REINALDO MISSAKA

**Centros instantâneos de rotação mandibular por meio de processamento de
imagem obtida por metodologia optoeletrônica**

São Paulo

2010

REINALDO MISSAKA

**Centros instantâneos de rotação mandibular por meio de processamento de
imagem obtida por metodologia optoeletrônica**

Tese apresentada à Faculdade de Odontologia da Universidade de São Paulo, para obter o título de Doutor, pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Odontológicas.

Área de Concentração: Prótese Dentária

Orientador: Prof. Dr. Matsuyoshi Mori

São Paulo

2010

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo da Publicação
Serviço de Documentação Odontológica
Faculdade de Odontologia da Universidade de São Paulo

Missaka, Reinaldo

Centros instantâneos de rotação mandibular por meio de processamento de imagem obtida por metodologia optoeletrônica / Reinaldo Missaka; orientador Matsuyoshi Mori. -- São Paulo, 2010.

111p. : fig., graf.; 30 cm.

Tese (Doutorado) -- Programa de Pós-Graduação em Ciências Odontológicas. Área de Concentração: Prótese Dentária. -- Faculdade de Odontologia da Universidade de São Paulo.

1. Movimentos da Mandíbula – Centros de rotação – Metodologia optoeletrônica. 2. Biomecânica. 3. Prótese Dentária. I. Mori, Matsuyoshi. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Missaka R. Centros instantâneos de rotação mandibular por meio de processamento de imagem obtida por metodologia optoeletrônica. Tese apresentada à Faculdade de Odontologia da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências odontológicas.

Aprovado em: / /2010

Banca Examinadora

Prof(a). Dr(a). _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof(a). Dr(a). _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof(a). Dr(a). _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof(a). Dr(a). _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof(a). Dr(a). _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

DEDICATÓRIA

À minha querida família, Viviane, Beatriz e Rebeca, que me ensinaram o significado do amor incondicional, doando-me um tempo de convívio precioso, incentivando-me e viabilizando essa conquista que não é minha, mas nossa.

Aos meus pais, Sihosi Missaka (*in memoriam*) e Noriko Kawaguti Missaka, pelo amor que sempre dedicaram a mim, e pelo exemplo de respeito, tolerância e perseverança que instruem a minha vida.

Às minhas irmãs, Ana Lúcia e Maria Inês, pela amizade que me apóia e me conforta sempre.

Eu dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. **Matsuyoshi Mori**, Professor Doutor da Disciplina de Prótese Parcial Fixa da FOUSP, pelo respeito dedicado a mim, pela paciência frente à minha ansiedade, pela grande amizade e instrução às oportunidades dadas à minha carreira acadêmica, e por praticamente ser meu “pai” na odontologia.

AGRADECIMENTOS

Ao **Prof. Dr. Rodney Garcia Rocha**, diretor da Faculdade de Odontologia da Universidade de São Paulo, pela atual administração.

Ao Coordenador do Curso de Pós-graduação da Faculdade de Odontologia da Universidade de São Paulo, área de Ciências Odontológica, **Prof. Dr. Antônio Carlos Bombana**, e área de concentração em Prótese Dentária, **Profa. Dra. Dalva Cruz Laganá**, pela seriedade, organização e nível do curso ministrado.

À **Profa. Dra. Tomie Nakakuki de Campos**, Professora Titular da Disciplina de Prótese Parcial Fixa e Chefe do Departamento de Prótese da F.O.U.S.P, pelo respeito, incentivo e tolerância dedicados à mim durante esse longo convívio. Sou extremamente grato à minha grande Mestra.

Aos Professores **Pedro Tortamano Neto**, **Ivo Contin**, **Fernando da Cunha Ribeiro**, **José Antônio Lupi da Veiga**, **Cláudio Luiz Sendyk**, **Hideki Yoshida**, e a todos os professores do curso de pós graduação da área de concentração em prótese dentária, por todos os ensinamentos e oportunidades dadas à minha carreira.

Ao **Prof. Associado Oswaldo Horikawa** e ao **Prof. Doutor Newton Maruyama**, professores do Departamento de Engenharia Mecatrônica da Escola Politécnica da USP, pelas orientações, compreensão e paciência, à minha disposição em todos os momentos que necessitei.

Ao **Roberto Ferraz de Campos Filho**, da Escola Politécnica da USP, pelo apoio e colaboração dispensadas sem os quais esse trabalho não seria possível.

Aos amigos **Reynaldo André Nunes Pereira e Alex Angelino**, que pacientemente colaboraram com esse trabalho, sempre solícitos e dispostos a ajudar.

Aos meus colegas de curso, **Alessandra, Juliana, Lucy, Márcio, Mônica, Ricardo Jun e Roger**, pelo companheirismo e amizade que tornaram o convívio um prazer.

Aos meus colegas do Serviço de Oclusão e ATM da disciplina de Prótese Parcial Fixa (SOATM), estagiários, alunos e funcionários, que me incentivam a melhorar sempre.

Às secretárias do Departamento de Prótese da FOU SP, **Coraci, Sandra, Val e Marlethe** que sempre me assistiram com o sorriso e eficiência.

Ao **Laboratório de prótese Júlio**, pela parceria em todos os meus projetos.

E a todos que direta ou indiretamente colaboraram para esse trabalho.

Muito Obrigado!

RESUMO

Missaka R. Centros instantâneos de rotação mandibular por meio de processamento de imagem obtida por metodologia optoeletrônica [Tese]. São Paulo: Universidade de São Paulo, Faculdade de Odontologia; 2010.

Nesta pesquisa, realizou-se o estudo dos movimentos de abertura e fechamento da mandíbula por meio de recursos da optoeletrônica para a obtenção e avaliação dos seus centros instantâneos de rotação. Os dados foram obtidos por duas câmeras filmadoras digitais e o processamento das imagens foi realizado por um *software* de computador desenvolvido junto ao Departamento de Engenharia Mecatrônica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Foram realizadas filmagens de dois pacientes, um sem sinais e sintomas de disfunção temporomandibular (DTM) e outro com deslocamento anterior unilateral do disco articular. Foi desenvolvida uma estrutura removível fixada aos dentes dos pacientes, que por meio de hastes metálicas, permitiu projetar para a porção extra-oral, o movimento da mandíbula, com pontos de referência (alvos) fixados à mesma. Foram realizadas duas filmagens do movimento de abertura e fechamento de cada paciente, uma a partir da posição de máxima intercuspidação (MIC) e outra com a mandíbula sob retrusão manual. As sequências de imagens obtidas geraram arquivos de dados em forma de coordenadas dos pontos correspondentes à variação do movimento dos alvos, bem como de suas trajetórias. Pelo processamento das imagens, foram calculados os centros instantâneos de rotação mandibular (CIRs), resultando em subsídios para análise clínica. Os resultados demonstraram que: o método desenvolvido foi capaz de capturar e processar o movimento mandibular de abertura e fechamento em um plano tridimensional de forma dinâmica, produzindo dados palpáveis para análise clínica; que foi possível, com nível de grandeza na ordem de *pixels*, analisar o comportamento dos CIRs da mandíbula e de toda a face dos pacientes; os CIRs se encontraram em regiões diferentes durante o movimento de abertura e fechamento com ou sem retrusão manual e com ou sem DTM; a localização dos CIRs esteve próxima à região de ATM quando se executou o movimento de abertura e

fechamento com retrusão mandibular, e próximos ao forame mandibular, quando se executou o movimento de abertura e fechamento natural a partir da posição de MIC.

Palavras-chave: Biomecânica. Centro instantâneo de rotação. Disfunção temporomandibular. Articulação temporomandibular.

ABSTRACT

Mandibular instantaneous centers of rotation assessed by image processing obtained by optoelectronic method. [thesis]. São Paulo: Universidade de São Paulo, Faculdade de Odontologia; 2010.

This study assessed the mandibular instantaneous center of rotation (ICR) of mandibular opening and closing movement using the optoelectronic method. Two digital camcorders provided the images and the data were evaluated by a software developed by the Department of Mechatronic Engineering, Polytechnic School- USP. The images were obtained from two patients, one without signs and symptoms with concerns on temporomandibular disorders and the other with unilateral disc displacement. A removable structure attached to patients' teeth allowed recording references points outside of the mouth. Two movies of mandibular opening and closing movement were made of each patient, one starting from intercuspal position and the other starting from a forced retrusive mandible position. The images sequence was use to produce the location data from the references points pathway. The software processed the data and the ICR was determined to provide clinical analysis parity. Optoelectronic method can be used to analyze the mandibular three-dimensional movements and could be applied to the clinical evaluation. Also, the method allowed the assessment of the ICR and the patients' faces in pixels magnitude. The ICR were detect in different regions of the mandible during the opening and closing mandibular movements of each condition. When patients started the mandibular movements from the forced retrusive position, the ICR was situated near the temporomandibular joint and, when patients started the movements from the intercuspal position, the ICR was located near the mandibular foramen.

Keywords: Biomechanics. Instantaneous centers of rotation. temporomandibular joint disorders, temporomandibular joint

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1	Arquitetura do sistema.....	45
Figura 4.2	Fotografia ilustrando a montagem do sistema.....	46
Figura 4.3	Esquema representando a função de suporte das estruturas metálicas intraorais do arco cinemático.....	47
Figura 4.4	Armação metálica superior.....	48
Figura 4.5	Armação metálica inferior.....	48
Figura 4.6	Prova da armação metálica inferior.....	49
Figura 4.7	Prova da armação metálica superior.....	49
Figura 4.8	Conectores posicionados nos grampos.....	49
Figura 4.9	Arco extra-oral para ortodontia (standard 0.051”–1.30 mm).....	50
Figura 4.10	Ponto de solda a laser.....	50
Figura 4.11	Arco cinemático superior.....	51
Figura 4.12	Arco cinemático inferior.....	51
Figura 4.13	Figura ilustrando o posicionamento das câmeras.....	52
Figura 4.14	Figura ilustrando o movimento de abertura com retrusão manual.	53
Figura 4.15	Câmera Imaging Source DFK31BF03.....	53
Figura 4.16	Modelo de câmera “pin-hole”.....	55
Figura 4.17	Imagem ilustrando a ação do algoritmo CAMSHIFT.....	57
Figura 4.18	Sistema de coordenadas no arco superior.....	57
Figura 4.19	Sistema de coordenadas no arco inferior.....	58
Figura 4.20	Resumo dos sistemas de coordenadas utilizados.....	59
Figura 4.21	Figura ilustrando a posição a localização dos pontos P1 e P3.....	60
Figura 4.22	Cálculo do CIR(n) através do método de Reauleaux.....	62

Figura 5.1	Trajetórias dos pontos do alvo anterior direito e na região do côndilo direito do paciente sem DTM. Movimento de abertura e fechamento habitual.....	69
Figura 5.2	Trajetórias dos pontos do alvo anterior direito e na região do côndilo direito do paciente sem DTM. Movimento de abertura e fechamento com retrusão manual.....	74
Figura 5.3	Trajetórias dos pontos do alvo anterior direito e na região do côndilo direito do paciente com DTM. Movimento de abertura e fechamento habitual.....	79
Figura 5.4	Trajetórias dos pontos do alvo anterior direito e na região do côndilo direito do paciente com DTM. Movimento de abertura e fechamento com retrusão manual.....	84
Figura 5.5	Trajetória dos CIRs do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento habitual.....	85
Figura 5.6	Trajetória dos CIRs do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual.....	87
Figura 5.7	Trajetória dos CIRs do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento habitual.....	88
Figura 5.8	Trajetória dos CIRs do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão	90

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 5.1 - Trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P1 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento habitual	64
Gráfico 5.2 - Visualização 3D da trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P1 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento habitual.....	65
Gráfico 5.3 - Visualização 2D da trajetória das coordenadas (x,z) do ponto P1 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento habitual	65
Gráfico 5.4 - Visualização 2D da trajetória das coordenadas (x,z) do ponto P1 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento habitual	66
Gráfico 5.5 - Visualização 3D da trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P2 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento habitual.....	66
Gráfico 5.6 - Visualização 2D da trajetória das coordenadas (x,z) do ponto P2 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento habitual.....	67
Gráfico 5.7 - Trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P3 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento habitual	67
Gráfico 5.8 - Visualização 3D da trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P3 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento habitual.....	68
Gráfico 5.9 - Visualização 2D da trajetória das coordenadas (x,z) do ponto P3 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento habitual.....	68
Gráfico 5.10 -Trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P1 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual	69
Gráfico 5.11 -Visualização 3D da trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P1 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual	70
Gráfico 5.12 -Visualização 2D da trajetória das coordenadas (x,z) do ponto P1 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual	70

Gráfico 5.13 -Trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P2 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual	71
Gráfico 5.14 -Visualização 3D da trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P2 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual	71
Gráfico 5.15 -Visualização 2D da trajetória das coordenadas (x,z) do ponto P2 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual	72
Gráfico 5.16 -Trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P3 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual	72
Gráfico 5.17 -Visualização 3D da trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P3 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual	73
Gráfico 5.18 -Visualização 2D da trajetória das coordenadas (x,z) do ponto P3 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual	73
Gráfico 5.19 -Trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P1 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento habitual	74
Gráfico 5.20 -Visualização 3D da trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P1 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento habitual.....	75
Gráfico 5.21 -Visualização 2D da trajetória das coordenadas (x,z) do ponto P1 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento habitual.....	75
Gráfico 5.22 -Trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P2 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento habitual	76
Gráfico 5.23 -Visualização 3D da trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P2 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento habitual.....	76
Gráfico 5.24 -Visualização 2D da trajetória das coordenadas (x,z) do ponto P2 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento habitual.....	77
Gráfico 5.25 - Trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P3 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento habitual	77
Gráfico 5.26 - Visualização 3D da trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P3 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento habitual.....	78

Gráfico 5.27 - Visualização 2D da trajetória das coordenadas (x,z) do ponto P3 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento habitual	78
Gráfico 5.28 -Trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P1 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual	79
Gráfico 5.29 - Visualização 2D da trajetória das coordenadas (x,z) do ponto P2 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento habitual	80
Gráfico 5.30 -Visualização 2D da trajetória das coordenadas (x,z) do ponto P1 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual	80
Gráfico 5.31 -Trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P2 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual	81
Gráfico 5.32 -Visualização 3D da trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P2 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual	81
Gráfico 5.33 -Visualização 2D da trajetória das coordenadas (x,z) do ponto P2 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual	82
Gráfico 5.34 -Trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P3 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual	82
Gráfico 5.35 -Visualização 3D da trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P3 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual	83
Gráfico 5.36 -Visualização 2D da trajetória das coordenadas (x,z) do ponto P3 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual	83
Gráfico 5.37 -Trajetória dos CIRs em função do tempo com filtragem do paciente sem DTM com o movimento de abertura e fechamento habitual	84
Gráfico 5.38 -Trajetória dos CIRs em função do tempo com filtragem em 2D do paciente sem DTM com o movimento de abertura e fechamento habitual	85
Gráfico 5.39 - Trajetória dos CIRs em função do tempo com filtragem do paciente sem DTM com o movimento de abertura e fechamento com retrusão manual	86

Gráfico 5.40 - Trajetória dos CIRs em função do tempo com filtragem em 2D do paciente sem DTM com o movimento de abertura e fechamento com retrusão manual	86
Gráfico 5.41 - Trajetória dos CIRs em função do tempo com filtragem do paciente com DTM com o movimento de abertura e fechamento habitual	87
Gráfico 5.42 - Trajetória dos CIRs em função do tempo com filtragem em 2D do paciente com DTM com o movimento de abertura e fechamento habitual	88
Gráfico 5.43 - Trajetória dos CIRs em função do tempo com filtragem do paciente com DTM com o movimento de abertura e fechamento com retrusão manual	89
Gráfico 5.44 - Trajetória dos CIRs em função do tempo com filtragem em 2D do paciente com DTM com o movimento de abertura e fechamento com retrusão manual	89

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATM	articulação temporomandibular
CIR	centro instantâneo de rotação
CL	câmera lateral
CF	câmera frontal
DTM	disfunção temporomandibular
<i>I</i>	sistema de coordenadas no arco inferior
<i>LED</i>	<i>Ligh-Emitting Diode</i>
MIC	máxima interduspidação
Mm	milímetro
<i>N</i>	número total de imagens
PPR	prótese parcial removível
S	sistema de coordenadas no arco superior

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
2 REVISÃO DA LITERATURA	22
2.1 MOVIMENTOS MANDIBULARES.	23
2.1.1 Eixo terminal de rotação (eixo de Bisagra).	24
2.1.2 Centro instantâneo de rotação.	27
2.1.3 Movimento transrotacional.	30
2.2 MÉTODOS DE REGISTRO DOS MOVIMENTOS MANDIBULARES	32
3 PROPOSIÇÃO	44
4 MATERIAL E MÉTODOS	45
4.1 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA DESENVOLVIDA	45
4.1.1 Arco cinemático	46
4.1.2 Estrutura para fixação aos dentes	49
4.2 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE IMAGENS	50
4.2.1 Materiais utilizados para aquisição e processamento de imagens	53
4.2.2 Método para a aquisição e processamento de imagem	54
4.2.2.1 Algoritmo de rastreamento dos alvos	56
4.3 ALGORÍTMO DE POSE	57
4.4 CÁLCULO DO CENTRO INSTANTÂNEO DE ROTAÇÃO	61
5 RESULTADOS	64
6 DISCUSSÃO	91
6.1 ELABORAÇÃO DO ARCO CINEMÁTICO	92
6.2 AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE IMAGENS	93
6.3 DISCUSSÃO CLÍNICA SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS	93
7 CONCLUSÕES	101
REFERÊNCIAS	102
APÊNDICES	111

1 INTRODUÇÃO

O estudo da oclusão dentária e sua relação com o funcionamento do sistema estomatognático têm sido alvo de interesse na Odontologia há muitos anos. O funcionamento desse sistema é complexo, pois envolve não somente estruturas dentais, mas também o sistema neuromuscular e as articulações temporomandibulares.

