

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA INTERDISCIPLINAR DE PÓS-GRADUAÇÃO  
COMPUTAÇÃO APLICADA  
NÍVEL MESTRADO**

**JONAS GABRIEL DE SOUZA**

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA OCLUSÃO DENTÁRIA**

**São Leopoldo**

**2019**

JONAS GABRIEL DE SOUZA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA OCLUSÃO DENTÁRIA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em 2019, pelo Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Computação Aplicada da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientadora: Dra. Marta Becker Villamil

São Leopoldo

2019

S729m Souza, Jonas Gabriel de.  
Modelagem e simulação da oclusão dentária / Jonas Gabriel de Souza. – 2019.  
77 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada, São Leopoldo, 2019.  
“Orientadora: Dra. Marta Becker Villamil.”

1. Computação gráfica. 2. Oclusão (Odontologia). 3. Dentes. 4. Simulação (Computadores). I. Título.

CDU 004

JONAS GABRIEL DE SOUZA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA OCLUSÃO DENTÁRIA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em 2019, pelo Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Computação Aplicada da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Aprovada em 25 de abril de 2019.

BANCA EXAMINADORA

---

Marta Becker Villamil – UNISINOS

---

Rodrigo da Rosa Righi – UNISINOS

---

Cristiano André da Costa – UNISINOS

---

Daniela Gorski Trevisan – UFF

Prof<sup>a</sup>. Dra. Marta Becker Villamil

Visto e permitida a impressão

São Leopoldo

Prof. Dr. Rodrigo da Rosa Righi  
Coordenador PPG em Computação Aplicada

*Ph'nglui mglw'nafh Cthulhu R'lyeh wgah-nagl fhtagn.*

## RESUMO

A má oclusão dentária pode resultar em danos em todo sistema estomatognático e seu estudo permite inferir os dados necessários para que se alcance o sucesso nos tratamentos médicos e/ou odontológicos (cirúrgicos ou não), na estabilidade oclusal e na harmonia orofacial. Este trabalho apresenta um modelo para simular e analisar informações relevantes ao processo de oclusão dentária e suas implicações. As simulações são realizadas a partir de dados reais morfológicos extraídos de pacientes e simulações da função mandibular. Os resultados obtidos fornecem informações relevantes como a distribuição espacial e temporal das colisões dentárias nas arcadas inferior e superior e a orientação do plano médio destas colisões em relação ao plano oclusal. A visualização das colisões dentárias é apresentada em forma de mapa de calor e por distribuição em quadrantes dentários permitindo a observação de indicadores individualizados e métricas comparativas para a compreensão do fenômeno.

**Palavras-chave:** Oclusão dentária. Detecção de Colisão. Simulação computacional. Computação Gráfica.

## ABSTRACT

Dental malocclusion can result in damage to the entire stomatognathic system. Its study allows professionals to infer the necessary data to achieve success in medical and/or dental treatments (surgical or otherwise), occlusal stability and orofacial harmony. This paper presents a model to simulate and analyze information relevant to the dental occlusion process and its implications. The simulations are performed based on real morphological data from patients and simulations of the mandibular function. The results of this paper provide relevant information such as the spatial and temporal distribution of dental collisions in the lower and upper arches and the orientation of the median plane of these collisions in relation to the occlusal plane. The visualization of the dental collisions is presented in the form of a heat map and by distribution in dental quadrants, which allows the observation of individualized indicators and comparative metrics for the understanding of the phenomenon.

**Key-words:** Dental Occlusion. Collision Detection. Computer Simulation. Computer Graphics.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Plano Oclusal.....	20
Figura 2 - Anatomia funcional da articulação temporomandibular.....	22
Figura 3 - Liberdade na Oclusão Cêntrica.....	24
Figura 4 - Demonstração da utilização do <i>software</i> do T-scan para análise dos resultados obtidos. ....	32
Figura 5 - Execução do sistema proposto por Nadjimi et al. (2010), onde (a) representa a etapa na qual são definidas as posições iniciais dos modelos e (b) representa o resultado da simulação .....	32
Figura 6 - Interface final do sistema proposto por Wu et al. (2016).....	33
Figura 7 - Resultados obtidos para a simulação da oclusão lateral esquerda (à esquerda), protrusão (centro) e oclusão lateral direita (à direita), proposta por Stavness et al. (2015) .....	35
Figura 8 - Fluxo de aquisição de dados, simulação e análise de resultados.....	36
Figura 9 - Processo de mapeamento das arcadas dentárias, com a utilização do escâner T12P .....	37
Figura 10 - Modelos I, II e III, representados por (a), (b) e (c), respectivamente .....	38
Figura 11 - Nuvens colisão sobrepostas nas malhas da maxila (a) e mandíbula (b), do modelo I.....	42
Figura 12 - Nuvens de colisões detectadas nas malhas da maxila (a) e mandíbula (b) do modelo I. Os eixos x e z são representados como azul e vermelho, respectivamente. ....	43
Figura 13 - Posicionamento das componentes principais .....	45
Figura 14 - Delimitação do Plano Oclusal .....	46
Figura 15 - Demonstração do vetor $\vec{w}$ , resultante do produto vetorial entre $\vec{u}$ e $\vec{v}$ ...	48
Figura 16 - Ângulo do vetor normal em relação às componentes principais. Os itens (a), (b) e (c) demonstram, nesta ordem, a inclinação do vetor normal em relação às componentes PC1, PC2 e PC3.....	49
Figura 17 - Nuvens de colisões do modelo I, malha da maxila, separadas em quatro quadrantes .....	50
Figura 18 - Modelo proposto por Pileicikiene et al. (2007) .....	51
Figura 19 - Posicionamento dos músculos utilizado por Pileicikiene et al. (2007).....	51



Figura 20 - Posicionamento dos vetores correspondentes aos grupos musculares envolvidos na mastigação .....	52
Figura 21 - Nuvens de colisões detectadas durante o processo de detecção de colisão durante a oclusão estática .....	55
Figura 22 - Distribuição das colisões das maxilas, discriminadas em quadrantes ....	57
Figura 23 - Distribuição das colisões das maxilas, discriminadas em quadrantes ....	57
Figura 24 - Demonstração das colisões detectadas do modelo I, e seus respectivos quadrantes .....	58
Figura 25 - Demonstração das colisões detectadas do modelo II, e seus respectivos quadrantes .....	59
Figura 26 - Demonstração das colisões detectadas do modelo III, e seus respectivos quadrantes .....	60
Figura 27 - Mapa de calor das colisões detectadas durante a oclusão estática, onde as colunas representam os modelos I, II e III e as linhas representam suas malhas da maxila e mandíbula .....	60
Figura 28 - Colisões detectadas no modelo I, na malha da maxila durante a simulação da oclusão dinâmica bilateral .....	62
Figura 29 - Colisões detectadas no modelo I, na malha da mandíbula durante a simulação da oclusão dinâmica bilateral .....	62
Figura 30 - Trecho de simulação da oclusão dinâmica bilateral nos Modelo I, II e III, na malha da maxila no momento de contato máximo .....	63
Figura 31 - Trecho de simulação da oclusão dinâmica bilateral nos Modelo I, II e III, na malha da mandíbula no momento de contato máximo .....	63
Figura 32 - Trecho de simulação da oclusão dinâmica unilateral do lado direito, malha da maxila no momento de contato máximo .....	66
Figura 33 - Trecho de simulação da oclusão dinâmica unilateral do lado direito, malha da mandíbula no momento de contato máximo .....	67
Figura 34 - Trecho de simulação da oclusão dinâmica unilateral do lado esquerdo, malha da maxila no momento de contato máximo .....	69
Figura 35 - Trecho de simulação da oclusão dinâmica unilateral do lado esquerdo, malha da mandíbula no momento de contato máximo .....	69
Figura 36 - Exemplo de extração das componentes principais, extraídas de um único dente .....	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Área de corte da seção reta e força máxima dos músculos mastigatórios .....	25
Tabela 2 - Dentes permanentes de um adulto .....	38
Tabela 3 - Detalhes das malhas com vértices redundantes .....	40
Tabela 4 - Detalhes das malhas sem vértices redundantes .....	40
Tabela 5 - Colisões detectadas durante a oclusão estática, sem pontos redundantes .....	54
Tabela 6 - Detalhamento da PC1, extraída das nuvens de colisões a partir da simulação da oclusão estática.....	55
Tabela 7 - Detalhamento da PC2, extraída das nuvens de colisões a partir da simulação da oclusão estática.....	56
Tabela 8 - Detalhamento da PC3, extraída das nuvens de colisões a partir da simulação da oclusão estática.....	56
Tabela 9 - Ângulos de cada componente principal em relação ao vetor normal do Plano Oclusal, durante a simulação da oclusão estática .....	56
Tabela 10 - Detalhamento da PC1, extraída das nuvens de colisões a partir da simulação da oclusão dinâmica bilateral no momento de contato máximo .....	64
Tabela 11 - Detalhamento da PC2, extraída das nuvens de colisões a partir da simulação da oclusão dinâmica bilateral no momento de contato máximo .....	64
Tabela 12 - Detalhamento da PC3, extraída das nuvens de colisões a partir da simulação da oclusão dinâmica bilateral no momento de contato máximo .....	65
Tabela 13 - Ângulos de cada componente principal em relação ao vetor normal do Plano Oclusal, durante a simulação da oclusão dinâmica bilateral .....	65
Tabela 14 - Detalhamento da PC1, extraída das nuvens de colisões a partir da simulação da oclusão dinâmica unilateral do lado direito, no momento de contato máximo.....	67
Tabela 15 - Detalhamento da PC2, extraída das nuvens de colisões a partir da simulação da oclusão dinâmica unilateral do lado direito, no momento de contato máximo.....	68
Tabela 16 - Detalhamento da PC3, extraída das nuvens de colisões a partir da simulação da oclusão dinâmica unilateral do lado direito, no momento de contato máximo.....	68

Tabela 17 - Ângulos de cada componente principal em relação ao vetor normal do Plano Oclusal, durante a simulação da oclusão dinâmica unilateral do lado direito, no momento de contato máximo .....	68
Tabela 18 - Detalhamento da PC1, extraída das nuvens de colisões a partir da simulação da oclusão dinâmica unilateral do lado esquerdo, no momento de contato máximo.....	70
Tabela 19 - Detalhamento da PC2, extraída das nuvens de colisões a partir da simulação da oclusão dinâmica unilateral do lado esquerdo, no momento de contato máximo.....	70
Tabela 20 - Detalhamento da PC3, extraída das nuvens de colisões a partir da simulação da oclusão dinâmica unilateral do lado esquerdo, no momento de contato máximo.....	70
Tabela 21 - Ângulos de cada componente principal em relação ao vetor normal do Plano Oclusal, durante a simulação da oclusão dinâmica unilateral do lado esquerdo, no momento de contato máximo .....	71

## LISTA DE SIGLAS

AABB	Axis-aligned Bounding Boxes
ATM	Articulação temporomandibular
CO	Oclusão Cêntrica
CR	Relação Cêntrica
ICP	Posição de Intercuspidação
OBB	Oriented bounding boxes
PC	Componente Principal
PCA	Análise de Componentes Principais
PCs	Componentes Principais
TC	Tomografia Computadorizada

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1 PROBLEMA .....	16
1.2 OBJETIVOS .....	16
<b>1.2.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>16</b>
<b>1.2.2 Objetivos Específicos</b> .....	<b>16</b>
1.3 CONTRIBUIÇÃO .....	17
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>19</b>
2.1 OCLUSÃO NA PRÁTICA DA ODONTOLOGIA .....	19
<b>2.1.1 O fenômeno da oclusão</b> .....	<b>19</b>
<b>2.1.2 Oclusão estática</b> .....	<b>20</b>
2.1.2.1 Oclusão Cêntrica .....	21
2.1.2.2 Relação Cêntrica .....	21
2.1.2.3 Importância da Relação Cêntrica .....	23
2.1.2.4 Liberdade na Relação Cêntrica .....	23
<b>2.1.3 Oclusão Dinâmica</b> .....	<b>25</b>
<b>2.1.4 A oclusão ideal</b> .....	<b>26</b>
2.2 DETECÇÃO DE COLISÃO .....	27
2.3 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS .....	28
<b>3 TRABALHOS RELACIONADOS</b> .....	<b>31</b>
<b>4 MÉTODO</b> .....	<b>36</b>
4.1 AQUISIÇÃO DE DADOS .....	36
<b>4.1.1 Pré-processamento dos dados</b> .....	<b>39</b>
4.2 A SIMULAÇÃO DO MOVIMENTO .....	41
<b>4.2.1 Simulação da oclusão estática</b> .....	<b>43</b>
<b>4.2.2 Simulação da oclusão dinâmica</b> .....	<b>50</b>
<b>5 RESULTADOS</b> .....	<b>54</b>
5.1 OCLUSÃO ESTÁTICA .....	54
5.2 OCLUSÃO DINÂMICA .....	61
<b>5.2.1 Simulação da oclusão dinâmica bilateral</b> .....	<b>61</b>
<b>5.2.2 Simulação da oclusão dinâmica unilateral</b> .....	<b>65</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>72</b>
6.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS .....	72

6.2 CONTRIBUIÇÕES .....	73
6.3 TRABALHOS FUTUROS .....	74
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>76</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Na área da saúde, a implantação e utilização de técnicas de simulação adquiriu fundamental importância, seja com foco no ensino ou em procedimentos médicos. Em sua função para o ensino, presta-se com propósitos acadêmicos, didáticos ou puramente informativos, a utilização de simuladores como ferramenta auxiliar é importante, pois fornece uma etapa intermediária entre a teoria e a prática, e pode ser utilizada para ilustrar e reforçar conceitos abordados em sala de aula ou para prevenir que pacientes sejam expostos a quaisquer possíveis problemas ao entrarem em contato com profissionais inexperientes, por exemplo. Quando utilizados como instrumento para auxílio em procedimentos médicos, simuladores são capazes de prestar assistência em procedimentos terapêuticos, etapas de diagnóstico e em processos de tomada de decisão de profissionais de saúde. Sua utilização também pode ser observada na área da engenharia biomédica com, por exemplo, a prototipação de ferramentas e utensílios médicos ou de próteses e de materiais protéticos.

A simulação do corpo humano e sua fisiologia é uma tarefa complexa e desafiadora. A quantidade de variáveis envolvidas em um único e aparentemente simples movimento dificulta a criação de um modelo verossímil (ZELTZER, 1982). Esses atributos não estão somente relacionados ao indivíduo, mas também ao ambiente no qual este indivíduo se encontra e na relação estabelecida entre ambos.

Villamil et al. (2009) propuseram a modelagem e simulação das articulações temporomandibulares e a detecção e o tratamento das colisões entre os ossos durante o fenômeno e Cunha et al. (2015) realizaram uma análise aprofundada sobre a simulação dos movimentos mandibulares, tendo como base as colisões detectadas para os casos de presença e ausência de anteposição dos discos articulares. Ambos foram ponto de partida para o estudo, simulação e análise dos movimentos mandibulares; um dos fenômenos presentes e que ocorrem no sistema mastigatório.

O presente trabalho, por sua vez, tem como foco a continuidade e aprofundamento acerca de outro fenômeno presente no sistema estomatognático: a

oclusão dentária<sup>1</sup>. O interesse por este fenômeno se dá, pois, a simulação da oclusão tem se tornado cada vez mais relevante no meio da ortodontia, e sua compreensão se faz necessária em aspectos funcionais, além de estéticos. Diversas patologias são passíveis de diagnóstico e tratamento, dada a compreensão adequada do funcionamento do sistema estomatognático; um dos passos nesta direção é o aprofundamento do conhecimento sobre o fenômeno da oclusão, seja para fins clínicos ou educacionais. A análise deste fenômeno, entretanto, está ligada a interpretações tanto objetivas, como “as seis chaves para a oclusão normal” definidas por Andrews (1972, apud OLTRAMARI et al., 2007) (MALTAGLIATI et al., 2006), quanto interpretações subjetivas, como o conceito de oclusão ideal, que pode variar de um paciente para outro, conforme observado por Davies e Gray (2001). Em vista disso, independentemente do caso analisado, é possível que se estabeleça, de maneira coesa, um equilíbrio entre ambos os tipos de critérios utilizados, de modo que este fenômeno, embora individual para cada paciente, possa se utilizar também de critérios objetivos ao ser avaliado.

Portanto, este trabalho propõe um modelo, com base na literatura existente, capaz de auxiliar no processo de análise e compreensão do movimento oclusal funcional para, deste modo, tornar possível a extração de informações relevantes a partir da observação do fenômeno oclusal ao longo do tempo. Com as informações extraídas de cada uma das simulações, é possível criar indicadores que podem ser utilizados, em um segundo momento, por um especialista como ferramenta para posteriormente auxiliar para a compreensão do movimento oclusal como a demonstração da distribuição das colisões detectadas sobre as superfícies das arcadas dentárias ou a orientação das nuvens de colisões detectadas em relação ao Plano Oclusal.

Ao longo deste trabalho, será abordado um método que pode ser utilizado para a extração de informações a partir da simulação das oclusões estáticas e dinâmicas a partir de três modelos distintos (estes, usados como prova de conceito), cada um com suas respectivas malhas de maxila e mandíbula.

No detalhamento dos passos metodológicos serão descritos a aquisição dos modelos tridimensionais das arcadas dentárias, a simulação das oclusões estáticas

---

<sup>1</sup> Refere-se à disposição dos dentes maxilares e mandibulares e a maneira como os dentes entram em contato (TÜRPEL et al., 2008).



e dinâmicas e a interpretação dos dados obtidos a partir destas simulações, como a distribuição das colisões na superfície das arcadas dentárias ou a inclinação dessas nuvens de colisões em relação ao Plano Oclusal.

## 1.1 PROBLEMA

Entre profissionais da saúde, a odontologia e ortodontia, é indispensável que se compreenda a importância da prática do estudo e análise dos contatos oclusais, de modo que se alcance não somente o sucesso do tratamento odontológico, mas a estabilidade oclusal e a harmonia orofacial. Isto ocorre porque interferências oriundas do fenômeno da oclusão podem resultar em danos a todo o sistema estomatognático, o que inclui dentes, estruturas de apoio, sistema neuromuscular e articulações temporomandibulares (ATM) (MACHADO et al., 2013).

Portanto, torna-se evidente a necessidade do desenvolvimento de um método por meio do qual se possa simular, de maneira verossímil, o fenômeno oclusal e que possibilite a extração de informações que possam, posteriormente, ser utilizadas de maneira complementar para a análise e compreensão da oclusão dentária e suas implicações.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um modelo generalista o suficiente para a análise da oclusão dentária estática e dinâmica, de modo que possa ser utilizado em diversos cenários sem muitas adaptações.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- a) simular as oclusões dentárias estáticas;
- b) simular as oclusões dentárias dinâmicas, sendo elas as oclusões bilaterais e unilaterais;
- c) detectar as colisões durante as simulações das oclusões dinâmicas bilaterais e unilaterais;

- d) avaliar e comparar, qualitativa e quantitativamente, os resultados obtidos das simulações nos diferentes cenários;
- e) demonstrar resultados obtidos a partir das simulações realizadas conforme literatura atual.

### 1.3 CONTRIBUIÇÃO

A contribuição deste trabalho se situa na lacuna que ainda existe em quantificar além de qualificar o que é uma boa oclusão. Este modelo, diferente de outros já propostos, se beneficia da recente técnica de escaneamento dentário com a utilização de um escâner intraoral para a obtenção dos modelos tridimensionais. Desta forma, este trabalho demonstra a inclinação das nuvens de oclusão obtidas a partir das simulações das oclusões estáticas e dinâmicas, e compara a inclinação destas nuvens com os respectivos planos oclusais encontrados de cada um dos modelos. Alguns tipos de visualizações aqui propostos como visualização por quadrantes dentários e número de colisões obtidas ao longo do tempo na oclusão dinâmica, também se apresentam como um diferencial deste trabalho em relação ao estado da arte.



## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste capítulo serão abordados conceitos fundamentais utilizados para o desenvolvimento do ambiente de simulação.

### **2.1 OCLUSÃO NA PRÁTICA DA ODONTOLOGIA**

Oclusão refere-se à disposição dos dentes maxilares e mandibulares e a maneira com as quais eles se relacionam (TÜRPEL et al., 2008).

