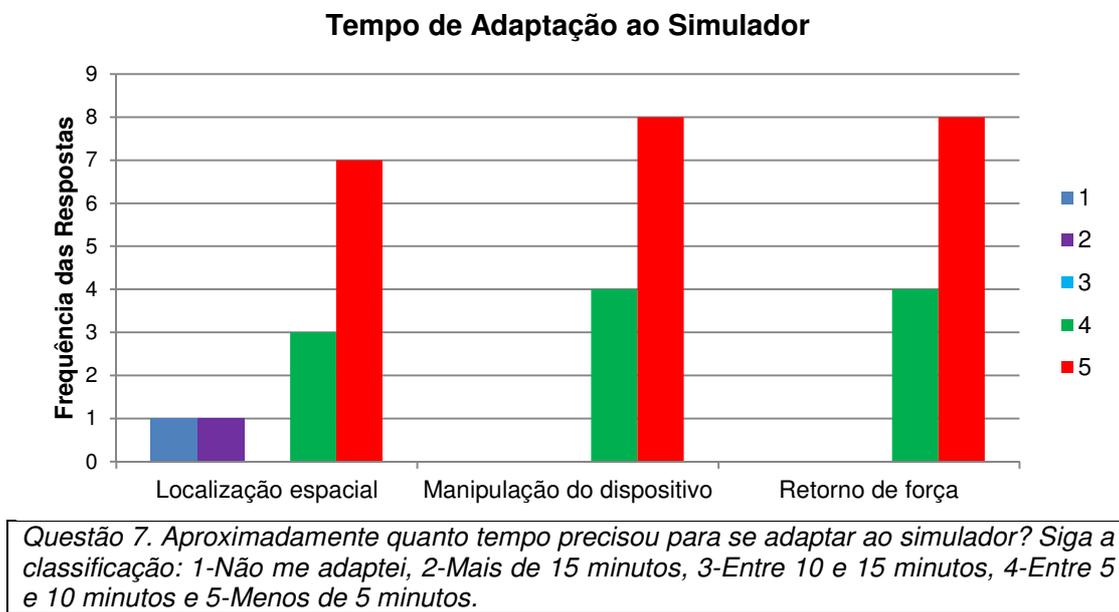


Figura 71 - Avaliação do tempo de adaptação
Fonte: O autor

Na questão aberta, os usuários comentam que a adaptação foi fácil, como o Usuário 12, que descreve que foi “muito fácil se adaptar ao simulador”, corroborando com isto, o Usuário 10 diz que foi “muito fácil de manipular” e o Usuário 03 destaca que “tudo é muito lúdico, o que favorece em rápida adaptação”. Os problemas apresentados pelos usuários estão relacionados à localização espacial, como descreve o Usuário 11, “tive problemas em colocar as limas (***dentro do canal***) na troca de instrumentos” (grifo nosso) e, o Usuário 06, que diz que “a localização espacial, sem dúvida, foi a mais difícil”.

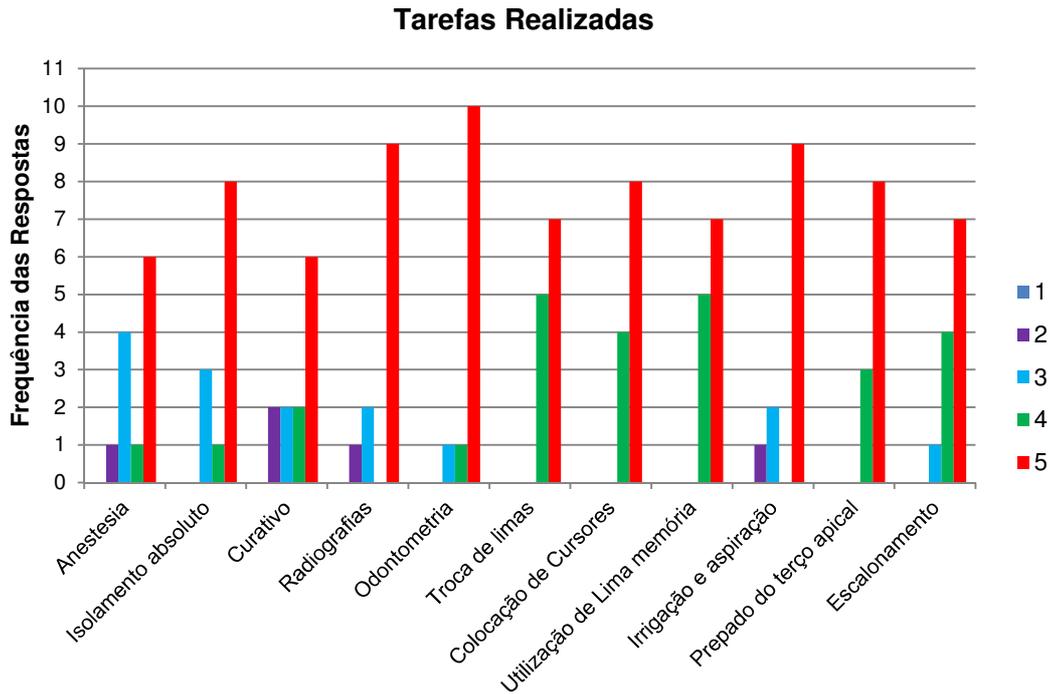
Com relação à localização espacial, já nos testes preliminares que foram feitos com três especialistas, havia sido percebida a necessidade de melhorias. Como o AV foi desenvolvido para visualização monoscópica, não é possível ter a

correta sensação de profundidade, o que leva os usuários, por vezes, a não conseguirem colocar a lima dentro da abertura coronária. A partir desta constatação passou-se a utilizar um ponto referencial dentro do AV, que pode ser visualizado na Figura 39 com um ponto azul, que indicava a posição da ponta da lima na altura da superfície da coroa do dente, indicando qual seria a posição que a lima estaria se movida em direção ao ápice do dente. De acordo com as respostas dos usuários, o problema em parte foi solucionado, mas necessita de melhorias para facilitar sua localização espacial dentro do AV, talvez utilizando visualização estereoscópica.

Para finalizar a avaliação do simulador, foi solicitado ao usuário que indicasse quais tarefas ele realizou e qual sua similaridade com os procedimentos reais. Neste caso, foram avaliados os seguintes quesitos, incluindo ações e etapas do procedimento que foram executadas durante a simulação:

- anestesia;
- colocação e remoção do isolamento absoluto;
- remoção e colocação do curativo;
- visualização da radiografia inicial e final;
- odontometria;
- troca de limas;
- colocação de cursores;
- utilização de lima memória;
- irrigação e aspiração;
- preparo do terço apical;
- e escalonamento.

A Figura 72 apresenta o gráfico com a frequência das notas atribuídas pelos usuários. Em nenhuma das respostas os usuários atribuíram nota zero, que indicava que não tinham realizado a tarefa. Como pode-se observar, em todos os quesitos, a nota com maior frequência foi a 5, indicando que, para a maioria dos usuários, as tarefas estavam “excelentes”.



Questão 8. Com relação às tarefas, indique quais você realizou e atribua uma nota para cada uma delas, levando em consideração o procedimento realizado. Siga a classificação: 1-Ruim, 2-Regular, 3-Bom, 4-Muito bom e 5-Excelente (0 caso não tenha realizado)

Figura 72 - Avaliação das tarefas/ações realizadas durante a simulação

Fonte: O autor

Na questão aberta, os Usuários 09 e 12 relatam que as linhas utilizadas para identificar o comprimento do dente durante a odontometria deveriam ser ajustadas para que o CT ficasse com valores inteiros, o que facilitaria o cálculo do CT. Os Usuários 03 e 06 recomendaram que poderiam ser colocadas mais etapas na simulação, como por exemplo, “a secagem do canal, irrigação com EDTA, colocação de MIC”. Além disto, o Usuário 01 destaca que “mais animações poderiam ser acrescentadas” e, o Usuário 06, descreve que “as animações poderiam ser mais parecidas com o real”.

Como o objetivo principal do trabalho era a avaliação dos movimentos cinemáticos, algumas animações e etapas finais do tratamento não foram consideradas, mas podem ser incluídas facilmente em versões futuras. Com relação ao posicionamento das linhas que indicam a medida do dente, não foi julgado necessário posicioná-los de forma a dar valores inteiros, uma vez que isto não acontece no ambiente real, e, como cada dente tem suas características próprias, o CT será diferente em todos os casos.

8.2 Análise da ferramenta de visualização

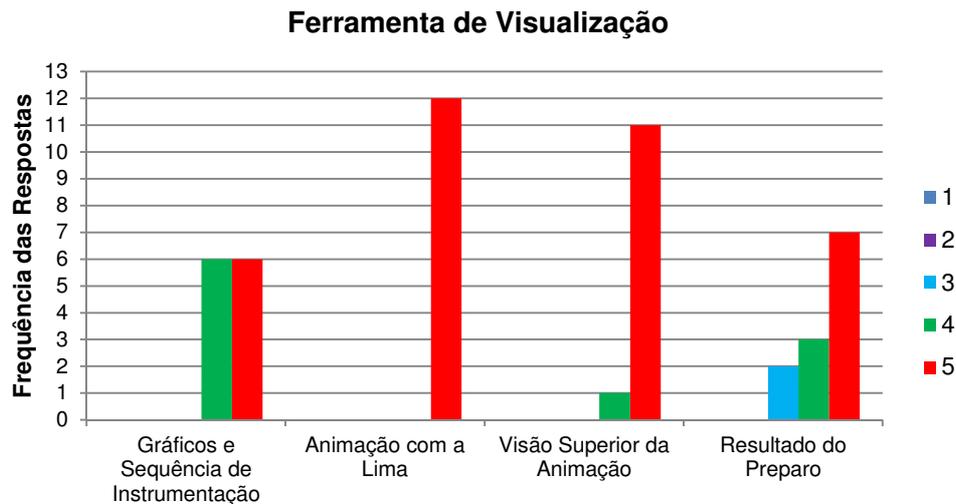
A ferramenta de visualização apresentada na seção 6.7 é uma das principais inovações deste trabalho de pesquisa. Com ela os usuários podem acompanhar como foi sua simulação e identificar possíveis erros na aplicação da técnica de instrumentação empregada e no manuseio das limas, quando realizam os movimentos cinemáticos.

Para avaliar a ferramenta de visualização foram feitos dois questionamentos aos usuários. Na nona questão do formulário de pós-teste foi solicitado que os usuários atribuíssem uma nota para as formas de visualização propostas, considerando sua percepção com relação à simulação feita e o resultado apresentado pela ferramenta. Neste caso, os quesitos avaliados foram as formas de visualização disponíveis na ferramenta, que são:

- gráficos 2D de movimentação vertical e de rotação, em conjunto com a sequência de instrumentação;
- animação dos movimentos da lima com visão frontal;
- visualização dos movimentos com visão superior;
- e, resultado final do preparo, na forma de fatias do dente.

A Figura 73 apresenta o gráfico com a distribuição da frequência das notas atribuídas pelos usuários, em cada quesito avaliado. Pode-se perceber que no quesito que trata dos gráficos 2D e da sequência de instrumentação, houve empate entre as notas 4 e 5, o que leva a classificar este tipo de visualização como “muito bom”. Em todos os demais quesitos avaliados a maior ocorrência de notas foi a nota 5, indicando que as visualizações são “excelentes” para a maioria dos usuários.

Nesta questão foi solicitado também que os usuários identificassem qual a melhor combinação de janelas de visualização para a ferramenta, porém, nenhum o fez pois, segundo comentários dos usuários, o conjunto dos métodos de visualização é que faz a ferramenta estar completa.



Questão 9. Com relação à ferramenta de visualização apresentada ao final do experimento, atribua uma nota para cada método de exibição considerando a sua percepção com relação a simulação feita e o resultado apresentado pela ferramenta. Siga a classificação: 1-Ruim, 2-Regular, 3-Bom, 4-Muito bom e 5-Excelente (0 caso não tenha realizado). Caso ache interessante a combinação de duas ou mais técnicas para avaliar a simulação acrescente na linha em branco da tabela e atribua uma nota a ela.