Um diagnóstico precoce das alterações do sistema e a elaboração de um plano de tratamento adequado são fundamentais e evitam, em muitos casos, a lesão irreversível das estruturas afetadas. Entretanto, devido à grande diversidade de sinais e sintomas, o diagnóstico torna-se extremamente difícil, particularmente quando o paciente apresenta dor difusa, não localizada.

Segundo Gillings (1967), muitos pesquisadores tentaram utilizar os movimentos mandibulares como um indicativo diagnóstico de funções mandibulares anormais.

O movimento mandibular resulta de uma série de deslocamentos tridimensionais de rotação e de translação interrelacionadas. É determinada pela atividade combinada e simultânea de três fatores, ou seja, pelo contato dos dentes, pela ação de ambas as articulações temporomandibulares e pela ação neuromuscular.

A excursão da mandíbula com contatos oclusais (contato entre os dentes superiores e inferiores) é uma parte fundamental dos movimentos bordejantes da mandíbula e é usada clinicamente para a avaliação da função mastigatória. O padrão de movimento mastigatório frequentemente coincide com as excursões laterais com contatos oclusais. O estudo dos movimentos condilares também é fundamental, pois uma alteração da trajetória desses movimentos pode estar relacionada a DTMs. Sabe-se que os movimentos da cabeça da mandíbula são resultantes de movimentos rotatórios e translatórios (transrotação).

Kohno e Ishiwara (1971), introduziram o conceito do eixo cinemático ligando os dois côndilos, onde o movimento é minimamente influenciado pelo componente rotacional. Os eixos cinemáticos da mandíbula são usados para a análise da

mecânica mandibular, diagnóstico de cinemáticas mandibulares anormais e avaliação dos movimentos mandibulares pré ou pós tratamentos reabilitadores.

Ingervall et al. (1970) e Agerberg (1974), introduziram a régua milimetrada como ferramenta para medição de movimento que tem sido utilizada universalmente até os dias de hoje, pois permite mensurações de posições extremas (por exemplo, abertura máxima da boca) e facilmente detecta condições de hipomobidade mandibular. Este método que estabeleceu valores normativos para humanos, tem uma precisão razoável (de aproximadamente 1,0 mm) e boa reprodutibilidade entre os examinadores. E o mais importante é que pode ser facilmente utilizado numa clínica. Suas desvantagens são as seguintes: movimentos mandibulares intra-bordejantes ou bordejantes dinâmicos não podem ser registrados e medições menores que 1,0 mm são questionáveis.

Na tentativa de registrar e analisar a dinâmica dos movimentos mandibulares, muitos dispositivos foram elaborados nestes últimos 90 anos. A maioria desses dispositivos se baseia em mecanismos que registram mecanicamente o movimento, porém, frequentemente interferem no fechamento total da boca na posição de máxima intercuspidação dental. Tal interferência impede que o registro do movimento tridimensional da mandíbula reproduza as posições cêntricas, a partir das quais o movimento se inicia.

Vários problemas existentes nos dispositivos mecânicos foram solucionados por dispositivos eletrônicos, entretanto, outras dificuldades foram surgindo, segundo Van Willigen (1979). Sistemas de registro eletrônicos magnéticos e optoeletrônicos apresentaram linearidade extremamente baixa, que produziam sérias distorções dos traçados dos movimentos mandibulares, tornando-os imprecisos acima de 20,0 mm de movimento à partir da posição de intercuspidação. Além disso, era extremamente difícil manter a calibração desses dispositivos, numa sessão de registros, devido à movimentação de uma variedade de sensores.

Mais recentemente, Koyano et al. (1997) desenvolveram um mecanismo com 6 graus de liberdade equipado com *LEDs* (*Light-emmiting diodes*) que pode medir e registrar os movimentos tridimensionais da mandíbula em qualquer posição. Este sistema de medição representou um avanço significativo na precisão de

medição dos movimentos mandibulares. Contudo, o mecanismo empregado, apesar de ter sido implementado em liga leve de alumínio, de modo a reduzir seu peso, apresenta um porte e uma massa considerável, sugerindo que a sua fixação a um paciente, impedirá que o mesmo execute um movimento estomatognático natural, tal qual o que ele faria numa situação normal.

O deslocamento bidimensional de um corpo rígido pode ser descrito pela construção do seu centro de rotação: um centro de rotação pode ser determinado para cada secção dividindo-se o movimento em segmentos. Se o intervalo entre os segmentos for suficientemente pequeno, refere-se ao centro instantâneo de rotação (CIR). Na maioria dos mecanismos articulares, o movimento das articulações, que é um fenômeno tridimensional, é ocasionalmente estudado como um movimento bidimensional a fim de se aproximar a função do movimento. Um dos métodos utilizados para documentar tal movimento bidimensional é a determinação de seus CIRs.

Um estudo sobre o estágio atual das pesquisas sobre o movimento mandibular e oclusão para aplicação clínica foi realizada por Bando et al, em 2009. Nesse trabalho, os autores discutiram sobre o movimento mandibular analisando conceitos como o eixo de bisagra, o eixo cinemático ou centro cinemático e o ponto condilar cinemático. Através de uma metodologia baseada na utilização de rastreadores magnéticos posicionados nos arcos dentários, os autores obtiveram as trajetórias dos arcos dentários e por simulação baseada na teoria de que a mandíbula e os dentes fazem parte de um corpo rígido, obtiveram as trajetórias de todo o corpo da mandíbula. Para todos os movimentos da mandíbula, incluindo os movimentos laterais, os autores descrevem pontos nos quais as trajetórias do movimento mandibular mostram convergência e têm a menor espessura. Esses pontos que foram encontrados na área central de cada cabeça da mandíbula foram chamados de pontos condilares cinemáticos. Nos pontos localizados fora da região dos côndilos, as trajetórias dos movimentos laterais obtiveram uma direção mais medial para a cabeça da mandíbula.

Fica evidenciada desta forma que o estudo dos movimentos mandibulares a partir da análise dos seus centros instantâneos de rotação, encerra uma informação valiosa da função estomatognática. Na mesma medida, o desenvolvimento de um

dispositivo para o registro dos movimentos mandibulares, aplicável clinicamente, trará grande contribuição ao aperfeiçoamento da prática odontológica.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Os tecidos maxilofaciais constituem um complexo conjunto composto de ossos, músculos, dentes, articulações e espaços orgânicos que, coordenado pelo sistema nervoso central, desempenha as funções de deglutição, mastigação, sucção, fonação, respiração e postura da cabeça. Estas funções são descritas isoladamente, mas adquirem alta complexidade quando se integram umas com as outras (Segovia, 1977). A ação conjunta de todas essas estruturas determina o padrão do movimento que a mandíbula executa. Devido a essa complexidade, a aparatologia que rege todo o registro da dinâmica do sistema estomatognático é bastante extensa e variada.

A maioria dos indivíduos não apresenta um ciclo mastigatório simétrico e possui um lado mastigatório preferencial (Gillings et al., 1973). Esse fator pode determinar algum tipo de DTM que deve ser diagnosticada pelos seus sinais e sintomas clínicos. Porém, o padrão de movimento mandibular que um indivíduo deste grupo executa durante a função mastigatória, que não é detalhadamente determinado com precisão devido à inexistência de um método que capture e analise o comportamento cinemático dos elementos que participam dessa função assimétrica.

Na prática odontológica são usadas várias técnicas de registro dos movimentos mandibulares bordejantes ou marginais, que, embora não coincidam com os movimentos funcionais, delimitam a área que os inclui. Normalmente, o registro desses movimentos é feito apenas para ajustar adequadamente um articulador total ou parcialmente ajustável, contudo, vários autores afirmam que também tem um valor diagnóstico significativo (Mongini, 1988).

Procurando descrever os movimentos da mandíbula com base na anatomia, fisiologia e mecânica, a cinesiologia do relacionamento funcional vem, desde os primeiros trabalhos, procurando explicar os movimentos mandibulares em termos simplificados. Porém, a complexidade dos princípios mecânicos e neuromusculares envolvidos desfaz qualquer tentativa de descrição simples destes movimentos (Ash ;Ramfjord, 1996).

Portanto, faz-se importante uma breve revisão da bibliografia existente que se refere aos movimentos mandibulares e aos seus métodos de registro.

2.1 Movimentos mandibulares

Estudando o problema da reprodução dos movimentos mandibulares e seu centro de rotação, Gysi em 1910 concluiu: “Nos maxilares humanos, as condições mais complicadas podem ocorrer; a mandíbula move-se para cima e para baixo, para frente e para trás, para a direita e para a esquerda, apresentando todo tipo de combinações destes três movimentos elementares. Além desses movimentos, uma infinita variedade de modificações pode ocorrer nos indivíduos; consistem em uma maior ou menor inclinação da parede anterior da fossa mandibular, num maior ou menor trespasse dos incisivos, e numa variedade de coordenação muscular, assim sendo, o ponto de rotação de todo o movimento pode se encontrar algumas vezes fora e outras dentro dos côndilos”.

Admitindo também três tipos de movimentos básicos para a mandíbula e suas combinações, McCollum em 1939, acrescentou a característica de reciprocidade dos côndilos. Segundo este autor, o movimento de abertura e fechamento, protrusão e retrusão, é modificado pela forma e inclinação da trajetória condilar e uma rotação combinada para os movimentos laterais. Todos esses movimentos se misturam de várias maneiras e em vários graus, nas duas articulações, para produzir ações peculiares e recíprocas dos côndilos. Estes movimentos articulares são todos resultantes de superfícies que deslizam umas sobre as outras.

Por outro lado, Granger (1954), em seu trabalho comentou que a mandíbula era capaz de executar uma infinita variedade de trajetórias de movimento. Um côndilo podia estar descrevendo apenas movimento de rotação enquanto o outro estava em rotação e deslizamento ou ambos podiam estar descrevendo movimentos deslizantes e rotacionais, simultaneamente. A infinita variedade de trajetórias era a resultante dessas duas simples componentes: rotação do côndilo no menisco e a trajetória do menisco na fossa, quando ele se move com o côndilo, às várias posições, durante a rotação. O movimento rotatório do côndilo deu-se em torno de

um eixo. No movimento vertical esse eixo foi chamado de eixo de bisagra; no movimento horizontal ele foi chamado de centro de rotação. A posição onde esses eixos se encontravam no côndilo seria o centro axial de rotação. A conexão desses dois centros axiais dos côndilos, através de uma linha imaginária, formaria o eixo de bisagra da mandíbula. A trajetória desses eixos terminaria quando a mandíbula atingisse a sua posição mais retrusiva; o fechamento em qualquer outra posição seria acompanhado por rotação mais translação.

Tamaki (1983) descreveu doze movimentos mandibulares diferentes, porém, admitindo como ponto inicial em suas mensurações a posição de repouso. Tais movimentos são:

- movimento para cima e seu retorno;
- movimento para frente e seu retorno;
- movimento para baixo e seu retorno;
- movimento para a esquerda e seu retorno;
- movimento para a direita e seu retorno;
- movimento para trás e seu retorno.

Como se percebe, os movimentos mandibulares estão vinculados ao comportamento das cabeças mandibulares dentro das respectivas fossas e respondem ao estímulo e atividade neuromuscular. Portanto, o estudo da movimentação condilar é essencial para a definição do padrão de movimento da mandíbula normal ou patológica.

2.1.1 Eixo terminal de rotação (eixo de Bisagra)

No fim do século XIX e início do século XX, encontram-se os primeiros trabalhos de Luce (1889), citado por Sonstebo (1971), Gysi (1910) e Bennett (1924), que investigaram a possibilidade de um eixo em torno do qual a mandíbula girasse durante os movimentos de abertura e fechamento da boca.

Os primeiros resultados das investigações indicam que, o movimento de abertura, envolve movimentos compostos ao nível das articulações e, em condições “as mais complicadas” (Gysi, 1910).

Campion (1905), definiu o movimento de abertura e fechamento, como sendo um movimento complexo, que ocorre em torno de dois eixos, um através dos centros das curvas das superfícies articulares dos côndilos e outro através dos centros das curvas das duas eminências articulares. Referiu-se ainda, ao eixo de abertura e fechamento da mandíbula observando que a única parte do movimento de abertura que um articulador teve condições de reproduzir, foi o estágio inicial, o qual, como pôde ser visto nos traçados, foi uma simples rotação de um eixo passando através dos côndilos.

Admitindo a possibilidade, de uma posição condilar onde haveria rotação em torno de um eixo intercondilar, fixo nas cabeças mandibulares, McCollum (1939) denominou a posição de bisagra, ou bisagra terminal ou eixo terminal de rotação. O movimento de abertura e fechamento, cujo centro designou de eixo de bisagra, era afetado pelo deslizamento de duas superfícies sinoviais, a cabeça arredondada do côndilo e a superfície inferior do menisco.

Esse conceito gerou uma opinião entre os pesquisadores sobre a capacidade de reprodução de movimentos puros dentro dos limites da amplitude dos movimentos mandibulares. Assim, Posselt (1952) conseguiu reproduzir gráficos desses movimentos bordejantes, ou movimentos de borda da mandíbula. Esse autor separou os tipos de gráficos, em gráfico de movimento bordejante e gráfico de movimento habitual ressaltando que a posição de bisagra posterior não é, em suas fases iniciais, coincidente com a posição das cabeças mandibulares durante o movimento de abertura habitual.

Complementando este pensamento, Beyron (1954), verificou que o movimento habitual da mandíbula, durante a mastigação, deglutição e fala, era geralmente, um movimento não bordejante, porém, ocorria dentro das trajetórias desses movimentos. A abertura e fechamento habituais apresentavam uma variedade de trajetórias em um mesmo indivíduo. Os movimentos de translação apareciam naturalmente, quando observava o caráter dos movimentos de abertura e fechamento. A posição de repouso permanecia na porção distal superior da trajetória, porém não era uma posição bordejante. Por essa razão, o fechamento a partir da posição de repouso era um movimento habitual e estava sujeito às várias modificações individuais.

Admitindo uma indefinição quanto à ocorrência do movimento mandibular em torno do eixo de bisagra durante a função, Frank (1956), afirmou que durante

pequenas aberturas, a mandíbula apresentava um movimento de alavanca com um suposto eixo centrado no côndilo, o qual permanecia na fossa mandibular, porém, quando de grandes aberturas, o suposto eixo estaria situado próximo ao forame dental. O autor separou a existência de um eixo de rotação para o côndilo e um eixo de abertura para a mandíbula, concluindo que o eixo de abertura da mandíbula localizava-se na região do forame da mandibular.

Weinberg (1959), determinou um limite de 35,0 mm de abertura mandibular interincisal onde ocorria um movimento em torno de um eixo transversal de bisagra, localizado na ou próximo aos côndilos. Referiu-se, ainda, ao fato de que as curvas anatômicas das superfícies dos côndilos não controlavam os movimentos mandibulares. No mesmo ano, porém, Brekke afirmou que movimentos mandibulares precisos poderiam ser orientados a partir do eixo de bisagra de forma que era comum os côndilos mandibulares rotacionarem durante uma abertura mandibular entre 20,0 a 30,0 mm sem translação.

Relacionando o movimento funcional da mandíbula com uma posição reprodutível dos côndilos dentro da cavidade articular, Zola e Rothschild (1961), afirmaram não haver relação entre a posição de repouso e a de bisagra. Verificaram ainda, que na maioria dos casos, obtinha-se o eixo de bisagra, apenas com a retrusão manual da mandíbula.

No trabalho de Helluy (1962), o autor afirmou que o centro de rotação da trajetória de abertura, apenas excepcionalmente coincidia com o eixo intercondilar.

Apesar de as evidências demonstrarem que ocorre tanto o movimento de rotação quanto o de translação durante a função mandibular, muitos autores ainda concebem que o movimento de abertura da mandíbula possui um eixo fixo com um centro rotacional no centro do côndilo no início do movimento (Lindauer et al., 1995).

Um estudo sobre o estágio atual das pesquisas sobre o movimento mandibular e oclusão para aplicação clínica foi realizado por Bando et al. (2009). Nesse trabalho, os autores discorreram sobre o movimento mandibular analisando conceitos como o eixo de bisagra, o eixo cinemático ou centro cinemático e o ponto condilar cinemático. Para todos os movimentos da mandíbula, incluindo os movimentos laterais, os autores descrevem pontos nos quais as trajetórias do movimento mandibular mostram convergência e têm a menor espessura. Esses pontos que foram encontrados na área central de cada cabeça dos côndilos foram chamados de pontos condilares cinemáticos.