Além de se definir a importância das diferentes maneiras com as quais os contatos oclusais acontecem, o processo da oclusão é preciso ser colocado em contexto. O sistema mastigatório, também chamado de sistema estomatognático, é composto por três partes: dentes, tecidos periodontais e o sistema articulatário.

Para Davies e Gray (2001), os cursos de odontologia negligenciam a terceira parte do sistema mastigatório em suas grades curriculares e isso é alvo de críticas por parte dos especialistas na área. Graduados e recém-graduados, oriundos de cursos de odontologia, sentem-se despreparados nesta área; e esse é um caso que se estende globalmente. Entretanto, os cursos de graduação, dada a necessidade de qualificar seus graduandos para atender pacientes, tão logo estejam formados, focam nas primeiras duas partes dessas três, pois o entendimento dessas duas partes possibilita que os acadêmicos sejam capazes de compreender e diagnosticar doenças que afetam os dentes e tecidos periodontais para, então, serem considerados capazes de atender pacientes.

#### **2.1.1 O fenômeno da oclusão**

O fenômeno da oclusão pode ser definido como o contato entre os dentes da maxila e da mandíbula. Há dois tipos de oclusão, cuja diferença entre elas é estabelecida com base na maneira com a qual os dentes da maxila e da mandíbula interagem. Para melhor definir, é possível dizer que o momento em que a mandíbula se encontra fechada e em posição estacionária chama-se de oclusão estática, e o momento em que a mandíbula está se movendo em relação à maxila é chamado de oclusão dinâmica (DAVIES; GRAY, 2001).

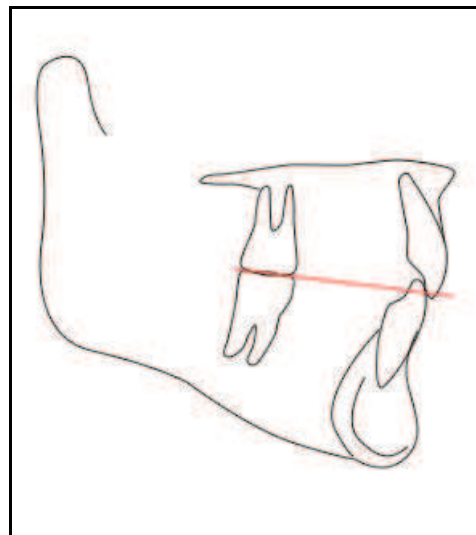
### 2.1.2 Oclusão estática

Conforme Davies e Gray (2001), para se abordar uma oclusão estática é, primeiramente, necessário verificar se a Oclusão Cêntrica ocorre numa Relação Cêntrica. Para elucidar esse ponto é importante atentar-se para a terminologia que, embora crie muita discussão e debate acerca de qual é a mais correta a se usar, é importante ferramental para se abordar este assunto.

A partir da oclusão estática é possível encontrar o Plano Oclusal. Este plano pode ser definido o plano que passa entre as arcadas dentárias durante o processo de oclusão. A Figura 1 demonstra Plano Oclusal, por meio de um corte do Plano Sagital.

Segundo Carvalho (2014), “Interlandi descreveu o Plano Oclusal tendo como pontos de referência a borda incisal do incisivo inferior e o ponto médio, tangente à face oclusal, na direção ântero-posterior do último molar inferior em oclusão.” Ou seja, o Plano Oclusal não está somente ligado à arcada dentária superior ou inferior. Mas às duas, no momento em que os dentes de ambas estão em oclusão.

Figura 1 - Plano Oclusal



Fonte: do autor (2018).

### 2.1.2.1 Oclusão Cêntrica

Oclusão Cêntrica (do inglês, “*Centric Occlusion*”) (CO) pode ser descrita como a oclusão em que o indivíduo faz com que seus dentes se encaixem com o máximo de intercuspidação possível.

Sinônimos para Oclusão Cêntrica são Posição de Intercuspidação (do inglês, “*Intercuspation Position*”) (ICP), Mordida de Conveniência (do inglês, “*Bite of Convenience*”) ou Mordida Habitual (do inglês, “*Habitual Bite*”). Trata-se da oclusão que o indivíduo na maioria dos casos realiza no momento em que lhe é pedido para cerrar os dentes juntos, é a mordida mais comum e a que, geralmente é a mais capturada; provém a posição assumida pelos modelos não articulados de dentição e, por fim, consiste no movimento de mordida que o indivíduo está acostumado a realizar (DAVIES; GRAY, 2001).

### 2.1.2.2 Relação Cêntrica

Não se trata de uma oclusão, pois não possui relação com os dentes e pode ser reproduzida com ou sem eles.

Para Rinchuse et al. (2006, apud OLTRAMARI et al., 2007), a terminologia para Relação Cêntrica (do inglês, “*Centric Relation*”) (CR) tem sido utilizado na Odontologia há muitos anos e, embora haja muitas definições, a Relação Cêntrica é geralmente considerada para se designar a posição da mandíbula na qual os côndilos se encontram numa posição ortopedicamente estável.

Para Davies e Gray (2001), a Relação Cêntrica compete ao relacionamento mandibular: que é a relação conceitual entre a maxila e mandíbula. Todas as tentativas de se estabelecer uma sólida definição sobre o que é Relação Cêntrica falharam, pois há uma barreira fundamental no que diz respeito à certeza, porque não existe maneira fácil de provar que o critério necessário e utilizado para a localização da Relação Cêntrica tenha sido alcançado.

A Relação Cêntrica pode ser descrita de três formas distintas: anatomicamente, conceitualmente e geometricamente. (DAVIES; GRAY, 2001)

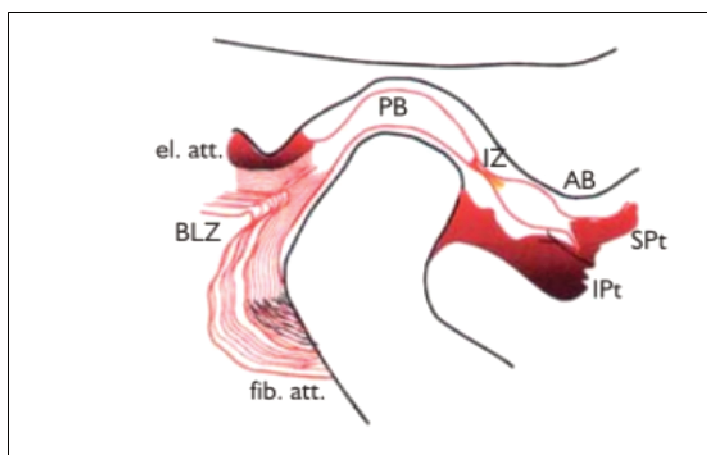
Por um viés anatômico, a Relação Cêntrica pode ser descrita como a posição da mandíbula em relação à maxila, com o disco intra-articular em seu lugar, no momento em que a cabeça do côndilo está posicionada contra, e de frente para, a

parte mais superior da inclinação distal da cavidade glenóide, também chamada de fossa mandibular. A Figura 2 ilustra essa situação.

Conforme Davies e Gray (2001), essa descrição anatômica é alvo de debate, pois existem alguns clínicos que defendem a ideia de que a Relação Cêntrica ocorre na posição mais central e mais superior da cabeça do côndilo, dentro da fossa glenóide, enquanto há outro grupo que apoia a ideia de que, na verdade, a posição correta para a cabeça do côndilo seria a mais superior e mais traseira, em relação à fossa mandibular. Esse debate, entretanto, é apenas de interesse acadêmico e não há relevância clínica, pois, não há maneira simples de se determinar a posição exata da cabeça do côndilo dentro da fossa mandibular.

De maneira conceitual, a Relação Cêntrica pode ser descrita como a posição relativa da mandíbula para com a maxila, considerando o disco articular em seu lugar, no momento em que os músculos estão em seu estado mais relaxado e numa posição menos tensa. Essa definição é importante para um melhor entendimento do conceito de “oclusão ideal”. Este conceito proporciona a possibilidade de se estabelecer uma relação qualitativa entre a posição mandibular e outros elementos do sistema articulatorio (DAVIES; GRAY, 2001).

Figura 2 - Anatomia funcional da articulação temporomandibular



Fonte: Davies e Gray (2001)

A Relação Cêntrica, de um ponto de vista geométrico, é a posição da mandíbula relativa à maxila, com o disco intra-articular em seu lugar, no momento em que a cabeça do côndilo está na posição final de articulação do respectivo eixo.

Esta definição é frequentemente utilizada e, para facilitar o entendimento, é sugerido que se ilustre apenas um lado da mandíbula. Deste modo, é possível de se

explicar o movimento da seguinte forma: a mandíbula se abre por meio de uma rotação do côndilo e então uma translação para baixo e para frente. Portanto, quando a mandíbula se fecha, o fechamento final é puramente rotacional. Neste ponto, o fechamento da mandíbula pode ser descrito como um simples arco porque o centro da rotação é estacionário. Com isso se atinge o “ponto final da articulação” de um dos lados da mandíbula (DAVIES; GRAY, 2001).

Entretanto, como a mandíbula é um osso com dois lados conectados, esses “pontos finais de articulação” são conectados por uma linha imaginária: o “eixo final da articulação”. Este eixo, então, pode ser previsto como os centros de rotação de cada côndilo durante o momento em que a mandíbula está em fase de movimento rotacional. Esse arco, desenhado pela mandíbula no momento em que as cabeças dos côndilos estão no “eixo final da articulação”, tem fundamental relevância clínica (DAVIES; GRAY, 2001).

#### 2.1.2.3 Importância da Relação Cêntrica

Há diversas hipóteses sobre a posição exata da Relação Cêntrica e qual a melhor maneira de encontrá-la. Muitos especialistas no assunto afirmam que há uma posição que pode ser reproduzida da mandíbula relativa à maxila e que esta posição é replicável independente da orientação fornecida pelas superfícies de oclusão dos dentes; isso se dá ao fato de que indivíduos sem dentes ainda possuem Relação Cêntrica. (DAVIES; GRAY, 2001).

#### 2.1.2.4 Liberdade na Relação Cêntrica

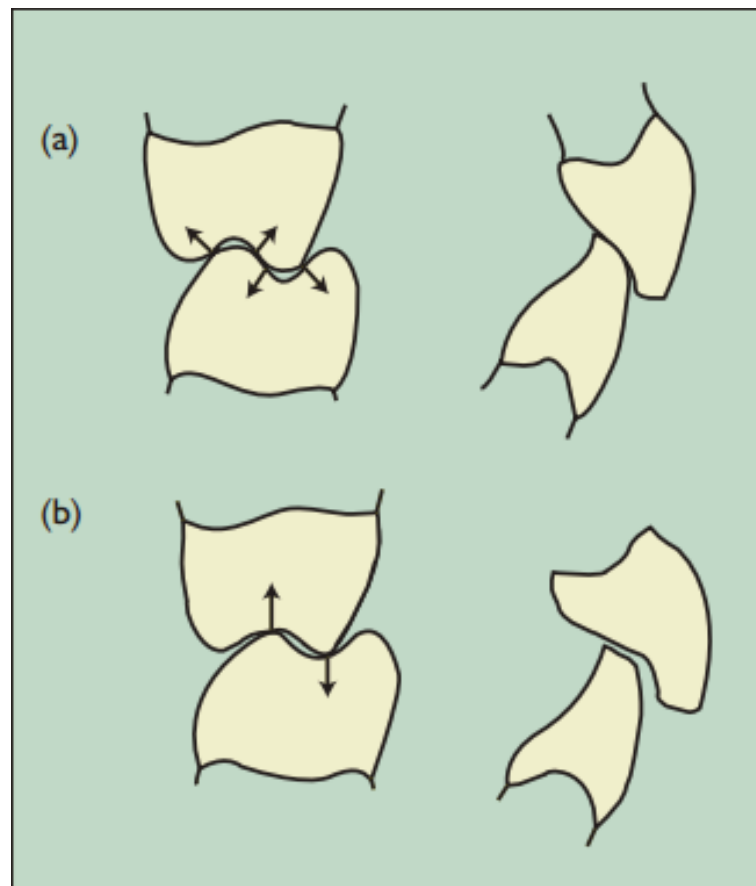
Outro aspecto da oclusão estática é a presença ou ausência de Liberdade na Relação Cêntrica (do inglês, “*Freedom in centric*”), também conhecida como Cêntrica Longa (do inglês, “*long centric*”).

Segundo Davies e Gray (2001), o termo “cêntrica” é usado adjetivamente, de modo apenas a descrever característica e não faz sentido que seja utilizado sem a presença de um substantivo. Portanto, o termo anteriormente abordado poderia ser lido de melhor forma, conforme segue: Liberdade na Oclusão Cêntrica ou Oclusão Cêntrica Longa.



A Liberdade na Oclusão Cêntrica ocorre quando a mandíbula, em estado de oclusão, é capaz de se mover por uma pequena distância no plano Horizontal, e no Plano Sagital enquanto mantém o contato entre os dentes, conforme a Figura 3, item (b). A Figura 3, item (a), ilustra o oposto, ou seja, quando os dentes da frente ou a oclusão posterior não permite esse movimento, é dito que não há Liberdade na Oclusão Cêntrica. Isso acontece, pois, os contatos entre os dentes durante a oclusão “prendem” a mandíbula à maxila, impedindo seu movimento (DAVIES; GRAY, 2001).

Figura 3 - Liberdade na Oclusão Cêntrica



Fonte: Davies e Gray (2001).

Uma maneira mais simples de se visualizar Liberdade na Oclusão Cêntrica é dizer que se os dentes anteriores (situados na parte da frente) se tocam com a mesma ou mais força que os posteriores (situados na parte de trás), não há liberdade naquela Oclusão Cêntrica. O entendimento da oclusão estática possibilita uma melhor compreensão não só da relação entre mandíbula e maxila, mas das

relações entre os dentes, posteriores e anteriores, e disfunções na articulação temporomandibular.

### 2.1.3 Oclusão Dinâmica

A oclusão dinâmica refere-se aos contatos oclusais que são feitos enquanto a mandíbula está se movendo relativa à maxila. A mandíbula é movida pelos músculos do sistema mastigatório e a trajetória pela qual se move é definida não apenas por esses músculos, mas por dois sistemas guia: o sistema guia posterior e o sistema guia anterior (DAVIES; GRAY, 2001).

O sistema guia posterior é composto pelas articulações temporomandibulares. Conforme a cabeça do côndilo se move, para baixo e para frente, a mandíbula se move em conjunto. Essa trajetória da guia posterior é determinada pelo disco intra-articular e pelas superfícies articulares da cavidade glenóide, cobertos pela cápsula articular (DAVIES; GRAY, 2001).

Dado que os dentes se tocam durante a movimentação da mandíbula, seja um movimento protruso ou lateral, então, esses dentes que se tocam oferecem orientação para o movimento mandibular. Esse é o sistema guia anterior e ele acontece baseado em todo e qualquer toque entre os dentes, proveniente de movimentos excêntricos realizados pela mandíbula (DAVIES; GRAY, 2001).

Tabela 1 - Área de corte da seção reta e força máxima dos músculos mastigatórios

<b>Músculo mastigatório</b>	<b>Área da seção reta, cm<sup>2</sup></b>	<b>Força muscular máxima, N</b>
Masseter	8,0	376,0
Temporal	9,1	427,7
Pterigoideo lateral	0,8	37,3
Pterigoideo medial	4,4	207,6

Fonte: Koolstra (1992).

Embora independente de o quão para trás esses dentes estejam, eles ainda são considerados precedentes para as articulações temporomandibulares, portanto, indivíduos com disfunções severas no que diz respeito a mordida anterior ainda terão o sistema guia anterior em suas mandíbulas. Apesar de o termo “guia anterior” possa gerar ambiguidade, ele não necessariamente se refere aos dentes da frente (DAVIES; GRAY, 2001).

Segundo Koolstra (1992), para a realização dos movimentos mandibulares, protrusivos, retrusivos ou laterais, estão associados quatro pares de músculos. São eles: masseter, temporal, pterigoideo medial e pterigoideo lateral. Fisiologicamente, a força máxima destes músculos, relacionada a área do corte de suas respectivas seções retas é demonstrada na Tabela 1.

#### **2.1.4 A oclusão ideal**

Este é um conceito que deve ser examinado com cautela, pois deve-se questionar se, em conjunto com a ideia de oclusão ideal, há função dentro da rotina clínica, no que tange a odontologia. É importante abordar questões como “oclusão ideal para quem?” ou até mesmo “oclusão ideal para quê?” (DAVIES; GRAY, 2001)

Para Edward Angle, fundador da ortodontia contemporânea, a oclusão normal é baseada na relação, com base no eixo sagital, dos dois primeiros molares permanentes. Segundo Angle, a harmonia facial do paciente seria alcançada uma vez que houvesse o alinhamento de todos os dentes em oclusão, em uma situação de relação normal entre os molares. (ANGLE, 1899, apud OLTRAMARI et al., 2007)

Em 1972, Andrews (1972, apud OLTRAMARI et al., 2007) (MALTAGLIATI et al., 2006), ao avaliar a oclusão natural de 120 pacientes, complementou este conceito, ao observar seis características comuns nas oclusões destes indivíduos e chamou estas seis particularidades de “as seis chaves para a oclusão normal” (do inglês, “*the six keys to normal occlusion*”). São elas: (1) relações interarcos entre molares, caninos e premolares; (2) angulação da coroa mesiodistal; (3) inclinação da coroa bucolingual; (4) ausência de rotações; (5) presença definida de contatos proximais e (6) uma curva de Spee pouco acentuada. Embora estes seis parâmetros descritos por Andrews tenham se tornado os pilares do tratamento ortodôntico, estas metas terapêuticas englobam apenas características estáticas, sem considerar os aspectos funcionais da oclusão.

Roth (1976, apud OLTRAMARI et al., 2007), no ano de 1976, apresentou os seguintes aspectos funcionais da oclusão como sendo fundamentais para tratamentos ortodônticos: (1) os dentes devem apresentar máxima intercuspidação com a mandíbula em Relação Cêntrica; (2) em Relação Cêntrica, a dentição posterior deve apresentar contato oclusional axial, e os dentes anteriores devem manter uma distância de 12,7 µm entre si; (3) durante a laterotrusão, os caninos

devem se desocluonar dos dentes posteriores (guia canina); (4) durante a protrusão, os dentes superiores anteriores devem oclucionar com os dentes inferiores anteriores e o primeiro premolar ou segundo premolar, de modo que desocluonem com todos os dentes posteriores (guia anterior imediata); (5) não deve haver interferência no lado de balanço.

## 2.2 DETECÇÃO DE COLISÃO

Conforme Moore e Wilhelms (1988) detecção de colisão envolve determinar quando um objeto interpenetra outro.

Segundo Jiménez et al. (2000), o problema de decisão mais simples é geralmente definido como: dado um conjunto de objetos e a descrição de seus movimentos em um determinado período, deve ser determinado quando ou como qualquer par destes objetos entrará em contato. De acordo com a necessidade e a abordagem assumidas, pode ser necessária a captura de diversas outras características envolvidas no processo, de modo que o resultado se torne o mais próximo do esperado. Contudo, frequentemente os objetos são poliedros, mas na maior parte dos casos são convexos, e seus movimentos são limitados como translacionais ou lineares em um determinado espaço.

Há diversas abordagens para se realizar detecção de colisão entre um ou mais objetos e sua aplicabilidade pode variar de acordo com o cenário de interesse e complexidade envolvidos, de modo que há técnicas com focos diferentes utilizadas para situações diversas, dentre estas técnicas está a indexação espacial. A ideia principal por trás da indexação espacial é aproximar a superfície de objetos, através de cascas convexas, ou decompor o espaço que estes objetos ocupam, de modo a reduzir o número de pares de objetos ou formas primitivas que precisam ser varridas e testadas para a verificação da presença de contato (JIMÉNEZ et al. 2000).

De modo a reduzir a complexidade computacional atrelada ao processo de se verificar colisões na superfície de um objeto complexo não convexo, é possível decompor e indexar o espaço por este objeto ocupado. Esta indexação pode ser realizada, por exemplo, por meio de estruturas de dados chamadas *octree*. Estas estruturas de dados na forma de árvores, podem ser utilizadas para, dentre muitas outras finalidades, armazenar informações a respeito de volumes tridimensionais. Cada nó da árvore, geralmente representado por um cubo e com exatamente oito

filhos, carrega consigo informações a respeito do espaço no qual está situado; normalmente informações a respeito de seus nós filhos e valores booleanos que remetem a seu volume estar ou não sendo ocupado por algum vértice, face ou objeto. *Octree*, no espaço, podem ser alinhadas ao eixo (do inglês, “*Axis-Aligned Bounding Boxes*”) (AABB), ou seja, alinhadas ao sistema de referência no qual estão inseridas, ou alinhadas ao objeto (do inglês, “*Oriented bounding boxes*”) (OBB) ao qual estão atreladas (JIMÉNEZ et al. 2000).