Figura 73 - Avaliação da ferramenta de visualização

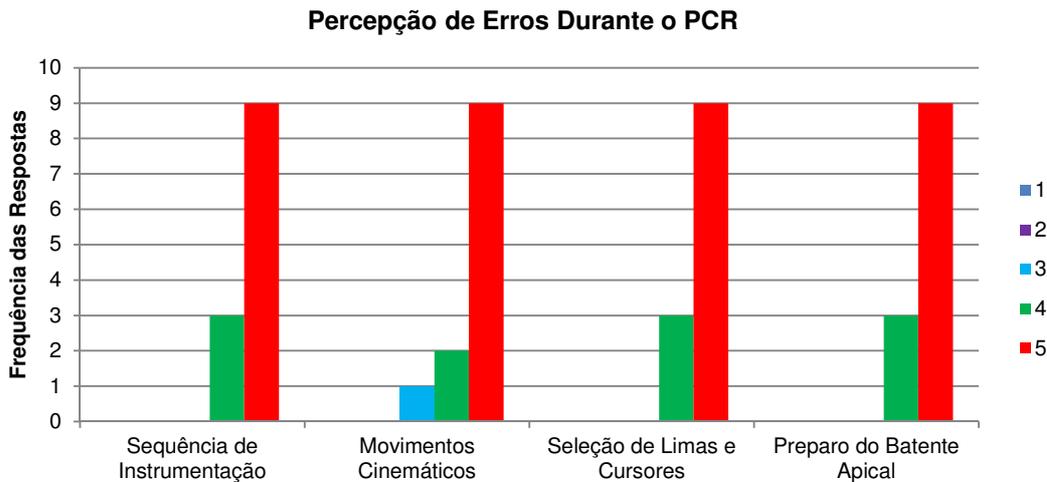
Fonte: O autor

Na décima questão do questionário de pós-teste, foi solicitado que os usuários indicassem quando conseguiam perceber, analisando a ferramenta de visualização, se alguma tarefa havia sido executada com imperfeição. Os quesitos aqui avaliados foram:

- sequência de instrumentação;
- movimentos cinemáticos;
- seleção de limas e cursores;
- e, preparo do batente apical.

Nos gráficos apresentados na Figura 74 são apresentados os resultados de cada quesito separadamente, contendo a frequência das notas atribuídas pelos usuários. Em todos os quesitos avaliados, 75% dos usuários, atribuíram nota 5, indicando que “sempre” foi possível identificar os erros ocorridos durante a simulação do PCR.

Também foi solicitado que os usuários indicassem outros erros que pudessem ser percebidos durante a simulação que fossem vistos na ferramenta de visualização, porém nenhum usuário indicou.



Questão 10. Em sua opinião, observando a ferramenta de visualização, é possível perceber se alguma ação é executada com imperfeição? Indique na tabela abaixo quais foram essas atividades, seguindo a classificação: 1-Nunca, 2-Raramente, 3-Algumas Vezes, 4-Quase Sempre e 5-Sempre (0 caso não se aplique ou não saiba). Caso tenha outros itens a destacar, preencha as linhas da tabela.

Figura 74 - Possibilidade de identificação de erros durante a simulação
Fonte: O autor

8.3 Ferramenta de ensino

Para finalizar o formulário de pós-teste foi colocada uma pergunta em aberto para que os usuários expusessem suas opiniões sobre a utilização do simulador como ferramenta de ensino para atividades práticas de pré-clínica. A Tabela 7 apresenta a transcrição das respostas dos participantes, sendo que 100% deles concordam que o simulador seria uma boa ferramenta de ensino.

Tabela 7 - Respostas sobre o questionamento do uso do simulador como ferramenta de ensino em atividades práticas de pré-clínica
Fonte: O autor

Id	Usuário	Comentário
01	Professor	“Sim, poderia. Representa uma ferramenta muito relevante para aprendizagem, desenvolvimento dos procedimentos. Poderia auxiliar na percepção tátil do aluno também. Além disso, funciona como avaliadora do procedimento realizado, possibilitando ao aluno fazer uma análise crítica do seu procedimento.”
02	Aluno	“Sim, simulador muito didático, excelente para aplicação no ensino dos alunos de graduação, principalmente em fase de laboratório para quem precisa ‘ver’ seus tratamentos e avaliá-los. Superimportante na visualização da instrumentação das paredes do canal.”
03	Professor	“Sim, a ferramenta possibilita a simulação dos movimentos executados da prática clínica, assim como confere a possibilidade de visualização das sequencia operatória escolhida. Também possibilita avaliar se a falha na execução correta dessa sequência pode interferir na execução ou continuação do tratamento. O simulador pode funcionar também como uma ferramenta de avaliação das atividades práticas do aluno.”

04	Aluno	“Sim, é uma forma de o aluno treinar e perceber acertos ou erros durante sua técnica, de uma forma diferente do que está acostumado na clínica, em paciente, para que possa melhorar e comparar com resultados anteriores para avaliar se houve melhora na prática.”
05	Profissional	“Sem sombra de dúvida, apenas mais alguns ajustes e seria extremamente útil no processo de aprendizagem, cinemática de movimento e princípios da endodontia.”
06	Profissional	“Sim. O simulador está muito bem feito e simula adequadamente a prática, sendo bastante preciso na técnica do preparo do canal radicular (uma das etapas em que o aluno mais apresenta dificuldade de memorizar a sequência clínica a ser realizada). Adorei! Parabéns!”
07	Aluno	“Sim. Treina o aluno para as etapas do tratamento endodôntico, é mais rápido e não utiliza dentes (pode ser um complemento para a pré-clínica). Além disto, demonstra onde o aluno utiliza mais força e se está utilizando os movimentos corretos na etapa certa.”
08	Profissional	“Sim. É um dispositivo que permite que o aluno tenha uma visão geral ao tratamento endodôntico. Possibilita o treino inicial e permite que no final possa ser feita uma avaliação individual das ações executadas.”
09	Aluno	“Sim. Ferramenta muito interessante e de grande valor didático para alunos de graduação.”
10	Profissional	“Sim. Na minha opinião o simulador demonstra muito bem a realidade da prática clínica e ainda permite que o aluno/usuário verifique onde estão seus erros e acertos durante o preparo. Esta última parte é muito interessante pois facilita o aprendizado e fornece informações que não seriam obtidas sem o uso do simulador.”
11	Profissional	“Sim. Auxiliaria nas atividades, pois se consegue muito bem simular uma situação real. E também se faz uma auto-avaliação no final, vendo possíveis erros encontrados.”
12	Profissional	“Excelente ferramenta para ensino, para prática de alunos e posterior análise dos movimentos, que não é possível em outro material onde só podemos analisar em radiografia. Acredito que para o que se propõe, disseminar a prática de preparo está excelente. Porém, o tratamento envolve diversas outras etapas que ainda seriam praticados em dentes naturais, mas seria ótimo para reduzir o número de dentes para cada aluno e aumentaria a prática.”

[Página deixada propositalmente em branco]

9 Discussões

Nesta seção serão discutidos os resultados obtidos durante a realização dos testes com o simulador, buscando apresentar dados capazes de demonstrar quais dos objetivos propostos pelo trabalho foram atingidos. Além disto, são detalhadas as inovações apresentadas no trabalho, nas áreas do conhecimento envolvidas na pesquisa.

O objetivo principal do trabalho era desenvolver uma metodologia de treinamento em endodontia, baseada em RV com o uso de um dispositivo háptico. Esta metodologia deveria conseguir reproduzir, de forma convincente, a sensação tátil percebida pelo dentista durante a etapa de limpeza e modelagem dos canais radiculares. Neste procedimento é utilizado instrumental endodôntico manual e o sistema captura os movimentos e a força que o dentista emprega no dispositivo háptico e, posteriormente, permite visualizar tais movimentos.

Antes de iniciar o desenvolvimento da metodologia de treinamento foi necessário construir o simulador para ser utilizado na aplicação da metodologia. Este simulador é composto por um dispositivo háptico com 4DOF e um AV que representa um tratamento endodôntico.

Devido à falta de acesso a dispositivos hápticos com as características necessárias para simular o movimento de giro executado com as limas endodônticas, foi necessário fazer uma adaptação em um dispositivo háptico convencional. Nesta adaptação foi adicionado mais um grau de liberdade com retorno de força em um dispositivo do tipo *Novint Falcon Controller*, que originalmente dispõe de 3DOF. A adaptação feita no dispositivo háptico permite que seja lido o giro da lima e também seja aplicada uma força sobre o eixo de rotação, fazendo com que o usuário precise empregar mais força para girar a lima quando ela estiver presa em alguma porção do dente.

A avaliação do retorno háptico foi realizada com 3 perguntas do questionário de pós-teste, com diversos itens em cada uma. A Figura 75 apresenta um gráfico com o percentual referente à somatória das respostas atribuídas pelos usuários em cada quesito. Com relação ao retorno háptico percebido pelos usuários, a avaliação da maioria foi positiva, sendo que a nota com maior frequência foi 5, com 46,7% das

respostas. Na avaliação da possibilidade de percepção de diferença de resistência quando realizava os movimentos, a nota com maior quantidade de ocorrências foi 4, com 43,8% das respostas. E, na questão sobre a similaridade do retorno de força com a sensação real a maior ocorrência de respostas foi 4, com 45,8% das respostas.

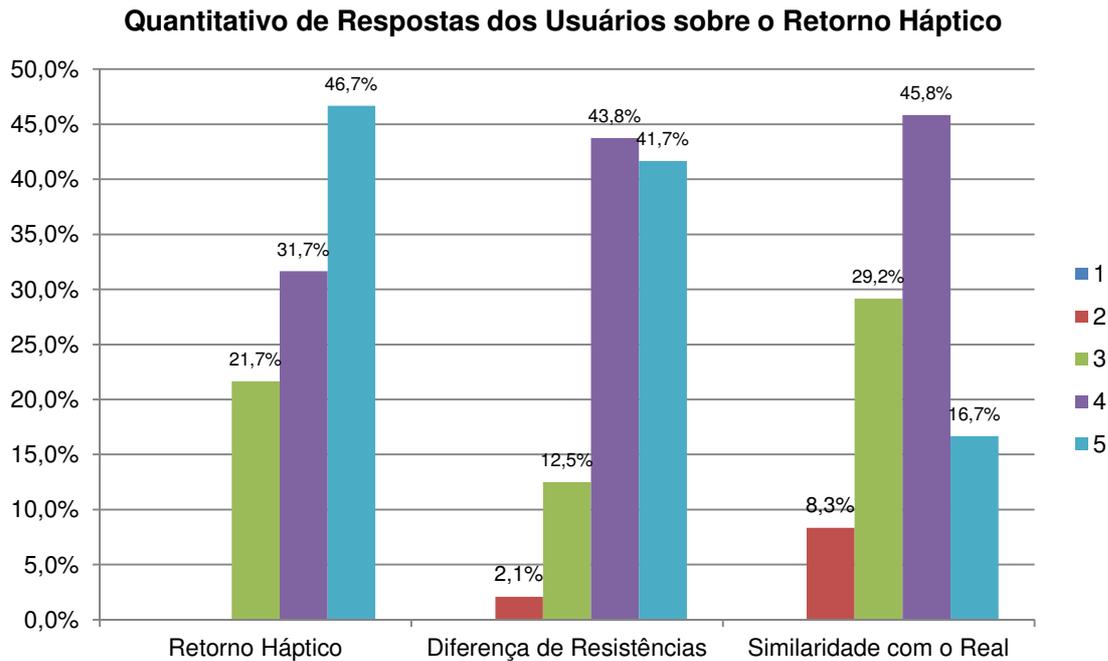


Figura 75 - Quantitativo de respostas dos usuários sobre o retorno háptico
Fonte: O autor

Como foi feita uma adaptação ao dispositivo háptico buscou-se analisar se tal mudança foi capaz de representar realisticamente os movimentos de giro da lima. Na seção 8.1.2 esta análise foi apresentada de forma abrangente, aqui, os dados estão apresentados de forma pontual, com foco exclusivo na avaliação do giro da lima.

Durante as sessões de teste foi possível perceber que a sensação provida pelo dispositivo háptico quando era necessário girar a lima, foi bem avaliada pelos usuários. A avaliação destes movimentos foi feita através de três perguntas presentes no questionário de pós-teste, que questionavam sobre aspectos específicos dos movimentos oscilatórios e de rotação. Para a avaliação foi utilizada uma escala Likert com 5 níveis, sendo que os valores 1 e 2 eram considerados pontos negativos, 3, o ponto neutro e, 4 e 5, os pontos positivos. As respostas dos usuários foram sumarizadas e são apresentadas no gráfico da Figura 76.