A idéia de um eixo de rotação na mandíbula no côndilo data de antes de 1900, no entanto até esses trabalhos sugerem que a abertura funcional da mandíbula é um movimento mais complexo. Fica claro, portanto, que este conceito não é consensual, principalmente, quando se observa o movimento mandibular como um todo e não apenas a análise do comportamento condilar.

2.1.2 Centro instantâneo de rotação

Estudando os movimentos mandibulares em relação à cinemática das articulações temporomandibulares, Bennett (1924), apresentou um trabalho contrariando o conceito de rotação pura dos côndilos no início do movimento de abertura da mandíbula. A articulação temporomandibular, segundo o autor, diferia de todas as articulações do corpo, na liberdade de movimentos permissíveis e característicos da mandíbula. Rotações, em torno de um eixo transversal, ocorriam entre o côndilo e o menisco, e os movimentos de translação aconteciam entre o menisco e o osso temporal. Já era bem conhecido, de há muitos anos, que nos movimentos habituais de abertura e fechamento da boca, uma vez que o côndilo movia-se para frente e para baixo, não havia centro de rotação localizado na articulação propriamente dita. Foram feitas tentativas para a localização de um centro, que estaria abaixo ou a frente do côndilo, porém essas tentativas foram em vão, porque o centro era uma quimera. Os movimentos da mandíbula no plano sagital (o que equivale dizer, sem movimentos laterais), eram compostos de rotação em torno da linha bicondilar e, translações na direção da trajetória condilar. A rotação resultante ocorria em torno de um centro instantâneo em constante deslizamento.

Posselt, em 1952, examinou os movimentos bordejantes da mandíbula e concluiu que é possível realizar o movimento em torno de um eixo fixo localizado no côndilo por aproximadamente 20,0 mm de abertura. Para que isso ocorra, no entanto, a mandíbula deveria ser passivamente mantida na posição mais retruída durante o movimento. Ele acreditava que as pessoas podem realizar esse movimento, apesar de não ser habitual ou fisiológico. Esse ponto de vista foi compartilhado por outros como Nevaraki (1956) e Shanahan e Leff (1962a), porém

muitos outros autores subsequentes referem a presença de um eixo fixo localizado no centro da cabeça da mandíbula (Brekke, 1969; Brotman, 1960; Getz et al., 1988; Wood; Korne, 1992).

Assumindo uma constante movimentação do eixo de bisagra durante a mastigação, Granger, em 1954, mencionou em seu trabalho que em relações normais, as ações de rotação e deslizamento, sempre ocorriam simultaneamente, numa grande variedade de combinações.

A existência de um eixo fixo e definido nos côndilos durante a abertura e fechamento da mandíbula também foi questionada por Oursland e Carlson (1958). Estes autores, no final de seu estudo, concluíram que tal conceito permanece sendo uma das mais antigas controvérsias na literatura odontológica.

Embora os CIRs do movimento de abertura e fechamento da mandíbula tenham sido identificados há muitos anos, eles não têm sido aplicados na prática odontológica. Ao invés disso, os protesistas tendem a favorecer o conceito de um eixo fixo para tentar simular o início da abertura e final do fechamento da mandíbula em articulador. (Bennett, 1958).

CIRs representam uma ferramenta sensível para detectar uma falta de coordenação entre os movimentos de rotação e translação do côndilo mandibular. Se um corpo rígido rotaciona, existe um centro de rotação em torno do qual os pontos desse corpo descrevem trajetórias equivalentes dependendo da sua localização. Se esse corpo translada, o centro de rotação encontra-se no infinito ou próximo dele, podendo-se dizer que ele não existe ou não pode ser calculado. Se esse corpo se movimenta rotacionando e sofrendo deslocamentos no espaço, existem centros instantâneos que também vão se deslocando descrevendo uma trajetória em função do deslocamento e do tempo (velocidade).

Uma série de trabalhos sucessivos sobre movimentos mandibulares foi apresentada por Shanahan e Leff (1962a). Neste ano, os autores compararam os ciclos mastigatórios em pacientes com a manipulação em eixo de bisagra no articulador em abertura e fechamento e concluíram que os movimentos não eram coincidentes. Em outro trabalho (Shanahan e Leff, 1962b), os autores citam que o estudo das trajetórias do movimento mandibular, de abertura, fechamento e mastigação, não indicava a presença de eixo mandibular na região dos côndilos. Não foram evidenciadas rotações, em torno de um eixo mandibular, na região dos côndilos, concomitantemente e translações para diante. Este ciclo de pensamento

destes autores em 1962 culminou com a afirmação de que o eixo mandibular era um mito porque ele não existia durante o movimento habitual de abertura e fechamento (Shanahan e Leff, 1962c). Um eixo artificial poderia ser criado, forçando os côndilos à sua posição mais retrusiva.

Considerando “três centros, de rotação, para cada côndilo, localizados no próprio côndilo”, DePietro (1963) relatou que no movimento de abertura, surgiam os “centros instantâneos de rotação”. O ponto inferior de inserção do ligamento temporomandibular, no bordo posterior do ramo, se convertia no apoio ou centro de rotação. A cabeça da mandíbula sofria translação ao redor deste ponto de apoio, movendo-se para frente e para baixo.

Shanahan e Leff (1965) afirmaram que uma discussão a respeito de um eixo instantâneo era necessária para estabelecer um melhor entendimento dos princípios básicos de cinemática. Com referência à mandíbula, verificaram que muitos estudos concluíam que se os côndilos moviam-se para frente e para baixo, este movimento era evidente na região dos incisivos. Se o côndilo rotacionasse em torno de um eixo, este deveria apresentar deslocamento zero e uma linha em direção perpendicular ao movimento produzido na região incisal deveria passar através do côndilo. Concluíram que o centro instantâneo de rotação não necessitava estar estacionário na mandíbula propriamente dita; em cinemática, uma vez que qualquer ponto se localiza no mesmo plano de um corpo rígido original, é considerado parte desse corpo.

Com o mesmo pensamento, Trapozzano e Lazzari (1967), num outro trabalho, concluíram que a presença de múltiplos eixos de bisagra foi estabelecida e que o conceito de que existia um único eixo de bisagra era tendencioso.

Kohn e Ishiwara (1971) realizaram em seu estudo uma análise do movimento do côndilo da mandíbula no plano sagital. Múltiplos eixos de rotação foram encontrados nos pacientes devido à influência da variação do movimento bordejante posterior e esses eixos estavam fora do côndilo em 20% dos casos.

Um estudo biomecânico realizado por Baragar e Osborn (1984) apresentou um modelo de simulação tridimensional computadorizado do sistema mastigatório e concluiu que a mandíbula deveria rotacionar em torno de um ponto 50,0 mm inferior e 25,0 mm posterior ao centro do côndilo no início da abertura. Durante grandes movimentos de abertura, o centro foi encontrado para uma posição anterior e

superior em uma linha terminando cerca de 10,0 mm à frete da posição do centro do côndilo

Torii (1989) analisou 3 tipos de movimentos de fechamento: a) guiando retrusivamente a mandíbula; b) fechamento mais retrusivo guiado pelo próprio paciente; c) fechamento habitual. Ele concluiu que em fechamento mandibular guiado na região do mento retrusivamente, não houve centro de rotação constante, que no fechamento mais retruído guiado pelo próprio paciente o centro de rotação foi constante e no fechamento habitual o centro de rotação mandibular não foi constante de forma que a mandíbula fecha perpendicularmente em relação ao plano oclusal. Dessa forma, o autor discute ainda, que o articulador não deve ter somente a habilidade de executar o movimento de dobradiça, mas também deve ter um mecanismo de reproduzir movimentos verticais da mandíbula.

Lindauer et al. (1995) examinaram em seu estudo o movimento condilar e os centros de rotação mandibular durante a abertura mandibular em pacientes não disfuncionados. O CIR nos primeiros 3,0 mm de abertura mandibular estava 2,2 cm posterior e 2,3 cm inferior ao centro da cabeça da mandíbula. Porém não houve um padrão na localização dos CIRs nas subseqüentes aberturas. Os autores concluíram que os seus achados dão suporte à teoria da constante movimentação dos CIRs da mandíbula.

Hayasaki et al. (2008), estudaram os centros instantâneos de rotação e a posição do centro de excursão lateral durante o movimento de lateralidade da mandíbula. Concluíram que o centro de excursão lateral está localizado aproximadamente 20,0 mm posterior à posição original do côndilo do lado de trabalho.

2.1.3 Movimento transrotacional

A combinação simultânea de movimentos de rotação condilar dentro do compartimento inferior da articulação temporomandibular e o movimento de translação do compartimento superior gerou o conceito de movimento transrotacional da mandíbula, que é defendido por diversos autores.

Segundo Page (1951), a posição de descanso fisiológico surge quando os ligamentos temporomandibulares estão livres de tensão. Isto refuta a teoria de que o movimento da posição fisiológica de repouso até o fechamento seja um movimento puro de bisagra. Portanto, o autor afirmou que se tratava de um movimento de translação.

Um estudo realizado por Sheppard et al. (1965), afirmou que: “uma restrição dos movimentos mandibulares, durante a abertura, particularmente rotação condilar no interior da fossa, foi observada somente em associação a uma problemática articular”, ou seja, a rotação pura do côndilo dentro da fossa mandibular acontecia associada a patologias da articulação. No mesmo sentido, Nemoto (1969), verificaram que o movimento de bisagra era impossível na maioria dos casos e, geralmente, o traçado do movimento de bisagra não coincidia com o movimento bordejante posterior em pacientes sem disfunção articular .

Em seu trabalho, Tamaki (1971), analisando os movimentos de borda contactantes e não contactantes, citou que por muitos anos pensou-se que o côndilo, durante a primeira fase do movimento de abertura e fechamento da boca, executasse apenas o movimento de rotação sobre o seu longo eixo. Porém, Alexander (1952), Hickey et al. (1963), Tamaki (1971), demonstraram que ao invés do movimento de rotação ocorria o de transrotação. O deslocamento do côndilo, encontrado por Hickey et al. (1963) e Tamaki (1971), foi da ordem de 0,4 e 1 mm, respectivamente. Tamaki (1971) se referiu à importância do eixo terminal de rotação dos côndilos para a reprodução da posição de bisagra em articuladores, apesar de não considerá-la como uma posição funcional durante a mastigação.

Estudando o eixo terminal de rotação em pacientes desdentados, Milluzi (1977) encontrou-o na região do masseter. Como o eixo terminal de rotação encontrou-se fora da região dos côndilos mandibulares, estes por sua vez, descreveram um movimento transrotatório dentro da fossa mandibular.

Disfunções clínicas das ATMs de humanos, frequentemente ocorrem pela incoordenação entre os movimentos de translação entre o disco articular e a cabeça da mandíbula. O componente rotacional do movimento normal é muito menos significativo como causa desses problemas (Farrar, 1978).

Segundo Smith (1985), durante os movimentos funcionais da mandíbula em humanos, os côndilos rotacionam e transladam em relação à cavidade mandibular do osso temporal. Embora o movimento de rotação pura bordejante posterior seja

possível, provavelmente todos os movimentos funcionais, incluindo entre a posição de máxima intercuspidação e a posição de repouso, consistem tanto de rotação condilar e translação anteroposterior.

Centro cinemático da articulação temporomandibular é definido como sendo o ponto de referência condilar que se movimenta segundo a trajetória seguindo o contorno da eminência articular da articulação temporomandibular durante o movimento de abertura da mandíbula, segundo Yatabe et al. (1995).

Gallo et al. (2008) verificaram em seu estudo se o centro cinemático encontra-se em um ponto anatômico peculiar e se sua trajetória reflete a distância intrarticular. Concluíram que embora os traçados do centro cinemático da ATM reflita a alguma extensão de variação no espaço articular, eles não estão relacionados com a anatomia da articulação, desde que eles não representam nem o movimento de todo o côndilo nem dos pontos superficiais.

2.2 Métodos de registro dos movimentos mandibulares

A partir da segunda metade do século XIX com a apresentação do articulador anatômico de Bonwill, os métodos de registro dos movimentos mandibulares começaram a se desenvolver. Isto se deve ao fato de que este autor descobriu em um de seus estudos, que a mandíbula executava um movimento horizontal pósterio-anterior. A busca de se conseguir adaptar os articuladores à reprodução correta das posições e movimentos mandibulares, principalmente no tratamento de pacientes que utilizariam próteses totais foi intensa, segundo Sonstebo (1971).

No fim do século XIX encontram-se os primeiros trabalhos utilizando fotografias, para o estudo dos movimentos mandibulares.

Luce (1889) desenvolveu uma estrutura composta por uma arco extra-oral que era fixado aos dentes inferiores. A esse arco fixou pontos brilhantes nas regiões do côndilo, ângulo da mandíbula e sínfise mentoniana. Durante o movimento de abertura e fechamento da mandíbula foram realizadas fotografias segundo o plano sagital, obtendo o perfil do paciente. Os pontos brilhantes sensibilizaram a chapa fotográfica, fornecendo traçados contínuos correspondentes às trajetórias dos

pontos de referência. A interpretação dos traçados foi feita com régua milimetrada e associação entre os três traçados. O autor concluiu que assim que se iniciava o movimento de abertura, o côndilo se deslocava para a frente, realizando consideráveis excursões mesmo em pequenas aberturas. O côndilo se deslocava para a frente mesmo que um esforço fosse feito para impedir esse deslocamento.

A partir de 1910, com o trabalho de Gysi, a utilização do pantógrafo para a descrição do movimento mandibular foi intensa. Tal instrumento apresentava como vantagem a obtenção gráfica do movimento supostamente do côndilo não mais de forma manual e sim pelo próprio paciente através de um arco facial. Este instrumento consistia de dois lápis marcadores fixados às extremidades de um arco facial que por sua vez, era solidário ao movimento mandibular pois mantinha-se preso à arcada inferior por um plano de cera em base de prova. O desenvolvimento deste pantógrafo foi realizado a partir de estudos para a reabilitação oral em próteses totais. Segundo o autor, esses lápis marcadores podiam ser ajustados em todos os casos, localizando-os na região dos côndilos. A marcação da trajetória era realizada sobre um papel que era posicionado manualmente na face do paciente.

Também obtendo gráficos dos movimentos mandibulares, Posselt, em 1952, pesquisou o movimento bordejante e intra-bordejante da mandíbula. Utilizando-se de um dispositivo, fixado aos dentes inferiores, obteve inscrições das trajetórias desses movimentos ao nível dos incisivos centrais. Relacionou seus estudos com os movimentos limítrofes (bordejantes) tanto no plano horizontal, como no plano sagital. O autor interpretou o movimento da mandíbula como um todo, desvinculando-o da preocupação existente com o comportamento dos côndilos, pois a preocupação maior era o estudo do movimento mandibular propriamente dito e não mais o conhecimento das posições para o desenvolvimento de articuladores.

Por um sistema ótico, Bennett em 1958, projetou imagens sobre uma folha de papel de duas pequenas lâmpadas que foram fixadas a um dispositivo extra-oral solidário à mandíbula, sendo uma delas posicionada na região do côndilo e outra na região do “sulco do lábio inferior”. Manualmente, o autor marcou a trajetória do movimento. Através de uma análise geométrica que se baseou em triângulos e polígonos formados pelas diversas posições dos pontos, verificou que, durante o movimento de abertura, a mandíbula era capaz de executar movimentos de rotação e translação e que esses movimentos se apresentavam usualmente combinados. O centro de rotação em torno do qual a mandíbula gira, tinha uma posição em cada

instante, não apenas diferente da posição condilar propriamente dita, mas ainda capaz de considerável variação, dependendo da natureza do movimento. Em relação ao eixo de bisagra, o autor foi categórico: a possibilidade da existência de um centro fixo de rotação, para qualquer indivíduo, seria impossível, a não ser que seu côndilo nunca saísse da posição onde se encontrava durante a oclusão, quando esse centro estaria no próprio côndilo, ou ainda, se as trajetórias do côndilo e da sínfise fossem arcos de círculos concêntricos, isto envolveria uma configuração anatômica muito anormal.

Utilizando metodologia por fotografias, Ulrich, em 1959, concluiu que, imediatamente após a abertura da boca, os côndilos iniciavam seu movimento pra diante e apenas um eixo móvel poderia ser responsável pelo movimento de abertura. Uma variabilidade dos traçados observados em um mesmo indivíduo em repetidas fotografias, levou o autor à conclusão de que os traçados dos movimentos de abertura e fechamento, de um mesmo indivíduo, não coincidiam. Com esse método, ele confirmou que durante o movimento de abertura da boca, os côndilos não permaneciam estacionários.