Esta indexação do espaço ocupado pelas arcadas dentárias superior e inferior, utilizadas neste trabalho, foi realizada com a utilização da biblioteca de física *Bullet Physics*, responsável por fazer a detecção de colisão. É uma biblioteca de código livre, amplamente utilizada no meio da pesquisa para se realizar simulações realísticas, bem como na indústria de jogos como motor de física (COUMANS, 2013).

### 2.3 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

A utilização de componentes principais para se realizar análise multivariada de dados é uma técnica bem-conceituada e utilizada no meio estatístico. O uso de Análise de Componentes Principais (PCA) (do inglês, “*Principal Component Analysis*”) tem por objetivo reduzir e simplificar dimensionalmente conjuntos de dados com grande número de variáveis que estão relacionadas entre si, de modo que se preserve e represente o máximo possível da variação original dos dados (JOLLIFFE, 2002).

Conforme Ringnér (2008), se reduz a dimensão dos dados por meio da transformação destes dados em um novo conjunto de variáveis, chamados de componentes principais (PCs) (do inglês, “*Principal Components*”). Estes componentes principais resultam da combinação linear das variáveis originais e, embora em igual número, não são correlacionados. Estes componentes representam, com uma pequena margem de erro, as variações presentes no conjunto original e são dispostas de maneira que os primeiros PCs detêm grande parte da variação observada nas variáveis originais. Deste modo, é possível representar um grupo volumoso de dados com uma relativamente pequena quantidade de novas variáveis. Esta representação simplificada, em união com técnicas de visualização de dados, facilita o processo de análise dos agrupamentos

de dados originais bem como a observação de suas características em comum, caso existam.

Para um conjunto com  $V$  variáveis, onde cada  $V$  é uma série temporal, haverá  $V$  PCs. Cada componente principal é uma combinação linear das variáveis originalmente presentes no conjunto e cada uma destas combinações se dá por meio da manipulação algébrica da matriz de covariância das  $V$  variáveis. Embora se encontre uma quantidade de componentes principais equivalente a quantidade original de variáveis do conjunto, apenas alguns destes PCs já são o suficiente para explicar a maior parte da variabilidade do conjunto original; de modo que não haja perda significativa de informações, mesmo com um conjunto reduzido de variáveis para análise (JACKSON, 1991).

Como exemplificado por KAIESKI (2014), um conjunto de dados com  $V$  variáveis e  $N$  observações, pode ser organizado na seguinte matriz:

$$W = \begin{bmatrix} w_1^1 & w_2^1 & \cdots & w_V^1 \\ w_1^2 & w_2^2 & \cdots & w_V^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1^N & w_2^N & \cdots & w_V^N \end{bmatrix},$$

onde, as variáveis e as observações são indicadas com a utilização de subscrito e sobrescrito, respectivamente, de modo que as colunas representem as variáveis de análise e as linhas as observações. De maneira geral, as variáveis de análise podem ser consideradas vetores, compostos por colunas, com  $N$  dimensões, como segue:

$$\begin{aligned} w_1 &= [w_1^1 & w_1^2 & \cdots & w_1^N] \\ w_2 &= [w_2^1 & w_2^2 & \cdots & w_2^N] \\ &\vdots \\ w_V &= [w_V^1 & w_V^2 & \cdots & w_V^N], \end{aligned}$$

onde as apóstrofes representam a transposição de matrizes e vetores.

Ao se levar em consideração as  $V$  variáveis, o processo de obtenção das PCs a partir do conjunto de dados, consiste em encontrar a matriz de covariância de  $W$ , definida por:

$$S = \begin{bmatrix} s_1^2 & s_{12} & \cdots & s_{1V} \\ s_{12} & s_2^2 & \cdots & s_{2V} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{V1} & s_{V2} & \cdots & s_V^2 \end{bmatrix},$$

onde  $s_k^2$  representa a variância da variável  $k$  e  $s_{ij}$  a covariância entre as variáveis  $i$  e  $j$ . Observa-se que tanto  $s_k^2$ , quanto  $s_{ij}$  são produtos vetoriais internos entre as variáveis de análise. Dada a centralização das variáveis de análise, ou seja, cada variável foi devidamente diminuída de sua média, pode-se definir  $s_k^2$  e  $s_{ij}$  como segue:

$$s_k^2 = \frac{\langle w_k, w_k \rangle}{N-1} \qquad s_{ij} = \frac{\langle w_i, w_j \rangle}{N-1},$$

onde  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  representa o produto interno vetorial usual. Visto que a análise por componentes principais é realizada com base na álgebra linear,  $S$  se dá por uma matriz simétrica, mesma quantidade de linhas e colunas, e que possui uma diagonal principal. Portanto, existe uma matriz ortonormal  $U$ , de modo que:

$$U' S U = L,$$

onde  $U'$  é a matriz transposta de  $U$ ,  $L$  é a matriz diagonal, da qual os elementos da diagonal principal são autovalores de  $l_1 > l_2 > \cdots > l_V$  de  $S$ . Além disso, as colunas  $u_1, u_2, \dots, u_V$  de  $U$  representam os autovetores normalizados (com norma 1) da matriz  $S$ , associados, de maneira respectiva, àqueles autovalores, na mesma ordem em que são apresentados. Estes autovetores são ortogonais (possuem ângulos retos) entre si, de modo que as matrizes  $U'$  e  $U$  são matrizes responsáveis pela mudança de base entre as variáveis originais, cujas orientações não necessariamente são ortogonais, e as novas variáveis, que são ortogonais.

### 3 TRABALHOS RELACIONADOS

O estado da arte contempla, além de pesquisas acadêmicas, soluções proprietárias para a questão da simulação e detecção da oclusão dentária. Algumas dessas soluções, cujas contribuições podem ser relacionadas à elaboração deste trabalho, serão descritas a seguir.

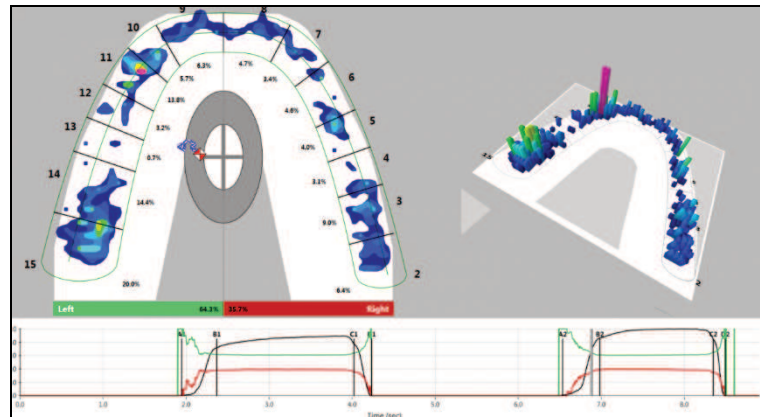
Villamil et al. (2009) propôs a modelagem e simulação das articulações temporomandibulares, a detecção e o tratamento de colisões detectadas entre os ossos relacionados durante o fenômeno. Sua contribuição levou em consideração a atuação das articulações, cada uma com seis graus de liberdade, de maneira interdependente, de modo que a mandíbula está associada à ambas, simultaneamente. O modelo foi adquirido por meio de tomografia computadorizada de um indivíduo e a reprodução do movimento da mandíbula em relação ao crânio foi realizado a partir da técnica de cinemática inversa com base nos pontos presentes na curva incisal obtida a partir do mesmo indivíduo. A simulação tratou as colisões entre os ossos da mandíbula e do crânio de modo a demonstrar como os elementos citados, envolvidos neste fenômeno, interagem entre si.

Posteriormente, Cunha et. al. (2015) realizou uma análise mais aprofundada relacionada a simulação dos movimentos da mandíbula, utilizando como base as colisões detectadas para os casos de presença e ausência de anteposição dos discos articulares e demonstrou um comparativo das trajetórias de movimento obtidas a partir de uma articulação saudável e uma que apresenta a patologia relacionada aos discos articulares. Seu trabalho demonstrou estes resultados por meio da modelagem e simulação dos deslocamentos mandibulares com base nas colisões entre os côndilos e as fossas temporais.

O dispositivo T-Scan (TEKSCAN, 2018), fabricado e patenteado pela empresa Tekscan, Inc., é um dispositivo de diagnóstico capaz de armazenar e categorizar dinamicamente informações a respeito da mordida do paciente, o que inclui força oclusal, localização das oclusões e momento em que ocorreram estas oclusões. A coleta de dados ocorre pela extremidade do dispositivo, onde, em forma de arco, está o sensor que deve ser inserido na boca do paciente e, na sequência, mordido. Os dados coletados podem ser analisados e interpretados pelo *software* de visualização que acompanha o dispositivo, conforme Figura 4.

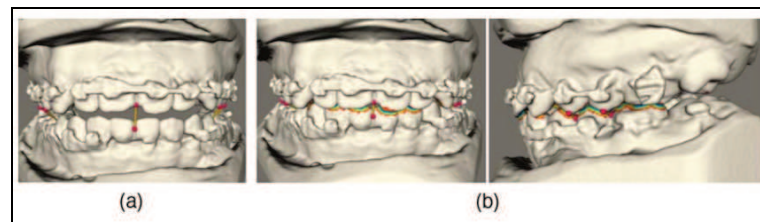


Figura 4 - Demonstração da utilização do *software* do T-scan para análise dos resultados obtidos.



Fonte: site do fabricante, disponível em <<https://www.tekscan.com/>>, acesso em 21 de out. de 2018.

Figura 5 - Execução do sistema proposto por Nadjimi et al. (2010), onde (a) representa a etapa na qual são definidas as posições iniciais dos modelos e (b) representa o resultado da simulação



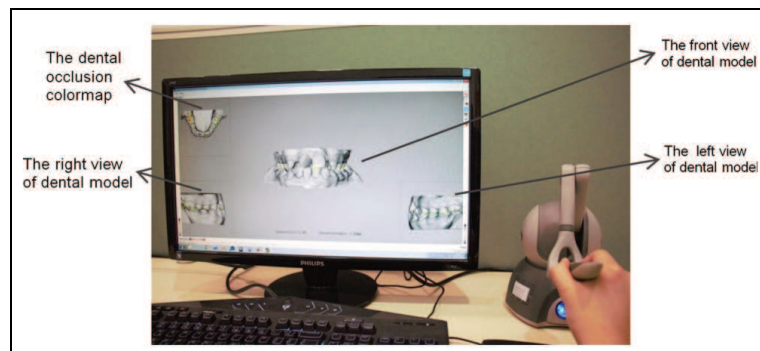
Fonte: Nadjimi et al. (2010).

Em relação à identificação da oclusão ideal, Nadjimi et al. (2010) observaram a importância do planejamento pré-operatório para procedimentos cirúrgicos que envolvam correções cirúrgicas para deformidades dento-faciais. Embora seja recente que sistemas computacionais sejam utilizados para o planejamento de procedimentos cirúrgicos, poucas soluções foram propostas para se determinar a oclusão ideal resultante, durante esta etapa. Os autores propuseram, portanto, uma ferramenta de oclusão virtual 3D, capaz de calcular interações realísticas entre a arcada dentária superior e inferior, de modo a possibilitar que o cirurgião, responsável por planejar o procedimento cirúrgico, possa facilmente obter uma oclusão ideal e fisicamente possível, como pode ser observado na Figura 5. O estudo foi validado com a utilização de dados obtidos a partir das arcadas dentárias

de onze indivíduos. Estes modelos foram submetidos à avaliação manual de um especialista e a avaliação do sistema proposto, com o objetivo de serem determinadas as oclusões ideais de cada um dos modelos. Os resultados observados, separados em dois grupos, de acordo com a técnica, demonstraram poucas discrepâncias de um grupo para o outro. Estes resultados demonstram, portanto, a validade do sistema proposto para a prática clínica.

Conforme Wu et al. (2016), muito embora evidente que a correta determinação do fenômeno da oclusão seja fator chave para o sucesso resultante do tratamento cirúrgico de inúmeras deformidades dento-faciais, foi observada a ausência de um método intuitivo para se determinar a oclusão dentária ideal. De modo a preencher essa lacuna, os autores propuseram o desenvolvimento de um sistema capaz de gerar respostas hápticas durante a interação com modelos virtuais. O simulador foi desenvolvido para que, durante a interação com um modelo virtual, o usuário possa utilizar um dispositivo responsável por gerar uma resposta háptica verossímil às suas interações com o modelo, como se estivesse, de fato, interagindo com o modelo físico, conforme Figura 6. Como prova de conceito, o estudo foi aplicado em quinze diferentes modelos, escolhidos aleatoriamente e com as mais diversas relações entre os dentes, assim como entre as arcadas dentárias superior e inferior. Os modelos foram, além disso, submetidos à avaliação de um especialista e ambos os resultados obtidos foram comparados. Como resultado, as experimentações demonstraram a validade do modelo e como as forças simuladas pelo sistema computacional puderam fornecer informações valiosas de modo a se determinar a oclusão dentária em um ambiente virtual.

Figura 6 - Interface final do sistema proposto por Wu et al. (2016)



Fonte: Wu et al. (2016).

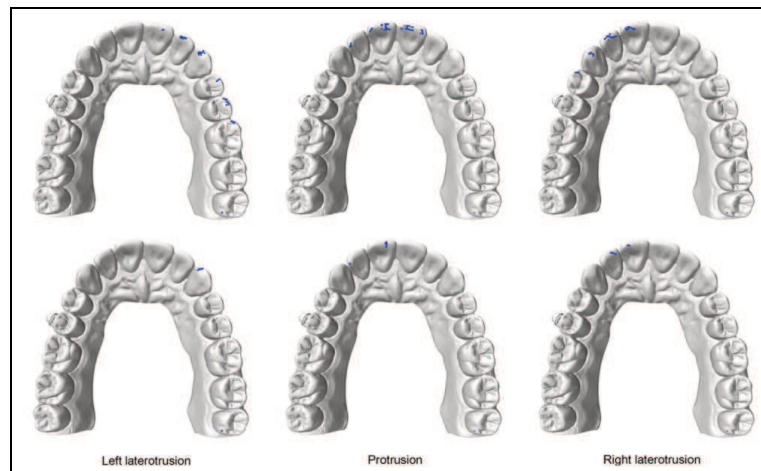
Segundo Stavness et al. (2015), os recentes avanços nas técnicas de escaneamento intraoral e *software* possibilitaram a modelagem matemática da oclusão dentária, como alternativa aos articuladores tradicionalmente utilizados para este fim. Seu estudo teve como objetivo demonstrar a viabilidade da modelagem e simulação da oclusão dentária por meio de um simulador com características análogas as de um articulador tradicional. Os modelos tridimensionais obtidos com o uso de um escâner intraoral e suas características principais, como informações relacionadas a posição das arcadas dentárias em posição de intercuspidação, protrusão, oclusão lateral esquerda e oclusão lateral direita, foram obtidas por meio de um dispositivo de medição de coordenadas. O movimento oclusal foi realizado por meio de um *software* de modelagem biomecânica e as trajetórias dos modelos durante suas movimentações foram realizadas com a utilização da técnica de cinemática inversa, com base nas posições iniciais e finais de cada um dos modelos já preestabelecidas. As colisões detectadas ao longo das simulações foram tratadas matematicamente. Os resultados (Figura 7) observados demonstram diferenças mínimas entre ambos os cenários comparados. Os autores sugerem, conforme observado, que a modelagem matemática do fenômeno oclusal pode ser utilizada para replicar com precisão os movimentos primários obtidos a partir a utilização de articuladores. Além disso, observam que informações adicionais e *software* apropriados poderiam, em alguns casos, substituir a utilização de articuladores, sejam tradicionais ou virtuais.

Os trabalhos descritos até o momento se diferenciam em alguns aspectos do projeto aqui apresentado. Em primeiro lugar, nenhum deles se propõe a fazer uma análise quantitativa da oclusão dentária. Eles apenas demonstram os pontos de colisão para que depois o especialista chegue a conclusões. O dispositivo T-Scan (TEKSCAN, 2018) procura demonstrar as forças aplicadas a cada dente, mas não em que face do dente especificamente. Aliás, ele não se propõe a demonstrar a colisão tridimensionalmente nos dentes visto que não os reconstrói em modelos 3D.

Nadjimi et al. (2010) propuseram um primeiro passo na identificação das colisões 3D nas faces dos dentes, mas os modelos 3D usados são baseados em tomografia computadorizada; o presente trabalho utilizou modelos obtidos a partir do uso de um escâner intraoral, uma técnica mais recente para a obtenção de modelos de arcadas dentarias. Wu et al. (2016) trata de aplicação de um dispositivo de retorno de força na superfície dos dentes e não da oclusão dentária em si. Stavness

et al. (2015) já reproduz o modelo tridimensional com a precisão do escâner 3D, mas foca em reproduzir o movimento mandibular baseado nas suas colisões por meio de cinemática inversa e não foca na análise qualitativa ou quantitativa da oclusão dentária.

Figura 7 - Resultados obtidos para a simulação da oclusão lateral esquerda (à esquerda), protrusão (centro) e oclusão lateral direita (à direita), proposta por Stavness et al. (2015)

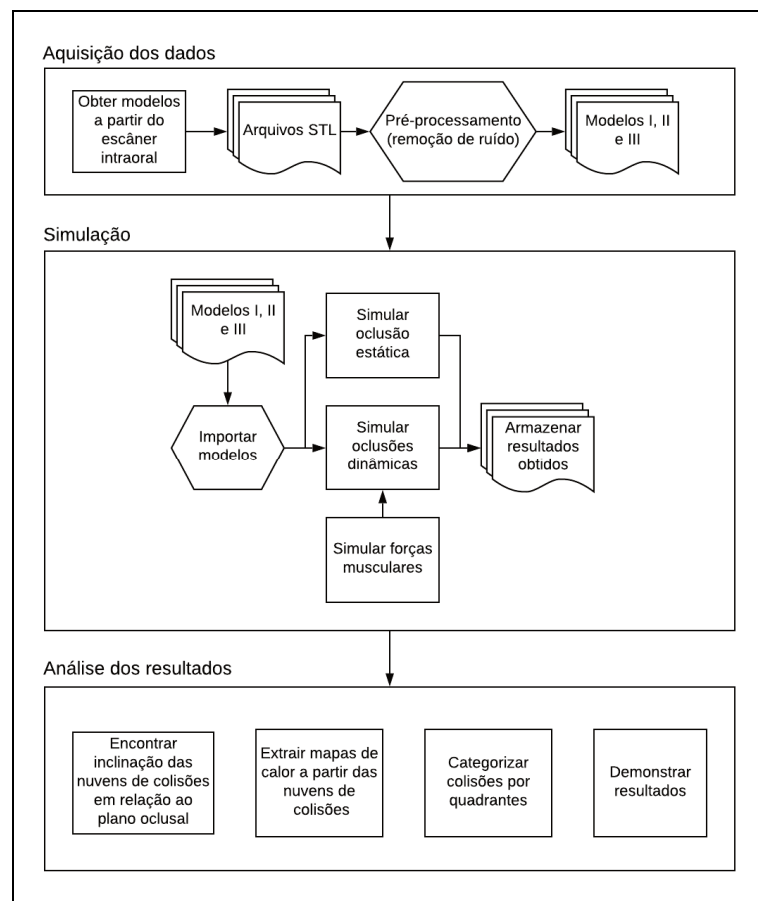


Fonte: Stavness et al. (2015).

## 4 MÉTODO

Este capítulo aborda o método utilizado para realizar as simulações e contempla descrições acerca das etapas de importação das nuvens de pontos, obtenção dos dados oriundos destas malhas, remoção de ruídos e limpeza destes dados, carregamento dos modelos para dentro do sistema, procedimentos realizados para efetuar as simulações de oclusão estática e dinâmica, a detecções de contatos entre as malhas e como esses dados foram trabalhados. Mais detalhes acerca do fluxo seguido são demonstrados na Figura 8.