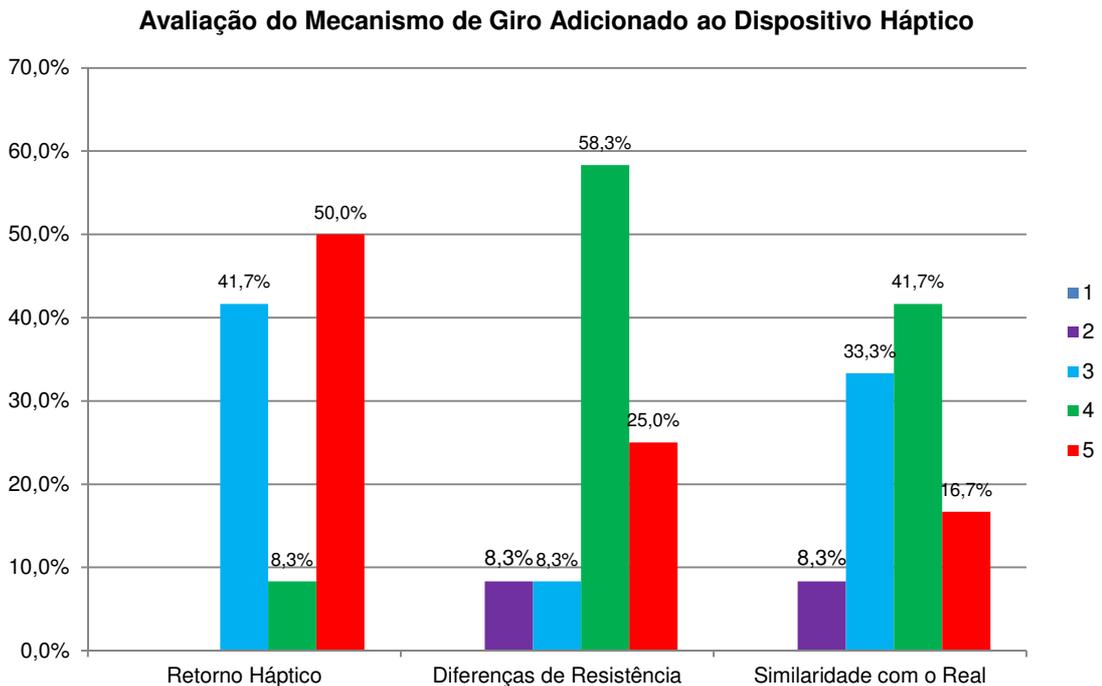


Figura 76 - Avaliação do Mecanismo de Giro Adicionado ao Dispositivo Háptico
Fonte: O autor

Apesar da maioria dos usuários considerarem o retorno háptico do giro adequado, é necessário que sejam feitas melhorias para trabalhos futuros. Em primeiro lugar, o mecanismo de leitura do giro, que é feito com um potenciômetro multivolta, deve ser substituído por um encoder. Isto permitirá que seja feita a leitura contínua do giro, o que não é possível com o potenciômetro, que, devido às suas limitações físicas, impede o movimento quando atinge seus limites. A segunda melhoria proposta é a substituição do servomotor, utilizado como freio, por um dispositivo de maior resolução. Com isso será possível adicionar mais níveis de retorno de força, aumentando a fidelidade do retorno háptico.

Além do dispositivo físico, foi criado um AV para simular um tratamento endodôntico. Neste AV foram desenvolvidos algoritmos de simulação que utilizam objetos volumétricos para representar os modelos. Estes algoritmos são capazes de modificar a estrutura interna ou externa dos objetos, com base na interação entre os instrumentos manipulados pelo usuário, através do dispositivo háptico, e o objeto que é modificado, proporcionando ao usuário a sensação de toque. Neste caso, o objeto volumétrico que é modificado é um dente e o objeto manipulado pelo usuário é uma lima endodôntica.

Após a construção do simulador foi necessário validá-lo com objetivo de verificar se ele é capaz de simular as operações que são necessárias em um tratamento endodôntico. A avaliação consistiu em verificar se o simulador consegue prover aos usuários sensações realísticas, tanto visuais quanto hápticas. Os resultados destes testes são apresentados na seção 8.1, que relata os resultados de três tipos de testes, os testes de realismo gráfico, realismo háptico e testes complementares.

Nos testes que avaliaram o realismo, ou testes de face [48], novamente foram usadas escalas Likert de 5 níveis. O gráfico apresentado na Figura 77 mostra o somatório de todos os quesitos utilizados na validação de face do simulador. Neste gráfico é possível perceber que 4% dos quesitos foram avaliados com resposta neutra (3), e outros 96% foram avaliados com respostas maiores que 3, sendo que 39% das questões obtiveram nota quatro e 57% obtiveram nota cinco. Nenhum dos quesitos avaliados obteve nota menor que 3.

Tais resultados levam a interpretar que, **do ponto de vista de realismo, o simulador é suficientemente realista para ser utilizado para simular as tarefas de limpeza e modelagem dos canais radiculares utilizando limas manuais.**

Frequência de Respostas da Avaliação do Simulador

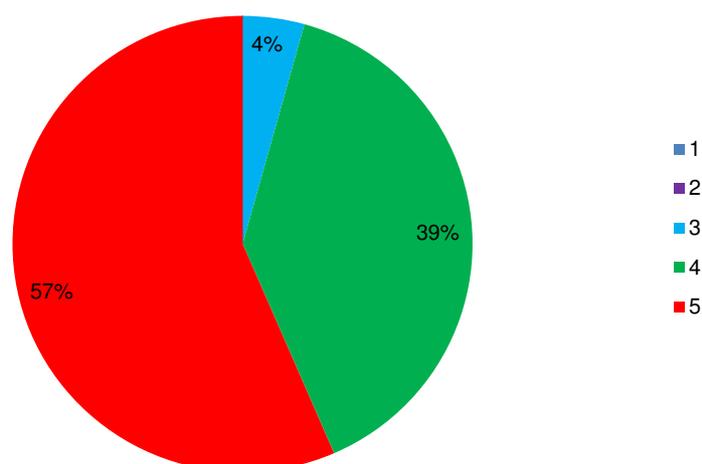


Figura 77 - Frequência de respostas da avaliação do simulador
Fonte: O autor

Após a validação do simulador foi feita a análise da ferramenta projetada para visualizar a simulação. Este tipo de visualização proposta é inovadora por

conseguir apresentar como a lima se comporta dentro do canal do dente durante a instrumentação.

São três os modos de visualização disponíveis. No primeiro é exibida a sequência de instrumentação, que permite ao usuário identificar erros na escolha das limas ou alguma falha na sequência de passos empregados para o preparo do canal radicular. Além disto, são exibidos dois gráficos que permitem identificar o tipo de movimento cinemático realizado, possibilitando identificar se o escalonamento foi feito de forma correta, com a diminuição da profundidade de penetração da lima no canal do dente. Um resumo dos dados apresentados na seção 8.2, é apresentado na Figura 78. Na figura, é possível notar que todos os participantes atribuíram notas positivas (maiores que 3), tanto para o modo de visualização, quanto para a possibilidade de identificação de erros na sequência de instrumentação.

Nesta avaliação, o modo de visualização dos dados obteve 50% das notas quatro e outros 50%, cinco. Já, na avaliação da possibilidade de identificar erros na sequência de instrumentação 75% das notas foram 5 e 25% foram quatro. Estes resultados permitem concluir que **o método de visualização ora apresentado possibilita identificar erros ocorridos na sequência de instrumentação.**

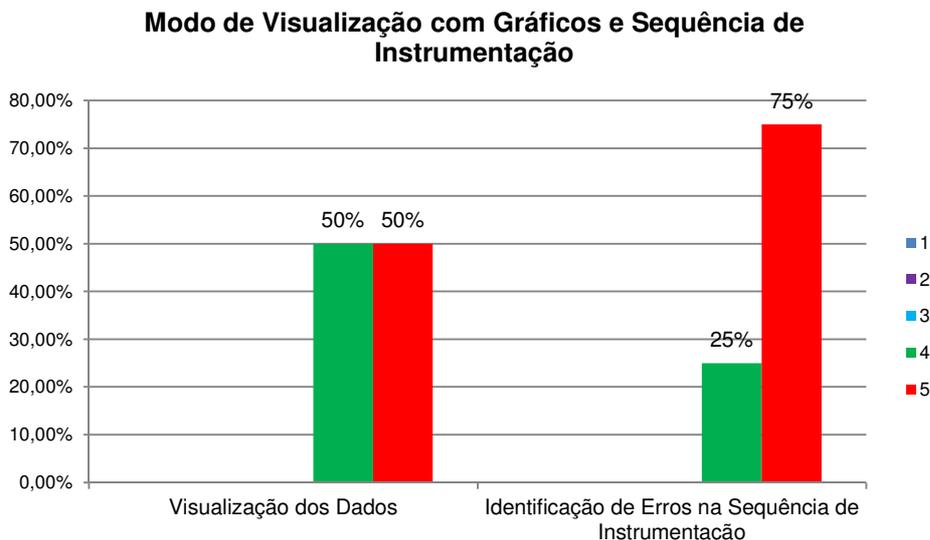


Figura 78 - Modo de Visualização com Gráficos e Sequência de Instrumentação
Fonte: O autor

No segundo modo de visualização, são exibidos para o usuário os movimentos realizados com a lima durante a simulação, apresentando também a direção e a amplitude da força empregada. Nesta visualização o usuário pode

identificar se aplica mais força para um lado do que para outro. Além disto, a ferramenta mostra ao usuário a força aplicada na direção coroa-ápice. Neste caso, em um tratamento real, quando é realizada muita força apical podem ocorrer situações em que a lima ultrapassa o forame do dente, provocando ferimentos da gengiva do paciente podendo acarretar em sérios problemas que podem levar à perda do dente.

Como se trata de uma visualização interativa é permitido ao usuário visualizar apenas partes da simulação, avançar, retroceder, parar e reiniciar a visualização. Com isto, é possível identificar, a cada instante, a força aplicada em cada direção. A amplitude das linhas serve para identificar a força empregada pelo usuário, e, a cor da linha, representa se a lima estava sendo introduzida no canal (verde), removida do canal (vermelho) ou estava parada (ciano) realizando movimentos oscilatórios ou de rotação. Tal modo de visualização pode auxiliar o usuário a treinar a força necessária para dilatar o canal de maneira uniforme em todo o seu diâmetro e evitar a perfuração do forame do dente.

Na Figura 79, do lado esquerdo, são mostradas as simulações de dois usuários com a lima 15 e do lado direito duas simulações com a lima 25. Comparando as simulações A e B, pode-se perceber que na simulação A, o usuário deixou de aplicar força sobre algumas paredes do canal, enquanto em B a força foi aplicada em todas as paredes. Além disto, na simulação B foi aplicada mais força na direção apical, o que poderia provocar a perfuração do forame do dente. Outro detalhe que se observa é que na simulação B o usuário realizou movimentos mais amplos, tratando uma porção maior do canal. Nas simulações C e D pode-se perceber que em D foram realizados mais movimentos oscilatórios ou de rotação próximo ao ápice do dente, e, em C, o usuário aplicou mais força na direção apical.