Contrariando as análises apresentadas anteriormente que utilizavam o método fotográfico, os traçados gráficos do pantógrafo e do gnatógrafo levavam os autores a defender a existência do eixo terminal de rotação próximo ou localizado no côndilo. À partir da década de 40 do século XX, muitos foram os estudos das posições condilares durante o movimento mandibular realizados através de radiografias laterais (Alexander, 1952; Posselt, 1956; Nevaraki, 1956; Sheppard, 1956; Barnett, 1963; LePera, 1964; L'Estrange, 1969). Basicamente, este método era realizado através de radiografias laterais da mandíbula com ênfase na região dos côndilos mandibulares. As tomadas radiográficas eram realizadas com a mandíbula posicionada de acordo com a metodologia de cada autor. Após a obtenção da imagem radiográfica, o contorno dos côndilos e a sua posição em relação a estruturas anatômicas como a cortical do teto da fossa mandibular e a parede posterior da eminência articular eram desenhados manualmente em papel. A análise desses traçados era feita por comparação entre si e determinavam a conclusão de cada autor.

Todavia, Frank (1950) advertia que um exame radiográfico completo das posições condilares, deveria ser feito com os dentes nas posições limítrofes, tanto no lado de trabalho, quanto no lado de balanceio, na retrusão e protrusão máxima,

além das posições de abertura e fechamento. De suas investigações concluiu que a influência dos côndilos era superestimada e dos músculos, subestimada. Ainda, referindo-se ao papel desempenhado pelos músculos, expressou a seguinte opinião: “É possível que quando uma intercuspidação e dimensão vertical corretas, a oclusão seja controlada pelos músculos e os côndilos representam apenas um eixo de pivotamento flutuante da mandíbula, para qualquer altura ou posição ditada pelos músculos”.

Observando que normalmente o estudo dos movimentos mandibulares eram realizados à partir de relações maxilomandibulares estáticas, Page (1951) comentou, entretanto, que o movimento era cinemático. Contudo, nenhum instrumento dinâmico para a avaliação do movimento mandibular seria confiável se as posições estáticas não fossem calibradas corretamente.

Com base na metodologia com radiografias, Alexander (1952) estudou os movimentos dos côndilos da posição de repouso até a máxima oclusão. Na análise dos resultados, encontrou grande dificuldade na correta interpretação das radiografias. Verificou que os casos que apresentavam movimento rotacional, podiam indicar que o eixo estava localizado na (ou próximo à) porção superior do côndilo. Da mesma forma, os casos que mostraram movimento de translação, podiam indicar que o eixo de rotação estava localizado sobre o côndilo, ou mais abaixo. Entretanto, o autor declarou que radiograficamente, as evidências da proximidade da superfície ântero-superior do côndilo a toda superfície da fossa mandibular ou à eminência articular não foi suficiente para propiciar qualquer conclusão.

Apresentando um trabalho sobre cinemática mandibular, Hickey (1963), registraram o comportamento dos côndilos por meio de um pino metálico posicionado na região dos mesmos. Na porção externa desses pinos, foram fixados pontos de referência para o estudo do movimento. Porém, Cohn (1963), critica o trabalho de Hickey (1963), quanto ao método empregado, alegando que a fixação da cabeça poderia influenciar os resultados, pois, durante a abertura e fechamento da mandíbula ocorreria a integração com a musculatura cervical. Dessa forma, a fixação da cabeça poderia alterar a movimentação livre da mandíbula.

Um equipamento eletrônico foi utilizado, em 1971, por Gibbs, que verificaram que ambos os côndilos iniciavam a abertura com um movimento imediato para a frente e para baixo, e que as trajetórias dos movimentos dos côndilos, eram muito

semelhantes para pacientes com oclusão normal ou má oclusão. Os instrumentos desse sistema eram desenhados para não interferir na função mastigatória pois permitiam os contatos dentais sem interferência e o fechamento total dos lábios do paciente. Esse equipamento era constituído de duas estruturas metálicas fundidas, cimentadas na face vestibular dos dentes anteriores e possuíam uma extensão extra-oral, como um arco facial. Nestes arcos faciais, um superior e outro inferior, eram montados seis transdutores, que ligados a um gravador, enviavam sinais pulsáteis de velocidade, que eram analisados por um computador. A fita gravada era capaz de reproduzir o movimento mandibular através de um mecanismo reprodutor desenvolvido com os modelos em gesso do paciente articulados com um décimo da velocidade real. Os autores obtiveram gráficos do movimento mandibular na região dos incisivos centrais inferiores e, através de uma análise das coordenadas espaciais dos pontos, o computador era capaz de calcular diversos parâmetros, inclusive dos centros instantâneos de rotação da mandíbula. Porém esse cálculo não foi realizado neste estudo.

Apesar da introdução da eletrônica na mensuração dos movimentos mandibulares, em 1973, Cerveira Netto apresentou uma tese de doutoramento estudando a localização dos eixos instantâneos de rotação da mandíbula durante os movimentos de abertura e fechamento da boca através do método fotográfico. O autor utilizou uma câmera fotográfica com velocidade de exposição lenta e filme para diapositivos coloridos. A obtenção de diapositivos permitiu a projeção dos traçados em papel milimetrado para o cálculo de seus resultados. Dentre as conclusões o autor afirmou que em geral, os eixos instantâneos de rotação da mandíbula foram localizados nas adjacências do ângulo e ramo ascendente da mandíbula. Porém, as posições ocupadas pelos eixos instantâneos de rotação da mandíbula, durante os seus movimentos de abertura e ou fechamento, num mesmo paciente, não foram constantes.

Kohno e Ishiwara (1971) realizaram em seu estudo uma análise do movimento do côndilo da mandíbula no plano sagital por meio também de imagens obtidas por fotografias de pontos de referência localizados à frente dos incisivos inferiores. A imagem foi gerada em filme com a velocidade de diafragma da câmera em 6 ciclos por segundo, mostrando assim, a trajetória dos pontos durante os movimentos bordejantes da mandíbula ou seja: desde a posição de máxima intercuspidação, ao contato interincisal, à protrusão máxima, à posição de abertura

máxima, à posição de contato em retrusão e muitas outras posições na trajetória no movimento limítrofe posterior. Através da análise compilada dessas trajetórias que se assemelhavam aos traçados encontrados por Posselt (1952), um computador eletrônico (NEAC 2101) calculou a trajetória de 120 pontos próximos ao côndilo. Tais pontos foram localizados em uma laminografia cefalométrica que foi obtida por um planígrafo. Os autores encontraram um ponto específico dentro do côndilo pelo qual o percurso durante os movimentos bordejantes da mandíbula foi o mais estreito de todos, com um gráfico com formato próximo ao contorno da eminência articular. Consideraram que todos os movimentos mandibulares no plano sagital se realizam pela rotação do côndilo em torno do eixo conectando esses dois pontos específicos (um de cada lado) e pela translação desse eixo pela trajetória desses pontos, ou seja, a mais estreita delas. Eles chamaram esse eixo de “Eixo Cinemático” que é o centro do movimento no plano sagital. Ressaltam ainda a diferença do eixo cinemático do eixo de rotação. Como foi descrito, múltiplos eixos de rotação foram encontrados nos pacientes devido à influência da variação do movimento bordejante posterior e esses eixos estavam fora do côndilo em 20% dos casos. Os eixos cinemáticos se localizaram anterosuperiormente aos eixos de rotação com uma distância média de 4,9 mm entre eles.

Estudando o eixo terminal de rotação em pacientes desdentados, Miluzzi (1977) utilizou um arco facial cinemático “T.T.”. Esse arco facial cinemático é composto de dois arcos: superior e inferior que foram fixados a planos de orientação posicionados intra-bucalmente. Na barras laterais do arco superior, existem duas “bandeiras” metálicas, uma de cada lado, que foram posicionadas na região da articulação temporomandibular dos pacientes. Na barras laterais do arco inferior, existem duas puas que inicialmente foram posicionadas na região das “bandeiras” para a verificação do eixo terminal de rotação. Durante os movimentos de abertura e fechamento da mandíbula, sabe-se que a pua quando está sobre o eixo terminal de rotação descreve um movimento de rotação e encontrando-se fora desse local, descreve um movimento transrotatório. Assim, enquanto o paciente executava os movimentos mandibulares de abertura e fechamento de pequena amplitude, não ultrapassando dois centímetros de afastamento na região dos incisivos, a pua foi sendo movimentada por tentativa e erro até se localizar o eixo terminal de rotação, que marcado a lápis diretamente no rosto do paciente, de ambos os lados. Através de uma régua, a posição do centro terminal de rotação de 25 pacientes encontrou-se

em média estatística, precisamente abaixo e adiante do ponto condilar ao nível do músculo masseter.

Segundo Nakamura et al. (1988), um dos métodos mais comumente utilizado para o registro dos movimentos mandibulares, é o sistema de rastreamento magnético, onde um pequeno magneto é acoplado aos incisivos inferiores e sua posição pode ser rastreada por uma antena de efeito Hall posicionada sobre a cabeça do paciente. As coordenadas em três dimensões (X,Y,Z) do magneto podem ser registradas num computador a velocidades de 500 quadros por segundo. O registro se limita a um único ponto e as informações sobre outros dentes ou da ATM são perdidas.

Através de várias montagens em articulador Dentatus ARL (Dentatus, Almore International, Inc, Portland, Ore.) e registros interoclusais em cera de diferentes aberturas, Torii (1989) analisou os movimentos de fechamento mandibular guiando retrusivamente a mandíbula, fechamento mais retrusivo guiado pelo próprio paciente e fechamento habitual. Através de pontos de referência localizados na porção anterior e lateral da maxila e mandíbula. A trajetória desses pontos foi reproduzida graficamente para um eixo de coordenadas cartesiano bidimensional e foram localizados assim os centros de rotação mandibular. Ele concluiu que em fechamento mandibular guiado na região do mento retrusivamente, não houve centro de rotação constante, que no fechamento mais retruído guiado pelo próprio paciente o centro de rotação foi constante e no fechamento habitual o centro de rotação mandibular não foi constante de forma que a mandíbula fecha perpendicularmente em relação ao plano oclusal. Dessa forma, o autor discute ainda que o articulador não deve ter somente a habilidade de executar o movimento de dobradiça, mas também deve ter um mecanismo de reproduzir movimentos verticais da mandíbula.

Jemt e Hedegard (1982), Peyron et al. (1997), Hayasaki et al. (1998), Ogawa et al. (1998), utilizaram o sistema intra-oral de diodos com emissão de luz (Light-emitting diodes, LEDs) que fornecia com clareza, registros reprodutíveis de movimentos mastigatórios com pouca ou nenhuma interferência de tecidos orais.

Atualmente, o método para registrar movimentos mandibulares mais comumente utilizado é o sistema optoeletrônico. Karlsson et al.(1991) obtiveram o registro de velocidade e dimensões dos movimentos mandibulares através de um dispositivo optoeletrônico. O dispositivo consistia de três unidades básicas: 3 a 5

LEDs com uma unidade controle, 2 câmeras detectoras de movimentos e um computador com interface de imagens. Os LEDs eram conectados aos dentes em posições diferentes, emitindo pulsos de luz infravermelho controlados, que eram captados pelas câmeras e interpretados pelo computador como coordenadas espaciais. Dez pacientes mulheres e 6 homens foram instruídos a treinar o movimento de mastigação para que fosse o mais natural possível, pois a presença dos dispositivos e a artificialidade do experimento poderiam, de alguma forma induzir o movimento não natural.

Nattestad e Vedtofte (1992), sugeriram um método para localizar o centro de rotação mandibular por análise computadorizada de dois cefalogramas laterais com diferentes graus de abertura de boca. Eles concluíram que a utilização do centro do côndilo como sendo o centro de rotação mandibular no planejamento do movimento do maxilar superior com a osteotomia de *Le Fort I* pode causar um erro considerável na posição horizontal da maxila na maioria dos casos.

Em seu estudo, Lindauer et al. (1995), analisou o movimento condilar e os centros de rotação mandibular durante a abertura mandibular em pacientes não disfuncionados através de um sistema ultrasônico (*Dolphin Sonic Digitizing System-DigiGraph*). O método consistia no posicionamento de uma sonda digitalizadora do *DigiGraph* na face vestibular do incisivo central e do primeiro molar direitos que emitiam sinais sonoros para os microfones do sistema. A localização dessas sondas foi obtida em diferentes aberturas guiadas por blocos de acrílico de 3,0, 6,0, 10,0, 15,0, 20,0 e 25,0 mm. Os dados obtidos foram visualizados em uma imagem lateral do paciente. Cada grupo de dados foi processado matematicamente através de um programa criado especificamente para esse estudo para o cálculo do centro instantâneo de rotação da mandíbula. Os autores relatam que em todos os pacientes o côndilo sofreu rotação e translação durante todo o movimento de abertura da mandíbula desde o primeiro aumento de 3,0 mm até o aumento de 25,0 mm de dimensão vertical de oclusão. Metade dos pacientes examinados exibiu um movimento para baixo e para frente do côndilo durante os primeiros 3,0 mm de abertura. Em dois pacientes, o movimento inicial foi para baixo e ligeiramente para trás e em outro dois para cima e para frente. Após o posicionamento dos outros blocos, todos os côndilos se movimentaram para baixo e para frente. O CIR nos primeiros 3,0 mm de abertura mandibular estava 2,2 cm posterior e 2,3 cm inferior

ao centro da cabeça da mandíbula. Porém não houve um padrão na localização dos CIRs nas subsequentes aberturas.

Com a finalidade de reduzir a estrutura necessária para a utilização do método optoeletrônico com LEDs, Heimansohn (1980) apresentou um dispositivo eletrônico que possibilita registrar os movimentos mandibulares através de um sensor que era usado como um transdutor optoeletrônico.

Zhang et al. (1995), utilizaram uma metodologia optoeletrônica (JAWS-3D) para medir a cinemática tridimensional dos côndilos mandibulares. O sistema de análise de movimento optoeletrônico *JAWS-3D* era constituído de um arranjo de três câmeras ortogonalmente orientadas e unidirecionais, uma unidade de controle, uma fonte de alimentação para os *LEDs* e uma interface para um microprocessador. Os autores mediram: o deslocamento linear, o deslocamento angular e a velocidade angular dos pontos através do deslocamento dos *LEDs* e de qualquer ponto dentro e fora do campo visual das câmeras.

Buschang et al. (2000) obtiveram registros através de um sistema de registro computadorizado optoeletrônico. Os ciclos mastigatórios foram registrados por 5-10 minutos ao mascar um chiclete somente do lado direito. Um programa Optotrack foi utilizado para remover qualquer movimento de cabeça e computar os movimentos tridimensionais do incisivo inferior ao plano horizontal de Frankfort.

Da mesma forma, Travers et al. (2000) estudaram uma amostra de 27 mulheres entre 23 e 25 anos, com função temporomandibular normal, oclusão e padrões esqueléticos normais. Utilizando-se de um sistema computadorizado optoeletrônico, os movimentos condilares e dos incisivos inferiores foram registrados em três dimensões por 20 segundos enquanto que cada participante desenvolvia múltiplos ciclos de abertura máxima.

Para simplificar a aparatologia utilizada, Kinuta et al. (2003), desenvolveram uma metodologia que utilizou uma câmera filmadora digital doméstica e um *software* para a captura do movimento e transformados em dados tridimensionais. Marcadores para a detecção do movimento mandibular foram fixados aos incisivos inferiores do paciente. Um espelho foi posicionado ao lado da face do paciente para a detecção do movimento anteroposterior. Os movimentos dos marcadores foram analisados pelo *software* de captura de movimento e transformados em dados tridimensionais. Os resultados foram comparados aos do sistema convencional

utilizando um sirognatógrafo que gerou gráficos semelhantes ao do sistema proposto tanto no plano frontal quanto no plano sagital.

Por meio de um axiógrafo eletrônico CADIAX®, Khonsari et al. (2003) calcularam a trajetória dos CIRs da mandíbula para a articulação temporomandibular esquerda dos pacientes durante o movimento de abertura nos planos sagital e vertical. Verificaram que a trajetória dos CIRs nos pacientes com DTM é irregular com alterações erráticas de direção. Uma trajetória harmônica dos CIRs começando próxima ao côndilo foi típica no grupo sem DTM; durante a abertura da mandíbula, a trajetória se moveu para baixo e para trás e finalmente mudou para frente e para frente e para cima. Concluíram que o padrão da trajetória dos CIRs pode ser usado como um indicador no diagnóstico de DTMs.

Erdinger (2004) desenvolveu um sistema robótico para a simulação dos movimentos mandibulares chamado “ROSY”. O simulador consistia de um sistema ultrassônico que registrava os movimentos mandibulares em três dimensões (vertical, horizontal e coronal) que eram reproduzidos automaticamente pelo robô através de seis motores. Dois modelos foram montados nesse equipamento simulando o sistema mastigatório. Através de um *software* criado pelo autor, que interpretava o sistema ultrassônico posicionado no paciente através de um arco facial fixado ao arco inferior, os modelos reproduziam o movimento mandibular em relação à maxila. Na conclusão do estudo, o autor relata que o sistema proposto confere fidelidade em relação aos movimentos mandibulares para o uso clínico.

