



**Tiago Miguel
Moura Rodrigues**

**Desenvolvimento e estudo de modelo multi-corpo
da articulação temporomandibular**



**Tiago Miguel
Moura Rodrigues**

**Desenvolvimento e estudo de modelo multi-corpo da
articulação temporomandibular**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica de António Manuel de Amaral Monteiro Ramos, Professor Auxiliar de Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

O júri / The jury

Presidente / President

Prof. Doutor António Manuel Godinho Completo
Professor Auxiliar C/ Agregação, Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Prof. Doutor José António de Oliveira Simões
Equiparado a Professor Coordenador C/ Agregação, Esad – escola Superior de Artes e Design de Matosinhos (Arguente Principal)

Prof. Doutor António Manuel de Amaral Monteiro Ramos
Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro (Orientador)

agradecimentos

Ao meu orientador, pela paciência e auxílio prestado no decorrer da realização deste trabalho.

Ao Engenheiro António Festas, pela disponibilidade e prontidão na maquinação das peças para o simulador.

Aos meus pais, por me darem a possibilidade de ter uma formação académica de qualidade.

A todos os meus amigos, por acreditarem, apoiarem e puxarem sempre pelo melhor de mim, tornando toda esta jornada muito mais desafiadora e interessante.

palavras-chave

Articulação temporomandibular, mandíbula, mordida, força, músculo, modelo multi-corpo, simulador.

resumo

A articulação temporomandibular é uma das articulações mais complexas do corpo humano e a que mais solicitações tem diariamente. Tendo isto em mente, esta dissertação tem como principal objetivo uma melhor compreensão das características desta articulação, bem como o desenvolvimento de um modelo multi-corpo capaz de prever o comportamento dos diferentes músculos envolvidos nas diferentes atividades diárias. Para este propósito, foi utilizado um modelo multi-corpo da mandíbula contendo todos os grupos musculares responsáveis pelos movimentos, com vista a identificar e caracterizar os que mais contribuem para atividades diárias como a mastigação. Foram realizadas diversas simulações retratando ações como a mordida e movimentos cíclicos da mandíbula, tendo sido determinado que o músculo masséter, temporal e pterigóideo medial são os principais responsáveis pelo realizar desta tarefa.

Foi utilizado um simulador da articulação temporomandibular existente no Laboratório de Biomecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro de forma a replicar e validar os valores das forças obtidas no modelo multi-corpo para a mordida unilateral da mandíbula. Foram utilizadas as forças obtidas no multi-corpo para cada um dos três músculos principais, de forma a obter a reação em três pontos pré-definidos da mandíbula, correspondentes ao primeiro molar, ao pré-molar e aos incisivos frontais.

Os resultados experimentais obtidos revelaram uma redução substancial da força quando comparada com o valor teórico presente no modelo, o que nos leva a concluir que o modelo experimental criado não pode ser utilizado para validar o modelo multi-corpo. A redução dos valores da força pode ser justificada pela incorreta replicação das direções das forças atuantes, bem como a diferente anatomia da mandíbula utilizada experimentalmente e da presente no modelo.

keywords

Temporomandibular joint, jaw, clenching, force, muscle, multi-body model, simulator.

abstract

The temporomandibular joint is one of the most complex joints in the human body and the one with the most daily demands. Thus, the main objective of this thesis is a better understanding of the characteristics of the articulation as well as the development of a multi-body model capable of predicting the different muscles behaviour involved in daily activities. For this purpose, a multi-body model of the mandible was used, containing all the muscular groups responsible for the movements, to identify and characterize the ones that contribute most to daily activities such as chewing. Several simulations were carried out, portraying actions such as bite and cyclic mandible movements, and it was determined that the masseter, temporal and the medial pterygoid muscle are the main responsible for performing those tasks.

A temporomandibular joint simulator was used in the Biomechanics Laboratory of the Department of Mechanical Engineering of the University of Aveiro to replicate and validate the forces obtained in the multi-body model for the unilateral mandibular bite. The forces obtained in the multibody model for each of the three main muscles were used to obtain the reaction at three pre-defined points of the mandible, corresponding to the first molar, the premolar and the frontal incisors.