Figura 8 - Fluxo de aquisição de dados, simulação e análise de resultados



Fonte: do autor (2018).

### 4.1 AQUISIÇÃO DE DADOS

A obtenção dos modelos tridimensionais das arcadas dentárias, usados na prova de conceito deste trabalho, foi realizada através da utilização de um escâner

3D intraoral de alta precisão TRIOS, fabricado pela empresa 3Shape's, modelo T12P. O scanner é uma ferramenta que se assemelha a uma caneta e em sua ponta possui um sensor responsável por mapear a superfície dos dentes, conforme Figura 9.

Figura 9 - Processo de mapeamento das arcadas dentárias, com a utilização do escâner T12P



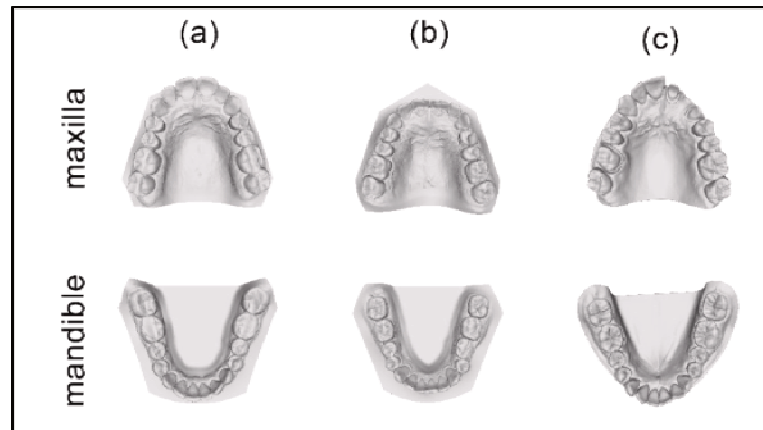
Fonte: site do fabricante, disponível em: <<https://www.3shape.com/>>, acesso em 2 de jan. de 2017.

Como resultado foram obtidos três pares de malhas, doravante referidas como modelos I, II e III, cada qual composto por uma nuvem de pontos correspondente a sua arcada dentária superior e uma nuvem de pontos correspondente a sua arcada dentária inferior. Estes modelos se assemelham aos moldes odontológicos não articulados de gesso. Esses pares de malhas são dispostos, cada qual em seu próprio arquivo no formato STL, um tipo de arquivo comumente utilizado para armazenamento de superfícies de geometrias tridimensionais, e utiliza como base o sistema cartesiano de coordenadas.

Os três modelos descritos foram obtidos com a utilização do escâner intraoral e pertencem a três indivíduos distintos. Estes modelos, compostos cada um por duas partes, são demonstrados na Figura 10, onde: as partes situadas na parte superior representam as arcadas superiores dos modelos I, II e III, representados respectivamente por (a), (b) e (c); e as partes situadas abaixo representam, da mesma forma, suas arcadas inferiores.

Os dentes permanentes de um ser humano adulto podem ser identificados conforme a notação presente na ISO 3950 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2016), e são descritos como na Tabela 2.

Figura 10 - Modelos I, II e III, representados por (a), (b) e (c), respectivamente



Fonte: do autor (2018).

Tabela 2 - Dentes permanentes de um adulto

Lado superior direito do paciente								Lado superior esquerdo do paciente							
18	17	16	15	14	13	12	11	21	22	23	24	25	26	27	28
48	47	46	45	44	43	42	41	31	32	33	34	35	36	37	38
Lado inferior direito do paciente								Lado inferior esquerdo do paciente							

Fonte: ISO 3950.

Cada dente é identificado por um par de dígitos, na forma <código do quadrante><código do dente>, o primeiro, à esquerda, identifica o quadrante e o segundo, à direita, identifica o dente. Os quadrantes são identificados de 1 a 4 e os dentes de 1 a 8. Por exemplo, o dente 23 corresponde ao dente 3, situado no quadrante 2; o dente 47 corresponde ao dente 7, situado no quadrante 4.

Os lados direito e esquerdo encontram-se invertidos, pois a notação tem como referência o ponto de vista do dentista em relação ao paciente, de modo que os códigos dos quadrantes estão dispostos e crescem no sentido horário. Os quadrantes, portanto, são e representam:

- a) quadrante 1, o lado superior direito do paciente;
- b) quadrante 2, o lado superior esquerdo do paciente;

- c) quadrante 3, o lado inferior esquerdo do paciente;
- d) quadrante 4, o lado inferior direito do paciente.

Os dentes, por sua vez, são nomeados a partir da região anterior em direção à região posterior da dentição. De modo que os dentes 1 são os incisivos centrais e os dentes 8 são os terceiros molares. Portanto, os dentes são:

- a) dente 1, os incisivos centrais;
- b) dente 2, os incisivos laterais;
- c) dente 3, os caninos;
- d) dente 4, os primeiros pré-molares;
- e) dente 5, os segundos pré-molares;
- f) dente 6, os primeiros molares;
- g) dente 7, os segundos molares;
- h) dente 8, os terceiros molares.

Dos três modelos obtidos, nenhum deles apresenta os dentes 18 e 28, que correspondem aos terceiros molares superiores, ou os dentes 38 e 48 que correspondem aos terceiros molares inferiores. O modelo III não apresenta, além dos dentes supracitados, os dentes 21, 22 e 23 que correspondem aos dentes incisivo central superior, incisivo lateral superior e canino superior, nesta ordem. Para as cavidades dos dentes 21 e 23, entretanto, há a presença de pilares de implante odontológico, embora sem as coroas.

As nuvens de pontos correspondentes às maxilas e mandíbulas dos modelos I, II e III, embora dispostas em arquivos separados, possuem as coordenadas de seus vértices e faces listadas respeitando sua respectiva contrapartida. Se carregadas simultaneamente em um software de visualização ou no ambiente de simulação, ficam dispostas, uma em relação à outra, no estado de repouso, ou seja, representando uma Oclusão Cêntrica, momento em que os dentes apresentam o máximo de intercuspidação possível, ou seja, estado onde há o máximo de contato possível entre as superfícies das arcadas dentárias superior e inferior, também chamada de mordida habitual.

#### **4.1.1 Pré-processamento dos dados**

Removidos os ruídos presentes nos dados dos três modelos, pois, durante a análise das nuvens de pontos, foi observado que as três possuíam pontos



duplicados, ou seja: vértices com as mesmas coordenadas nos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Portanto, foram criados modelos derivados dos originais, então, mas sem os vértices redundantes.

Tabela 3 - Detalhes das malhas com vértices redundantes

<b>modelo</b>	<b>malha</b>	<b>vértices</b>	<b>faces</b>	<b>% de red.</b>
modelo I	maxila	538.596	179.532	83,333%
	mandíbula	617.856	205.952	83,333%
modelo II	maxila	321.504	107.168	83,332%
	mandíbula	299.994	99.998	83,332%
modelo III	maxila	1.053.018	351.006	83,333%
	mandíbula	1.295.835	431.945	83,332%

Fonte: do autor (2018).

A remoção dos vértices duplicados foi realizada porque, além de gerar malhas significativamente menores, a sua remoção não afeta em nada as faces de cada malha e sua presença não contribui para as simulações; de maneira oposta, apenas torna mais onerosa cada iteração do sistema.

Tabela 4 - Detalhes das malhas sem vértices redundantes

<b>modelo</b>	<b>malha</b>	<b>vértices</b>	<b>faces</b>
modelo I	maxila	89.768	179.532
	mandíbula	102.978	205.952
modelo II	maxila	53.586	107.168
	mandíbula	50.001	99.998
modelo III	maxila	175.505	351.006
	mandíbula	215.984	431.945

Fonte: do autor (2018).

A proporção de pontos redundantes presentes em cada um dos modelos, para as nuvens de suas respectivas maxilas e mandíbulas, é descrita conforme na Tabela 3, na coluna mais à direita. Os modelos resultantes deste processamento e remoção dos vértices duplicados têm seus vértices e faces detalhados conforme Tabela 4. Os novos modelos são os que foram utilizados para realizar as simulações das Oclusões Estática e Dinâmica.

Para o carregamento de um modelo, durante o processo de execução, o sistema recebe um ponteiro que indica o início do arquivo que contém as informações de vértices, faces e normais. Conforme o buffer de leitura itera linha a

linha do arquivo, as informações são salvas em um objeto na memória e, uma vez que o buffer de leitura termina de iterar até o final do arquivo e a seguir é fechado.

O objeto resultante em memória contém informações a respeito do número de vértices presentes no arquivo lido, número de faces, um *array* com uma lista de todos os vértices e todas as faces encontradas durante o procedimento de leitura. Os vértices e as faces são, então, armazenados em um *array* de ponteiros, cujos espaços, em memória estão alocados de maneira contígua, durante o tempo de execução. Estes vetores apresentam a seguinte estrutura:

$$array = [x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2, x_3, y_3, z_3, \dots, x_n, y_n, z_n]$$

Dado que são unidimensionais, o vetor de vértices terá um valor de  $n$  igual a três vezes o número de vértices encontrado e o vetor de triângulos terá um valor de  $n$  igual a três vezes o número de triângulos. Feito isto, cria-se um objeto responsável por armazenar e organizar os relacionamentos entre os triângulos e os vértices. O construtor deste objeto tem como argumentos o número de triângulos, o ponteiro da primeira posição do vetor de triângulos, o tamanho do *passo* para iterações realizadas no vetor de triângulos, o número de vértices, o ponteiro da primeira posição do vetor de vértices e o tamanho do *passo* para iterações realizadas dentro deste último vetor.

Uma vez alocada na memória a lista de vértices, é, então, instanciado um objeto que herda as características de corpo rígido, tipo construído presente na biblioteca Bullet Physics, para que este objeto possa ser inicializado, por meio de seu construtor, que recebe como argumento principal um ponteiro de *array* de vértices.

Na sequência, o construtor executa, recursivamente, a importação dos vértices e tecelagem das faces e, no fim da execução deste escopo, desenha na tela a malha importada na forma de um corpo rígido.

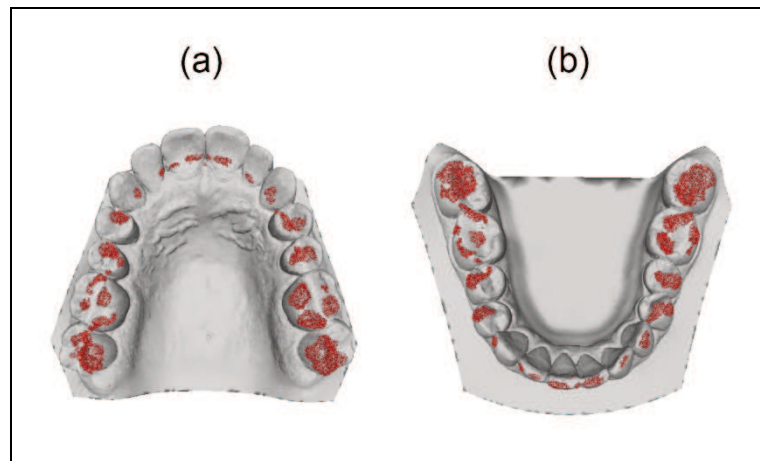
## 4.2 A SIMULAÇÃO DO MOVIMENTO

As simulações foram realizadas considerando a fixação da arcada dentária superior, que corresponde à maxila. Portanto, a geometria movimentada foi a da arcada dentária inferior, que corresponde à mandíbula. Deste modo, torna-se a

simulação mais próxima da realidade, visto que é a articulação temporomandibular que se flexiona, o que resulta no movimento da mandíbula em relação à maxila e não o contrário.

A detecção e tratamento de colisões durante as simulações ficou sob responsabilidade da biblioteca de física Bullet Physics. Para realizar a detecção de colisões de maneira discreta, foi atrelada para cada um dos corpos rígidos uma função de retorno que escuta e é disparada sempre que uma colisão é detectada, durante a execução da *broadphase*, que é a etapa do *pipeline* de execução da biblioteca na qual é executada a rotina (e sub-rotinas) de detecção de colisão.

Figura 11 - Nuvens colisão sobrepostas nas malhas da maxila (a) e mandíbula (b), do modelo I



Fonte: do autor (2018).

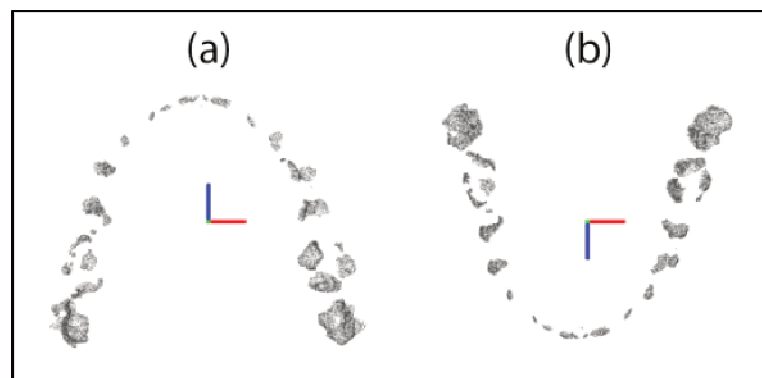
A execução desta função de retorno tem como objetivo armazenar as coordenadas de quaisquer colisões detectadas entre os corpos rígidos. Essas coordenadas são relativas ao corpo testado, por exemplo, no momento em que o corpo A estiver em etapa de detecção de colisão, se houver em sua superfície um contato com alguma extremidade da superfície do corpo B, as coordenadas armazenadas relacionadas à esta colisão serão relativas à geometria de A. O contrário também acontece, de modo que, para cada colisão detectada em um dos corpos rígidos, há uma colisão correspondente no outro corpo.

Visto que as superfícies dos dentes das arcadas dentárias superior e inferior não são idênticas, optou-se por realizar a detecção de colisão e gerar uma nuvem de colisões para cada uma das malhas, tanto da maxila, quanto da mandíbula, pois,

um ponto ou região específica de uma das malhas pode, ao longo do tempo, colidir com diversos pontos ou regiões da outra malha.

Na Figura 11 são ilustradas ambas as malhas da arcada dentária superior (a) e arcada dentária inferior (b) do modelo I e as respectivas nuvens de colisões detectadas para cada uma delas, com corte perpendicular ao plano axial. A Figura 11 demonstra o porquê de se ter capturado duas nuvens de colisão, uma para cada malha; pois, como as malhas não tem as mesmas características de altura, largura e profundidade, apenas transpõem os pontos detectados em uma delas para outra que resultaria em incoerência no posicionamento dos pontos.

Figura 12 - Nuvens de colisões detectadas nas malhas da maxila (a) e mandíbula (b) do modelo I. Os eixos x e z são representados como azul e vermelho, respectivamente.



Fonte: do autor (2018).

A Figura 12 exemplifica um par de nuvens de colisão, extraídos da simulação da oclusão estática com a utilização do modelo I, onde: (a) é a nuvem de colisões que abrange os pontos onde ocorreram intersecções na superfície dos dentes da maxila e (b) é a nuvem de colisões extraída das colisões nas superfícies dos dentes da mandíbula. Para melhor visualização, a demonstração é realizada por meio do plano axial. Os eixos x e z são representados pelas cores vermelho e azul, nesta ordem.

#### 4.2.1 Simulação da oclusão estática

Como mencionado anteriormente, os modelos quando carregados, simultaneamente, terão suas posições em estado de Oclusão Cêntrica, momento em

que há o máximo de intercuspidação possível; esta posição, também chamada de “Mordida Habitual” trata-se da posição mais comum alcançada pelo indivíduo quando lhe for solicitado para que cerre os dentes.

Ao se considerar isto, o processo de simulação da oclusão estática resume-se a carregar os modelos ao mesmo tempo, sem a necessidade de movê-los, e dado que ambas as superfícies das arcadas dentárias superior e inferior já se tocam, detectando as colisões entre os dentes.

Durante a execução da simulação os pontos em ambas as superfícies onde detectou-se intersecções foram capturados e salvos em um arquivo de texto, para análise posterior. Neste arquivo de saída, cada linha possui as seguintes colunas:

- a) nome: nome do objeto testado;
- b) iteração: iteração, dentro da simulação, na qual foi detectada a colisão, para que seja possível observar em que momento aconteceu cada colisão;
- c) coordenada x: posição da colisão dentro do eixo x;
- d) coordenada y: posição da colisão dentro do eixo y;
- e) coordenada z: posição da colisão dentro do eixo z;
- f) rotação em x: rotação da malha em torno do eixo x;
- g) rotação em y: rotação da malha em torno do eixo y;
- h) rotação em z: rotação da malha em torno do eixo z.

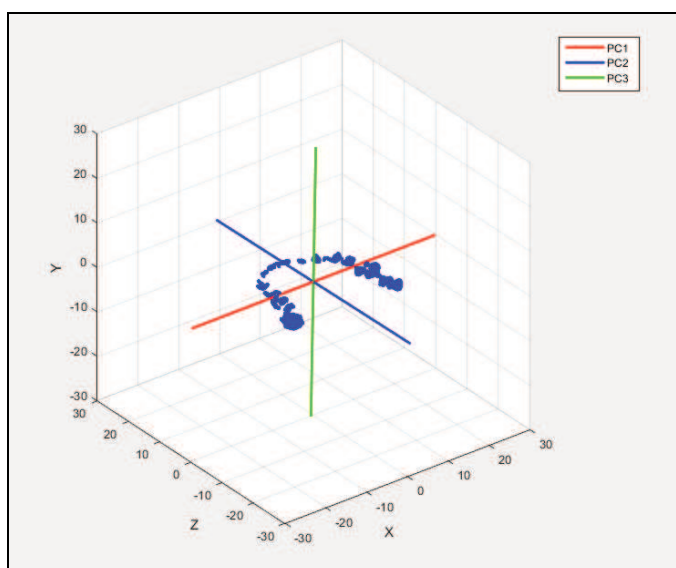
Os resultados observados, entretanto, demonstraram locais de colisão repetidos - com os mesmos valores para x, y e z - e, como estes resultados foram obtidos durante a simulação da oclusão estática, estes pontos redundantes foram removidos, pois, dado que as malhas se encontravam estáticas, estes pontos não poderiam, portanto, serem resultantes de colisões detectadas em função da movimentação da mandíbula em relação à maxila em função do tempo.

A partir dessas nuvens de colisões são extraídas componentes principais, para análise. Para a obtenção do método de extração das componentes principais, considera-se a saída de cada uma das simulações uma lista de diferentes pontos no espaço, cada um com sua posição composta por x, y e z. Como segue:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= [x_1 \quad y_1 \quad z_1] \\
 P_2 &= [x_2 \quad y_2 \quad z_2] \\
 &\vdots \\
 P_N &= [x_N \quad y_N \quad z_N],
 \end{aligned}$$

onde cada vetor  $P$  corresponde a um ponto no espaço e possui três dimensões, definidas pela quantidade de coordenadas espaciais de cada ponto. Portanto o número de observações equivale ao número de pontos e o número de variáveis equivale a quantidade de coordenadas de cada ponto, ou seja, os valores de  $x$ ,  $y$  e  $z$  que determinam sua posição no espaço. A partir deste cenário, foram encontradas as componentes principais que melhor representam as variabilidades de cada nuvem de pontos que corresponde às colisões capturadas para cada uma das malhas de cada um dos modelos.

Figura 13 - Posicionamento das componentes principais



Fonte: do autor (2018).

Como mencionado anteriormente, a extração das componentes principais de um conjunto de dados com  $v$  variáveis e  $n$  observações, resulta em uma componente principal, na forma de um vetor, para cada variável  $v$ , cada uma com  $v$  variáveis. Para o caso das nuvens de colisão, o processo gera três componentes principais (PCs), cada uma com valores em  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Estes vetores, que compõem o conjunto das componentes principais, são os que melhor representam a dispersão dos dados presentes no conjunto original. O conjunto trata-se de um sistema de coordenadas e as componentes principais são ortogonais entre si.