Pelo método de rastreamento eletromagnético (3Space Fastrak, Polhemus, Inc.), um computador portátil para coleta de dados e *software* (The MotionMonitor, Innovative Sports Training, Inc.) e aparelho dental comum, Yoon et al. (2006) apresentaram um método para o estudo da cinemática da articulação temporomandibular e incisivos,. Os autores posicionaram dois sensores (um superior e outro inferior) eletromagnéticos nos incisivos sobre *brackets* plásticos fixados a eles. Uma fonte magnética foi colocada posteriormente aos ombros dos pacientes a uma altura inferior à dos sensores. Durante os movimentos de abertura e fechamento em 2,0 segundos em diversos ciclos, o equipamento registrou a movimentação tridimensional dos sensores gerando trajetórias que foram transcritas a um sistema de coordenadas da mandíbula e do osso temporal, construído a partir de pontos de referência usados do paciente na posição de oclusão. Tais pontos de referência foram a cúspide méso vestibular dos primeiros molares inferiores, a borda

incisal do incisivo central inferior, a borda incisal do incisivo central superior e o pólo lateral dos côndilos mandibulares.

No mesmo ano, outros autores como Scholz et al. (2006), utilizaram esse método o qual nomearam de ultrassonografia computadorizada

Hayasaki et al. (2008), utilizaram um sistema de análise optoeletrônico (TRI-MET, Tokyo-shizaisha, Tokyo, Japan) com frequência de 100hz que registrou os movimentos de lateralidade de pacientes e transmitiu os dados obtidos para uma estação de trabalho gráfico (OCTANE, Silicon Graphics Co., Inc., Mountain View, CA) utilizando a internet, que processou e analisou tais dados. Os autores estudaram os CIRs e a posição do centro de excursão lateral durante o movimento de lateralidade da mandíbula. Concluíram que o centro de excursão lateral está localizado aproximadamente 20,0 mm posterior à posição original do côndilo do lado de trabalho. Essa localização indica que toda a mandíbula translada lateralmente durante o movimento de lateralidade. Se a excursão lateral da mandíbula fosse um movimento rotacional simples com o centro no côndilo, o centro de excursão lateral deveria estar localizado na mesma posição do côndilo. Entretanto, o centro instantâneo de rotação durante o movimento de lateralidade se aproximou do côndilo do lado de trabalho. Este resultado sugere que a diferença da coordenada anteroposterior entre o centro de excursão lateral e a posição do côndilo do lado de trabalho deve estar relacionada com a extensão da translação mandibular e ao centro instantâneo de rotação durante o movimento de lateralidade.

Um estudo sobre o estágio atual das pesquisas sobre o movimento mandibular e oclusão para aplicação clínica foi realizada por Bando et al. (2009). Pela metodologia baseada na utilização de rastreadores magnéticos posicionados nos arcos dentários, os autores obtiveram as trajetórias dos arcos dentários e por simulação baseada na teoria de que a mandíbula e os dentes fazem parte de um corpo rígido, obtiveram as trajetórias de todo o corpo da mandíbula. Para todos os movimentos da mandíbula, incluindo os movimentos laterais, os autores descrevem pontos nos quais as trajetórias do movimento mandibular mostram convergência e têm a menor espessura. Esses pontos que foram encontrados na área central de cada cabeça da mandíbula foram chamados de pontos condilares cinemáticos. Nos pontos localizados fora da região dos côndilos, as trajetórias dos movimentos laterais obtiveram uma direção para dentro da cabeça do côndilo.

Recentemente, Tuijt et al. (2010) construíram um modelo gráfico biomecânico tridimensional do sistema mastigatório humano com 24 músculos atuantes, duas articulações temporomandibulares e uma dentição simplificada para estudar a diferença de carga compressiva do côndilo contra a superfície articular da cavidade mandibular durante os movimentos de abertura e fechamento da boca. Os dados referentes à morfologia, origem e inserção, comprimento em repouso e sarcômeros, força máxima e dinâmica dos músculos foram obtidos através de revisão da literatura existente. Os autores realizaram uma simulação dos movimentos mandibulares e graficamente em um plano cartesiano, descreveram a magnitude das forças nas articulações temporomandibulares e a trajetória dos côndilos. É interessante observar que os traçados gráficos receberam um tratamento de filtragem dos dados devido à presença de um “ruído” não fisiológico de alta frequência obtido no prognóstico.

Como se pode notar pela revisão bibliográfica, a complexidade dos princípios mecânicos e neuromusculares envolvidos nos movimentos mandibulares determina que, até os dias de hoje, ocorram divergências entre os autores sobre o comportamento cinemático da mandíbula como um todo, bem como de suas estruturas quando analisadas individualmente. Isto se deve, em grande parte, ao fato de não existir ainda uma metodologia capaz de reproduzir e processar a análise dos movimentos mandibulares com parâmetros de precisão e fidelidade.

3 PROPOSIÇÃO

O objetivo desta pesquisa é verificar se a metodologia proposta permite:

- 1) A aquisição da imagem digitalizada do movimento de abertura e fechamento da mandíbula.
- 2) O processamento tridimensional, dinâmico e em tempo real desta imagem.
- 3) Verificar o comportamento dos CIRs durante o movimento de abertura e fechamento da mandíbula.
- 4) Verificar por meio da observação de gráficos de trajetórias de pontos e dos CIRs, as diferenças entre pacientes com e sem DTM.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Descrição da metodologia desenvolvida

Esta metodologia apresentou três etapas distintas:

- 1) Confeção de um arco cinemático,
- 2) Aquisição de imagem dinâmica de vídeo com formato digital,
- 3) Captura e processamento da imagem por computação gráfica.

A interação desses três seguimentos possibilitou a avaliação da dinâmica dos movimentos mandibulares (Figura 4.1, figura 4.2).

Figura 4.1 Arquitetura do sistema

Figura. 4.2 Fotografia ilustrando a montagem do sistema.

4.1.1 Arco cinemático

Conforme a metodologia descrita por Missaka (2002), nota-se a necessidade da elaboração de um arco cinemático fixado à arcada inferior, ou seja, uma estrutura de suporte que projete fisicamente para a porção extra-oral, o movimento mandibular. Considerando que os dentes estão fixos à base óssea mandibular e consequentemente permanecem espacialmente solidários à mesma durante a sua cinemática, pode-se assumir que uma extensão extraoral de uma estrutura fixa a eles mimetizam dinamicamente um corpo rígido. Portanto, a análise em determinado plano do deslocamento de pontos dessa estrutura corresponde à forma como se comporta esse corpo. Conforme foi visto na revista de literatura, o emprego de um arco facial como parte da aparatologia dos diferentes métodos é usual. A construção e forma desse arco, desde o pantógrafo até os métodos optoeletrônicos, sempre preocuparam os pesquisadores, no sentido de que não interferissem nas posições cênicas e nos movimentos mandibulares naturais. Ogawa et al. (1997), utilizando uma metodologia optoeletrônica, fixaram à mandíbula um aparato que possuía uma

massa de apenas 15 gramas, e o paciente foi capaz de realizar o movimento mandibular de forma natural e fisiológica.

Pode-se dividir o arco cinemático em três partes distintas: estrutura de fixação aos dentes, arco extra-oral e alvos para rastreamento pela câmera (Figura 4.3).

Os requisitos do arco cinemático são:

- a- Não interferir nas posições cênicas e movimentos excursivos da mandíbula;
- b- Conferir estabilidade e retenção (fixação) aos dentes com a utilização de uma técnica não invasiva;
- c- Promover suporte para a fixação de alvos;
- d- Ser de fácil remoção;
- e- Ser rígida;
- f- Individualizada para cada paciente.

Figura. 4.3 Esquema representando a função de suporte das estruturas metálicas intra – orais do arco cinemático.

4.1.2 Estrutura de fixação aos dentes

Foram selecionados para este estudo, dois pacientes. Conforme o parecer do Comitê de Ética e Pesquisa da Faculdade de Odontologia da Universidade de São Paulo, (Anexo A). Um paciente apresentava pouca ou nenhuma alteração da anatomia dentária natural, classe I de Angle, e ausência de sinais e sintomas de

DTM. O outro paciente apresentava pouca ou nenhuma alteração da anatomia dentária natural, classe I de Angle, estalo da ATM direita com ligeiro desvio para o mesmo lado durante o movimento de abertura da boca, sendo diagnosticado previamente pelo exame clínico, como portador de deslocamento (anteriorização) do disco articular direito (unilateral) com redução. Nos dois pacientes, realizou-se a moldagem das arcadas dentárias com material elástico para a obtenção de modelos em gesso pedra tipo IV.

Os modelos foram montados em articulador semi- ajustável com a relação maxilomandibular fixada na posição de máxima intercuspidação (MIC).

A partir da análise dos modelos montados em articulador, confeccionou-se duas armações metálicas fundidas em liga de cromo- cobalto (uma superior e uma inferior) semelhantes a próteses parciais removíveis (PPRs) (figuras 4.4, 4.5, 4.6, 4.7) para cada paciente. Tais armações para PPRs possuem cada uma, quatro grampos de retenção (dois posteriores na região dos terceiros molares e dois anteriores na região dos caninos) e quatro conectores para a fixação dos arcos extra- orais posicionados nos grampos (figura 4.8). A posição e dimensões dos grampos e conectores foram definidas de forma a não interferirem nas posições cênicas e nos movimentos mandibulares.

Figura 4.4 Armação metálica superior

Figura 4.5 Armação metálica inferior

Fig 4.6 Prova da armação metálica superior

Fig 4.7 Prova da armação metálica inferior

Fig 4.8 Conectores posicionados nos grampos

4.1.3 Arco extra-oral

Para cada estrutura metálica, utilizou-se um arco extra-oral para ortodontia (standard 0,051" – 1,30 mm) (figura 4.9) que foi unido aos conectores da armação por solda a laser utilizando quatro pontos de solda para cada armação (figura 4.10). A estrutura desses arcos permite a manipulação e deformação plástica das hastes intra e extra- orais. Tal manipulação permitiu a adequação das hastes intraorais aos conectores das armações e das hastes extraorais ao plano de captura da imagem dos alvos pela câmera de vídeo digital.

Figura 4.9 Arco extra-oral para ortodontia (standard 0,051" – 1,30 mm)

Figura.4.10 Pontos de solda a laser

4.2 Aquisição e Processamento de Imagens

O sistema é composto por dois arcos cinemáticos separados e independentes (um superior e um inferior). Por sua vez, o arco superior (Figura 4.11), durante o movimento de mastigação acompanha o movimento do crânio do paciente, enquanto o inferior (Figura 4.12) acompanha o movimento da mandíbula. Fixos a estes arcos, encontram-se alguns alvos que são facilmente identificáveis na imagem que é capturada pela câmera filmadora.

Figura 4.11 Arco cinemático superior

Figura 4.12. Arco cinemático inferior

O procedimento básico deste sistema consiste em realizar uma tomada de imagens do paciente produzindo movimentos de abertura e fechamento da boca.

Para cada quadro de imagem captada pelas câmeras, a posição dos alvos é determinada por meio de processamento de imagem. Repetindo-se o processo para vários quadros determina-se o movimento dos diversos alvos no transcorrer do tempo. Combinando-se os movimentos capturados pela câmera, obtêm-se os movimentos dos pontos e por consequência o da mandíbula, no espaço.

As câmeras foram posicionadas em relação à disposição dos alvos no plano frontal e lateral. No plano frontal, foi traçada uma reta imaginária unindo os alvos mais anteriores, equidistantes ao plano sagital e a câmera foi posicionada perpendicularmente a essa reta. No plano lateral, foi traçada uma reta imaginária unindo os alvos anterior e posterior do lado esquerdo de cada paciente, e a câmera foi posicionada perpendicularmente a essa reta. As câmeras foram posicionadas sobre tripés em alumínio diretamente ao solo, impedindo possíveis distorções

durante a aquisição de imagem devido a vibrações. A figura 4.13 ilustra o posicionamento das câmeras.

Figura 4.13 Figura ilustrando o posicionamento das câmeras

Foram realizadas duas tomadas de cada paciente. Foi realizada uma tomada com o movimento natural de abertura e fechamento da boca pelo paciente a partir da posição de MIC e outra, com o movimento forçado com manipulação retrusiva da região mentoniana da mandíbula, realizada pelo próprio paciente sob orientação do operador. A figura 4.14 ilustra esse movimento retrusivo.

Figura 4.14 Figura ilustrando o movimento de abertura com retrusão manual

O paciente foi orientado a executar o movimento de abertura e fechamento dentro de um tempo determinado de aproximadamente 2 a 3 segundos, repetidamente, até se completarem cerca de 10 ciclos.

4.2.1 Materiais utilizados para a aquisição e processamento de imagens

1. 2 câmeras da marca Imaging Source, modelo DFK31BF03, com resolução de 1024x768 pixels e interface de comunicação *Firewire*.

Figura 4.15. Câmera Imaging Source DFK31BF03.

2. *Software* de processamento de imagens desenvolvido a partir da biblioteca Intel OpenCV (Bradsky; Kaehler, 2008),
3. *Software* de processamento numérico desenvolvido na linguagem script do programa MATLAB,
4. Arcos cinemáticos (Missaka, 2002).

4.2.2 Método para a aquisição e processamento de imagem

O método aqui adotado pode ser resumido pelos seguintes passos:

1. Aquisição de imagens na resolução 1024x768 através de duas câmeras digitais numa taxa de 15 imagens/s. As câmeras foram denominadas câmera frontal (CF) e câmera lateral (CL). Somente as imagens da câmera frontal foram utilizadas para processamento. As imagens da câmera lateral foram utilizadas apenas para apresentação de resultados.
2. Processamentos destas imagens com programa que implementa o algoritmo CAMSHIFT (François, 2004) para rastreamento de alvos. O programa foi desenvolvido com a biblioteca Intel OpenCV. São rastreados seis alvos em cada arco.
3. Utilizando um programa que implementa o algoritmo POSIT (Dementhon; Davis, 1995) foi possível estimar a matriz de rotação e vetor de translação do alvos em toda sua trajetória no espaço 3D. O programa foi desenvolvido na linguagem *script* do Matlab.
4. Em particular, dois alvos, um no arco inferior e um no arco superior foram monitorados. Estes alvos coincidiram com a origem de sistemas de coordenadas.
5. Pôde-se então calcular as matrizes de transformação homogêneas durante todo o movimento.
6. Filtrou-se as coordenadas do ponto devido ao ruído de estimação. Aplicou-se o algoritmo de *splines* cúbicas com alisamento.
7. Calculou-se o Centro Instantâneo de Rotação (CIR) ao longo da trajetória destes dois pontos num plano escolhido.

8. Filtrou-se as coordenadas do CIR ao longo da trajetória.

A seguir detalha-se os métodos utilizados:

A modelagem matemática da câmera segue o modelo clássico da câmera do tipo “pin-hole” que utiliza geometria projetiva.

Considerando-se, por exemplo, uma câmera localizada em O_c . Um modelo de perspectiva descreve a relação entre um ponto 3D (em coordenadas homogêneas)

$P_w = [x \ y \ z \ 1]^T$ expressa em coordenadas globais e sua projeção,

$m = [c_x \ c_y \ 1]^T$ no plano de imagem de acordo com:

$$m = KMP_w,$$

onde $K \in R^3$ é a matriz de parâmetros intrínsecos dada por:

$$K = \begin{bmatrix} K_x f & \gamma & c_x \\ 0 & K_y f & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

Figura 4.16 Modelo de câmera “pin-hole”

onde c_x e c_y são as coordenadas em *pixels* do ponto principal, K_x e K_y descrevem o número de pixels por unidade de distância, f é a distância focal em metros e γ é o fator de ortogonalidade dos eixos da imagem do CCD (*skew factor*) (Figura 4.16).

Neste trabalho utilizou-se a seguinte simplificação:

$$K = \begin{bmatrix} F & 0 & c_x \\ 0 & F & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

A matrix $M = [R \mid t] \in R^{3 \times 4}$ contém as componentes de rotação e translação entre as coordenadas globais e as da câmera e é denominada de matriz de parâmetros externos.

Os parâmetros intrínsecos da camera através de procedimento de calibragem (Tsai, 1987). Em particular, uma técnica de calibração *stereo* é realizada. Determina-se a seguinte relação:

$$H_{CL}^{CF} K_{CF} K_{CL} = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & t_{3 \times 1} \\ 0_{3 \times 1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F & 0 & c_{x_{CF}} \\ 0 & F & c_{y_{CF}} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F & 0 & c_{x_{CL}} \\ 0 & F & c_{y_{CL}} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Neste caso, utiliza-se a hipótese que F é o mesmo para as duas câmeras. Através desta equação é possível transportar pontos da imagem na câmera frontal para pontos na câmera lateral.

4.2.2.1 Algoritmo de rastreamento dos alvos

O algoritmo de rastreamento dos alvos foi realizado diretamente sobre o plano de imagem.

Inicialmente identificou-se os alvos desejados. Neste caso, os alvos foram as esferas coloridas de cada arco. O algoritmo calculou o histograma de cores desta do alvo a ser rastreado. Para cada imagem nova o algoritmo de rastreamento procurou a nova posição que tenha maior probabilidade (Figura 4.17)

Figura 4.17 Imagem ilustrando a ação do algoritmo CAMSHIFT. Alvos rastreados se encontram no interior das elipses vermelhas. Pontos brancos representam a geometria do objeto informada a priori

Este algoritmo de rastreamento é denominado CAMSHIFT (Continuously Adaptive Mean Shift Algorithm) (François, 2004). Este é um algoritmo derivado do algoritmo não paramétrico denominado MEANSHIFT que faz busca de pontos de máximo locais de densidade de probabilidade. O algoritmo CAMSHIFT é uma variação que permite uma adaptação caso o tamanho do alvo varie a cada imagem, por exemplo, devido a variações de distância e perspectiva.