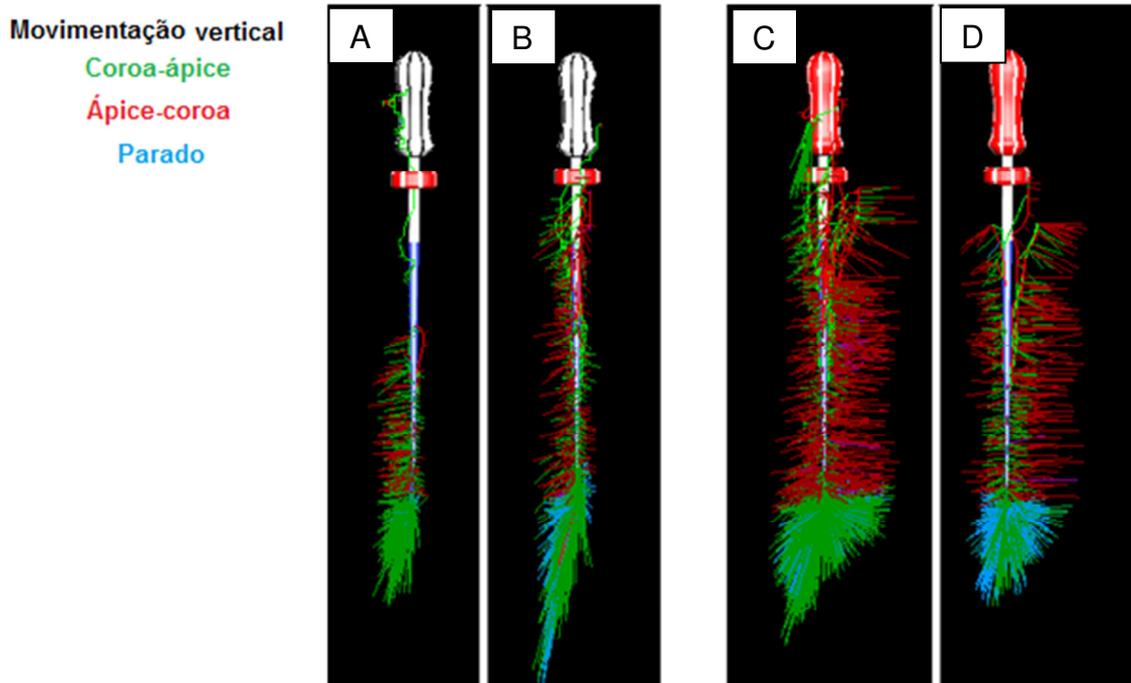


Figura 79 - Visualização da direção e amplitude da força aplicada
 Fone: O autor

Para completar esta visualização é exibido para o usuário uma visão superior da animação, na qual são exibidos apenas os vetores de indicam a direção e amplitude das forças aplicadas durante a simulação. A Figura 80 apresenta a simulação de dois usuários com a lima 25. Na simulação do lado esquerdo, pode-se perceber que o usuário deixa de tratar algumas paredes do canal e aplica força excessiva em outras paredes. Já na simulação da direita, todas as paredes do canal são tratadas e o usuário aplica praticamente a mesma força em todas. Considerando que o canal do dente utilizado na simulação é reto e cônico, pode-se considerar que a simulação da direita deixará o canal dilatado igualmente, enquanto a simulação da esquerda criará um desgaste maior de um lado do canal, provocando um abaulamento.

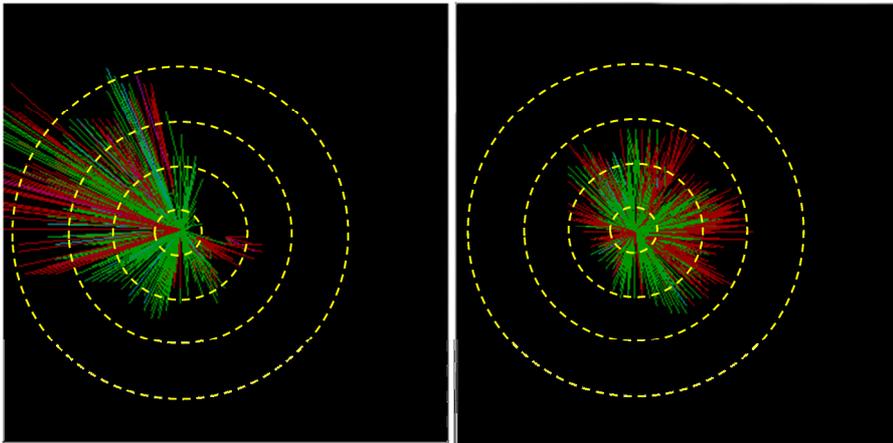


Figura 80 - Visão superior da amplitude e direção da força aplicada nas limas
Fonte: O autor

No terceiro modo de visualização é exibido o resultado final do preparo de um dente separado em camadas. Em uma situação real, isto só poderia ser visualizado a partir da comparação de microtomografias do dente, antes e após o preparo, o que não é possível fazer em dentes reais. Mesmo com dentes extraídos esta visualização é complexa, pois depende do correto alinhamento das duas tomografias, para conseguir gerar este tipo de visualização.

Para esta visualização o dente é dividido em porções longitudinais em forma de fatias. Devido à resolução do modelo, o dente é dividido em 128 fatias, sendo que a raiz do dente está localizada entre as fatias 3 e 90 e, o batente apical deve ficar próximo à fatia 15, como ilustra a Figura 81.

A Figura 82 apresenta uma amostragem das fatias após o preparo do dente realizado pelo Usuário 02 e a Figura 83 mostra o preparo do Usuário 10. Comparando as imagens pode-se perceber que o Usuário 10 realiza o preparo mais uniforme do dente, enquanto o Usuário 02 deixa o canal em forma abaulada (a partir da fatia 70). Além disto, o Usuário 10 trata o dente até um ponto mais próximo ao forame do dente, fatia 19, enquanto o Usuário 02 trata o dente até a fatia 22.