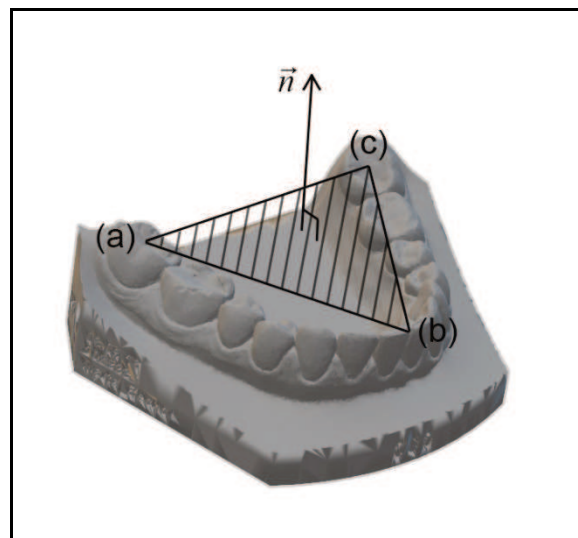
A Figura 13 demonstra como as componentes foram posicionadas em relação às nuvens de pontos de colisão, após sua extração, e como serão apresentadas na

seção relacionada a demonstração de resultados. As retas vermelha, verde e azul, correspondem às componentes PC1, PC3 e PC2, nesta ordem.

As componentes estão dispostas conforme a variabilidade dos dados, sendo a PC1 a que representa o eixo no qual os dados têm maior variabilidade, seguida pela PC2, que representa o eixo que tem a segunda maior variabilidade e, finalmente, PC3 que representa o eixo que tem a terceira maior variabilidade. Ao se considerar que todas as componentes extraídas são perpendiculares entre si e as componentes PC1 e PC2 são paralelas ao plano que melhor representa a dispersão dos pontos das nuvens de colisão, optou-se por considerar a PC3, portanto, como o vetor normal que representa a orientação deste plano composto pelas PC1 e PC2.

O conjunto que contém as três componentes principais representa um sistema de coordenadas por si só e, portanto, possui uma orientação espacial em relação ao sistema de coordenadas no qual está inserido e, com isso, podem ser encontradas suas inclinações em relação aos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , por exemplo.

Figura 14 - Delimitação do Plano Oclusal



Fonte: do autor (2018).

Entretanto, encontrar a inclinação em relação aos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , apesar de gerar um resultado quantitativo, não tem significado, pois, o sistema original de coordenadas no qual os modelos I, II e III inseridos não necessariamente utiliza algum ponto de referência em relação ao ser humano. Portanto, o referencial de interesse a partir do qual deve-se avaliar a inclinação das nuvens de colisão é o Plano Oclusal. Para tal, foi necessário encontrar o Plano Oclusal dos modelos para

que, então, pudesse ser calculado o ângulo das nuvens de colisão em relação a este plano.

O Plano Oclusal de cada um dos modelos, foi estabelecido de acordo com de Interlandi (1968, apud CARVALHO, 2014). Foram estabelecidos três pontos, de modo que se pôde extrair um plano a partir destes; três pontos são posicionados como segue: (a) no ponto médio da face oclusal onde ocorre oclusão entre os últimos molares do lado direito; (b) no ponto central onde há oclusão entre os incisivos centrais superior e inferior; e (c) no ponto médio da face oclusal onde ocorre oclusão entre os últimos molares do lado esquerdo. Na Figura 14 são demonstrados três pontos, (a), (b) e (c), cada um representa um dos itens mencionados anteriormente, de maneira respectiva.

A localização destes três pontos está diretamente relacionada às colisões detectadas durante as simulações e suas respectivas localizações que foram arbitrariamente definidas conforme o método supracitado. Entretanto, embora em máxima intercuspidação, nem todos os modelos apresentaram oclusão nas regiões nas quais os três pontos - utilizados para se encontrar o Plano Oclusal - deveriam ser localizados. Para este último caso, presente nas simulações de Oclusão Estática com os modelos II e III, os pontos foram aproximados não pelas suas nuvens de colisões, mas pelas geometrias de suas respectivas malhas.

Dados estes três pontos, há um plano que os tange simultaneamente, como na Figura 14. Este plano, que também pode ser representado por um polígono, representa o Plano Oclusal.

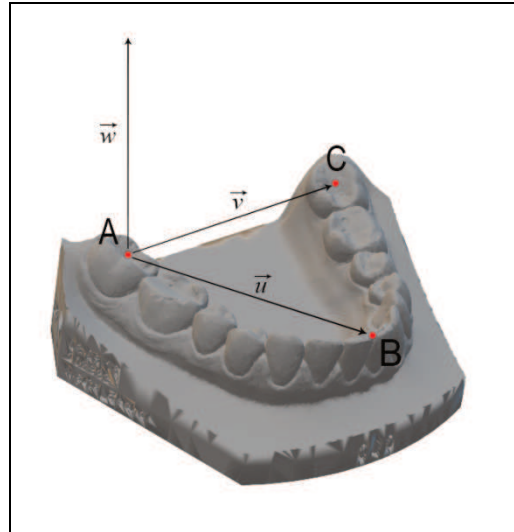
A análise do plano possibilita encontrar o seu vetor normal, presente na Figura 15, representado pelo vetor  $\vec{w}$ , que está posicionado em um ângulo reto, ou seja,  $90^\circ$ , em relação ao plano e a qualquer vetor que se encontre paralelo à superfície do plano. Definir o vetor normal do Plano Oclusal é importante para que se possa encontrar o ângulo de inclinação deste em relação às componentes principais extraídas das nuvens de colisão de cada uma das simulações porque o Plano Oclusal é o sistema de referência a partir do qual serão analisadas as inclinações das componentes e não o sistema cartesiano de coordenadas na qual os modelos estão inseridos.

Conforme definido por Pogorelov (1980), o produto vetorial obtido a partir de dois vetores  $\vec{a}$  e  $\vec{b}$  é um terceiro vetor  $\vec{a} \times \vec{b}$ . Se pelo menos um dos vetores for igual a zero ou paralelo, então o vetor resultante é igual a zero; do contrário, o vetor



resultante, em seu valor absoluto, é igual a área do paralelogramo construído cujos lados são os vetores  $\vec{a}$  e  $\vec{b}$ , é perpendicular ao plano paralelo aos vetores  $\vec{a}$  e  $\vec{b}$ , portanto, perpendicular a estes vetores.

Figura 15 - Demonstração do vetor  $\vec{w}$ , resultante do produto vetorial entre  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$



Fonte: do autor (2018).

Como demonstrado na Figura 15, para se encontrar o vetor normal, considerou-se os pontos **A**, **B** e **C**, em vermelho, e, a partir destes pontos, foram definidos dois vetores,  $\vec{u}$  e  $\vec{v}$ , correspondentes aos segmentos de reta  $\overline{AB}$  e  $\overline{AC}$ , respectivamente, de modo a encontrar  $\vec{w}$ , vetor resultante da aplicação do produto vetorial entre ambos. Este processo aconteceu de maneira análoga ao citado acima, onde os vetores  $\vec{u}$ ,  $\vec{v}$  e  $\vec{w}$  correspondem aos vetores  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  e  $\vec{a} \times \vec{b}$ . Portanto, o vetor  $\vec{w}$  equivale ao vetor normal, que é perpendicular à face paralela ao Plano Oclusal cujos lados são definidos pelos segmentos de reta  $\overline{AB}$  e  $\overline{AC}$ .

O passo seguinte a encontrar o vetor normal do Plano Oclusal, que representa sua orientação, foi encontrar a sua inclinação em relação às componentes principais, pois, uma inclinação de uma entidade no espaço tridimensional possui grandezas para todo os eixos no sistema de coordenadas no qual está inserido. Um vetor que inserido no  $\square^2$ , por exemplo, possui orientação em relação aos eixos  $x$  e  $y$ ; da mesma forma que um vetor inserido no  $\square^3$  possui orientação em relação aos eixos  $x$ ,  $y$ , e  $z$ . Para o caso em questão, a normal do Plano Oclusal possui inclinação em relação à PC1, PC2 e PC3, eixos do espaço vetorial gerado pela extração das componentes principais, inserido dentro do  $\square^3$ .

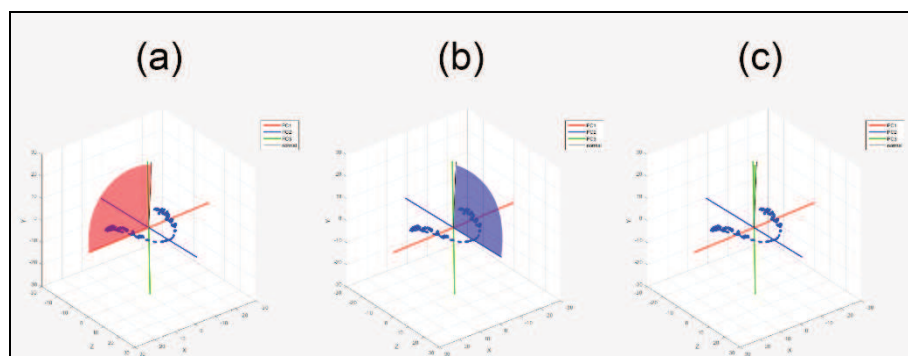
A inclinação entre dois vetores pode ser obtida por meio da aplicação do produto escalar entre  $\vec{a}$  e  $\vec{b}$  em razão do valor resultante da multiplicação do módulo de  $\vec{a}$  pelo módulo de  $\vec{b}$ . Conforme a equação que segue:

$$\cos \alpha = \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| \cdot |\vec{b}|},$$

onde  $\vec{a}$  e  $\vec{b}$  são os vetores de interesse e  $\alpha$  é o ângulo entre estes vetores. Este procedimento foi realizado três vezes para cada um dos modelos, pois foi necessário encontrar o ângulo do vetor normal do Plano Oclusal em relação à PC1, à PC2 e à PC3.

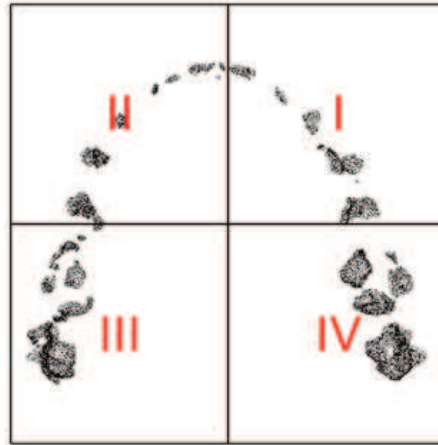
A inclinação do vetor normal e cada uma das três componentes principais obtidas é definida como na Figura 16. Os itens (a), (b) e (c) demonstram, nesta ordem, a inclinação do vetor normal em relação às componentes PC1, PC2 e PC3; desta forma, a inclinação em relação à PC1, representada em vermelho, tem seu arco colorido em vermelho; a inclinação em relação à PC2, representada em azul, tem seu arco colorido em azul; e a inclinação em torno da PC3, representada em verde, tem seu arco colorido em verde.

Figura 16 - Ângulo do vetor normal em relação às componentes principais. Os itens (a), (b) e (c) demonstram, nesta ordem, a inclinação do vetor normal em relação às componentes PC1, PC2 e PC3



Fonte: do autor (2018).

Figura 17 - Nuvens de colisões do modelo I, malha da maxila, separadas em quatro quadrantes



Fonte: do autor (2018).

Após a obtenção das inclinações do vetor normal em relação a cada uma das componentes principais, foi avaliada a distribuição das colisões. Para isso os pontos de colisão foram distribuídos e interpretados na forma de quatro quadrantes. Os quadrantes, I, II, III e IV, estabelecidos de forma crescente no sentido anti-horário, conforme Figura 17, representam, respectivamente, o lado esquerdo parte anterior, o lado direito parte anterior, o lado direito parte posterior e o lado esquerdo parte posterior.

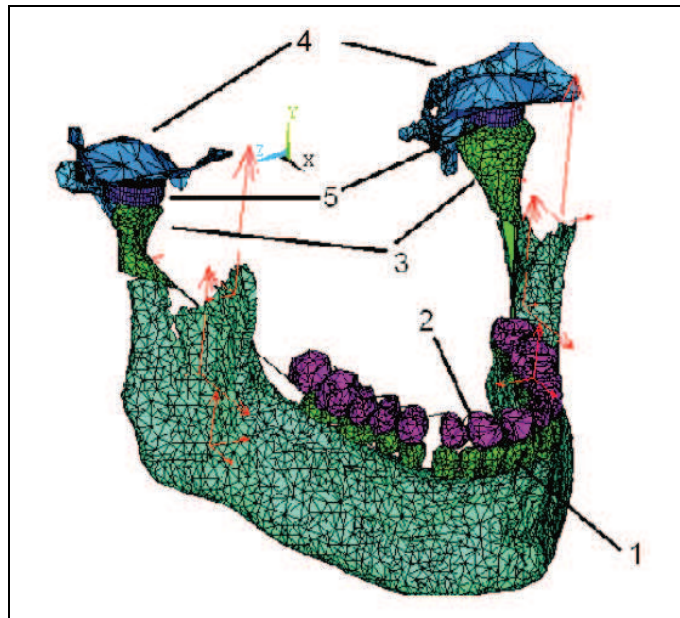
#### 4.2.2 Simulação da oclusão dinâmica

Para simular a oclusão dinâmica, são necessárias simulações dos movimentos excêntricos realizados pela mandíbula em relação à maxila. Como descrito anteriormente a movimentação da mandíbula é realizada por meio da contração dos músculos masseter, temporal, pterigoideo medial e pterigoideo lateral. Cada um destes músculos possui uma capacidade máxima de força que exercida em sua contração e essa força se está diretamente relacionada ao corte da seção reta de cada músculo, conforme Koolstra (1992).

A Figura 18 demonstra o modelo proposto por Pileickiene et al. (2007) em seu trabalho. A geometria completa possui as seguintes partes, acompanhadas de suas respectivas legendas: arcadas dentárias mandibular (1) e maxilar (2), côndilos mandibulares (3), fossas mandibulares do osso temporal (4) e os modelos sólidos

dos discos articulares (5). Adicionalmente, a geometria foi utilizada como base para o posicionamento dos músculos e, posteriormente, alterada de modo que apenas as áreas de interesse para as simulações e medições foram preservadas.

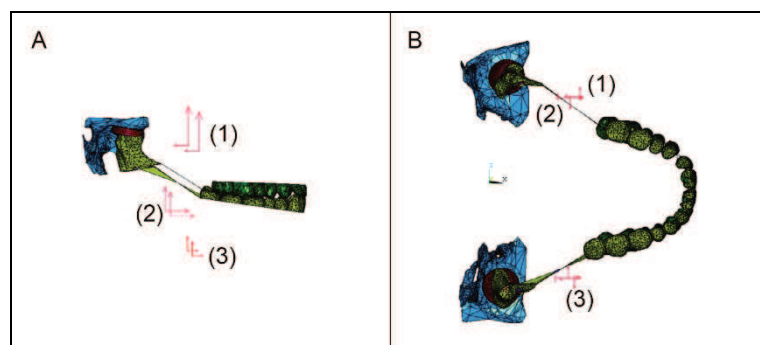
Figura 18 - Modelo proposto por Pileickiene et al. (2007)



Fonte: Pileickiene et al. (2007).

A Figura 19 demonstra como Pileickiene et al. (2007) posicionou os músculos, em relação à mandíbula, onde A representa o Plano Sagital; B representa o Plano Transversal; e os itens (1), (2) e (3) representam, respectivamente, mais claramente observados em A, os pares de músculos temporais, masseteres e o pterigoideos mediais. As setas, em vermelho, representam a direção da aplicação das forças e suas origens, para cada músculo.

Figura 19 - Posicionamento dos músculos utilizado por Pileickiene et al. (2007)

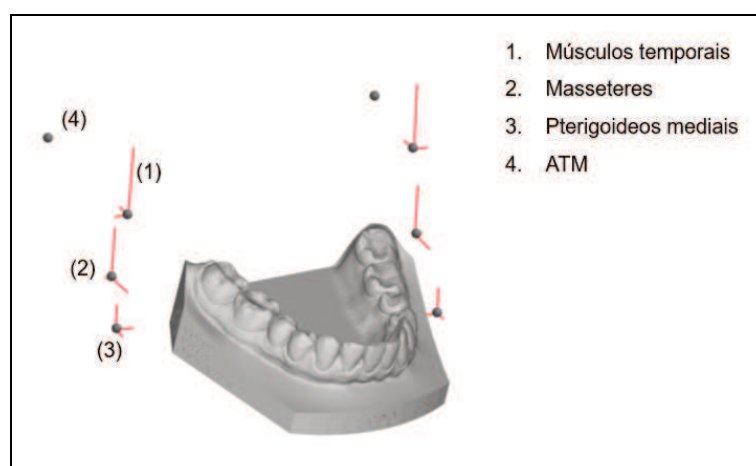


Fonte: Pileickiene et al. (2007).

Deste modo, neste trabalho foi utilizado o modelo proposto por Pileicikiene et al. (2007) e as forças responsáveis por simular os músculos diretamente relacionados à movimentação da mandíbula em relação à maxila foram posicionadas de maneira análoga. Sobre a aplicação das forças, se optou por utilizar 25% da capacidade máxima de força muscular disponível para cada músculo para se realizar os movimentos da oclusão dinâmica, de forma análoga ao modelo proposto por Pileicikiene et al. (2007), onde, também foi utilizada apenas uma fração da capacidade máxima de força muscular.

A Figura 20 ilustra como foram posicionados os vetores análogos aos músculos, conforme trabalho de Pileicikiene et al. (2007).

Figura 20 - Posicionamento dos vetores correspondentes aos grupos musculares envolvidos na mastigação



Fonte: do autor (2018).

Após definidos os locais apropriados para a aplicação das forças, conforme a direção dos grupos musculares, foram realizadas as simulações. Cada simulação para cada um dos modelos ocorreu em três etapas:

- a) simulação da oclusão dinâmica unilateral para lado direito, na qual foram aplicadas forças apenas para grupos musculares do lado direito;
- b) simulação da oclusão dinâmica unilateral para o lado esquerdo, na qual foram aplicadas forças apenas para os grupos musculares do lado esquerdo; e
- c) simulação da oclusão dinâmica bilateral, na qual foram aplicadas forças para ambos os grupos musculares.

Durante estas etapas foram armazenadas as iterações, quantas e quais colisões foram detectadas para cada iteração e, com as iterações conhecidas, foi possível estabelecer uma linha do tempo, de modo a demonstrar qual a ordem e em que momento ocorreram as colisões detectadas entre as superfícies dos dentes, de ambas as malhas.

Adicionalmente, foi armazenada a orientação da mandíbula durante a simulação, de modo que essa orientação, com inclinações em relação aos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , pudesse ser comparada com o plano oclusal de cada modelo. Assim como as simulações da oclusão estática, estas informações resultantes das simulações das oclusões dinâmicas foram persistidas para análise posterior. Estas informações são as que seguem:

- a) nome: nome do objeto testado;
- b) iteração: iteração, dentro da simulação, na qual foi detectada a colisão;
- c) coordenada  $x$ : posição da colisão dentro do eixo  $x$ ;
- d) coordenada  $y$ : posição da colisão dentro do eixo  $y$ ;
- e) coordenada  $z$ : posição da colisão dentro do eixo  $z$ ;
- f) rotação em  $x$ : rotação da malha em torno do eixo  $x$ ;
- g) rotação em  $y$ : rotação da malha em torno do eixo  $y$ ;
- h) rotação em  $z$ : rotação da malha em torno do eixo  $z$ .

Para as simulações das oclusões dinâmicas para cada modelo e cada uma de suas respectivas malhas, foram extraídas as componentes principais dos pontos em que há maior e menor quantidade de colisões detectadas. Desta forma foram obtidas as inclinações destas nuvens em relação ao vetor normal do Plano Oclusal e, portanto, a inclinação de cada nuvem em relação ao próprio plano.

Adicionalmente, ao longo das simulações, as colisões se acumularam da mesma forma que ocorreu durante a simulação da oclusão estática, nos supracitados quadrantes. Esta informação possibilitou avaliar visualmente se, durante as simulações, em quais quadrantes e como, ao longo das iterações durante cada processo de simulação, as colisões se aglutinaram ou quais superfícies de quais dentes fizeram contato e em que momento esse contato ocorreu.

## 5 RESULTADOS

Nesta seção serão demonstrados os resultados obtidos a partir das simulações realizadas relacionadas as oclusões estática e dinâmica, anteriormente detalhadas.

### 5.1 OCLUSÃO ESTÁTICA

Após o pré-processamento dos dados, de modo a reduzir a quantidade de vértices duplicados dos modelos I, II e III, foram realizadas as simulações, como descrito na seção anterior.