4.3 Algoritmo de Cálculo de Pose

Os seguintes sistemas de coordenadas foram definidos:

- CF : sistema de coordenadas na câmera frontal;
- CL : sistema de coordenadas na câmera lateral;
- S : sistema de coordenadas no arco superior. (Figura 4.18)

Figura 4.18. Sistema de coordenadas no arco superior

- I : sistema de coordenadas no arco inferior (Figura 4.19)

Figura 4.19 Sistema de coordenadas no arco inferior

Uma indexação no tempo discreto foi necessária para os sistemas de coordenadas superior S e inferior I devido a sua movimentação. Desta forma, podemos escrever:

$$S(n), I(n) \quad n = 0, \dots, N - 1.$$

Onde N é o número de total de imagens. Em particular, estava-se interessados no sistema de coordenadas inferior no instante $n = 0, I(0)$. Todos os gráficos aqui apresentados se referem a este sistema de coordenadas.

O algoritmo de rastreamento em combinação com o algoritmo POSIT realizou uma estimativa das matrizes de transformação homogêneas de $S(n), I(n) \quad n = 0, \dots, N - 1$ referidas os sistema de coordenadas da câmera frontal CF :

$$H_{CF}^S(n) = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3}^S(n) & t_{3 \times 1}^S(n) \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix},$$

e,

$$H_{CF}^I(n) = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3}^I(n) & t_{3 \times 1}^I(n) \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}.$$

As matrizes de transformação homogêneas contêm informações de rotação e translação do sistema de coordenadas. Como a origem dos sistemas de coordenadas S e I coincidiram com a posição dos respectivos alvos as componentes de translação $t_{3 \times 1}^S(n)$ e $t_{3 \times 1}^I(n)$ descreveram o movimento dos pontos nos instantes de tempo discreto.

Para efeito de apresentação a movimentação dos pontos de interesse foi

Figura 4.20 Resumo dos sistemas de coordenadas utilizados

realizado sempre utilizando o sistema de coordenadas $I(0)$ ou seja o sistema de coordenadas inferior no instante $n = 0$. Para que a trajetória de um ponto qualquer referido ao sistema de coordenadas $I(n)$ possa ser reconstruído em relação a $I(0)$ foi necessário calcular a matriz de transformação homogênea :

$$H_{I(0)}^{I(n)} = H_{I(0)}^{S(0)} \left[H_{CF}^{S(n)} \right]^{-1} H_{CF}^{I(n)},$$

onde,

$$H_{I(0)}^{S(0)} = \left[H_{CF}^{I(0)} \right]^{-1} H_{CF}^{S(0)},$$

$H_{CF}^{S(n)}$, é a transformação homogênea do sistema de coordenadas CF para o sistema qualquer e $H_{CF}^{S(0)}$ é a transformação homogênea do sistema de coordenadas CF para o sistema $S(0)$.

Ao final a trajetória de um ponto qualquer descrito no sistema de coordenadas $P_{I(n)}$ pode ser descrito no sistema de coordenadas $I(0)$ através de:

$$P_{I(0)}(n) = H_{I(0)}^{I(n)} P_{I(n)}(n),$$

Ou seja, qualquer ponto rigidamente acoplado ao sistema $I(n)$ pode ter sua trajetória calculada desta forma.

Em particular, foram escolhidos 3 pontos de interesse para se descrever a trajetória da mandíbula:

- $P_{1,I(n)}(n)$: este ponto coincide com a origem do sistema de coordenadas.
- $P_{2,I(n)}(n)$: este ponto é um ponto imaginário fora da área da mandíbula que será utilizado para o cálculo do centro instantâneo de rotação.
- $P_{3,I(n)}(n)$: este ponto é tal que para o instante $n = 0$ a sua posição é aproximadamente a região do côndilo. (Figura 4.21).

Figura 4.21 Figura ilustrando a posição a localização dos pontos P1 e P3

O processo de estimação da posição dos pontos introduziu um ruído significativo. Desta forma as trajetórias dos pontos referidos ao sistema de coordenadas $I(0)$:

$$\begin{aligned} &P_{1,I(0)}(n), \\ &P_{2,I(0)}(n), \\ &P_{3,I(0)}(n), \\ &n = 0, \dots, N - 1, \end{aligned}$$

foram filtradas. A filtragem foi realizada através de *splines* cúbicas com alisamento (*smoothing cubic spline*) (Mathworks, 2006). As trajetórias foram então denominadas como:

$$\begin{aligned} &\tilde{P}_{1,I(0)}(n), \\ &\tilde{P}_{2,I(0)}(n), \\ &\tilde{P}_{3,I(0)}(n), \\ &n = 0, \dots, N - 1. \end{aligned}$$

A utilização de duas câmeras filmadoras digitais (CF e CL) pôde gerar trajetórias dos pontos de todo o campo visual pela movimentação dos alvos, visto que todos os pontos estavam solidários a eles, movimentando-se ou não, dentro do quadro de cada imagem. Assumindo a mandíbula como um corpo rígido, a movimentação dos alvos fixos aos dentes significou uma projeção desse corpo para a porção extraoral. A utilização da CL serviu apenas para a transcrição visual das trajetórias dos pontos de interesse e dos CIRs, pois a câmera frontal foi capaz de adquirir as imagens através dos seis alvos localizados em cada arco.

O arco facial cinemático superior foi utilizado como referência para o cálculo do movimento relativo dos alvos inferiores. Dessa forma, a imobilização da cabeça dos pacientes durante as filmagens, segundo a metodologia utilizada por Kohno (1971) e nas metodologias utilizando radiografias (Alexander, 1952; Posselt, 1956; Nevaraki, 1956; Sheppard, 1956; Barnett, 1963; LePera, 1964; L'Estrange, 1969) que poderia influenciar no movimento habitual da mandíbula, não foi necessária.

4.4 Cálculo do Centro Instantâneo de Rotação (CIR)

O cálculo do centro Instantâneo de rotação foi feito a partir das trajetórias dos pontos $\tilde{P}_{1,I(0)}$ e $\tilde{P}_{2,I(0)}$ em suas versões filtradas, i.e.,

$$\begin{aligned} &\tilde{P}_{1,I(0)}(n), \\ &\tilde{P}_{2,I(0)}(n), \\ &n = 0, \dots, N-1. \end{aligned}$$

Para cálculo do CIR foi necessário estabelecer um plano paralelo ao eixo xz do sistema de coordenadas inferior $I(0)$. Desprezou-se aqui a componente do eixo y , substituindo-a por um valor constante y_c .

Utilizou-se aqui o método clássico de Reauleaux (Bryant et al., 1984) baseado no cálculo de bisetrizes.

Figura 4.22 Cálculo do CIR(n) através do método de Reauleaux

Tomou-se os pontos em dois instantes consecutivos n e $n+1$:

$$\begin{aligned} &P_{1,I(0)}(n), P_{1,I(0)}(n+1), \\ &P_{2,I(0)}(n), P_{2,I(0)}(n+1). \end{aligned}$$

Calculou-se as bissetrizes considerando o seguimento de reta formado pelo mesmo ponto nos dois instantes de tempo consecutivos. A intersecção das duas bissetrizes define o centro instantâneo de rotação:

$$CIR_{I(0)}(n) = \begin{bmatrix} x_{CIR}(n) \\ y_{CIR}(n) \end{bmatrix}.$$

Desta forma pôde-se calcular o centro instantâneo de rotação para os instantes $n = 0, \dots, N - 2$. Este método é reconhecidamente sensível a erros de estimação da posição dos pontos (Bryant, 1984). Estes erros puderam ser interpretados como ruídos. Desta forma, utilizou-se um procedimento de filtragem através de *splines* cúbicas com alisamento obtendo-se:

$$\tilde{CIR}_{I(0)}(n) = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{CIR}(n) \\ \tilde{y}_{CIR}(n) \end{bmatrix},$$

$$n = 0, \dots, N - 2.$$

Esse procedimento também foi utilizado no trabalho recente de Tuijt et al. (2010).

5 RESULTADOS

A partir das imagens obtidas pela câmera filmadora frontal (CF), foram mapeados os movimentos absolutos dos alvos, os movimentos relativos dos alvos fixos à mandíbula e as trajetórias dos pontos na região do alvo anterior direito e na região dos côndilos mandibulares foram marcadas sobre a primeira imagem obtida no início do processo de captura pela câmera filmadora lateral (CL). Os movimentos relativos dos alvos fixos à mandíbula geraram gráficos das trajetórias de três pontos: Ponto P1 localizado sobre o alvo anterior esquerdo; ponto P2 virtual, para efeito de aplicação do algoritmo para o cálculo dos CIRs; e ponto P3, localizado na região da articulação temporomandibular esquerda. Os gráficos relativos às trajetórias dos pontos P1, P2 e P3 com filtragem nos planos de coordenadas X, Y e Z e a visualização do resultado das coordenadas dessas trajetórias serão apresentadas a seguir com a imagem a que se referem.

Gráfico 5.1 Trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P1 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento habitual

Gráfico 5.2 Visualização 3D da trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P1 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento habitual

Gráfico 5.3 Visualização 2D da trajetória das coordenadas (x,z) do ponto P1 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento habitual

Gráfico 5.4 Trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P2 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento habitual

Gráfico 5.5 Visualização 3D da trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P2 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento habitual

Gráfico 5.6 Visualização 2D da trajetória das coordenadas (x,z) do ponto P2 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento habitual

Gráfico 5.7 Trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P3 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento habitual

Gráfico 5.8 Visualização 3D da trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P3 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento habitual

Gráfico 5.9 Visualização 2D da trajetória das coordenadas (x,z) do ponto P3 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento habitual

Figura 5.1 Trajetórias dos pontos do alvo anterior direito e na região do côndilo direito do paciente sem DTM. Movimento de abertura e fechamento habitual

Gráfico 5.10 Trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P1 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual

Gráfico 5.11 Visualização 3D da trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P1 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual

Gráfico 5.12 Visualização 2D da trajetória das coordenadas (x,z) do ponto P1 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual

Gráfico 5.13 Trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P2 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual

Gráfico 5.14 Visualização 3D da trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P2 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual

Gráfico 5.15 Visualização 2D da trajetória das coordenadas (x,z) do ponto P2 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual

Gráfico 5.16 Trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P3 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual

Gráfico 5.17 Visualização 3D da trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P3 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual

Gráfico 5.18 Visualização 2D da trajetória das coordenadas (x,z) do ponto P3 do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual

Figura 5.2 Trajetórias dos pontos do alvéolo anterior direito e na região do côndilo direito do paciente sem DTM. Movimento de abertura e fechamento com retrusão manual

Gráfico 5.19 Trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P1 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento habitual

Gráfico 5.20 Visualização 3D da trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P1 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento habitual

Gráfico 5.21 Visualização 2D da trajetória das coordenadas (x,z) do ponto P1 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento habitual

Gráfico 5.22 Trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P2 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento habitual

Gráfico 5.23 Visualização 3D da trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P2 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento habitual

Gráfico 5.24 Visualização 2D da trajetória das coordenadas (x,z) do ponto P2 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento habitual

Gráfico 5.25 Trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P3 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento habitual

Gráfico 5.26 Visualização 3D da trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P3 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento habitual

Gráfico 5.27 Visualização 2D da trajetória das coordenadas (x,z) do ponto P3 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento habitual

Figura 5.3 Trajetórias dos pontos do alvo anterior direito e na região do côndilo direito do paciente com DTM. Movimento de abertura e fechamento habitual

Gráfico 5.28 Trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P1 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual

Gráfico 5.29 Visualização 3D da trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P1 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual

Gráfico 5.30 Visualização 2D da trajetória das coordenadas (x,z) do ponto P1 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual

Gráfico 5.31 Trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P2 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual

Gráfico 5.32 Visualização 3D da trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P2 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual

Gráfico 5.33 Visualização 2D da trajetória das coordenadas (x,z) do ponto P2 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual

Gráfico 5.34 Trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P3 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual

Gráfico 5.35 Visualização 3D da trajetória das coordenadas (x,y,z) do ponto P3 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual

Gráfico 5.36 Visualização 2D da trajetória das coordenadas (x,z) do ponto P3 do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual

Figura 5.4 Trajetórias dos pontos do alvo anterior direito e na região do côndilo direito do paciente com DTM. Movimento de abertura e fechamento com retrusão manual

O cálculo do centro Instantâneo de rotação que foi feito a partir das trajetórias dos pontos $P_{1,I(0)}$ e $P_{2,I(0)}$ em suas versões filtradas, gerou os gráficos apresentados a seguir, bem como a trajetória e a imagem a que se referem.

Gráfico 5.37 Trajetória dos CIRs em função do tempo com filtragem do paciente sem DTM com o movimento de abertura e fechamento habitual

Gráfico 5.38 Trajetória dos CIRs em função do tempo com filtragem em 2D do paciente sem DTM com o movimento de abertura e fechamento habitual

Figura 5.5 Trajetória dos CIRs do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento habitual

Gráfico 5.39 Trajetória dos CIRs em função do tempo com filtragem do paciente sem DTM com o movimento de abertura e fechamento com retrusão manual

Gráfico 5.40 Trajetória dos CIRs em função do tempo com filtragem em 2D do paciente sem DTM com o movimento de abertura e fechamento com retrusão manual

Figura 5.6 Trajetória dos CIRs do paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual

Gráfico 5.41 Trajetória dos CIRs em função do tempo com filtragem do paciente com DTM com o movimento de abertura e fechamento habitual

Gráfico 5.42 Trajetória dos CIRs em função do tempo com filtragem em 2D do paciente com DTM com o movimento de abertura e fechamento habitual

Figura 5.7 Trajetória dos CIRs do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento habitual

Gráfico 5.43 Trajetória dos CIRs em função do tempo com filtragem do paciente com DTM com o movimento de abertura e fechamento com retrusão manual

Gráfico 5.44 Trajetória dos CIRs em função do tempo com filtragem em 2D do paciente com DTM com o movimento de abertura e fechamento com retrusão manual

Figura 5.8 Trajetória dos CIRs do paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento com retrusão manual

6 DISCUSSÃO

O estudo da cinemática dos movimentos mandibulares apresentou um avanço considerável, a partir da década de 1960, com a introdução de cinematografia, cinefluorografia e vários outros métodos eletrônicos de registro. Como foi visto na revisão de literatura, um grande passo para se estudar os parâmetros relacionados ao movimento mandibular foi o desenvolvimento de equipamentos que registrassem o rápido e complexo padrão do ciclo mastigatório.

As primeiras análises utilizavam hastes nos métodos fotográficos e também nos métodos pantográficos (Luce, 1889; Gysi, 1910; McCollum, 1939; Cerveira Neto, 1973). Estes primeiros sistemas eram limitados pois traçavam movimentos em apenas duas dimensões e segundo Gibbs (1971) eram incapazes de registrar informações de tempo ao longo da linha traçada.

Ahlgren (1967) comentou que a cinematografia eliminou as incômodas hastes, mas geralmente, o movimento era registrado num único plano, sendo que cada fotograma de filme representava um instante de tempo, permitindo o cálculo de tempo dentro de cada ciclo mastigatório. Pelo fato de a mandíbula estar coberta por tecido móvel e os dentes estarem na maior parte do tempo ocultos atrás dos lábios a precisão do registro cinematográfico era limitada.

Kinuta et al. (2003), desenvolveram uma metodologia que utilizou uma câmera filmadora digital doméstica e um *software* para a captura do movimento pois segundo os autores, os sistemas de registro dos movimentos mandibulares que são utilizados em prótese e ortodontia são muito caros e complicados para o diagnóstico clínico diário.

Com o objetivo de desenvolver uma metodologia capaz de analisar os movimentos mandibulares com fidelidade e precisão e de forma tridimensional, esta pesquisa testou todos os componentes e métodos, a fim de minimizar possíveis distorções e interpretações errôneas.

Em se tratando de uma metodologia nova e complexa, apresentamos o capítulo de discussão, em itens para facilitar a compreensão do seu desenvolvimento e da interpretação clínica dos resultados obtidos.

6.1 Elaboração do arco cinemático

Conforme foi visto na revista de literatura, o emprego de um arco facial como parte da aparatologia dos diferentes métodos é usual. A construção e forma desse arco, desde o pantógrafo até os métodos optoeletrônicos, sempre preocuparam os pesquisadores, no sentido de que não interferissem nas posições cênicas e nos movimentos mandibulares naturais. Ogawa et al. (1997), utilizando uma metodologia optoeletrônica, fixaram à mandíbula um aparato que possuía uma massa de apenas 15,0 gramas, e o paciente foi capaz de realizar o movimento mandibular de forma natural e fisiológica.

De acordo com a metodologia apresentada por Missaka (2002), neste trabalho foi utilizado um sistema de medição de movimentos mandibulares que não requer a conexão física entre a base de medição e a mandíbula, de forma que a medição interferisse o mínimo possível nos movimentos mandibulares do paciente.