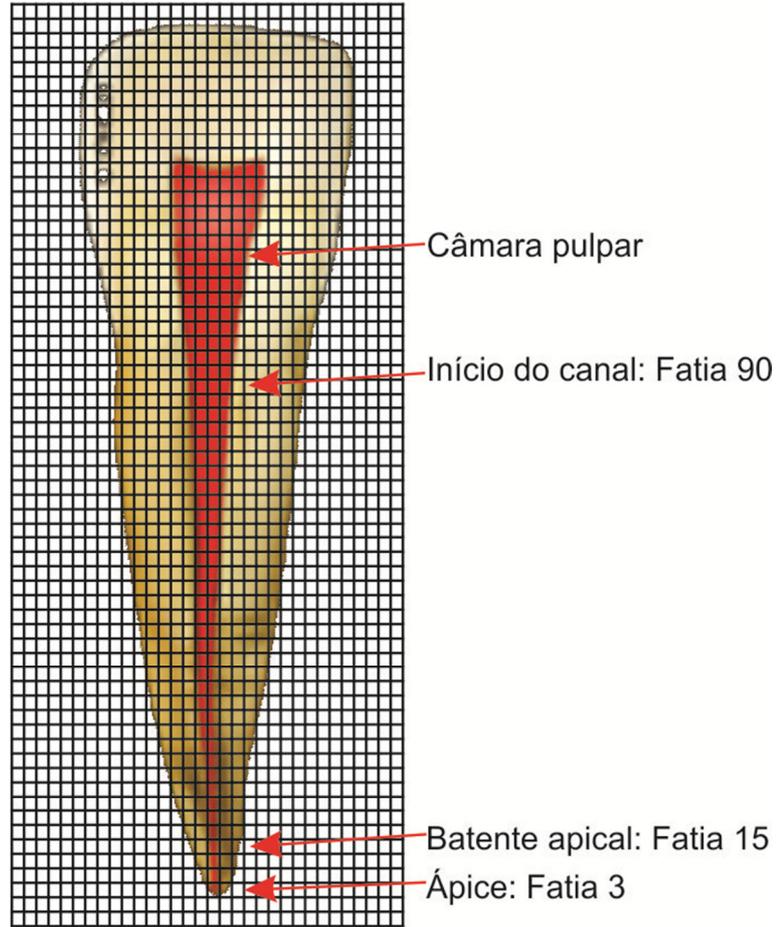


Figura 81 - Fatias de referência do dente
Fonte: O autor

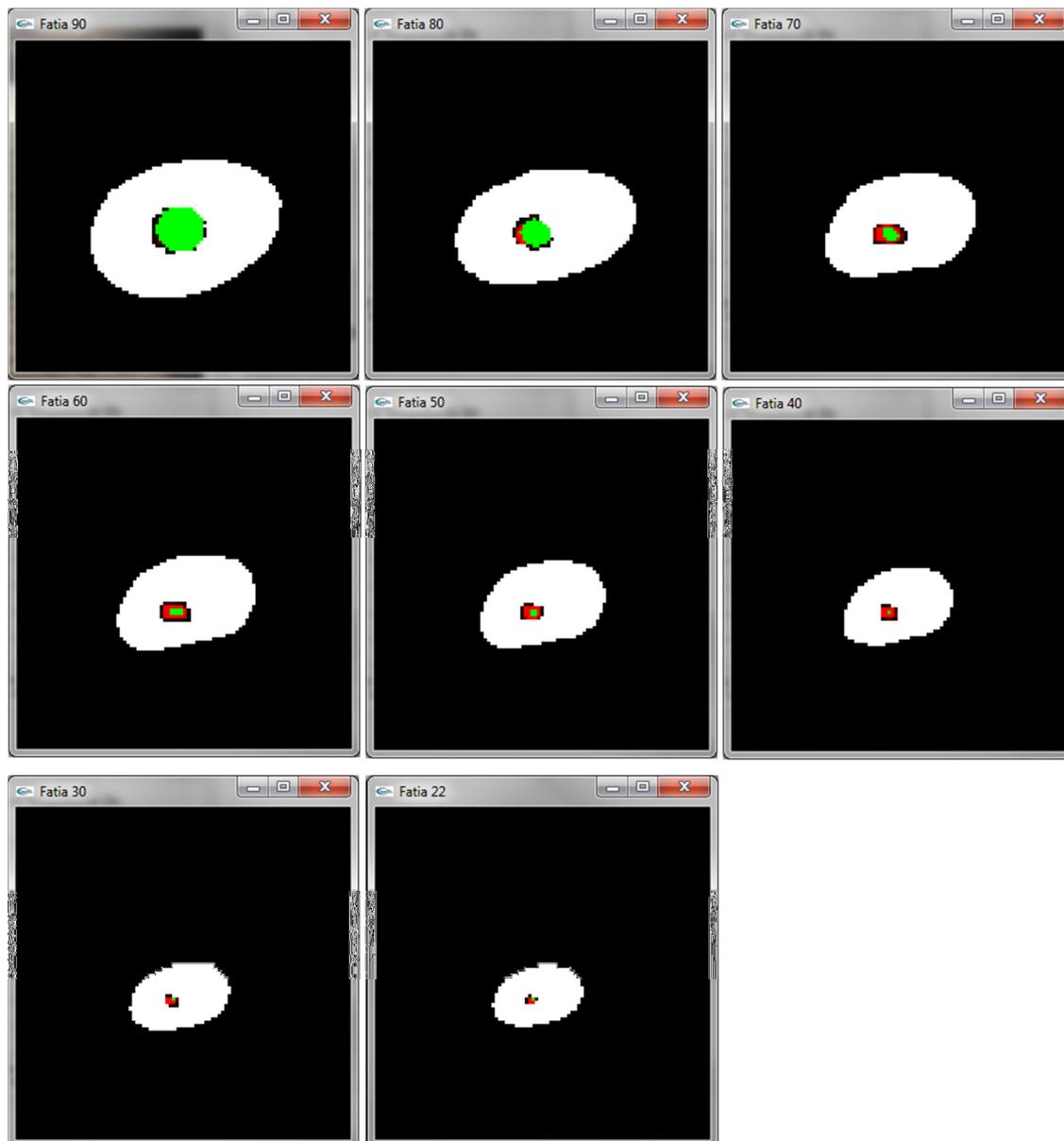


Figura 82 - Amostra da visualização de fatias do Usuário 02
Fonte: O autor

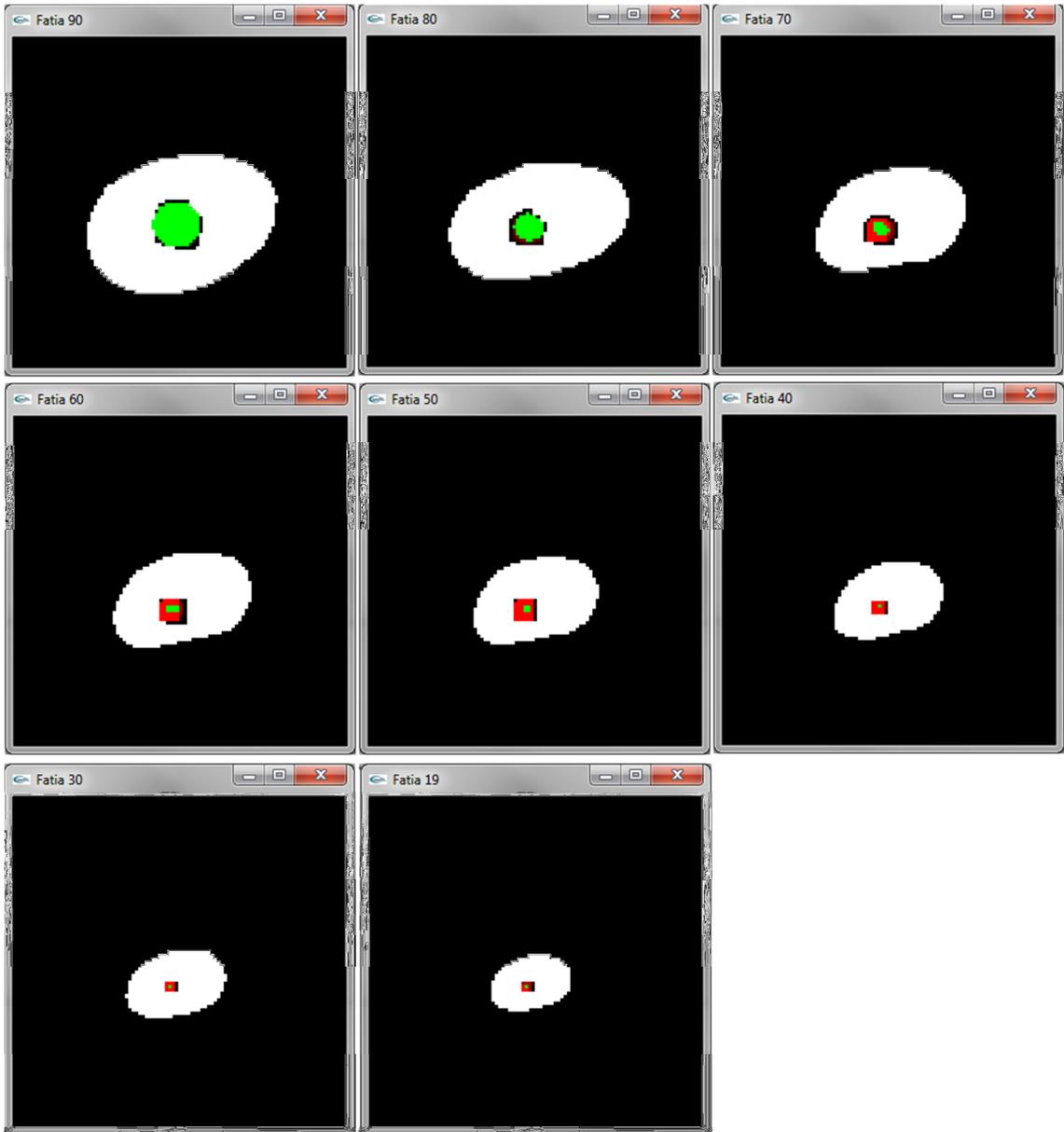


Figura 83 - Amostra da visualização de fatias do Usuário 10
Fonte: O autor

[Página deixada propositalmente em branco]

10 Conclusões

Este trabalho apresentou uma metodologia para avaliação de movimentos cinemáticos realizados por dentistas, quando utilizam limas manuais na tarefa de limpeza e modelagem dos canais radiculares.

A metodologia proposta consistiu em fazer com que os usuários aplicassem corretamente a técnica de instrumentação escalonada para o PCR, do dente 45, segundo pré-molar inferior esquerdo, que possuía uma raiz e um canal reto. Para tanto, o usuário devia realizar todas as etapas do procedimento utilizando limas manuais, considerando que previamente já havia sido feita a abertura coronária.

Para a aplicação da metodologia foi desenvolvido um simulador equipado com um dispositivo háptico customizado para simular um tratamento endodôntico. Além da simulação háptica, a fim de tornar a simulação mais realística, foram incluídas tarefas como anestesia, irrigação e aspiração e utilização de isolamento absoluto, necessárias para a realização de um tratamento real.

Após o término da simulação eram apresentados aos usuários os dados capturados pelo simulador com relação aos movimentos realizados, à força aplicada nas limas e à sequência de instrumentação utilizada.

Para que fosse possível realizar todos os movimentos cinemáticos das limas manuais foi necessário adaptar um dispositivo háptico convencional de 3DOF para 4DOF, com retorno de força em todos estes graus. Para isto, foi desenvolvido um mecanismo que simula uma lima. Este mecanismo é capaz de captar o giro feito pelo usuário na lima e tornar o movimento de giro mais pesado de ser executado, quando a lima está presa no canal do dente.

Durante a avaliação da metodologia também foi validado o simulador desenvolvido, buscando verificar se ele era capaz de reproduzir, realisticamente, as situações que ocorrem em um procedimento real, tanto do ponto de vista gráfico, quanto háptico. Para isso, foi aplicado um processo de validação de face [48], na qual foi verificada a qualidade dos modelos e animações gráficas, e o retorno háptico provido pelo simulador. Com base nas avaliações dos usuários que utilizaram o sistema, é possível concluir que **o simulador é suficientemente**

realista para ser utilizado na simulação das tarefas de limpeza e modelagem dos canais radiculares utilizando limas manuais.

Ao concluir a simulação era apresentada para o usuário uma nova ferramenta de visualização interativa, desenvolvida especificamente para este trabalho. Nesta ferramenta o usuário podia ver a sequência de instrumentação utilizada, a movimentação das limas e a força aplicada por ele sobre o dispositivo háptico, além da visualização do dente após o tratamento, permitindo comparar o resultado de seu preparo com o formato original do canal do dente. O objetivo desta ferramenta era identificar se o usuário podia encontrar erros que por ventura tivessem sido cometido durante a simulação, como por exemplo, a falta de execução de alguma parte do tratamento ou a realização incorreta de movimentos cinemáticos. Após avaliar os resultados dos testes aplicados aos usuários é possível **concluir que a ferramenta de visualização é capaz de mostrar aos usuários erros cometidos durante a simulação, tanto na sequencia técnica empregada, quanto na realização dos movimentos cinemáticos.**

Assim, espera-se que, com o conjunto dos modos de visualização, seja possível que os usuários melhorem sua técnica de instrumentação, observando a sequência de instrumentação, os movimentos cinemáticos realizados e a força aplicada em cada direção. Outra possibilidade é visualizar uma simulação feita por um professor ou um profissional mais experiente e tentar repetir esta simulação, aprimorando suas habilidades, sem a necessidade da presença constante destes profissionais para avaliar seu treinamento.

Outro aspecto tratado no trabalho foi relacionado à possibilidade da utilização do simulador como instrumento de ensino. Neste quesito, de acordo com as respostas dos questionários, os usuários do simulador acreditam que ele possa ser utilizado como ferramenta de ensino para o treinamento de dentistas iniciantes. Segundo os usuários, o uso do sistema facilita sua familiarização com a sequência da técnica de instrumentação, além de permitir que seja calibrada a força aplicada sobre as limas e a realização correta dos movimentos cinemáticos com as limas manuais.

Com relação à adaptação dos usuários ao sistema, considerando o tempo de aprendizado, questão 7 do formulário de pós-teste, em 30% das respostas dos usuários indicaram que precisaram entre 5 e 10 minutos para se adaptarem e 64% das respostas indicaram que foi necessário menos de 5 minutos para adaptação. Apenas 6% das respostas indicaram que foi necessário mais de 15 minutos para adaptação ou que não se adaptaram ao simulador durante o teste. **Isto leva a concluir que o simulador é de fácil aprendizado.**

Além disto, os usuários concordam que as tarefas realizadas durante as simulações, presentes na questão 9 do formulário de pós-teste, foram de alta qualidade, sendo que em 65% das respostas os usuários consideraram as tarefas como excelente, 20% com qualidade muito boa, 11% com qualidade boa e apenas 4% com qualidade regular. Com estes resultados, 85% das avaliações feitas sobre a realização das tarefas foram positivas.

Com base nas análises apresentadas, conclui-se que o simulador desenvolvido neste trabalho é **capaz de reproduzir realisticamente um tratamento endodôntico com dentes de canais retos e permite que os usuários identifiquem erros na sequência de instrumentação e nos movimentos cinemáticos com a utilização de limas endodônticas manuais.**

Sobre as contribuições científicas proporcionadas por este trabalho de pesquisa podem ser citados os artigos publicados no Simpósio Brasileiro de Informática na Educação (2011) [13], no Workshop de Informática Médica (2013) [12], no *Symposium on Virtual and Augmented Reality* (2013) [10] que recebeu a premiação de *best paper*, e, na *International Conferences in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision* (2013) [11].

Como trabalhos futuros propõe-se desenvolver modelos gráficos com maior resolução a fim de verificar se estes modelos podem melhorar o retorno háptico percebido pelo usuário e a visualização final do preparo do dente. Além disto, para permitir a comparação entre duas simulações, seria interessante apresentá-las lado a lado, em uma execução simultânea.

Com relação à adaptação do dispositivo háptico, propõe-se que seja testado o uso de um *encoder* para fazer a leitura do giro da lima, o que permitirá o giro

contínuo da lima sem se deparar com os limites físicos do potenciômetro. Propõe-se também a utilização de um novo mecanismo de freio que permita mais níveis para o freio do dispositivo.

Para finalizar, outro ponto que pode ser abordado futuramente é a utilização de dentes com canais curvos. Para isto devem ser desenvolvidos novos algoritmos de controle da lima, permitindo que esta se curve seguindo o formato do canal. Isto torna-se uma tarefa complexa pois são utilizados modelos voxelizados para compor a lima e o dente, sendo necessário reposicionar os voxels da lima quando esta estiver sendo curvada.

REFERÊNCIAS

- [1] ACOSTA, E.; LIU, A. "Real-time volumetric haptic and visual burrhole simulation". In: Virtual Reality Conference, 2007, pp. 247–250.
- [2] ARBABTAFTI, M. et al. "Haptic and visual rendering of virtual bone surgery: A physically realistic voxel-based approach". In: IEEE International Workshop on Haptic Audio visual Environments and Games, 2008, pp. 30–35.
- [3] ARNOLD, D.B. et al. 2000. "Virtual teeth for endodontics training and practice". In: IEEE International Conference on Information Visualization, 2000, pp. 597–604.
- [4] ARORA, A. et al. 2014. "Virtual reality simulation training in Otolaryngology." *International Journal of Surgery*, vol. 12-2, 2014, pp. 87–94.
- [5] BASDOGAN, C. et al. 2007. "3-DOF haptic rendering". *Haptic Rendering: Foundations, Algorithms, and Applications*. AK Peters, 2007, 611p. pp. 311–333.
- [6] BATH-BALOGH, M.; FEHRENBACH, M. J. "Anatomia, Histologia e Embriologia dos Dentes e Estruturas Orofaciais". Elsevier Brasil, 2012, 3 ed., 352p.
- [7] BIFFI, J. C. G. et al. "Endodontia Pré-Clinica Endo-UFU (roteiro de aula)". Capturado em: http://www.fo.ufu.br/sites/fo.ufu.br/files/Anexos/Documentos/Anexos_RoteiroAula_Endodontia_22_01_2013_correcao1.pdf, Outubro 2013.
- [8] BINGOLD, R. A.; MONAGHAN, J. J." Smoothed particle hydrodynamics - Theory and application to non-spherical stars". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.*, vol. 181, Nov 1977, pp. 375–389.
- [9] BOGDAN, C.M. et al. "A Brief Survey of Visuo-Haptic Simulators for Dental Procedures Training". In: Proceedings of the 6th International Conference on Virtual Learning, 2011, pp. 28–29.
- [10] BOGONI, T. N.; PINHO, M. S. "Haptic Rendering Techniques Supporting Material Removal". In: Virtual and Augmented Reality (SVR), 2013, pp. 36–45.
- [11] BOGONI, T. N.; PINHO, M. S. "Haptic Technique for Simulating Multiple Density Materials and Material Removal". In: 21st International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision in cooperation with EUROGRAPHICS Association, 2013, pp.151–160.
- [12] BOGONI, T. N.; PINHO, M. S. "Simulador Háptico para Preparo de Dentes". In: XXXIII Congresso da Sociedade Brasileira de Computação - XIII Workshop de Informática Médica Anais, 2013, pp. 1194–1197.
- [13] BOGONI, T. N.; PINHO, M. S. "Uma Revisão Sistemática de Simuladores de Endodontia Equipados com Dispositivos Hápticos". In: Simpósio Brasileiro de Informática na Educação, 2011, pp. 446-455.
- [14] BOYD, L. B. "Manual de Instrumentais e Acessórios Odontológicos". Elsevier Brasil, 2012, 4 ed, 736p.
- [15] CHOI, K. S. et al. "Virtual Suturing Simulation Based on Commodity Physics Engine for Medical Learning". *Journal of Medical Systems*. vol. 36-3, Jun 2012, pp. 1781–1793.
- [16] EISEMANN, E.; DÉCORET, X. "Single-pass GPU solid voxelization for real-time applications". In: Proceedings of graphics interface, 2008, pp. 73–80.
- [17] ELVINS, T. T. "A survey of algorithms for volume visualization". *ACM Siggraph Computer Graphics* vol. 26-3, 1992, pp. 194–201.
- [18] ERIKSSON, M. et al. "A haptic and virtual reality skull bone surgery simulator". In: World Haptics Conference, 2005, pp. 592-597.