Tabela 5 - Colisões detectadas durante a oclusão estática, sem pontos redundantes

<b>Modelo</b>	<b>Malha</b>	<b>Colisões detectadas</b>
modelo I	maxila	32.464
	mandíbula	32.472
modelo II	maxila	17.178
	mandíbula	17.171
modelo III	maxila	34.788
	mandíbula	34.791

Fonte: do autor (2018).

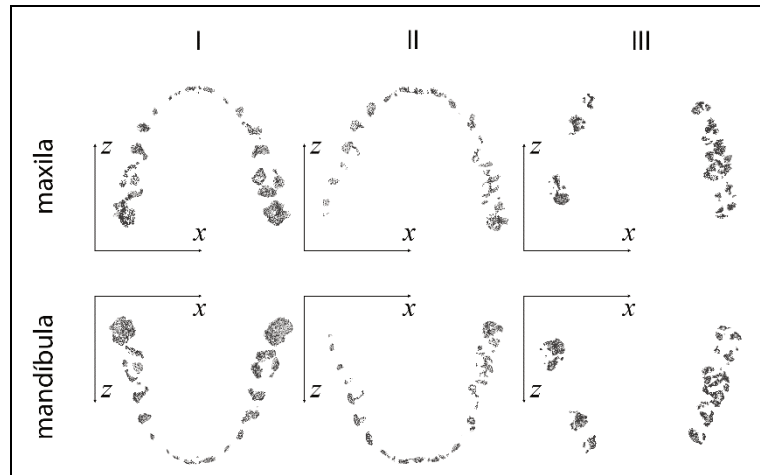
As colisões detectadas, para cada um dos modelos, durante a Oclusão Estática, são discriminadas conforme a Tabela 5.

Na Figura 21, observa-se as nuvens de pontos acima descritas, compostas pelos pontos capturados das simulações da Oclusão Estática. Na linha superior, encontram-se as nuvens de colisões detectadas para cada uma das maxilas dos modelos I, II e III, representados por (a), (b) e (c); na linha inferior, o mesmo acontece para as nuvens de pontos detectados de colisões para cada uma das mandíbulas para cada um dos modelos. Os eixos x e z são descritos para cada uma das malhas, e representam os eixos horizontal e vertical, na imagem, respectivamente.

Para as componentes principais, os vetores correspondentes às componentes PC1, PC2 e PC3, extraídas das nuvens de colisões, da maxila e mandíbula, dos modelos I, II e III, são descritos conforme Tabelas 6, 7 e 8. Estes vetores, como

detalhado na seção sobre componentes principais, são os vetores que melhor representam como os dados estão distribuídos, sua variabilidade e sua orientação.

Figura 21 - Nuvens de colisões detectadas durante o processo de detecção de colisão durante a oclusão estática



Fonte: do autor (2018).

Tabela 6 - Detalhamento da PC1, extraída das nuvens de colisões a partir da simulação da oclusão estática

		PC1		
Modelo	Malha	x	y	z
modelo I	maxila	0,9996	0,0226	-0,0157
	mandíbula	0,9997	0,0191	-0,0132
modelo II	maxila	0,868	0,4966	0,0027
	mandíbula	0,8686	0,4955	0,0058
modelo III	maxila	0,9997	0,0035	-0,0223
	mandíbula	0,9999	0,0041	-0,0165

Fonte: do autor (2018).

São detalhadas duas componentes principais para cada modelo, como já mencionado anteriormente, pois foram capturadas duas nuvens de pontos de colisão para cada. A criação destas nuvens se justifica porque existe a possibilidade de os conjuntos de colisões detectadas na maxila e na mandíbula não serem iguais. É possível, por exemplo, que uma cúspide de um dente da maxila, toque diversos pontos na superfície dos dentes da mandíbula e vice-versa.



Dadas estas duas nuvens de colisão, foram extraídas, de cada uma, suas componentes principais. As componentes PC1, PC2 e PC3 representam, nessa ordem, os eixos nos quais há maior variabilidade dos dados, do maior para o menor.

Tabela 7 - Detalhamento da PC2, extraída das nuvens de colisões a partir da simulação da oclusão estática

<b>PC2</b>				
<b>Modelo</b>	<b>Malha</b>	<b>x</b>	<b>y</b>	<b>z</b>
modelo I	maxila	-0,0224	0,9996	0,0153
	mandíbula	-0,0190	0,9998	0,0086
modelo II	maxila	-0,4925	0,8601	0,1326
	mandíbula	-0,4917	0,8604	0,1339
modelo III	maxila	-0,0012	0,9946	0,1035
	mandíbula	-0,0023	0,9944	0,1058

Fonte: do autor (2018).

Tabela 8 - Detalhamento da PC3, extraída das nuvens de colisões a partir da simulação da oclusão estática

<b>PC3</b>				
<b>Modelo</b>	<b>Malha</b>	<b>x</b>	<b>Y</b>	<b>z</b>
modelo I	maxila	0,0160	-0,015	0,9998
	mandíbula	0,0134	-0,0084	0,9999
modelo II	maxila	0,0636	-0,1165	0,9912
	mandíbula	0,0613	-0,1192	0,9910
modelo III	maxila	0,0225	-0,1034	0,9944
	mandíbula	0,0169	-0,1057	0,9943

Fonte: do autor (2018).

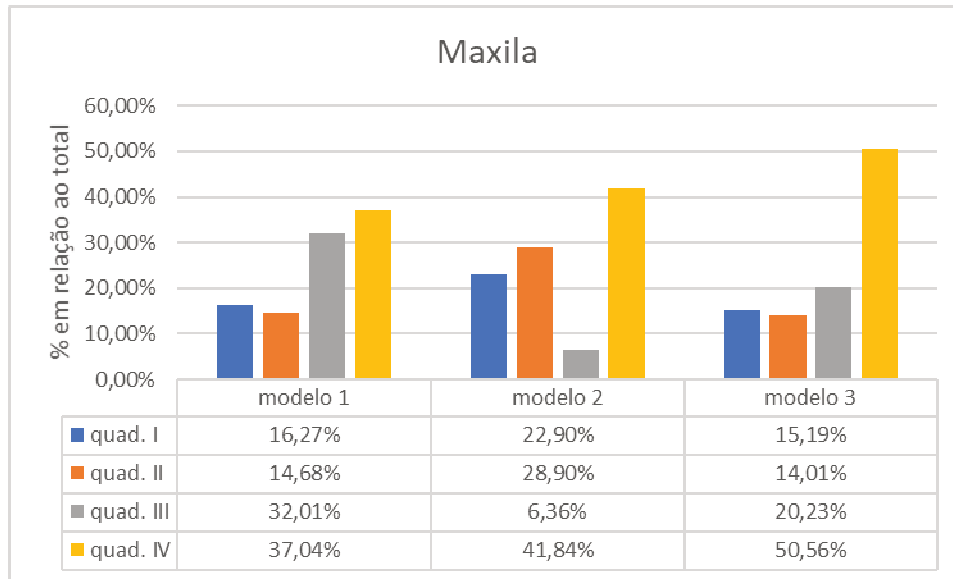
Tabela 9 - Ângulos de cada componente principal em relação ao vetor normal do Plano Oclusal, durante a simulação da oclusão estática

<b>Modelo</b>	<b>Malha</b>	<b>∠PC1</b>	<b>∠PC2</b>	<b>∠PC3</b>
modelo I	maxila	89,3462°	85,6852°	4,3642°
	mandíbula	88,3548°	87,5849°	2,9228°
modelo II	maxila	86,4082°	75,1670°	15,2812°
	mandíbula	86,0989°	74,9136°	15,6060°
modelo III	maxila	87,4519°	78,5110°	11,7757°
	mandíbula	87,5622°	82,4895°	7,9006°

Fonte: do autor (2018).

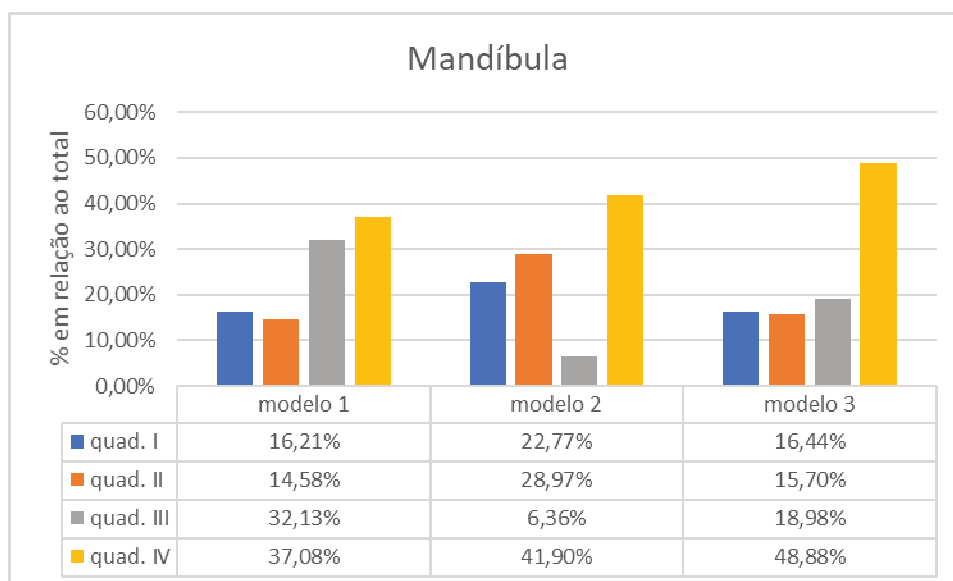
Uma vez encontradas as componentes principais que melhor representam a distribuição de pontos, foi possível, a partir de cada componente, encontrar o seu ângulo de inclinação em relação ao vetor normal do Plano Oclusal, portanto, a inclinação ao próprio plano. A Tabela 9 demonstra as inclinações encontradas entre as componentes, PC1, PC2 e PC3, em relação ao vetor normal do Plano Oclusal.

Figura 22 - Distribuição das colisões das maxilas, discriminadas em quadrantes



Fonte: do autor (2018).

Figura 23 - Distribuição das colisões das maxilas, discriminadas em quadrantes



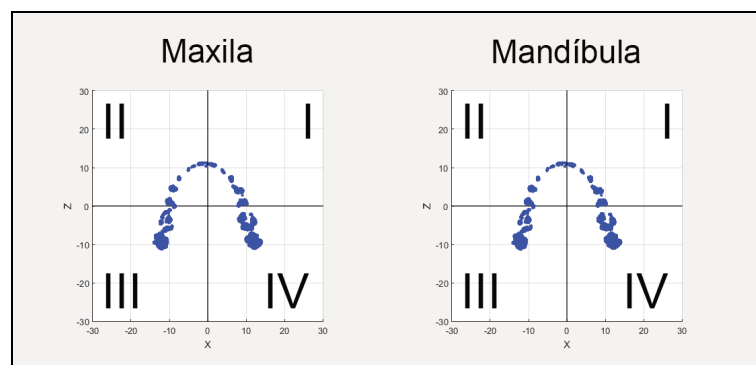
Fonte: do autor (2018).

A separação e avaliação das colisões em quadrantes foi realizada como método adicional para avaliar a distribuição das colisões. Os quadrantes, embora possibilitem avaliar como os pontos estão distribuídos, são utilizados apenas para demonstrar como as colisões estão distribuídas entre o lado direito e esquerdo da nuvem de colisões, e não no sentido anterior (frente) e posterior (trás), pois, há grande diferença entre as superfícies de contato dos dentes anteriores e posteriores.

Portanto, foram comparadas as colisões presentes nos quadrantes I com as do quadrante II, que correspondem aos dentes anteriores do lado esquerdo e aos dentes anteriores do lado direito, respectivamente; e as colisões do quadrante III com as do quadrante IV, que correspondem aos dentes posteriores do lado direito e aos dentes posteriores do lado esquerdo, respectivamente.

As Figuras 22 e 23 demonstram as distribuições das colisões por quadrante das malhas da maxila e mandíbula, respectivamente, dos modelos I, II e III.

Figura 24 - Demonstração das colisões detectadas do modelo I, e seus respectivos quadrantes

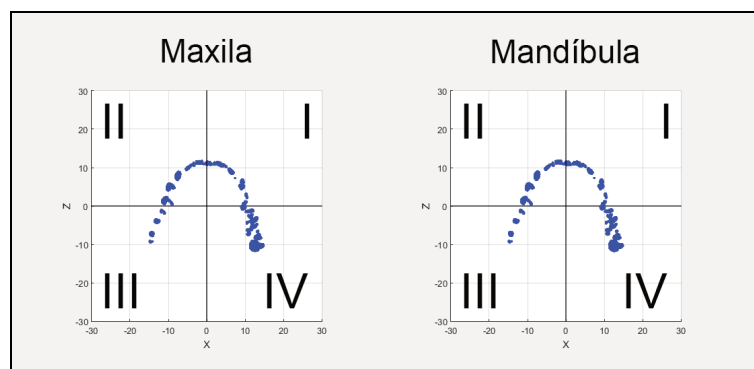


Fonte: do autor (2018).

Para o modelo I, Figura 24, observou-se, na malha da maxila, que os quadrantes I, II, III e IV contém, 16,27%, 14,68%, 32,01% e 37,04% do total de pontos da nuvem de colisões, respectivamente. Na malha da mandíbula, observou-se que pontos contidos nos quadrantes I, II, III e IV representam 16,21%, 14,58%, 32,13% e 37,08% do total de pontos da nuvem de colisões, nesta ordem. Portanto, em estado de máxima intercuspidação, há uma ocorrência maior de colisões entre as superfícies dos dentes do lado esquerdo, tanto na parte anterior quanto na posterior.

Para o modelo II, Figura 25, observou-se, na malha da maxila, que os quadrantes I, II, III e IV contém, 22,90%, 28,90%, 6,36% e 41,84% do total de pontos da nuvem de colisões, respectivamente. Na malha da mandíbula, observou-se que pontos contidos nos quadrantes I, II, III e IV representam 22,77%, 28,97%, 6,36% e 41,90% do total de pontos da nuvem de colisões, nesta ordem. Neste caso, em estado máxima intercuspidação, observou-se, para a metade anterior, que há maior quantidade de colisões do lado direito em relação ao lado esquerdo e, para a metade posterior, que há uma maior incidência de colisões no lado esquerdo em relação ao lado direito.

Figura 25 - Demonstração das colisões detectadas do modelo II, e seus respectivos quadrantes



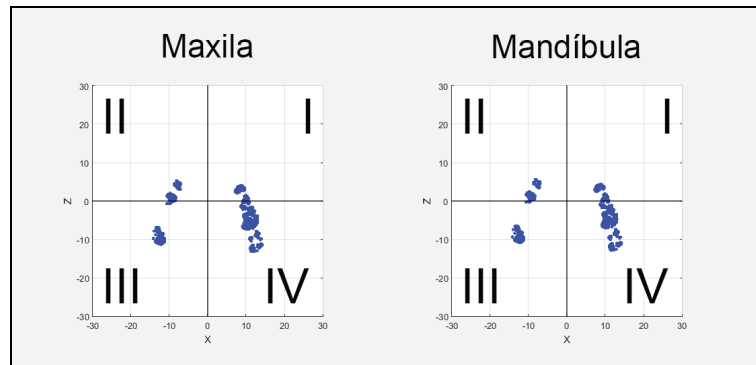
Fonte: do autor (2018).

Para o modelo III, Figura 26, observou-se, na malha da maxila, que os quadrantes I, II, III e IV contém, 15,19%, 14,01%, 20,23% e 50,56% do total de pontos da nuvem de colisões, respectivamente. Na malha da mandíbula, observou-se que pontos contidos nos quadrantes I, II, III e IV representam 16,44%, 15,70%, 18,98% e 48,88% do total de pontos da nuvem de colisões, nesta ordem. Para este caso, observou-se maior quantidade de colisões do lado esquerdo em relação ao lado direito, para a parte anterior e, para parte posterior, maior quantidade de colisões para o lado direito em relação ao lado esquerdo.

As nuvens de colisão foram submetidas a análise de densidade, o que auxilia a ilustrar como os pontos estão distribuídos. Para tal, foi extraída uma matriz a partir dos eixos X e Z das nuvens de pontos e, ao se percorrer cada elemento desta matriz foram contados os itens (neste caso, os pontos) presentes em cada interseção linha-coluna. Esta quantidade de pontos contidos em cada elemento foi armazenada, em

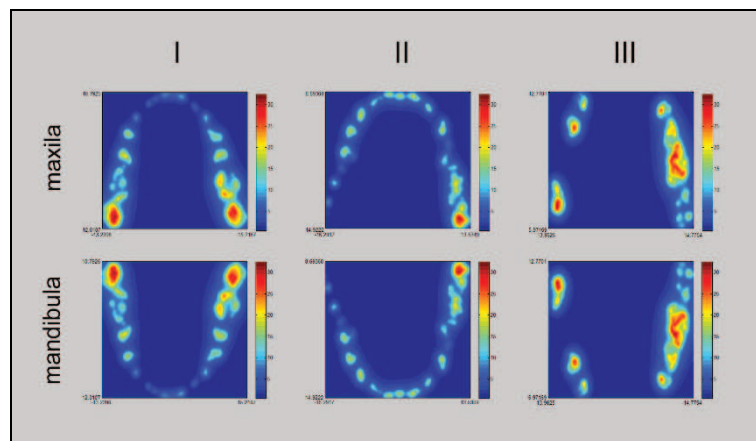
seguida foram encontrados os elementos com a maior e a menor quantidade de pontos para que, por fim, pudesse ser feita uma interpolação entre as cores que representam os elementos da matriz e suas respectivas cores com base na quantidade de pontos que possuem.

Figura 26 - Demonstração das colisões detectadas do modelo III, e seus respectivos quadrantes



Fonte: do autor (2018).

Figura 27 - Mapa de calor das colisões detectadas durante a oclusão estática, onde as colunas representam os modelos I, II e III e as linhas representam suas malhas da maxila e mandíbula



Fonte: do autor (2018).

A Figura 27 evidencia os locais onde há menor e maior quantidade de colisões por pixel nas malhas de colisão, respectivamente representadas pelas cores azul e vermelho a interpolação destas.

Em conjunto com a análise anterior, por quadrante, observou-se que, para o modelo I, a maior parte das colisões se concentra nos quadrantes III e IV, mais

especificamente os dentes 17, 26 e 27, na malha da maxila e 36, 37 e 47, para a malha da mandíbula; para o modelo II, foi identificada uma maior concentração de colisões nos dentes 26 e 27, para a malha da maxila e 36 e 37; e, por fim, para o modelo III foram identificadas uma distribuição maior de colisões para os dentes 16, 25, 26 e 27, na malha da maxila e 35, 36, 37 e 46. Entretanto, embora seja natural que exista uma concentração maior de colisões nos quadrantes III e IV, pois os dentes pré-molares e molares possuem uma maior superfície para que ocorra contato, este mapa de calor possibilita, no processo de avaliação da oclusão estática, que sejam identificados quais dentes possuem maior contato durante a máxima intercuspidação e como estão balanceadas as colisões entre os cúspides de cada dente, por exemplo.

## 5.2 OCLUSÃO DINÂMICA

A simulação da oclusão dinâmica, para todos os modelos, foi realizada conforme descrito na seção anterior.

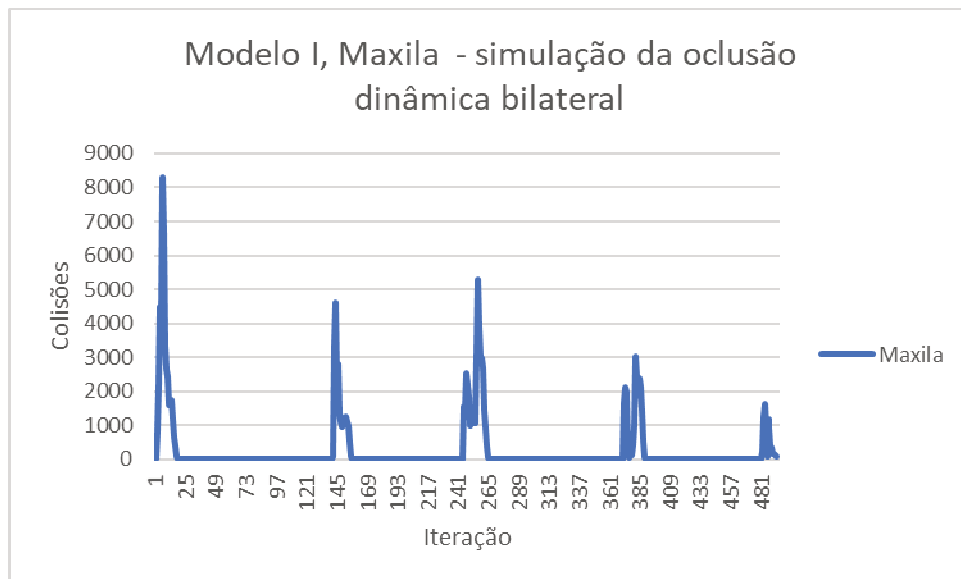
### 5.2.1 Simulação da oclusão dinâmica bilateral

Os resultados obtidos foram organizados de forma temporal de acordo com o momento em que as colisões foram detectadas.