Esta metodologia apresenta algumas vantagens sobre os métodos descritos na literatura.

A precisão da terminação do trajeto percorrido pelo alvo é imprescindível para a sua análise. Nos trabalhos que utilizaram o método fotográfico como o de Cerveira Neto (1973) ou o método com *LEDs* como o de Ogawa et al. (1998), há o inconveniente de que os alvos produziam o traçado dos gráficos dos movimentos mandibulares com imprecisão, pois, não era possível o cálculo do seu centro geométrico. Neste estudo, conforme foi descrito no capítulo 4, foi utilizado um algoritmo de rastreamento denominado CAMSHIFT (Continuously Adaptive Mean Shift Algorithm) (François, 2004). Este é um algoritmo derivado do algoritmo não paramétrico denominado MEANSHIFT que faz busca de pontos de máximo locais de densidade de probabilidade. O algoritmo CAMSHIFT é uma variação que permite uma adaptação caso o tamanho do alvo varie a cada imagem, por exemplo, devido a variações de distância e perspectiva, conforme citado.

Outro quesito importante no estudo dos movimentos mandibulares é a reprodução fiel, executada sem empecilhos ou dificuldades pelo paciente. Neste

aspecto, além de preciso, o método selecionado é simples e não exige a conexão física entre a base de medição e a mandíbula, como ocorreu nos trabalhos de Gibbs (1971), Karlsson et al. (1991) e Bando et al. (2009).

6.2 Aquisição e processamento de imagens

A utilização de duas câmeras filmadoras digitais (CF e CL) pôde gerar trajetórias dos pontos de todo o campo visual através da movimentação dos alvos, visto que todos os pontos estavam solidários a eles, movimentando-se ou não, dentro do quadro de cada imagem. Assumindo a mandíbula como um corpo rígido, a movimentação dos alvos fixos aos dentes significou uma projeção desse corpo para a porção extra-oral. A utilização da CL serviu apenas para a transcrição visual das trajetórias dos pontos de interesse e dos CIRs, pois a câmera frontal foi capaz de adquirir as imagens através dos seis alvos localizados em cada arco.

O arco facial cinemático superior foi utilizado como referência para o cálculo do movimento relativo dos alvos inferiores. Dessa forma, a imobilização da cabeça dos pacientes durante as filmagens, segundo a metodologia utilizada por Kohno (1971) e nas metodologias utilizando radiografias (Alexander, 1952, Posselt, 1956; Nevaraki, 1956; Sheppard, 1956; Barnett, 1963; LePera, 1964; L'Estrange, 1969) que poderia influenciar no movimento habitual da mandíbula, não foi necessária.

Durante o de estimacão da posicão dos pontos introduziu-se um ruído significativo. Desta forma as trajetórias dos pontos referidos ao sistema de coordenadas foram filtradas. A filtragem foi realizada através de *splines* cúbicas com alisamento (*smoothing cubic spline*), conforme descrito no capítulo 4. Esse procedimento também foi utilizado no trabalho recente de Tuijt et al. (2010).

6.3 Discussão clínica sobre os resultados obtidos

Os gráficos gerados por essa metodologia sugerem uma uniformidade das trajetórias dos pontos P1, P2 e P3 durante a repetição dos ciclos de abertura e fechamento mandibular.

Conforme descrito no capítulo 4, o eixo X representa o plano sagital (anteroposterior), o eixo Z representa o plano frontal (superoinferior) e o eixo Y representa o plano horizontal (lateromedial).

Analisando primeiramente os resultados obtidos através das filmagens do movimento de abertura e fechamento habitual realizado pelo paciente sem DTM, pode-se notar através do gráfico 5.1 relativo ao ponto P1 sobre o deslocamento do alvo anterior, que no eixo X que representa o plano sagital houve um deslocamento de cerca de 10,0 mm em termos de amplitude anteroposterior. No início da abertura ocorreu um pequeno deslocamento do ponto para anterior e logo em seguida para posterior. No eixo Z que representa o plano frontal, esse ponto sofreu um deslocamento de cerca de 40,0 mm em termos de amplitude superoinferior descrevendo o deslocamento vertical de abertura durante a filmagem. A conjugação entre esses dois gráficos gerou a visualização bidimensional representada pelo gráfico 5.3, tendo a trajetória uma forma de arco com a concavidade voltada para trás. Esse formato de arco coincide com as trajetórias obtidas pelos estudos sobre os centros cinemáticos da mandíbula (Naeije et al., 1999; Yoon et al., 2006; Gallo et al., 2008) na região anterior. Em relação ao ponto P3, o gráfico 5.7 mostra o deslocamento aproximado de 10,0 mm no eixo X de posterior para anterior e também um deslocamento aproximado de 10,0 mm no eixo Z de superior para inferior. Nesse ponto localizado na região dos côndilos, a conjugação dos eixos X e Z determinou uma trajetória em formato de arco voltada para baixo e para trás, semelhante às trajetórias especificamente do eixo cinemático na mandíbula citado por Kohno e Ishiwara (1971). Pela análise dos deslocamentos no plano horizontal, ou seja, no eixo Y, o ponto P1 sofreu um pequeno deslocamento de cerca de 1,0 mm de lateral para medial e o ponto P3, no mesmo sentido, de cerca de 1,5 mm. Esse dado sugere que existe uma deflexão mandibular durante o movimento de

abertura com aproximação entre os côndilos maior do que na região anterior. A conjugação dos gráficos 5.1 e 5.3 gerou o gráfico 5.2, que representa o movimento tridimensional do ponto P1 e a conjugação dos gráficos 5.7 e 5.9 gerou o gráfico 5.8, que representa o movimento tridimensional do ponto P3. As trajetórias dos pontos P1 e P2, este último localizado virtualmente atrás do ponto P1 de forma que tivesse valores magnificados dentro do sistema de coordenadas, determinaram a aplicação do algoritmo para o cálculo dos CIRs. Conforme se observa no gráfico 5.38 a trajetória dos CIRs teve um deslocamento de aproximadamente 20,0 mm no plano sagital e 20,0 mm no plano frontal. A localização dos CIRs no paciente sem DTM com movimento de abertura e fechamento habitual se encontrou em uma região próxima ao ângulo mandibular, abaixo e à frente da região do côndilo, conforme se observou na figura 5.5 que representa a imagem inicial obtida pela CL. Esse resultado comprova o que foi observado por Miluzzi (1977), Baragar e Osborn (1984), Zhang et al. (1995), Lindauer et al. (1995), Missaka (2008), Khonsari et al. (2003).

Moss (1983) através de exames cefalométricos, argumentou que a translação do côndilo resulta em um eixo de rotação localizado no forame mandibular durante todo o movimento mandibular. Isto leva a definir a área do forame mandibular como sendo a região mais estacionária da mandíbula durante seus movimentos, pois se isso não ocorresse, o feixe vâsculo nervoso do nervo alveolar inferior poderia correr o risco de ser seccionado durante os movimentos de abertura máxima. É importante ressaltar que o autor sugere que o forame mandibular se movimenta dentro de uma área limitada aproximadamente do tamanho de uma moeda de dez centavos. No mesmo sentido, Smith (1985) Ele avaliou e revisou as consequências da translação ântero-posterior do côndilo e seus possíveis significados biológicos e concluiu que a translação do côndilo durante os movimentos funcionais da mandíbula é efetiva na redução do movimento do forame mandibular e, portanto, na extensão da agressão ao feixe vâsculo nervoso do alveolar inferior durante as funções mandibulares, na redução da tensão de estiramento do músculo masseter durante a abertura da mandíbula e na prevenção da mandíbula e da língua comprometerem a passagem do ar e outras estruturas cervicais. Missaka et al. (2008) também afirmou através do seu estudo, que a região dos pontos na mandíbula que sofreram o menor deslocamento durante o movimento

de abertura e fechamento estavam na região do forame mandibular, local da inserção do ligamento esfenomandibular.

Comparando os resultados descritos do movimento de abertura e fechamento habitual do paciente sem DTM com o movimento de abertura e fechamento com retrusão manual, observa-se pelo gráfico 5.12, que a amplitude anteroposterior do ponto P1 foi menor, ou seja, no eixo X, de 8,0 mm contra 10,0 mm no movimento habitual. Isso determinou que o arco de abertura e fechamento com retrusão manual, na região anterior não tivesse o deslocamento inicial para anterior, tendo uma forma com a concavidade mais voltada para cima em relação ao arco habitual. Obviamente conclui-se que isso ocorreu devido à limitação de movimento anteroposterior promovido pela retrusão manual. Essa trajetória porém, foi a responsável pela diferença da trajetória dos CIRs, quando comparada ao movimento habitual. Como pode ser visto na figura 5.6, com retrusão manual, o movimento de abertura e fechamento da mandíbula apesar de estar localizado na mesma região da trajetória do movimento habitual, houve uma maior concentração de CIRs mais próxima à região de ATM. Desde Posselt (1952), sabe-se que a partir da posição de retrusão mandibular, o côndilo inicialmente rotaciona e depois translada, porém, esse movimento não é funcional.

Segundo Lindauer et al. (1995), os articuladores podem ser utilizados em ortodontia para diagnóstico, plano de tratamento e construção de aparelhos. Seu uso é baseado no conceito de rotação em torno de um eixo fixo no centro do côndilo no início da abertura e final do fechamento da mandíbula. Isso implica que não há movimento de translação do côndilo durante esses movimentos. Portanto, Torii (1989) discute que o articulador não deve ter somente a habilidade de executar o movimento de dobradiça, mas também deve ter um mecanismo de reproduzir movimentos verticais da mandíbula. Se o centro de rotação mandibular representado como a região onde ocorre a maior concentração de CIRs não está localizado na cabeça do côndilo, então o articulador não é capaz de reproduzir o movimento de abertura e fechamento mandibular (Bando et al., 2009).

Tuijt et al., (2010) utilizaram o simulador descrito no capítulo 2 para a reprodução dos movimentos mandibulares e concluíram que as forças de reação nas articulações temporomandibulares foram maiores durante o movimento de abertura do que durante o movimento de fechamento, contrariando os resultados do

trabalho de Gallo et al. (2008). Porém, os próprios autores ressaltam que a ausência dos discos articulares e dos ligamentos da mandíbula podem ter influenciado no resultado dessa simulação.

No paciente sem DTM, a trajetória do ponto P3 foi semelhante quando foram executados os movimentos de abertura e fechamento da mandíbula habitual e com retrusão manual. Porém, a trajetória do ponto P1 mostrou pequenas diferenças nos dois casos, o que gerou uma diferença também na localização e formato da trajetória dos CIRs.

Analisando os resultados obtidos através das filmagens do movimento de abertura e fechamento habitual realizado pelo paciente com DTM, pode-se notar através do gráfico 5.19, relativo ao ponto P1 sobre o deslocamento do alvo anterior direito, que no eixo X que representa o plano sagital houve um deslocamento de cerca de 6,0 mm em termos de amplitude anteroposterior, portanto menor que o deslocamento do paciente sem DTM. No eixo Z que representa o plano frontal, esse ponto sofreu um deslocamento de cerca de 17,0 mm em termos de amplitude superoinferior, descrevendo o deslocamento vertical de abertura durante a filmagem, demonstrando uma limitação do movimento de abertura da boca provocado pela DTM. A conjugação entre o gráfico 5.20 e 5.22, gerou a visualização bidimensional representada pelo gráfico 5.21. Pôde-se observar que a trajetória tridimensional do ponto P1 não possui pontos que descrevessem um padrão de arco como no paciente sem DTM. O deslocamento desses pontos sofreu dispersão gerando uma trajetória imprecisa, conforme descrito no trabalho de Khonsari et al. (2003). Apesar dessa dispersão, pôde-se notar que desde o início do movimento de abertura da mandíbula, na região do alvo anterior direito (P1), todos os pontos se deslocaram para trás. Isso resultou em uma trajetória em arco, embora imprecisa, com a concavidade voltada para trás e para cima. Em relação ao ponto P3, o gráfico 5.25 mostra o deslocamento aproximado de 6,0 mm no eixo X de posterior para anterior, sendo que no ciclo de abertura e fechamento o deslocamento foi relativamente maior que nos demais. Esse fato sugere que pode ter ocorrido a redução do disco articular durante a primeira abertura e a sua manutenção sobre a cabeça do côndilo nos demais ciclos. Um deslocamento aproximado de 4,5 mm no eixo Z de superior para inferior também sugere uma hipoexcursão condilar dentro da fossa mandibular. Nesse ponto localizado na região dos côndilos, a conjugação dos eixos X e Z

determinou uma trajetória também dispersa, em formato de arco voltada para baixo e para trás. Pela análise dos deslocamentos no plano horizontal, ou seja, no eixo Y, o ponto P1 sofreu um deslocamento de cerca de 2,0 mm de lateral para medial e o ponto P3, no mesmo sentido, de cerca de 3,0 mm sendo que o maior deslocamento no plano horizontal ocorreu dentro do primeiro ciclo de abertura e fechamento mandibular. Esse dado sugere que além da deflexão mandibular durante o movimento de abertura com aproximação entre os côndilos maior do que na região anterior, a redução do disco articular em pacientes com DTM provoca um deslocamento da trajetória da mandíbula na região do côndilo. A conjugação dos gráficos 5.28 e 5.30 gerou o gráfico 5.29, que representa o movimento tridimensional do ponto P1 e a conjugação dos gráficos 5.34 e 5.36 gerou o gráfico 5.35, que representa o movimento tridimensional do ponto P3. A trajetória tridimensional do ponto P3 não gerou um formato de arco e sim uma concentração de pontos localizados na região de ATM, como pôde ser visto no gráfico 5.26. Conforme se observa no gráfico 5.42 a trajetória dos CIRs teve um deslocamento de aproximadamente 55,0 mm no plano sagital e 10,0 mm no plano frontal. A localização dos CIRs no paciente com DTM com movimento de abertura e fechamento habitual se encontrou em uma região próxima da ATM, com grande deslocamento no plano frontal e pequeno deslocamento no plano sagital, como se ocorresse limitação do movimento do côndilo dentro da fossa mandibular.

Comparando os resultados descritos do movimento de abertura e fechamento habitual do paciente com DTM com o movimento de abertura e fechamento com retrusão manual, observa-se que a trajetória do ponto P3 foi ainda mais pontual. Porém, trajetória dos CIRs, foi semelhante, ambos localizados na região da ATM, apenas com deslocamentos maiores no caso da abertura e fechamento com retrusão manual. Isto sugere que com retrusão manual, a redução do disco articular se torna mais difícil e quando ocorre, o deslocamento brusco do côndilo durante a redução do disco articular, gera um movimento de translação que leva os CIRs para longe, pois se o corpo sofre translação pura, o CIR tende ao infinito.

Nitidamente pode se notar as semelhanças entre das trajetórias dos pontos P1 e P3 do paciente com DTM com ou sem retrusão manual. Tanto a retrusão mandibular, quanto um impedimento da excursão do disco articular, como no caso

do paciente com DTM, determinaram a localização dos CIRs próximos à região da ATM.

O centro do côndilo é um dos pontos de referência registrados no planejamento de osteotomia *Le Fort I*. (Hohl, 1978). Frequentemente, uma cirurgia piloto é realizada em modelos dentais montados em um articulador para estabelecer o movimento preciso e necessário da mandíbula para se obter uma oclusão normal e as alterações desejadas na morfologia facial. O centro do côndilo é utilizado como referência, pois presume-se que ele representa o centro de rotação mandibular. Baseado neste experimento, tal afirmação pode ser verdadeira quando do fechamento com retrusão manual ou com em casos de anteriorização do disco.

Lindauer et al. (1995) concluíram que os seus achados dão suporte à teoria da constante movimentação dos CIRs da mandíbula e, que a incerteza do prognóstico da rotação mandibular dos pacientes deve ser considerada durante o plano de tratamento em cirurgias ortognáticas e aparelhos ortodônticos. Nattestad et al. (1991) realizaram um estudo sobre o efeito da posição pós operada de uma mandíbula pelo erro de localização do centro de rotação mandibular, usando um modelo de simulação computadorizado e cirurgia simulada. O centro do côndilo foi o ponto de referência dos procedimentos cirúrgicos envolvendo a maxila. O propósito do estudo foi descrever o tamanho da má posição da mandíbula na cirurgia devido à discrepância entre o centro de rotação simulado e o centro do côndilo. Os resultados mostraram um erro de 20,0 mm na localização do centro de rotação pode causar um mal posicionamento horizontal de 3,0 mm da maxila.

Com base no que foi observado, aparentemente a retrusão manual leva a localização dos CIRs em direção à ATM e a hipoexcursão do côndilo mandibular torna a trajetória dos CIRs mais pontuais.

As coordenadas de todas as imagens produzidas demonstraram que é possível identificar o comportamento cinemático de todos os pontos da face do paciente projetada na tela de um computador em um plano definido. Por ser estática a imagem da face do paciente e o comportamento dos pontos dinâmico, a projeção dos gráficos não permite conclusões com precisão necessária sobre algumas estruturas ósseas, ligamentares, musculares ou articulares.