- [19] ERIKSSON, M. G. "Haptic Milling Simulation in Six Degrees-of-Freedom: With Application to Surgery in Stiff Tissue". Tese de Doutorado, KTH Royal Institute of Technology, 2012, 85p.
- [20] ETHREDGE, C. E. "A Parallel Mass-Spring Model for Soft Tissue Simulation with Haptic Rendering in CUDA". In: 15th Twente Student Conference, 2011.
- [21] FANG, T. Y. et al. "Evaluation of a haptics-based virtual reality temporal bone simulator for anatomy and surgery training". *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol.113-2, Fev 2014, pp. 674–681.
- [22] FORCE DIMENSION. Capturado em: <http://www.forcedimension.com/>, Jan 2014.
- [23] FRISOLI, A. et al. "A new force-feedback arm exoskeleton for haptic interaction in virtual environments". In: Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2005, pp. 195–201.
- [24] GAO, Y. et al. 2009. "An Application Framework of Three-dimensional Reconstruction and Measurement for Endodontic Research". *Journal of Endodontics*, vol.35-2, Fev 2009, pp. 269–274.
- [25] GIBSON, S. F. F. "Beyond volume rendering: visualization, haptic exploration, and physical modeling of voxel-based objects". In: Visualization in Scientific Computing'95, 1995, pp. 10–24.
- [26] GOTTLIEB, R. et al. "Faculty Impressions of Dental Students' Performance With and Without Virtual Reality Simulation". *Journal of Dental Education*, vol. 75-11 Nov 2011, pp. 1443–1451.
- [27] GREENISH, S. et al. "Measurement, analysis, and display of haptic signals during surgical cutting". *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 11-6, 2002, pp. 626–651.
- [28] HAMZA-LUP, F. G. et al. "A survey of visuo-haptic simulation in surgical training". In: The Third International Conference on Mobile, Hybrid, and On-line Learning, 2011, pp. 57–62.
- [29] HAYWARD, V. "Survey of haptic interface research at McGill University". In: Workshop on Advances in Interactive Multimodal Telepresence Systems, 2001, pp. 91–98.
- [30] HIKICHI, K. et al. "Architecture of Haptics Communication System for Addaptation to Network Environmens". In: IEEE International Conference on Multimedia and Expo, 2001, pp. 563-566.
- [31] HO, C. H. et al. "Efficient Point-Based Rendering Techniques for Haptic Display of Virtual Objects". *Presence*, vol. 8-5, Out 1999, pp. 477–491.
- [32] HOLLIS, W. et al. "Computer Assisted Learning: A New Paradigm in Dental Education". *Journal of the Tennessee Dental Association*, vol. 91-4, 2011, 14p.
- [33] ISAKSSON, M. et al. "Low-cost 5-DOF haptic stylus interaction using two phantom omni devices". In: EuroHaptics International Conference, 2012, pp. 1–12.
- [34] VON JACO, C.R. et al. "A Novel Accurate Miniopical Tracking System for Percutaneous Needle Placement". *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 60-8, Ago 2013, pp. 2222–2225.
- [35] KHAN, M. et al. "Exploring the quantitative and qualitative measures for haptic systems". In: International Symposium in Information Technology, 2010, pp. 31–36.
- [36] KIM, K. et al. "Volume-based Haptic Model for Bone-drilling". In: International Conference on Control, Automation and Systems, 2008, pp. 255–259.

- [37] LAURETTI, M. B. "Manual de técnica endodôntica". Livraria Editora Santos, 2ed, 2008, 256p.
- [38] LEBLANC, V. R. et al. "A preliminary study in using virtual reality to train dental students". *Journal of Dental Education*, vol. 68-3, 2004, pp. 378–383.
- [39] LEONARDO, M. R. "Endodontia: tratamento de canais radiculares: princípios técnicos e biológicos". Artes Médicas, 2005, 1191p.
- [40] LI, M.; LIU, Y.H. "A virtual endodontics testbed for training root canal skills". In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004, pp. 841–846.
- [41] LI, M.; LIU, Y.H. "Dynamic Modeling and Experimental Validation for Interactive Endodontic Simulation". *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 23-3, 2007, pp. 443–458.
- [42] LI, M.; LIU, Y.H. "Haptic modeling and experimental validation for interactive endodontic simulation". In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006, pp. 3292–3297.
- [43] LI, M.; LIU, Y.H. "Modeling a Haptic Experimental Validation for Endodontic Simulation". In: ICRA 2006, 2006, pp. 312–317.
- [44] LI, M.; LIU, Y.H. "Learning interaction force model for endodontic shaping with support vector regression". In: International Conference on Robotics and Automation, 2006, pp. 3642–3647.
- [45] LI, M.; LIU, Y.H. "Modeling interactions of pulpal tissue with deformable tools in endodontic simulation". In: International Conference on Robotics and Automation, 2005, pp. 2637–2642.
- [46] LORENSEN, W.E.; CLINE, H.E. "Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm". In: 14th Annual Conference on Computer graphics and interactive techniques, 1987, pp. 163–169.
- [47] MARRAS, I. et al. "A virtual system for cavity preparation in endodontics". *Journal of dental education*, vol. 72-4, 2008, pp. 494–502.
- [48] MCDUGALL, E. M. "Validation of Surgical Simulators". *Journal of Endourology*, vol. 21-3, Mar 2007, pp. 244–247.
- [49] MCNEELY, W. A. et al. "Six degree-of-freedom haptic rendering using voxel sampling". In: ACM SIGGRAPH 2005 Courses, 2005, 42p.
- [50] MONDELLI, J. et al. "Dentística: procedimentos pré-clínicos". Livraria Santos Editora, 2003, 266p.
- [51] MORRIS, D. et al. "Visuohaptic simulation of bone surgery for training and evaluation". *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 26-6, 2006, pp. 48–57.
- [52] MURNAGHAN, F. D. "The compressibility of media under extreme pressures". *Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America*, vol. 30-9, 1944, pp. 244-247.
- [53] NASSIF, A. C. da S. et al. "Structuralization of a Human Teeth Bank". *Pesquisa Odontológica Brasileira*, vol. 17, Mai 2003, pp. 70–74.
- [54] NOVINT. Capturado em: <http://home.novint.com/>. Janeiro 2014.
- [55] OAKLEY, I. et al. "Putting the feel in 'look and feel'". In: Conference on Human Factors in Computing Systems, 2000, pp. 415–422.
- [56] PAI, M. et al. "Clinical Research Methods". *National Medical Journal Of India*, vol. 17-2, 2004, pp. 86-95.
- [57] PÉREZ-GUTIERREZ, B. et al. "Endoscopic endonasal haptic surgery simulator prototype: A rigid endoscope model". In: Virtual Reality Conference (VR), 2010, pp. 297–298.

- [58] PINTO, M. L. et al. "Haptic simulator for training of total knee replacement". In: International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob), 2010, pp. 221–226.
- [59] POPOVICI, D. M. et al. "Comparative Study of APIs and Frameworks for Haptic Application Development". In: International Conference on Cyberworlds, 2012, pp. 37–44.
- [60] REILEY, C. E. et al. "Review of methods for objective surgical skill evaluation". *Surgical Endoscopy*, vol. 25-2, Jul. 2010, pp. 356–366.
- [61] RHIENMORA, P. et al. "Augmented reality haptics system for dental surgical skills training". In: 17th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, 2010, pp. 97–98.
- [62] RHIENMORA, P. et al. "Intelligent dental training simulator with objective skill assessment and feedback". *Artificial Intelligence in Medicine*, vol. 52-2, Jun. 2011, pp. 115–121.
- [63] ROTH, S. D. "Ray Casting for Modeling Solids". *Computer Graphics and Image Processing*, vol. 18, 1982, pp. 109–144.
- [64] SALISBURY, K.; TARR, C. "Haptic rendering of surfaces defined by implicit functions". In: ASME Dynamic Systems and Control Division, 1997, pp. 61–67.
- [65] SAMUR, E. et al. "Generic and systematic evaluation of haptic interfaces based on testbeds". In: International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2007, pp. 2113–2119.
- [66] SANGPRADIT, K. et al. "Finite-Element Modeling of Soft Tissue Rolling Indentation". *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 58-12, 2011, pp. 3319–3327.
- [67] SEMERE, W. et al. "Teleoperation with sensor/actuator asymmetry: Task performance with partial force feedback". In: 12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2004, pp. 121–127.
- [68] SENSABLE. Capturado em: <http://geomagic.com/en/products-landing-pages/sensible>. Janeiro 2014.
- [69] SHAH, A. V. et al. "How to build an inexpensive 5-dof haptic device using two novint falcons". In: Haptics: Generating and Perceiving Tangible Sensations, 2010, pp. 136–143.
- [70] SHIMOGA, K. B. "A survey of perceptual feedback issues in dexterous telemanipulation. II. Finger touch feedback". In: Virtual Reality Annual International Symposium, 1993. pp. 271–279.
- [71] SOARES, I.J.; GOLDBERG, F. *Endodontia: técnica e fundamentos*. Artmed, 2011, 524p.
- [72] SUEBNUKARN, S. et al. "Access cavity preparation training using haptic virtual reality and microcomputed tomography tooth models". *International Endodontic Journal*, vol. 44-11, 2011, pp. 983–989.
- [73] SUEBNUKARN, S. et al. "Haptic Virtual Reality for Skill Acquisition in Endodontics". *Journal of Endodontics*, vol. 36-1, Jan 2010, pp. 53–55.
- [74] SUEBNUKARN, S. et al. "Process and outcome measures of expert/novice performance on a haptic virtual reality system". *Journal of Dentistry*, vol. 37-9, Set 2009, pp. 658–665.
- [75] SUEBNUKARN, S. et al. "The use of cone-beam computed tomography and virtual reality simulation for pre-surgical practice in endodontic microsurgery: Virtual reality for endodontic microsurgery". *International Endodontic Journal*, vol. 45-7, Jul 2012, pp. 627–632.