The experimental results showed a substantial reduction of the obtained force, when compared to the theoretical value, present in the model, which leads us to conclude that the experimental model created can't be used to validate the multibody model. The reduction of force values can be justified by the incorrect replication of the acting forces directions, as well as the different anatomy of the mandible used experimentally and the one present in the model.

Índice

Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas.....	vii
Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos.....	1
1.3 Estrutura da Dissertação.....	2
Capítulo 2 - Articulação	3
2.1 Anatomia	4
2.1.1 Estrutura óssea	4
2.1.2 Ligamentos e outras estruturas	5
2.1.3 Músculos	7
2.2 Cinemática	9
2.2.1 Movimentos da mandíbula	10
2.2.2 Ciclo de abertura da mandíbula	11
2.2.3 Forças.....	11
Capítulo 3 - Patologias	13
3.1 Disfunções temporomandibulares (DTM)	13
3.1.1 Deslocamentos discais.....	13
3.1.2 Disfunções inflamatórias da ATM.....	15
3.2 Bruxismo	16
3.3 Tratamentos das DTM.....	16
3.3.1 Artrocentese.....	17
3.3.2 Artroscopia	17
3.3.3 Artroplastia	18
Capítulo 4 - Modelos multi-corpo da ATM.....	19
4.1 Criação de um modelo	19
4.2 Modelos multi-corpo.....	20
4.3 Conclusão	23
4.4 Modelo multi-corpo desenvolvido.....	23
4.4.1 O modelo da mandíbula - “Mandible Chewing And Clenching”	24
Capítulo 5 - Resultados modelo AnyBody	29
5.1 Movimento cíclico de mastigação (tarefa 1).....	30

5.2 – Mordida unilateral com o transdutor de força presente entre os primeiros pré-molares do lado esquerdo da mandíbula (Tarefa 4).	32
5.2.1 – Caso simétrico.....	32
5.2.2 – Simulações com modelo sem disco do lado ativo	34
5.3 – Resultados	36
5.4 - Implicações dos grupos musculares.....	37
5.4.1 – Influência do músculo masséter	37
5.4.2 – Influência do músculo temporal.....	39
5.4.3 – Influência do músculo pterigóideo medial	41
5.4.4 – Influência do músculo pterigóideo lateral	44
5.4.5 – Resultados implicação muscular	46
5.5 – Artroplastia unilateral	46
5.6 – Influência da posição do transdutor.....	48
5.7 Discussão de resultados do modelo multi-corpo	54
5.8 Validação do modelo multi-corpo com outros resultados <i>in vivo</i>	57
5.8.1 Conclusões	61
Capítulo 6 – Modelos experimentais ATM	63
6.1 Medições <i>in vivo</i>	63
6.2 Modelos <i>in vitro</i>	65
6.3 Conclusão	66
6.4 Validação experimental	67
6.4.1 Aparelho de teste.....	68
6.4.2 Forças musculares aplicadas.....	72
6.4.3 Procedimento experimental	74
6.4.4 Resultados.....	74
6.4.5 Discussão	76
6.4.6 Conclusões	76
Capítulo 7 – Conclusões	79
Futuros desenvolvimentos.....	80
Bibliografia	81
Anexos	85