Nas Figuras 28 e 29 são demonstradas as colisões detectadas ao longo da simulação da oclusão dinâmica bilateral. As colisões para as malhas da maxila e mandíbula foram discriminadas em figuras distintas, pois, dado que a diferença entre a quantidade de colisões detectadas por iteração é baixa e a sobreposição das linhas dificultaria a observação.

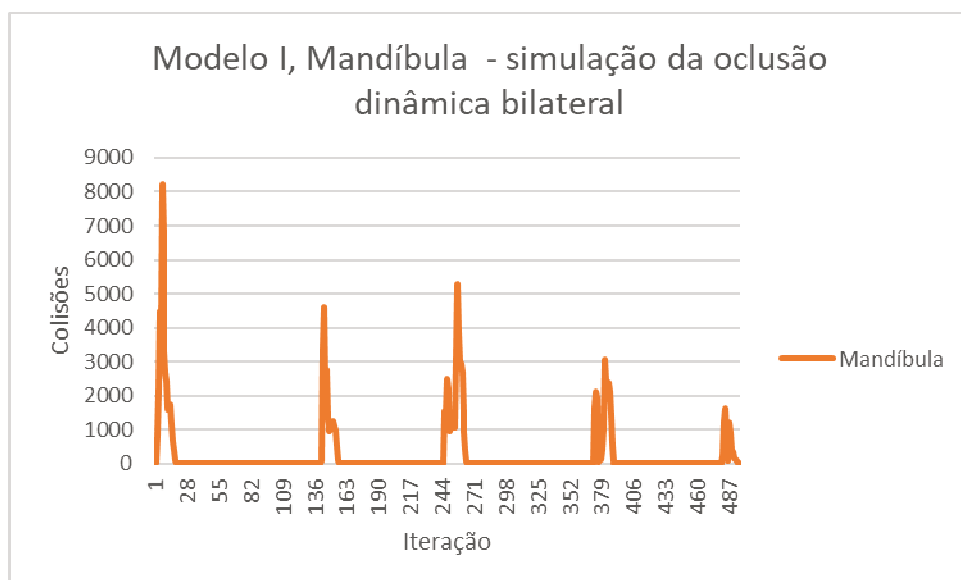
Para avaliação e extração das componentes principais, de modo a encontrar o ângulo de cada malha durante as simulações, optou-se por utilizar a iteração com maior número de colisões, de modo a representar o momento de contato máximo entre os dentes durante as simulações. Esta abordagem foi utilizada durante as simulações das oclusões dinâmicas bilaterais e unilaterais, para ambos os lados.

Figura 28 - Colisões detectadas no modelo I, na malha da maxila durante a simulação da oclusão dinâmica bilateral



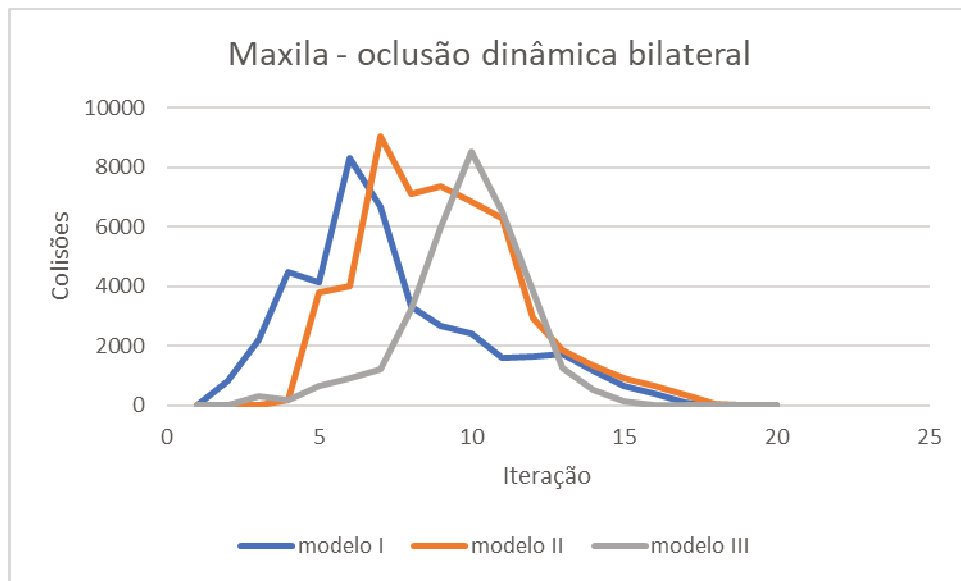
Fonte: do autor (2018).

Figura 29 - Colisões detectadas no modelo I, na malha da mandíbula durante a simulação da oclusão dinâmica bilateral



Fonte: do autor (2018).

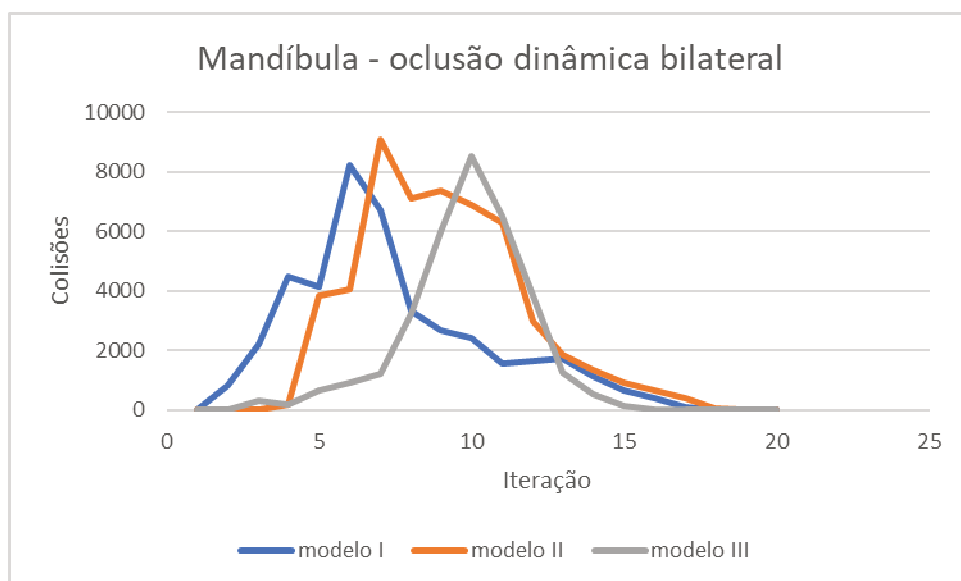
Figura 30 - Trecho de simulação da oclusão dinâmica bilateral nos Modelo I, II e III, na malha da maxila no momento de contato máximo



Fonte: do autor (2018).

As Figuras 30 e 31 demonstram as colisões detectadas nas malhas das maxilas e mandíbulas, nesta ordem, ao longo das iterações durante as simulações das oclusões dinâmicas bilaterais nos Modelos I, II e III.

Figura 31 - Trecho de simulação da oclusão dinâmica bilateral nos Modelo I, II e III, na malha da mandíbula no momento de contato máximo



Fonte: do autor (2018).



A partir das nuvens de colisão obtidas com base nas simulações foram extraídas suas componentes principais. Esta prática possibilitou encontrar a inclinação das nuvens de pontos nos pontos correspondentes ao momento em que há maior quantidade de oclusões entre a arcada dentária superior e inferior.

O processo de extração das componentes principais foi efetuado para todos os três modelos, I, II e III e para cada uma de suas respectivas malhas, da maxila e mandíbula.

Tabela 10 - Detalhamento da PC1, extraída das nuvens de colisões a partir da simulação da oclusão dinâmica bilateral no momento de contato máximo

PC1				
Modelo	Malha	x	y	Z
modelo I	maxila	0,8305	0,5570	0,0000
	mandíbula	0,8341	0,5517	-0,0033
modelo II	maxila	0,8293	0,5587	0,0120
	mandíbula	0,8927	0,3827	0,2381
modelo III	maxila	0,9417	-0,3334	0,0459
	mandíbula	0,9948	-0,0642	-0,0785

Fonte: do autor (2018).

Tabela 11 - Detalhamento da PC2, extraída das nuvens de colisões a partir da simulação da oclusão dinâmica bilateral no momento de contato máximo

PC2				
Modelo	Malha	x	y	z
modelo I	maxila	-0,5569	0,8305	0,0062
	mandíbula	-0,5516	0,8340	0,0157
modelo II	maxila	-0,5552	0,8213	0,1308
	mandíbula	-0,4469	0,8201	0,3574
modelo III	maxila	0,1877	0,6336	0,7506
	mandíbula	0,0482	0,9804	-0,1909

Fonte: do autor (2018).

Nas Tabela 10, 11 e 12 são detalhadas as componentes principais encontradas a partir das nuvens de colisões resultantes com base na simulação da oclusão dinâmica bilateral. São discriminadas as malhas para cada um dos modelos, pois, desta forma, é possível de se entender como e em que momento ocorreram as colisões e suas respectivas contrapartidas, de modo que, para cada colisão

detectada na malha da maxila, existe uma colisão correspondente na malha da mandíbula no mesmo tempo  $T$ .

A partir das componentes encontradas com a simulação da oclusão dinâmica bilateral, foram extraídas suas orientações em relação ao Plano Oclusal de cada um dos modelos. O Plano Oclusal permanece o mesmo, seguindo a definição de Interlandi, conforme Carvalho (2014).

Tabela 12 - Detalhamento da PC3, extraída das nuvens de colisões a partir da simulação da oclusão dinâmica bilateral no momento de contato máximo

PC3				
Modelo	Malha	x	y	z
modelo I	maxila	0,0035	-0,0051	1,0000
	mandíbula	0,0114	-0,0113	0,9999
modelo II	maxila	0,0632	-0,1152	0,9913
	mandíbula	-0,0584	-0,4255	0,9031
modelo III	maxila	0,2793	0,6982	-0,6592
	mandíbula	0,0893	0,1862	0,9785

Fonte: do autor (2018).

As inclinações encontradas durante o momento de contato máximo entre as superfícies das arcadas dentárias são descritas conforme Tabela 13.

Tabela 13 - Ângulos de cada componente principal em relação ao vetor normal do Plano Oclusal, durante a simulação da oclusão dinâmica bilateral

Modelo	Malha	$\angle PC1$	$\angle PC2$	$\angle PC3$
modelo I	maxila	87,9488°	86,8817°	3,7336°
	mandíbula	89,9095°	87,0021°	2,9992°
modelo II	maxila	85,3583°	75,5544°	15,2041°
	mandíbula	73,6482°	61,6222°	33,5324°
modelo III	maxila	89,5504°	36,4970°	53,5067°
	mandíbula	83,8649°	84,4748°	8,2706°

Fonte: do autor (2018).

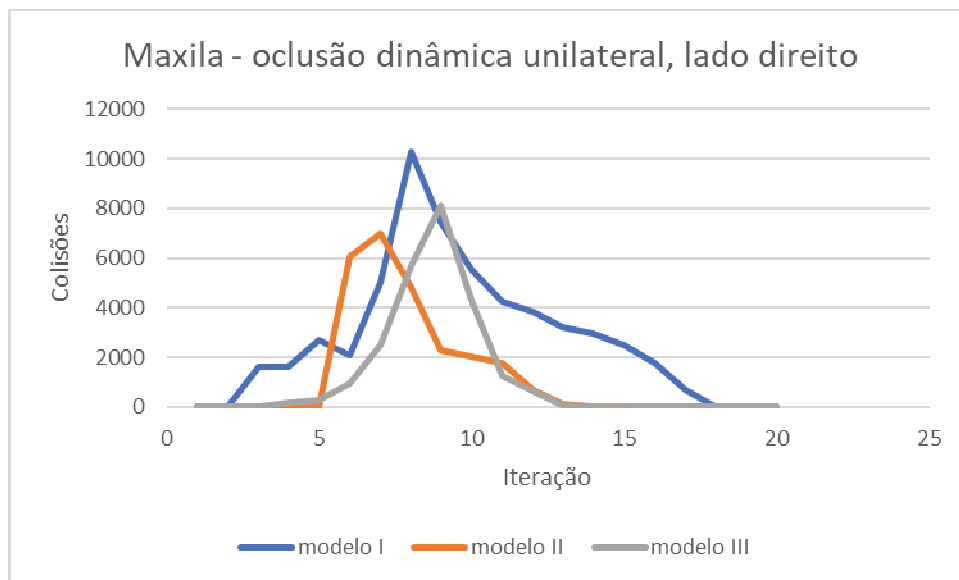
### 5.2.2 Simulação da oclusão dinâmica unilateral

Em relação as colisões detectadas durante as simulações laterais, foi observado que estas colisões não necessariamente representam apenas colisões para o lado de interesse durante a simulação. Isto ocorre porque, como os grupos

musculares foram fixados relacionando a maxila e a mandíbula de forma análoga aos principais grupos musculares correspondentes ao processo de mastigação, é natural que, no momento em que qualquer um destes músculos ou grupo de músculos seja estimulado, a mandíbula se mova de acordo e dentro de suas limitações, pois há interdependência entre estes, a mandíbula e a maxila.

As Figuras 32 e 33 ilustram as colisões detectadas para as simulações unilaterais do lado direito detectadas nas malhas da maxila e da mandíbula, respectivamente, discriminadas por modelo.

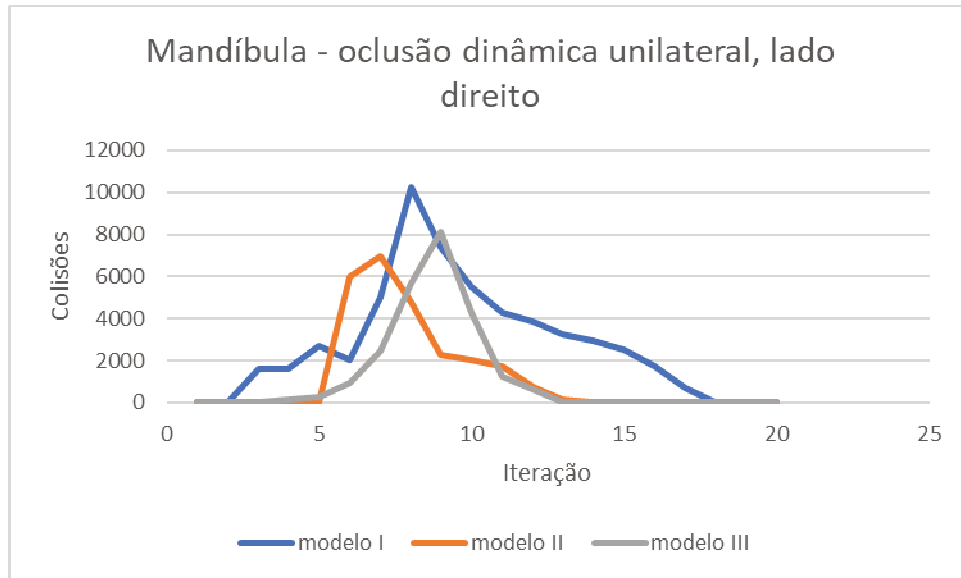
Figura 32 - Trecho de simulação da oclusão dinâmica unilateral do lado direito, malha da maxila no momento de contato máximo



Fonte: do autor (2018).

A partir das nuvens de colisão obtidas com base nas simulações unilaterais dos lados esquerdos e direitos foram extraídas suas componentes principais que melhor representam a nuvem de pontos no momento em que há o maior contato entre as superfícies dos dentes durante a simulação e, como realizado com as simulações das oclusões bilaterais, a partir da extração destas componentes foi possível encontrar a orientação das nuvens de pontos e, portanto, suas inclinações em relação ao vetor normal do Plano Oclusal. Este processo de extração das componentes principais foi efetuado para todos os três modelos, I, II e III e para cada uma de suas respectivas malhas, da maxila e mandíbula.

Figura 33 - Trecho de simulação da oclusão dinâmica unilateral do lado direito, malha da mandíbula no momento de contato máximo



Fonte: do autor (2018).

As componentes principais extraídas a partir das nuvens de colisão para as simulações unilaterais do lado direito são descritas conforme tabelas 14, 15 e 16.

As inclinações encontradas durante o momento de contato máximo entre as superfícies das arcadas dentárias são descritas conforme Tabela 17.

Tabela 14 - Detalhamento da PC1, extraída das nuvens de colisões a partir da simulação da oclusão dinâmica unilateral do lado direito, no momento de contato máximo

		PC1		
Modelo	Malha	x	y	z
modelo I	maxila	0,8665	0,4991	-0,0085
	mandíbula	0,8672	0,4978	-0,0111
modelo II	maxila	0,7165	0,6974	0,0173
	mandíbula	0,6167	0,7559	0,2198
modelo III	maxila	0,9989	0,0468	0,0088
	mandíbula	0,9942	0,1071	-0,0053

Fonte: do autor (2018).

Tabela 15 - Detalhamento da PC2, extraída das nuvens de colisões a partir da simulação da oclusão dinâmica unilateral do lado direito, no momento de contato máximo

PC2				
Modelo	Malha	x	y	z
modelo I	maxila	-0,4988	0,8663	0,0283
	mandíbula	-0,4975	0,8672	0,0224
modelo II	maxila	-0,6919	0,7072	0,1452
	mandíbula	0,6723	-0,6510	0,3526
modelo III	maxila	-0,0269	0,7077	-0,7060
	mandíbula	-0,1065	0,9810	-0,1623

Fonte: do autor (2018).

Tabela 16 - Detalhamento da PC3, extraída das nuvens de colisões a partir da simulação da oclusão dinâmica unilateral do lado direito, no momento de contato máximo

PC3				
Modelo	Malha	x	y	z
modelo I	maxila	0,0215	-0,0203	0,9996
	mandíbula	0,0208	-0,0139	0,9997
modelo II	maxila	0,0891	-0,1160	0,9892
	mandíbula	-0,4096	0,0696	0,9096
modelo III	maxila	-0,0393	0,7050	0,7081
	mandíbula	-0,0122	0,1620	0,9867

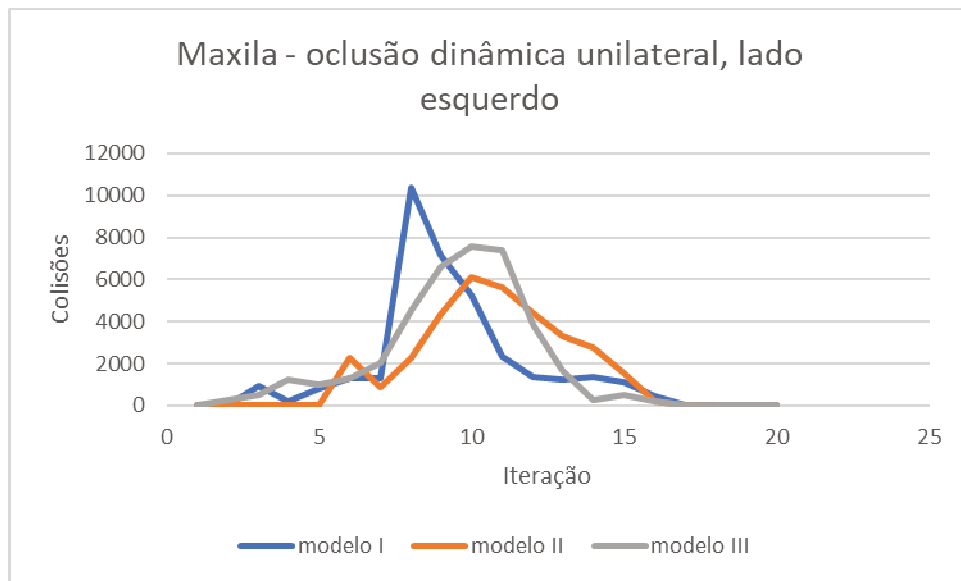
Fonte: do autor (2018).