- [76] TSAO, C.C. et al. "Force Sensor Design and Measurement for Endodontic Therapy". *IEEE Sensors Journal*, vol. 13-7, Jul 2013, pp. 2636–2642.
- [77] VALSOV, R. et al. "Haptic Rendering of Volume Data with Collision Detection Guarantee Using Path Finding". In: XVIII Transactions on Computational Science, 2013, pp. 212–231.
- [78] VLASOV, R. et al. "Ray Casting for Collision Detection in Haptic Rendering of Volume Data". In: ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games, 2012, pp. 215.
- [79] WAINER, J. "Métodos de pesquisa quantitativa e qualitativa para a Ciência da Computação". *Atualização em Informática*. Org: Tomasz Kowaltowski; Karin Breitman. Rio de Janeiro: Ed. PUC-Rio, 2007, 42p.
- [80] WANG, D. et al. "iDental: A Haptic-Based Dental Simulator and Its Preliminary User Evaluation". *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 5-4, 2012, pp. 332–343.
- [81] WANG, D.; ZHANG, Y. "Effect of haptic device's position resolution on stability". In: EuroHaptics, 2004, pp. 377–380.
- [82] WESTERMANN, R.; REZK-SALAMA, C. "Real-time volume deformations". *EUROGRAPHICS*, vol. 20-3, 2001, pp. 113–140.
- [83] WU, J. et al. "Voxel-based interactive haptic simulation of dental drilling". In: International Design Engineering Technical Conferences & Computer and Information in Engineering Conference, 2009, 10p.
- [84] ZECELL, M. D.; BACHMANN, L. "Estrutura e composição do Esmalte e da Dentina tratamento térmico e irradiação laser". Editora Livraria da Física, 2005, 298p.
- [85] ZHOU, M. et al. "Effect of haptic feedback in laparoscopic surgery skill acquisition". *Surgical Endoscopy*, vol. 26-4, Abr 2012, pp. 1128–1134.
- [86] ZHOU, Z. et al. "A realistic force rendering algorithm for CyberGrasp". In: Ninth International Conference on Computer Aided Design and Computer Graphics, 2005, pp. 16–24.
- [87] ZILLES, C.B.; SALISBURY, J.K. "A constraint-based god-object method for haptic display". In: International Conference on Intelligent Robots and Systems 95, 1995, pp.146–151.

APÊNDICE A – Termo de consentimento livre e esclarecimento

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL

FACULDADE DE INFORMÁTICA

"Avaliação de Movimentos Cinemáticos com Limas Manuais para o Preparo Endodôntico Utilizando um Simulador Equipado com Dispositivo Háptico"

TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Agradecemos sua participação nos testes da tese de doutorado "Avaliação de Movimentos Cinemáticos com Limas Manuais para o Preparo Endodôntico Utilizando um Simulador Equipado com Dispositivo Háptico". O objetivo deste trabalho é avaliar se o simulador proposto é capaz de simular com eficiência o preparo de um dente com canal reto utilizando limas manuais. Além disto, verificar se os movimentos cinemáticos realizados pelo participante são similares aos executados nos procedimentos reais. Para isto, os participantes serão convidados a utilizar um simulador equipado com um dispositivo háptico desenvolvido especificamente para o experimento. Durante os testes, o sistema irá armazenar as ações realizadas pelo participante, que serão posteriormente analisadas por especialistas, sem que o usuário seja identificado. Ressaltamos que o objetivo **não é** avaliar o participante, **mas sim** avaliar o simulador. O uso que se faz dos dados gerados através dos testes é **absolutamente** limitado à atividade de pesquisa e desenvolvimento, garantindo-se para tanto que:

1. O anonimato dos participantes será garantido em todo e qualquer documento divulgado em foros científicos (tais como conferências, periódicos, livros e assemelhados);
2. Todo participante terá acesso a cópias destes documentos após a publicação dos mesmos;
3. Todo participante que se sentir constrangido ou incomodado durante os testes pode se retirar e estará colaborando de forma importante com a equipe se registrar por escrito as razões ou sensações que o levaram a esta atitude. A equipe fica obrigada a descartar suas contribuições para fins da avaliação que se destinaria;
4. Todo participante tem direito de expressar por escrito, na data do encontro, qualquer restrição ou condição adicional que lhe pareça aplicar-se às garantias enumeradas em (1), (2) e (3), acima. A equipe do projeto se compromete a observá-la com rigor e entende que, na ausência de tal manifestação, o participante concorda que estas diretrizes conduzam o comportamento ético da equipe de pesquisadores;
5. A equipe do projeto tem direito de utilizar os dados gerados durante os testes, mantidas as condições acima mencionadas, para quaisquer fins acadêmicos contemplados por seus membros.
6. Esta pesquisa faz parte do projeto "Apoio a avaliação de critérios de interação humano-computador de sistemas computacionais", registrada no Comitê de Ética na Pesquisa da PUCRS sob nº 11/05667.

() Estou de pleno acordo com os termos acima.

() Em anexo registro condições adicionais para participar dos testes.

Assinatura do observador

Assinatura do participante

Porto Alegre, ____/____/____

Nome do participante

APÊNDICE B – Termo de confidencialidade

TERMO DE COMPROMISSO DE CONFIDENCIALIDADE E SIGILO INDIVIDUAL

_____,
_____, CPF nº _____,
doravante denominado simplesmente COMPROMISSÁRIO, por meio deste instrumento, se obriga a manter confidencialidade e sigilo sobre todos os dados, informações, documentações, sistemas, tecnologias a que tiver acesso em decorrência da realização de testes do Protótipo de software Odontológico, desenvolvido pelo Grupo de pesquisadores Tales Nereu Bogoni, Marcio Sarroglia Pinho e Roberta Scarparo, do Grupo de Realidade Virtual e da Faculdade de Odontologia da PUCRS, por meio das seguintes cláusulas:

1.1 O COMPROMISSÁRIO tem obrigação de zelar pela manutenção da confidencialidade e sigilo das informações, dados, documentos, sistemas e tecnologias a que tiver acesso durante o desenvolvimento das atividades de análise em epígrafe, e após seu término, pelo período mínimo de 5 (cinco) anos;

1.2 Ao COMPROMISSÁRIO, é vedado o uso das informações consideradas confidenciais e estratégicas para fins diversos dos necessários para o exercício regular de suas atividades ou seu compartilhamento com pessoas não autorizadas expressamente pelos pesquisadores da **PUCRS**, acima mencionados, em benefício próprio ou de terceiros;

1.3. – É proibida a realização de cópias, *downloads* ou reprodução por qualquer meio das informações confidenciais e estratégicas, para fins diversos daqueles estritamente necessários para a realização do trabalho proposto na clausula 1.1 acima, salvo quando expressamente autorizado pelos pesquisadores PUCRS.

1.4 – Os documentos impressos devem receber tratamento especial e em caso de descarte, os mesmos devem ser obrigatoriamente, incinerados ou picotados, de forma a não ser possível a identificação de seu conteúdo; Os documentos de cunho eletrônico ou virtual ao serem descartados deverão ser deletados de forma irreversível, inclusive excluídos da lixeira do sistema;

O presente Termo Individual de Compromisso de Confidencialidade passa a vigorar a partir do recebimento do material físico ou oralmente revelado, referente a pesquisa sob análise e perdura pelo prazo de 5 (cinco) anos contados da entrega efetiva do parecer em questão.

O COMPROMISSÁRIO desde já declara e reconhece que a Propriedade Intelectual deste Protótipo pertence exclusivamente à PUCRS e aos pesquisadores acima citados, não podendo este reivindicar qualquer participação relacionada a tais direitos de titularidade ou autoria.

Porto Alegre, ____/____/____.

APÊNDICE C – Formulário de Pré-Teste
Formulário de Pré-teste

1. Nome: _____
2. Sexo: Masculino Feminino
3. Idade: _____
4. Mão que utiliza para manipular os instrumentos: Direita Esquerda
5. Tipo de usuário: Professor Aluno Profissional
6. Há quanto tempo exerce endodontia: _____
7. Já utilizou dispositivos de geração de tato e força)? Sim Não
8. Já utilizou simuladores de odontologia? Sim Não
 - a. Que tarefas eram simuladas?

Porto Alegre, ____/____/____

Observador

Participante

Nome do arquivo de dados: _____

Nome do arquivo de preparo final: _____

APÊNDICE D – Instruções do experimento

23/03/2014

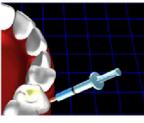
AVALIAÇÃO DE MOVIMENTOS CINEMÁTICOS COM LIMAS MANUAIS PARA O PREPARO ENDODÔNTICO UTILIZANDO UM SIMULADOR EQUIPADO COM DISPOSITIVO HÁPTICO

Testes de Validação

Tales Nereu Bogoni

Ações Simuladas

- Aplicar anestesia
- Colocar e remover o isolamento absoluto
- Colocar e remover o curativo
- Irrigar o canal
- Visualizar a radiografia
- Fazer a odontometria
- Colocar e remover cursores
- Utilizar instrumentos com diferentes diâmetros
- Definir a o instrumento anatômico
- Definir e utilizar o instrumento memória

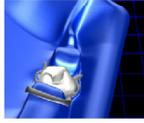


Objetivos

- Simular o preparo da raiz de um dente para realizar tratamento endodôntico
- Avaliar o retorno de força oferecido pelo simulador
- Avaliar a possibilidade de realizar os movimentos cinemáticos utilizando limas manuais
- Comparar a simulação com um procedimento real
- Avaliar os movimentos realizados pelo participante
- Avaliar a sequencia de instrumentação

Ações Simuladas

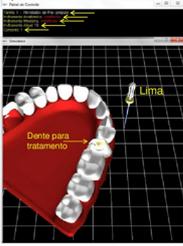
- Aplicar anestesia
- **Colocar e remover o isolamento absoluto**
- Colocar e remover o curativo
- Irrigar o canal
- Visualizar a radiografia
- Fazer a odontometria
- Colocar e remover cursores
- Utilizar instrumentos com diferentes diâmetros
- Definir a o instrumento anatômico
- Definir e utilizar o instrumento memória



Tela Principal

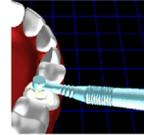
Panel de Controle

Área de Trabalho



Ações Simuladas

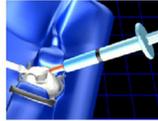
- Aplicar anestesia
- Colocar e remover o isolamento absoluto
- **Colocar e remover o curativo**
- Irrigar o canal
- Visualizar a radiografia
- Fazer a odontometria
- Colocar e remover cursores
- Utilizar instrumentos com diferentes diâmetros
- Definir a o instrumento anatômico
- Definir e utilizar o instrumento memória



23/03/2014

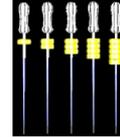
Ações Simuladas

- Aplicar anestesia
- Colocar e remover o isolamento absoluto
- Colocar e remover o curativo
- **Irigar o canal**
- Visualizar a radiografia
- Fazer a odontometria
- Colocar e remover cursores
- Utilizar instrumentos com diferentes diâmetros
- Definir a o instrumento anatômico
- Definir e utilizar o instrumento memória



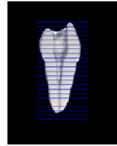
Ações Simuladas

- Aplicar anestesia
- Colocar e remover o isolamento absoluto
- Colocar e remover o curativo
- Irrigar o canal
- Visualizar a radiografia
- Fazer a odontometria
- **Colocar e remover cursores**
- Utilizar instrumentos com diferentes diâmetros
- Definir a o instrumento anatômico
- Definir e utilizar o instrumento memória



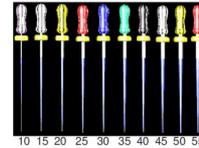
Ações Simuladas

- Aplicar anestesia
- Colocar e remover o isolamento absoluto
- Colocar e remover o curativo
- Irrigar o canal
- **Visualizar a radiografia**
- Fazer a odontometria
- Colocar e remover cursores
- Utilizar instrumentos com diferentes diâmetros
- Definir a o instrumento anatômico
- Definir e utilizar o instrumento memória



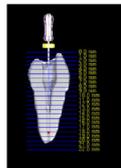
Ações Simuladas

- Aplicar anestesia
- Colocar e remover o isolamento absoluto
- Colocar e remover o curativo
- Irrigar o canal
- Visualizar a radiografia
- Fazer a odontometria
- Colocar e remover cursores
- **Utilizar instrumentos com diferentes diâmetros**
- Definir a o instrumento anatômico
- Definir e utilizar o instrumento memória



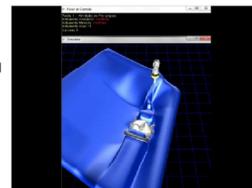
Ações Simuladas

- Aplicar anestesia
- Colocar e remover o isolamento absoluto
- Colocar e remover o curativo
- Irrigar o canal
- Visualizar a radiografia
- **Fazer a odontometria**
- Colocar e remover cursores
- Utilizar instrumentos com diferentes diâmetros
- Definir a o instrumento anatômico
- Definir e utilizar o instrumento memória



Instruções de Uso

- Movimentação
- Movimento de rotação e oscilatório
- Localização espacial
- Cursor tocando na borda do dente



Contato Fora do Dente

- Caso toque em uma área diferente do dente que está sendo tratado, os modelos são apresentados em tons avermelhados



Caso Clínico

- Paciente A.X, relata haver procurado atendimento odontológico devido a dor intensa e espontânea, com diagnóstico de pulpite sintomática (irreversível) no dente 45 . Após atendimento de urgência, houve alívio dos sintomas
- No atendimento anterior, foram realizados abertura coronária, pulpectomia, aplicação de curativo de demora e selamento coronário
- **Considere a necessidade de tratamento endodôntico, e a opção pela técnica de instrumentação escalonada**

Tarefas

1. Procedimentos prévios ao preparo do canal
2. Odontometria
3. Determinação do instrumento anatômico
4. Preparo do batente apical
5. Determinação do instrumento memória
6. Escalonamento
7. Procedimentos clínicos pós preparo

APÊNDICE E – Formulário de Pós-Teste

Formulário de Pós-teste

1. De acordo com sua percepção do ambiente virtual, atribua uma nota relacionada aos **modelos gráficos** utilizados, seguindo a classificação: 1-Ruim, 2-Regurar, 3-Bom, 4-Muito Bom e 5-Excelente.