Quanto à inconsistência dos CIRs (Lindauer et al., 1995) , nos movimentos repetitivos, pode-se imaginar que após os primeiros movimentos ocorram alterações intra-articulares que favoreçam a lubrificação e/ou até mesmo um mecanismo de proteção, que impeçam a compressão dos mesmos pontos articulares nos movimentos repetitivos subsequentes.

A análise dos dados obtidos através dos gráficos e trajetórias dos pontos P1 e P3 sugerem interpretações que podem explicar inúmeras observações clínicas, tais como a redução do disco articular, além do comportamento dos CIRs. Portanto, esta pesquisa sugere que muitos outros estudos devam ser realizados por esta metodologia para que conclusões clínicas e diagnósticas possam ser alcançadas.

7 CONCLUSÕES

Os resultados e a discussão permitiram concluir que a metodologia apresentada torna possível:

- 1- Executar a aquisição de imagens digitalizadas do movimento de abertura e fechamento da mandíbula,
- 2- Realizar o processamento tridimensional, dinâmico e em tempo real das imagens,
- 3- Verificar o comportamento dos CIRs durante o movimento de abertura e fechamento da mandíbula,
- 4- Verificar, por meio dos gráficos de trajetórias de pontos e dos CIRs, as diferenças entre pacientes com e sem DTM.

REFERÊNCIAS

Agerberg G. Maximal mandibular movements in children. *Acta Odontol Scand.* 1974 Mar;32(3):147-59.

Alexander PC. Movements of the condyle from rest position to initial contact and full occlusion. *J Amer Dent Assoc.* 1952 Sept; 45(3):284–93.

Ahlgren J. Pattern of chewing and malocclusion of teeth. A clinical study. *Acta Odontol Scand.* 1967 Jan; 25:3-13.

Ash MM, Ramfjord S. *Oclusão*, 4^a ed., Rio de Janeiro: Guanabara Koogan; 1996, p 44.

Bando E, Nishigawa K, Nakano M, Hisahiro T, Shiguemoto S, Okura K, Satsuma T, Yamamoto T. Current status of researches on jaw movement and occlusion for clinical application. *Jpn Dent Sci Rew.* 2009 apr; 45(4):83-97.

Baragar FA, Osborn JW. A model relating patterns of human jaw movement to biomechanical constraints. *J Biomechanics.* 1984;10:757.

Barnett AV. Masticatory movements. *Aust Dent J.* 1963 Dec; 8(6):504–5.

Bennett NG. Contribution to the study of the movement of the mandible. *J Prosthet Dent.* 1958 Jan; 8(1):41 – 54.

Bennett NG. The movements of the mandible in relation to prosthetics. *Brit Dent J.* 1924 Feb;45(4):217–27.

Beyron HL. Characteristics of functionally optimal occlusal rehabilitation. *J Amer Dent Assoc.* 1954 Jun;48(6):648-56.

¹ De acordo com Estilo Vancouver.

Bradsky G, Kaehler A. Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library. 1st ed. Cambridge, MA, USA: O'Reilly; 2008.

Brekke CA. Jaw function; hinge rotation. J Prosthet Dent. 1969 Jul/Aug;9(4):600–6.

Brotman DN. Hinge axes. J Prosthet Dent. 1960;10:436-40.

Bryant JT, Wevers HW, Lowe PJ. Methods of data smoothing for instantaneous centre of rotation measurements. Med Biol Eng Comput 1984 Nov;22(6):597-602.

Buschang PH, Hayasaki H, Trockmorton GS. Quantification of human chewing cycle kinematics. Arch Oral Biol. 2000 Jun;45(6):461-74

Campion GC. Some graphic records of movements of the mandible in the living subject and their bearing on the mechanism of the joint and the construction of articulators. Dent Cosmos. 1905 Jan;47(1):39 – 42.

Cerveira Neto H. Contribuição para o estudo da localização dos eixos instantâneos de rotação da mandíbula durante os movimentos de abertura e fechamento da boca. [Tese]. São José dos Campos: Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Odontologia 1973.

Cohn LA. Discussion of “mandibular movements in three dimensions”. J Prosthet Dent. 1963 May/Jun;13(3):480–4.

DePietro AJ. Concepts of occlusion. A system – based on rotational centers of the mandible. Dent Clin N Am. 1963;607–20.

DeMenthon D, Davis LS. Model based object pose in 25 lines of code. International Journal of Computer Vision. 1995 June;15:123-41.

Erdinger DH. Accuracy of a robotic system for the reproduction of condylar movements: a preliminary report. Quintessence Int. 2004 Jul;35(7):519-23.

Farrar WB. Characteristics of the condylar path in internal derangements of the TMJ. J Prosthet Dent. 1978;39:319-23.

François ARJ. CAMSHIFT tracker design experiments with Intel OpenCV and SAI, Technical Report, Institute for Robotics and Intelligent Systems, University of Southern California, USA; 2004.

Frank L. Muscular influence on occlusion as show by X rays of the condyle. Dent Dig. 1950 Jan;56(11):484–88.

Frank L. Opening axis of the jaw. Dent. Dig. 1956 Jan;62(1):16–19.

Gallo LM, Gössi DB, Colombo V, Palla S. Relationship between kinematic Center and TMJ anatomy and function. J Dent Res. 2008 Aug; 87(8):726-30.

Getz EH, Getz MS, Getz ES. Application of a geometric principle for locating the mandibular hinge axis through the use of a double recording stylus. J Prosthet Dent. 1988;60:553-9.

Gibbs CH. Functional movements of the mandible. J Prosthet Dent. 1971 Dec;26(6):604–19.

Gillings BR. Photoelectric mandibulography: a technique for studying jaw movements. J Prosthet Dent. 1967 Feb;17(2):109-21.

Gillings BR, Graham CH, Duckmanton NA. Jaw movements in Young adult men during chewing. J Prosthet Dent. 1973 Jun;29(6):616-627.

Granger ER. Functional relations of the stomatognathic system. J Am Dent Assoc. 1954 Jun;48(6):638 - 47.

Gysi A. The problem of articulation. Dent Cosmos. 1910 Jan;52(1):1-29.

Hayasaki H, Yamasaki Y, Nishijima N, Naruse K, Nakata M. Characteristics of protrusive and lateral excursions of the mandible in children with the primary dentition. J Oral Rehabil. 1998 Apr;25(4):311-20.

Hayasaki H, Saitoh I, Iwase Y, Inada E, Hasegawa H, Tokutomi J, Matsumoto Y, Yamasaki Y. Movement of the instantaneous Center of rotation and position of the lateral excursion center during lateral excursion. Cranio. 2008 Oct;26(4):253-62.

Heimansohn H. An electronic gothic arch tracer. *Dent Surv.* 1980 Dec;56(12):30–34.

Helluy M. Étude cinétique et dynamique du jeu mandibulaire dans l'abaissement et l'élévation simples. *Actual Odontostomatol.* 1962 Avr/Juin;16(58):147–77.

Hickey JC. Mandibular movements in three dimensions. *J Prosthet Dent.* 1963 Feb;13(1):72–92.

Hohl TH. The use of an anatomical articulator in segmental orthognathic surgery. *Am J Orthod.* 1978; 73:428

Ingervall B, Carlsson GE, Helkimo M. Change in location of hyoid bone with mandibular positions. *Acta Odontol Scand.* 1970 June;;28(3):337-61.

Jemt T, Hedegard B. Reproducibility of chewing rhythm and of mandibular displacements during chewing. *J Oral Rehabil.* 1982 June;9(6):531–7.

Karlsson S, Persson M, Carlsson GE. Mandibular movement and velocity in relation to state of dentition and age. *J Oral Rehabil.* 1991 Jan;18(1):1–8.

Khonsari RS, Fenske C, Nieke BK, Kirsch I, Jüde HD. Mandibular instantaneous centers of rotation in patients with and without temporomandibular dysfunction. *J of Orofac Orthop.* 2003;64:256-64.

Kinuta S, Wakabayashi K, Sohmura T, Kojima T, Nagao M, Nakamura T, Takahashi J. Simple system to record jaw movements by a home digital camcorder. *Int J Prosthodont.* 2003 May;16(5):563-568.

Kohno S, Ishiwara T. Analysis of movement of mandibular condyle in sagittal plane. *Bull Tokyo Med Dent Univ.* 1971 Sep;18(3):233-45.

Koyano K, Ogawa T, Suetsugu T. The influence of canine guidance and condylar guidance on mandibular lateral movement. *J Oral Rehabil.* 1997 Apr;24(4):802–7.

LePera F. Determinations of the hinge axis. *J Prosthet Dent.* 1964 Aug;14(4):651–6.

Lindauer SJ, Sabol G, Isaacson RJ, Davidovitch M. Condylar movement and mandibular rotation during jaw opening. *Am J Orthod Dentofac Orthop*. 1995;107(6):573-7.

L'Estrange PR. A tomographic studie of the hinge axis. *Dent Pract Dent. Rec.* 1969 Feb;19(6):209–14.

Luce CE. The movements of the lower jaw. *Boston Med Surg J*. 1889;8-11.

McCollum BB. Fundamentals involved in prescribing restorative dental remedies. *Dental Items Interest*. 1939 June;61(6):522-35.

Miluzzi MC. Eixo terminal de rotação da mandíbula (Determinação em pacientes desdentados)[tese]. São Paulo: Universidade de São Paulo, Faculdade de Odontologia; 1977.

Missaka R. Utilização do método de processamento de imagens para a avaliação dinâmica dos movimentos mandibulares.[tese]. São Paulo: Universidade de São Paulo, Faculdade de Odontologia; 2002.

Missaka R, Campos TN, Horikawa O, Shinkai R, Tamaki R, Adachi LK. Development of na experimental optoeletronic device to study the ampltude of mandibular movements. *Braz Oral Res*. 2008;22(2):151-7.

Mongini F. O Sistema Estomatognático. 1ª ed, Chicago: Quintessence Publishing Co.; 1988. p.87.

Moss ML. The functional matrix concept and its relationship to temporomandibular joint dysfunction and treatment. *Dent Clin North Am*. 1983;27:445-455.

Naeije M, Slater JJRH e Lobbezoo F. Variation in movement traces of the kinematic Center of the temporomandibular joint. *J Orofac Pain*. 1999 Mar;13(2):121-7.

Nakamura T, Inoue T, Ishigaki S, Maruyama T. The effect of vertical dimension change on mandibular movements and muscles activity. *Int J Prosthodont*. 1988 Nov./Dec;1:297-301.

Nattestad A, Vedtofte P, Mosekilde E. The significance of an erroneous recording of the centre of mandibular rotation in orthognathic surgery. *J Cranio-Max-Fac Surg*. 1991 Aug;19(6):254-9.

Nattestad A, Vedtofte P. Mandibular autorotation in orthognathic surgery: a new method of locating the centre of mandibular rotation and determining its consequence in orthognathic surgery. *J Cranio-Max-Fac Surg* 1992;20:163-70.

Nemoto K. A study on the three-dimensional range of mandibular movement at the incision inferious. *Bull Tokyo Med Dent Univ*. 1969 Jun;16(2):123-137.

Nevaraki K. Analysis of the mandibular movement from rest to occlusal position. A roentnographic / cephalometric investigation. *Acta Odontol Scand*. 1956; 14 Suppl 19:9-129.

Ogawa T, Koyano K, Suetsugu T. The influence of anterior guidance and condylar guidance on mandibular protrusive movement. *J Oral Rehabil*. 1997 Apr;24(4):303-9.

Ogawa M, Ogawa T, Koyano K, Suetsugu T. Effect of altered canine guidance on condylar movement during laterotrusion. *Int J Prosthodont*. 1998 Feb;11(2):139-44.

Oursland LE, Carlson RD. Study of the horizontal axis of rotation of the mandible. *J S Calif Dent Assoc*. 1958 Jun;26(6):212-21.

Page HL. Maxilomandibular terminal relationships. *Dent Dig*. 1951 Nov;57(11):490-3.

Peyron MA, Maskawi K, Woda A, Tanguay R, Lund JP. Effects of food texture and sample thickness on mandibular movement and hardness assessment during biting in mam. *J Dent Res*. 1997 Mar;76(3):789-95.

Posselt U. Hinge opening axis of the mandible. *Acta Odontol Scand*. 1956 Jun;14:49-63.

Posselt U. Studies in the mobility of the human mandible. *Acta Odontol Scand*. 1952;10 Suppl:160.

Scholz MS, Demling A, Rossbach A. Reproducibility os jaw movements in patients with craniomandibular disorders. J Oral Rehabil. 2006;33:807-12.

Segovia ML. Interrelaciones entre la odonto estomatologia y la. Buenos Aires: Panamericana, 1977.

Shanahan TE, Leff A. Ilusion of mandibular tracings. J Prosthet Dent. 1962a Jan./Feb;12(1):82–85.

Shanahan TE, Leff A. The mandibular axis dilema. J Prosthet Dent. 1962b Mar./Apr;12(2):292-7.

Shanahan TE, Leff A. Mandibular three dimentional movements. J Prosthet Dent. , 1962c Jul./Aug;12(4):678–84.

Shanahan TE, Leff A. Mandibular and articulator movements, physiologic and machanical concepts of occlusion. J Prosthet Dent. 1965 Jan./Feb;16(1):62–72.

Sheppard IM. Observations of condylar and mandibular movement during function. J Dent Res. 1956 July/ Aug;40(4):695.

Sheppard IM, Sheppard SM, Rakoff, S. Range of condylar movement during mandibular opening. J Prosth Dent. 1965 Mar. / Apr;15(2):263–71.

Smith RJ. Functions of condylar translation in human mandibular movement. Am J Orthod. 1985 Sept;88(3):191-202.

Sonstebo HRCE. Luce's recordings of mandibular movements. J Prosthet Dent. 1971 Nov./Dec;11(6):1068–72.

Spline toolbox users guide. Version 3.3.1, Mathworks Inc., 2006.

Tamaki T. A.T.M., Noções de interesse protético. 1ª ed. São Paulo: Livros Médicos; 1971:46–47.

Tamaki T. Dentaduras completas. 4ª ed. São Paulo: Sarvier; 1983. p. 252.

Torii K. Analysis or rotation center of various mandibular closures. J Prosthet Dent. 1989 Mar;61(3):285-91.

Trapozzano VR, Lazzari JB. The physiology of the terminal rotational position of the condyles in the temporomandibular joint. *J Prost Dent.* 1967 Feb;17(2):122–33.

Travers KH, Buschang PH, Hayasaki H, Trockmorton GS. Associations between incisor and mandibular condylar movements during maximum mouth opening in humans. *Arch Oral Biol.* 2000 Apr;45(4):267-75.

Tsai RY. A versatile camera calibration technique for 3D machine vision. *IEEE J. Robotics & Automation* 1987 August, 3(4):323-344.

Tuijt M, Koolstra JH, Lobbezoo F, Naeije M. Differences in loading of the temporomandibular joint during opening and closing of the jaw. *J Biomech* 2010;43:1048-54.

Ulrich J. The human temporomandibular joint, kinematics and actions of masticatory muscles. *J Prosthet Dent.* 1959 May/June;9(3):399-406.

Van Willigen J. The sagittal condylar movements of the clicking temporomandibular joint. *J Oral Rehabil.* 1979 Apr;6(2):167-75.

Weinberg LA. Transverse hinge axis: real or imaginary. *J Prosthet Dent.* 1959 Sept./Oct;9(5):775–87.

Wood DP, Korne PH. Estimated and true hinge axis:a comparison of condylar displacements. *Angle Orthod.* 1992;62:167-74.

Zhang X, Miller JAA, Stohler CS. Three-dimensional unilateral method for the bilateral measurement of condylar movements. *J Biomech.* 1995 Aug;28(8):1007-1011.

Zola A, Rothschild E A. Condyle positions on unimpeded jaw movements. *J Prosthet Dent.* 1961 Sept./Oct;11(5):873–81.

Yatabe M, Zwijoenburg A, Megens CCEJ, Naedje M. The kinematic Center: A reference point for condylar movements. *J Dent Res.* 1995; 74(1):1644-48.

Yoon HJ, Zhao KD, Rebellato J, Na KN, Keller EE. Kinematic study of the mandible using an electromagnetic tracking device and custom dental appliance: Introducing a new technique. *J Biomech.* 2006;29:2325-30.

ANEXO A

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ODONTOLOGIA**Comitê de Ética em Pesquisa****PARECER DE APROVAÇÃO****FR329242****Protocolo 107/10**

Com base em parecer de relator, o Comitê de Ética em Pesquisa **APROVOU** o Projeto de pesquisa **“Centros instantâneos de rotação mandibular através de processamento de imagem obtida por metodologia optoeletrônica”**, de responsabilidade do Pesquisador Reinaldo Missaka, sob orientação do Prof. Dr. Matsuyoshi Mori.

Tendo em vista a legislação vigente, devem ser encaminhados a este Comitê relatórios anuais referentes ao andamento da pesquisa e ao término cópia do trabalho em “cd”. Qualquer emenda do projeto original deve ser apresentada a este CEP para apreciação, de forma clara e sucinta, identificando a parte do a ser modificada e suas justificativas.

São Paulo, 19 de maio de 2010.

Profa. Dra. Marcia Turolia Wanderley
Coordenadora do CEP-FOUSP