Tabela 17 - Ângulos de cada componente principal em relação ao vetor normal do Plano Oclusal, durante a simulação da oclusão dinâmica unilateral do lado direito, no momento de contato máximo

Modelo	Malha	$\angle$ PC1	$\angle$ PC2	$\angle$ PC3
modelo I	maxila	88,6252°	85,4808°	4,7245°
	mandíbula	89,5098°	86,6028°	3,4325°
modelo II	maxila	83,8841°	75,5649°	15,7295°
	mandíbula	71,3675°	75,5626°	23,9077°
modelo III	maxila	89,4677°	50,6906°	39,3145°
	mandíbula	89,0027°	86,3157°	3,8172°

Fonte: do autor (2018).

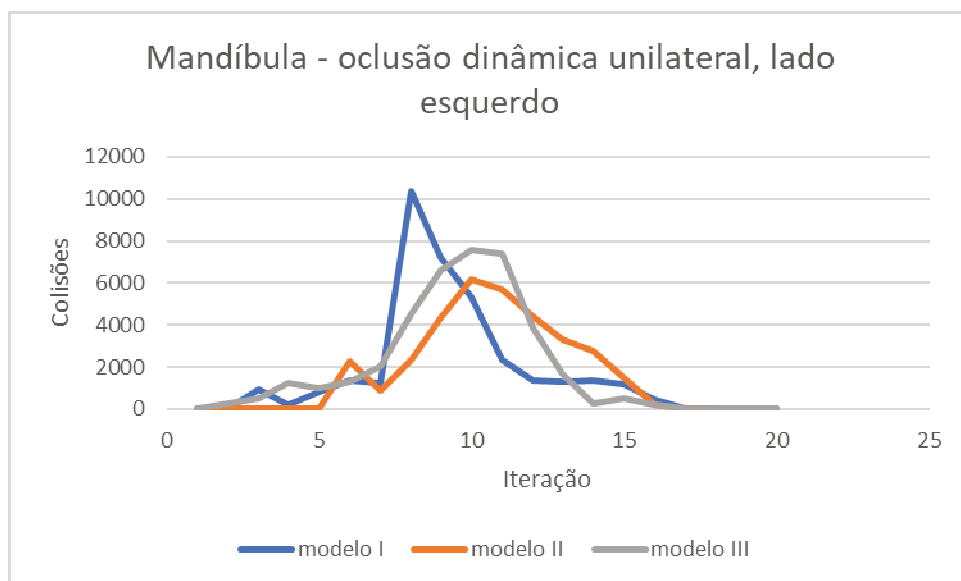
Figura 34 - Trecho de simulação da oclusão dinâmica unilateral do lado esquerdo, malha da maxila no momento de contato máximo



Fonte: do autor (2018).

As componentes principais extraídas a partir das nuvens de colisão para as simulações unilaterais do lado direito são descritas conforme tabelas 18, 19 e 20.

Figura 35 - Trecho de simulação da oclusão dinâmica unilateral do lado esquerdo, malha da mandíbula no momento de contato máximo



Fonte: do autor (2018).

Tabela 18 - Detalhamento da PC1, extraída das nuvens de colisões a partir da simulação da oclusão dinâmica unilateral do lado esquerdo, no momento de contato máximo

PC1				
Modelo	Malha	x	y	z
modelo I	maxila	0,8404	0,5418	-0,0165
	mandíbula	0,8426	0,5379	-0,0275
modelo II	maxila	0,8156	0,5786	-0,0049
	mandíbula	0,8794	0,3579	0,3140
modelo III	maxila	0,8537	-0,5081	-0,1143
	mandíbula	0,9622	-0,2533	-0,0997

Fonte: do autor (2018).

Tabela 19 - Detalhamento da PC2, extraída das nuvens de colisões a partir da simulação da oclusão dinâmica unilateral do lado esquerdo, no momento de contato máximo

PC2				
Modelo	Malha	x	y	z
modelo I	maxila	-0,5420	0,8398	-0,0318
	mandíbula	-0,5384	0,8425	-0,0170
modelo II	maxila	-0,5736	0,8096	0,1249
	mandíbula	-0,4430	0,8568	0,2639
modelo III	maxila	0,3019	0,6616	-0,6864
	mandíbula	0,2366	0,9593	-0,1539

Fonte: do autor (2018).

Tabela 20 - Detalhamento da PC3, extraída das nuvens de colisões a partir da simulação da oclusão dinâmica unilateral do lado esquerdo, no momento de contato máximo

PC3				
Modelo	Malha	x	y	z
modelo I	maxila	-0,0034	0,0357	0,9994
	mandíbula	0,0141	0,0292	0,9995
modelo II	maxila	0,0762	-0,0991	0,9922
	mandíbula	-0,1745	-0,3712	0,9120
modelo III	maxila	0,4244	0,5515	0,7182
	mandíbula	0,1346	0,1245	0,9831

Fonte: do autor.

Tabela 21 - Ângulos de cada componente principal em relação ao vetor normal do Plano Oclusal, durante a simulação da oclusão dinâmica unilateral do lado esquerdo, no momento de contato máximo

<b>Modelo</b>	<b>Malha</b>	<b>∠PC1</b>	<b>∠PC2</b>	<b>∠PC3</b>
modelo I	maxila	88,9428°	89,0219°	1,4404°
	mandíbula	88,6678°	88,8707°	1,7466°
modelo II	maxila	86,1516°	75,9853°	14,5544°
	mandíbula	69,3153°	67,1710°	31,6472°
modelo III	maxila	79,5040°	51,2544°	40,6802°
	mandíbula	81,6376°	86,2333°	9,1826°

Fonte: do autor.

Em conjunto com a simulação da oclusão dinâmica unilateral com a estimulação dos grupos musculares do lado direito, foram também realizadas as simulações para o lado esquerdo.

As Figuras 34 e 45 destacam, assim como foi efetuado para as simulações do lado direito, os momentos onde em que foram detectadas a maior quantidade de colisões para as simulações da oclusão dinâmica unilateral do lado esquerdo.

As componentes principais, mais uma vez, foram utilizadas para se encontrar a orientação das nuvens de colisão em relação ao vetor normal do Plano Oclusal e, conseqüentemente, sua inclinação em relação ao plano. Estas inclinações estão detalhadas conforme Tabela 21.



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho propôs um método, conforme literatura atual, que pode ser utilizado, em um segundo momento, como ferramenta adicional para um especialista da área da saúde para a realização da avaliação da simulação das oclusões estáticas e dinâmicas.

### 6.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

O presente trabalho demonstrou um modelo que pode ser utilizado como instrumento auxiliar para a elaboração de diagnósticos relacionados ao fenômeno da oclusão, estática e dinâmica. Posteriormente, as simulações e com o auxílio de um especialista, os indicadores aqui apresentados, como a demonstração das nuvens de colisões, extração das componentes principais e sua utilização para determinar a orientação das nuvens de colisões em relação ao Plano Oclusal, a discriminação e aglutinação das colisões por quadrantes e os mapas de densidade, podem ser utilizados de modo a auxiliar na avaliação da oclusão, para cada caso, de maneira distinta.

Para os cenários simulados, levando em consideração as métricas supracitadas, pôde-se observar, as inclinações das nuvens de colisões resultantes das simulações das oclusões estáticas e dinâmicas dos modelos I, II e III. Com estes resultados pôde-se observar que o modelo I é o que apresenta colisões distribuídas de forma mais próxima do uniforme, de modo que, foi possível perceber uma maior quantidade de colisões detectadas do lado direito das malhas da mandíbula e da maxila e, conforme os mapas de calor, maior concentração de colisões nas superfícies dos dentes 17, 26, 27, 36, 37, 47 e, além disso, uma maior quantidade de colisões detectadas nos dentes 26 e 36 em relação aos seus respectivos pares, do lado direito, 16 e 46. O modelo II, embora tenha demonstrado uma quantidade de colisões próxima do uniforme para os quadrantes I e II, nos quadrantes III e IV observou-se acentuado desequilíbrio da distribuição das colisões detectadas, no sentido de que a maior parte das colisões para os quadrantes posteriores está acumulada na região do quadrante IV, como pode ser observado com auxílio do mapa de calor que, além disso, evidencia maior concentração de colisões detectadas no lado esquerdo, tanto para as malhas da mandíbula e da maxila. No

modelo III, foi observado que, para os quadrantes anteriores, I e II, não foram detectadas colisões nos dentes 11, 12, 13, 21, 22, 23, 31, 32, 33, 41, 42 e 42 e para os quadrantes posteriores, a maior parte das colisões se acumularam no quadrante IV, em particular nos dentes 17, 25, 26, 27, 35, 36, 37 e 47.

As simulações das oclusões dinâmicas demonstraram as colisões detectadas ao longo do processo e das iterações, além de demonstrar a orientação de cada uma das nuvens de colisões no momento em que há maior contato entre as superfícies das arcadas dentárias durante cada simulação e sua inclinação em relação ao Plano Oclusal durante o momento em que acontece maior contato entre as superfícies dos dentes, seja nas simulações bilaterais ou unilaterais para cada um dos lados direito e esquerdo. Estas informações demonstraram o comportamento das malhas e a interação das arcadas dentárias, dos dentes e de seus respectivos cúspides durante a movimentação, bem como oscilações em relação ao volume de colisões simultâneas para cada iteração.

## 6.2 CONTRIBUIÇÕES

Espera-se que as simulações e resultados aqui apresentados contribuam para os casos descritos a seguir.

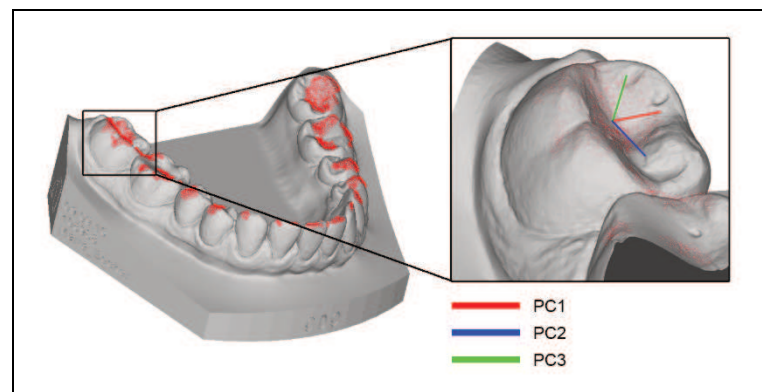
Em relação à oclusão estática, a extração das componentes principais das nuvens de pontos oriundas da detecção de colisão entre as malhas, sua categorização em quadrantes e a criação de mapas de calor a partir destas nuvens, apresentaram-se como indicadores auxiliares para a avaliação de determinadas situações, tanto de modo quantitativo, como qualitativo. A extração das Componentes Principais, utilizada principalmente para obter a inclinação e como estão dispersas as colisões de cada uma das nuvens, possibilitou demonstrar a inclinação das colisões detectadas em relação ao Plano Oclusal; esta informação, aliada a identificação dos quadrantes possibilitou entender a distribuição das colisões detectadas nas superfícies das arcadas dentárias; e o mapa de densidade, por sua vez, possibilitou entender em quais superfícies de quais dentes e como se distribuíram as colisões detectadas, no sentido de facilitar o processo de identificação, por meio de um resultado visual, se há algum ponto onde são detectadas mais colisões em detrimento de outro, por exemplo.

Em relação à oclusão dinâmica, a extração das componentes principais auge do contato entre os dentes para cada simulação forneceu informações a respeito orientação da malha durante os movimentos bilaterais e unilaterais resultantes da estimulação dos vetores análogos aos grupos musculares responsáveis pelo fenômeno da mastigação. Uma vez obtida as orientações das malhas de colisões foi possível encontrar a inclinação de cada uma destas em relação ao Plano Oclusal; esta informação pode ser utilizada para se avaliar a discrepância entre as inclinações das nuvens de colisões obtidas e as inclinações ideais de acordo com diversos parâmetros utilizados nos meios da odontologia e ortodontia como o, já anteriormente citado, Plano Oclusal ou a curva de Spee (ANDREWS, 1972, apud OLTRAMARI et al., 2007), por exemplo, dentre muitos atributos ou métricas que podem ser utilizados como parâmetro para avaliação. Pôde-se observar, como anteriormente citado, que os movimentos unilaterais, embora resultantes da estimulação dos grupos musculares de apenas um lado, não estão isolados; de modo que foram detectadas colisões distribuídas não somente do lado estimulado, mas por toda a superfície das arcadas dentárias; o que demonstra a interdependência de todos os atores envolvidos no processo: grupos musculares de cada lado, maxila, mandíbula e articulações temporomandibulares.

### 6.3 TRABALHOS FUTUROS

O modelo proposto neste trabalho avaliou as colisões detectadas sobre as superfícies das arcadas dentárias.

Figura 36 - Exemplo de extração das componentes principais, extraídas de um único dente



Fonte: do autor (2018).

A evolução deste trabalho iria de encontro a discriminação das colisões detectadas para cada nuvem de colisões, de modo que seja possível isolar e analisar as colisões detectadas para cada dente.

A Figura 33 ilustra a extração das componentes principais a partir das colisões detectadas no dente 47, que corresponde ao segundo molar inferior direito. Esta abordagem possibilitaria encontrar divergências nas distribuições das colisões detectadas para cada um dos dentes e seus respectivos pares e contrapartidas, sendo o primeiro, o que corresponde ao dente equivalente na mesma arcada dentária, porém do lado oposto; e o segundo, o correspondente ao dente equivalente na arcada dentária oposta.

Entretanto, o presente trabalho, apresenta limitações relacionadas a simulação do movimento, no que tange a reprodução da oclusão dinâmica. Há aspectos que poderiam ser incorporados de modo a aumentar a verossimilhança da simulação: a evolução da simulação da ATM, que é de fundamental importância para o fenômeno, pois, conforme observado por Villamil et al. (2009), a mandíbula se move em relação à maxila (e ao crânio) por meio de duas articulações que são interdependentes; a inclusão dos discos articulares ao modelo, pois eles são estruturas fundamentais para o fenômeno e há diversas patologias relacionadas que podem ser simuladas e analisadas graças a presença destas estruturas, como demonstrou Cunha et al. (2015); a realização da validação dos movimentos por meio da utilização da técnica da cinemática inversa que, embora utilizada por Villamil et al. (2009) como ponto de partida para a simulação dos movimentos da mandíbula em relação a maxila, poderiam ser utilizadas como parâmetro para validar e reproduzir, de maneira mais precisa, o fenômeno da oclusão dinâmica para cada indivíduo. A adição destes itens, por exemplo, em conjunto com a simulação da oclusão dinâmica por meio do adequado posicionamento e estimulação dos grupos musculares responsáveis pelo fenômeno forneceria mais informações a respeito de possíveis problemas oclusais em função de problemas articulatorios, em adição aos resultados aqui apresentados.

## REFERÊNCIAS

- CARVALHO, P. A. L. **Estudo cefalométrico radiográfico da relação entre os tipos faciais, a inclinação do plano oclusal e a discrepância sagital maxilo-mandibular em indivíduos com oclusão normal.** São Paulo, SP: USP, 2014. Tese de Doutorado (Programa de Pós-graduação em Ciências odontológicas, Nível Doutorado) - Universidade de São Paulo – USP.
- COUMANS, E. **Bullet Physics Library.** 2013. Disponível em: <<https://pybullet.org/>> Acesso em 13 de jun. de 2018.
- CUNHA, D. G. et al. **Simulação dos Movimentos Mandibulares baseado em Colisões com e sem Anteposição dos Discos Articulares.** São Leopoldo, RS: UNISINOS, 2015. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-graduação em Computação Aplicada, Nível Mestrado) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS.
- DAVIES, S. et al. Orthodontics and occlusion. **British Dental Journal**, v. 191, n. 10, 2001.
- DAVIES, S.; GRAY, R. M. J. The examination and recording of the occlusion: why and how. **British Dental Journal**, v. 191, n. 6, 2001.
- DAVIES, S.; GRAY, R. M. J. What is Occlusion? **British Dental Journal**, v. 191, n. 5, 2001.
- DAVIES, S.; GRAY, R. M. J; SMITH, P. W. Good occlusal practice in simple restorative dentistry. **British Dental Journal**, v. 191, n. 7, 2001.
- INTERLANDI, S. **O cefalograma padrão do curso de Pós-Graduação de Ortodontia da Faculdade de Odontologia de São Paulo, USP.** Rev. Faculdade de Odontologia da USP, 1968.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3950:2016: Dentistry - Designation system for teeth and areas of the oral cavity.** Genebra, Suíça. 2016. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/68292.html>> Acesso em 10 de abr. de 2018.
- JACKSON, J. E. **A User's Guide to Principal Component Analysis.** 1ª ed., John Wiley & Sons, p. 592, 1991.
- JIMÉNEZ, P. et al. 3D Collision Detection: A Survey. **Institut de Robòtica i Informàtica Industrial (CISC-UPC)**, Gran Capità 2-4 (Ed. Nexus), Barcelona, Spain, 2000.
- JOLLIFFE, I. T. **Principal component analysis.** Springer series in statistics, 2ª ed., p. 487, 2002.
- KAIESKI, Naira. **Vis-Saúde: Uma metodologia para visualização e análise de dados de saúde pública.** São Leopoldo, RS: UNISINOS, 2014. Dissertação de

Mestrado (Programa de Pós-graduação em Computação Aplicada, Nível Mestrado) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS.

KOOLSTRA, J. H. et al. Application and validation of a three-dimensional mathematical model of the human masticatory system in vivo. **Journal of Biomechanics**, v. 25, p. 175–187, 1992.

MACHADO, N. A. G. et al. Identification of occlusal prematurity by clinical examination and cone-beam computed tomography. **Braz. Dent. J.**, Ribeirão Preto, v. 24, n. 1, p. 64-67, 2013.

MALTAGLIATI, L. A. et al. Avaliação da prevalência das seis chaves de oclusão de Andrews, em jovens brasileiros com oclusão normal natural. **R Dental Press Ortodon Ortop Facial**, Maringá, v. 11, n. 1, p. 99-106, 2006.

MOORE, M.; WILHELMS, J. Collision detection and response for computer animation. **Proceedings of the 15th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques - SIGGRAPH '88**, 1988.

NADJMI, N. et al. Virtual occlusion in planning orthognathic surgical procedures. **International Association of Oral and Maxillofacial Surgeons**, v. 39, p. 457-462, 2010.

OLTRAMARI, P. V. P. et al. Importance of occlusion aspects in the completion of orthodontic treatment. **Braz. Dent. J.**, Ribeirão Preto, v. 18, n. 1, p. 78-82, 2007.

PILEICKIENE et al. Finite element analysis of stresses in the maxillary and mandibular dental arches and TMJ articular discs during clenching into maximum intercuspation, anterior and unilateral posterior occlusion. **Stomatologija, Baltic Dental and Maxillofacial Journal**, 9:121-128, 2007.

POGORELOV, A. V. **Analytical Geometry**. Moscou, Rússia: Mir Publishers, 1980.

RINGNÉR, M. What is principal component analysis? **Nature Biotechnology**, v. 26, n. 3, p. 303–304, Mar. 2008.

STAVNESS, I. K. et al. Simulation of dental collisions and occlusal dynamics in the virtual environment. **Journal of Oral Rehabilitation**, v. 43, p. 269–278, 2015.

TEKSCAN, Inc. **T-Scan**. Disponível em: <<https://www.tekscan.com>> acesso em 21 de out. de 2018.

TÜRPEL, J. C. et al. Dental occlusion: a critical reflection on past, present and future concepts. **Journal of Oral Rehabilitation**, v. 35, ed. 6, 2008.

VILLAMIL, M. B. et al. **TMJsim - Simulador de Auxílio ao Diagnóstico, Planejamento Pré-cirúrgico e Acompanhamento de Tratamento Bucomaxilofacial**. Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação Aplicada Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, Brasil, 2011.

VILLAMIL, M. B. **Modelagem e Simulação da Articulação Temporomandibular**. Porto Alegre: PPGC – UFRGS, 2009.

WU, W. et al. Haptic simulation framework for determining virtual dental occlusion. **International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery**, v. 12, p.595-606, 2016.

ZELTZER, D. Representation of Complex Animated Figures. In: **GRAPHICS INTERFACE**, Toronto, Canada, p. 205-211, 1982.