Modelo Gráfico	Nota
Boca	
Isolamento	
Dente que recebe o tratamento	
Limas	
Radiografia	

Apresente aqui sua opinião sobre este quesito:

2. De acordo com sua percepção do ambiente virtual, atribua uma nota relacionada às **animações** apresentadas, seguindo a classificação: 1-Ruim, 2-Regurar, 3-Bom, 4-Muito Bom e 5-Excelente.

Animação	Nota
Anestesia	
Remoção/Colocação do curativo	
Irrigação e aspiração	
Rotação da lima	
Ponto que representa o posicionamento da lima na superfície do dente	

Apresente aqui sua opinião sobre este quesito:

3. De acordo com sua percepção do ambiente virtual, atribua uma nota relacionada ao **retorno háptico** proporcionado pelo dispositivo, seguindo a classificação: 1-Ruim, 2-Regurar, 3-Bom, 4-Muito Bom e 5-Excelente.

Ação	Nota
Movimentação em espaço livre	
Toque da lima com a superfície do dente	
Penetração da lima no dente até atingir o bordo de referência	
Movimento oscilatório e de rotação	
Movimento de limagem	

Apresente aqui sua opinião sobre este quesito:

4. Foi possível perceber **diferenças na resistência à penetração do instrumento** quando realizava os movimentos? Siga a classificação: 1-Nunca, 2-Raramente, 3-Algumas Vezes, 4-Quase Sempre e 5-Sempre. (0 caso não se aplique ou não saiba)

Movimento	Nota
Colisão da lima na parede externa do dente	
Penetração da lima	
Movimento oscilatório e de rotação	
Movimento de limagem	
Diferença na resistência à penetração do instrumento quando não realizou a irrigação	
Diferença na resistência à penetração do instrumento quando não utilizou a lima de memória (Apenas durante o escalonamento)	

Apresente aqui sua opinião sobre este quesito:

5. Com relação à **similaridade** do retorno de força proporcionado pelo simulador e a sensação real, atribua uma nota para cada quesito seguindo a classificação: 1-Nada similar, 2-Pouco similar, 3-Similar, 4-Muito Similar e 5-igual. (0 caso não se aplique ou não saiba)

Movimento	Nota
Colisão da lima na parede externa do dente	
Penetração da lima	
Movimento oscilatório e de rotação	
Movimento de imagem	
Diferença na resistência à penetração do instrumento quando não realizou a irrigação	
Diferença na resistência à penetração do instrumento quando não utilizou a lima de memória (Apenas durante o escalonamento)	

Apresente aqui sua opinião sobre este quesito:

6. Com relação à **disposição dos dispositivos físicos**, atribua uma nota para cada componente do simulador. Siga a classificação: 1-Nada adequada, 2-Pouco adequada, 3-Adequada, 4-Muito adequada e 5-Excelente.

Quesito	Nota
Posição das mãos	
Posição do monitor	
Posição da cadeira	
Área de movimentação das limas	

Apresente aqui sua opinião sobre este quesito:

7. Aproximadamente quanto **tempo** precisou para se adaptar ao simulador. Siga a classificação: 1-Não me adaptei, 2-Mais de 15 minutos, 3-Entre 10 e 15 minutos, 4-Entre 5 a 10 minutos e 5-Menos de 5 minutos.

Quesito	Nota
Localização espacial	
Manipulação do dispositivo háptico	
Retorno de força do dispositivo háptico	

Apresente aqui sua opinião sobre este quesito:

8. Com relação às **tarefas**, indique quais você realizou e atribua uma nota para cada uma delas, levando em consideração o procedimento realizado. Siga a classificação: 1-Ruim, 2-Regurar, 3-Bom, 4-Muito Bom e 5-Excelente. (0 caso não tenha realizado)

Tarefa	Nota
Anestesia	
Colocação e remoção do isolamento absoluto	
Remoção e colocação do curativo	
Visualização da radiografia inicial e final	
Odontometria	
Troca de limas	
Colocação de cursores	
Utilização de lima memória	
Irrigação e aspiração	
Preparo do terço apical	
Escalonamento	

Apresente aqui sua opinião sobre este quesito:

9. Com relação à **ferramenta de visualização** apresentada ao final do experimento, atribua uma nota para cada método de exibição considerando a sua percepção com relação à simulação feita e o resultado apresentado pela ferramenta. Siga a classificação: 1-Ruim, 2-Regurar, 3-Bom, 4-Muito Bom e 5-Excelente. (0 caso não tenha opinião). Caso ache interessante a combinação de duas ou mais técnicas para avaliar a simulação acrescente na linha em branco da tabela e atribua uma nota a ela.

Tarefa	Nota
Gráficos 2D	
Visão frontal dos movimentos	
Visão superior dos movimentos	
Exibição das fatias do dente preparado	

10. Em sua opinião, observando a **ferramenta de visualização**, é possível perceber se alguma ação é executada com imperfeição? Indique na tabela abaixo quais foram essas atividades, seguindo a classificação: 1-Nunca, 2-Raramente, 3-Algumas Vezes, 4-Quase Sempre e 5-Sempre. (0 caso não se aplique ou não saiba). Caso tenha outros itens a destacar, preencha as linhas da tabela.

Tarefa	Nota
Sequência de instrumentação	
Movimentos cinemáticos	
Seleção de limas e de cursores	
Preparo do batente apical	

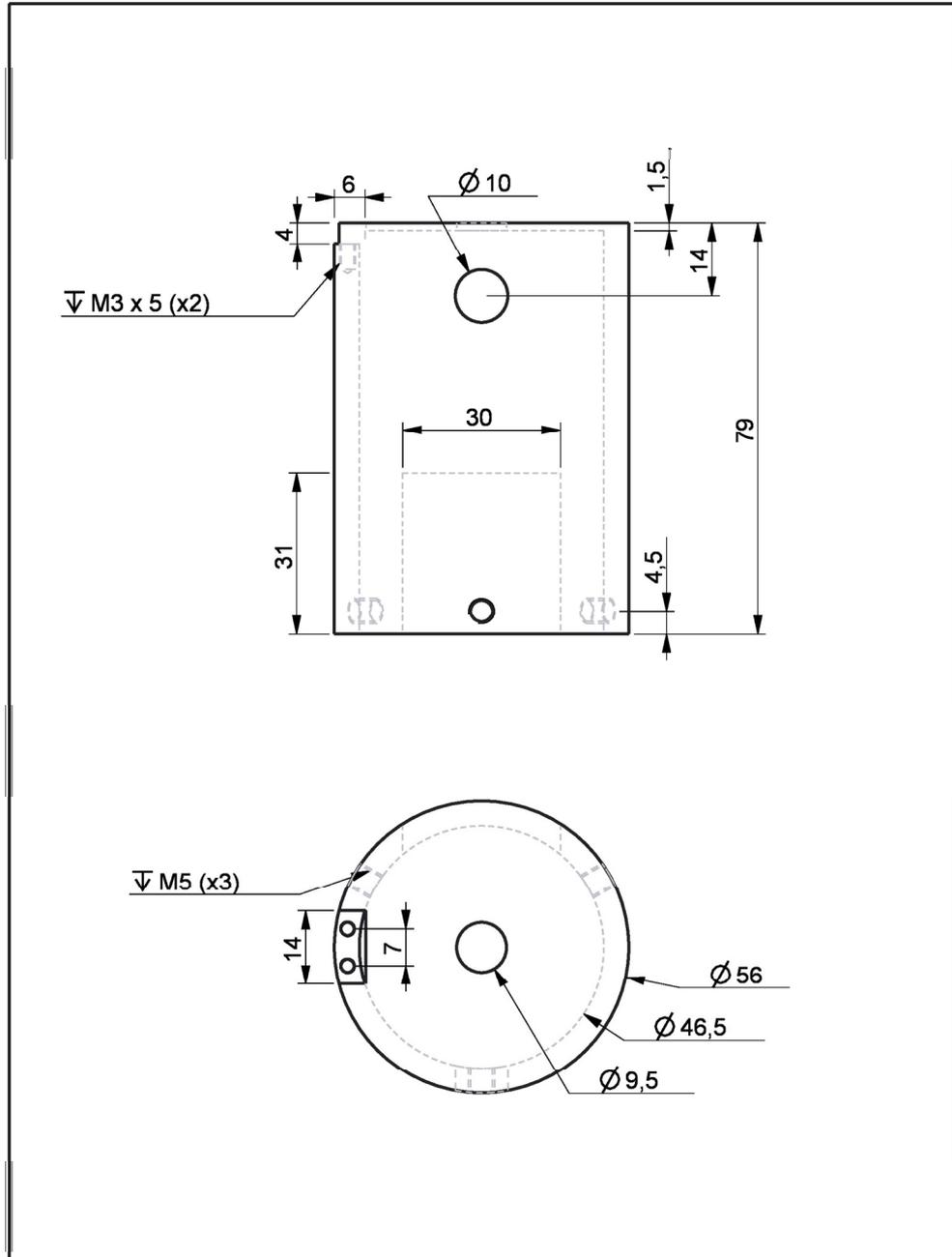
11. Em sua opinião, o simulador poderia ser utilizado como ferramenta de ensino para atividades práticas de pré-clínica? Justifique sua resposta.

Porto Alegre, ____/____/____

Observador

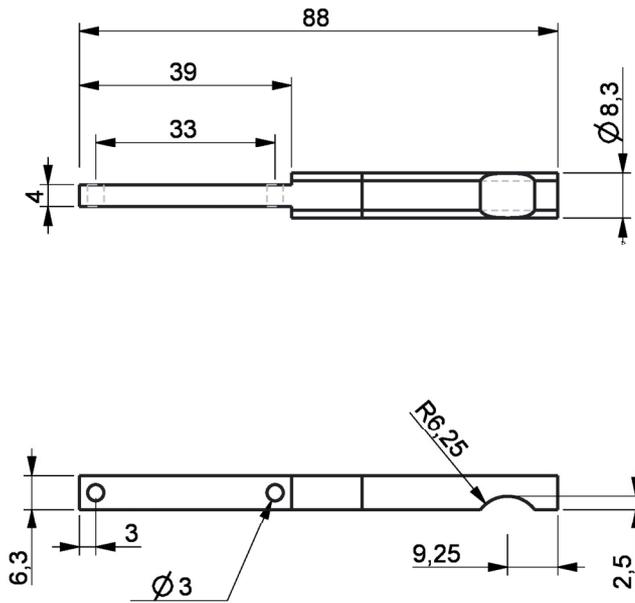
Participante

ANEXO I – Projeto do Adaptador para o Dispositivo Háptico



	Data:	Nome:	Assinatura:		Projeto:
Concepção Projeto Mecânico					Título:
Desenho	05/09/2013	Henrique B.		Operação:	
Escala: 1:1	Obs.:			Material: Poliacetal.	Demanda: 2229
Cotas em: mm					

ANEXO II – Projeto da Haste do Mecanismo de Freio



	Data:	Nome:	Assinatura:		Projeto:
Concepção Projeto Mecânico					Título:
Desenho	16/10/2013	Henrique B.		Operação:	
Escala: 1:1	Obs.:			Material: Poliacetal.	Demanda: 2229.
Cotas em: mm					