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Articulação temporomandibular, vista lateral. Adaptado de [6].	3
Figura 2.2 - Mandíbula, vista súpero-lateral. Adaptado de [6].	4
Figura 2.3 - Localização dos ossos temporais. Vista anterior (A) e vista lateral (B) [8].	5
Figura 2.4 - Osso temporal, vista lateral. Adaptado de [6].	5
Figura 2.5 - Articulação temporomandibular, vista lateral. Adaptado de [6].	6
Figura 2.6 - Articulação temporomandibular, vista medial em corte. Adaptado de [6].	7
Figura 2.7 - Estrutura muscular. A: Vista lateral. B: Vista lateral, músculos pterigóideos expostos. Adaptado de [9].	8
Figura 2.8 - Movimentos da mandíbula. Adaptado de [10].	9
Figura 2.9 - A: Rotação da mandíbula sobre eixo horizontal. B: Rotação da mandíbula sobre eixo vertical. C: Rotação da mandíbula sobre eixo sagital. D: Movimentos de translação da mandíbula. Adaptado de [12].	10
Figura 2.10 - Comportamento da articulação durante o ciclo de abertura da mandíbula.	11
Figura 3.1 - Deslocamentos discais. Adaptado de [22].	14
Figura 4.1 - Inputs e outputs do modelo multi-corpo.	24
Figura 4.2 - Tarefa 1, movimento cíclico.	25
Figura 4.3 - Força medida durante a mordida unilateral, apresentando um valor máximo de 441N.	26
Figura 4.4 - Força simulada utilizada para o movimento cíclico de mastigação, presente na tarefa 1.	27
Figura 5.1 - Conjunto de simulações efetuadas no modelo.	29
Figura 5.2 - Legenda dos músculos presentes nos gráficos.	30
Figura 5.3 - Reações estimadas na ATM do lado esquerdo (vermelho) e direito (azul) em mandíbula simétrica para a tarefa 1 (mastigação).	30
Figura 5.4 - Força muscular estimada de cada músculo do lado esquerdo em mandíbula simétrica para a tarefa 1 (legenda: ver Figura 5.2).	31
Figura 5.5 - Força muscular estimada de cada músculo do lado direito em mandíbula simétrica para a tarefa 1 (legenda: ver Figura 5.2).	31
Figura 5.6 - Reações estimadas na ATM do lado esquerdo (vermelho) e direito (azul) em mandíbula simétrica para a tarefa 4.	32
Figura 5.7 - Força muscular estimada de cada músculo do lado esquerdo (ativo) da mandíbula simétrica para a tarefa 4 (legenda: ver figura 5.2).	33
Figura 5.8 - Força muscular estimada de cada músculo do lado direito (passivo) da mandíbula simétrica para a tarefa 4 (legenda: ver figura 5.2).	33
Figura 5.9 - Reações estimadas na ATM do lado esquerdo (vermelho) e direito (azul) em mandíbula com ramo reduzido em 3mm do lado esquerdo, para a tarefa 4. A picotado encontram-se os valores dispostos na Figura 5.6, para comparação.	34
Figura 5.10 - Força muscular estimada de cada músculo do lado esquerdo (ativo) em mandíbula com ramo reduzido em 3mm do lado esquerdo, para a tarefa 4 (legenda: ver figura 5.2).	35
Figura 5.11 - Força muscular estimada de cada músculo do lado direito (passivo) em mandíbula com ramo reduzido em 3mm do lado esquerdo, para a tarefa 4 (legenda: ver figura 5.2).	35
Figura 5.12 - Reações estimadas na ATM do lado esquerdo (vermelho) e direito (azul) em mandíbula simétrica para um caso hipotético de ausência do grupo muscular masséter, para a tarefa 4. A picotado encontram-se os valores dispostos na Figura 5.6, para comparação.	38

Figura 5.13 - Força muscular estimada de cada músculo do lado esquerdo (ativo) da mandíbula simétrica para um caso hipotético de ausência do grupo muscular masséter, para a tarefa 4 (legenda: ver Figura 5.2).....	38
Figura 5.14 - Força muscular estimada de cada músculo do lado direito (passivo) da mandíbula simétrica para um caso hipotético de ausência do grupo muscular masséter, para a tarefa 4 (legenda: ver Figura 5.2).....	39
Figura 5.15 - Reações estimadas na ATM do lado esquerdo (vermelho) e direito (azul) em mandíbula simétrica para um caso hipotético de ausência do grupo muscular temporal, para a tarefa 4. A picotado encontram-se os valores dispostos na Figura 5.6, para comparação.	40
Figura 5.16 - Força muscular estimada de cada músculo do lado esquerdo (ativo) da mandíbula simétrica para um caso hipotético de ausência do grupo muscular temporal, para a tarefa 4 (legenda: ver Figura 5.2).....	40
Figura 5.17 - Força muscular estimada de cada músculo do lado direito (passivo) da mandíbula simétrica para um caso hipotético de ausência do grupo muscular temporal, para a tarefa 4 (legenda: ver Figura 5.2).....	41
Figura 5.18 - Reações estimadas na ATM do lado esquerdo (vermelho) e direito (azul) em mandíbula simétrica para um caso hipotético de ausência do músculo pterigóideo medial, para a tarefa 4. A picotado encontram-se os valores dispostos na Figura 5.6, para comparação.....	42
Figura 5.19 - Força muscular estimada de cada músculo do lado esquerdo (ativo) da mandíbula simétrica para um caso hipotético de ausência do músculo pterigóideo medial, para a tarefa 4 (legenda: ver Figura 5.2).....	43
Figura 5.20 - Força muscular estimada de cada músculo do lado direito (passivo) da mandíbula simétrica para um caso hipotético de ausência do músculo pterigóideo medial, para a tarefa 4 (legenda: ver Figura 5.2).....	43
Figura 5.21 - Reações estimadas na ATM do lado esquerdo (vermelho) e direito (azul) em mandíbula simétrica para um caso hipotético de ausência do músculo pterigóideo lateral inferior e superior, para a tarefa 4. A picotado encontram-se os valores dispostos na Figura 5.6, para comparação.....	44
Figura 5.22 - Força muscular estimada de cada músculo do lado esquerdo (ativo) da mandíbula simétrica para um caso hipotético de ausência do músculo pterigóideo lateral, para a tarefa 4 (legenda: ver Figura 5.2).....	45
Figura 5.23 - Força muscular estimada de cada músculo do lado direito (passivo) da mandíbula simétrica para um caso hipotético de ausência do músculo pterigóideo lateral, para a tarefa 4 (legenda: ver Figura 5.2).....	45
Figura 5.24 - Reações estimadas na ATM do lado esquerdo (vermelho) e direito (azul) em mandíbula simétrica para um caso hipotético de necessidade de artroplastia unilateral do lado esquerdo, para a tarefa 4. A picotado encontram-se os valores dispostos na Figura 5.6, para comparação.	47
Figura 5.25 - Força muscular estimada de cada músculo do lado esquerdo (ativo) da mandíbula simétrica para um caso hipotético de necessidade de artroplastia unilateral do lado esquerdo, para a tarefa 4 (legenda: ver Figura 5.2).....	47
Figura 5.26 - Força muscular estimada de cada músculo do lado passivo (direito) da mandíbula simétrica para um caso hipotético de necessidade de artroplastia unilateral do lado esquerdo, para a tarefa 4 (legenda: ver Figura 5.2).....	48
Figura 5.27 - Mandíbula, arco dental inferior, vista por cima. Adaptado de [6].....	49
Figura 5.28 - Reações estimadas na ATM do lado esquerdo (vermelho) e direito (azul) em mandíbula simétrica com o transdutor de força localizado entre os primeiros pré-molares do lado direito, para a tarefa 4. A picotado encontram-se os valores dispostos na Figura 5.6, para comparação.	50
Figura 5.29 - Reações estimadas na ATM do lado esquerdo (vermelho) e direito (azul) em mandíbula simétrica com o transdutor de força localizado entre os primeiros molares do lado esquerdo, para a tarefa 4. A picotado encontram-se os valores dispostos na Figura 5.6, para comparação.	51

Figura 5.30 - Reações estimadas na ATM do lado esquerdo (vermelho) e direito (azul) em mandíbula simétrica com o transdutor de força localizado entre os primeiros molares do lado direito, para a tarefa 4. A picotado encontram-se os valores dispostos na Figura 5.6, para comparação.....	51
Figura 5.31 - Reações estimadas na ATM do lado esquerdo (vermelho) e direito (azul) em mandíbula simétrica com o transdutor de força localizado entre os incisivos inferiores frontais, para a tarefa 4. A picotado encontram-se os valores dispostos na Figura 5.6, para comparação.....	52
Figura 5.32 - Força muscular estimada de cada músculo do lado esquerdo da mandíbula simétrica para a tarefa 4 com o transdutor de forças localizado nos incisivos frontais da mandíbula (legenda: ver Figura 5.2).....	53
Figura 5.33 - Força muscular estimada de cada músculo do lado direito da mandíbula simétrica para a tarefa 4 com o transdutor de forças localizado nos incisivos frontais da mandíbula (legenda: ver Figura 5.2).....	53
Figura 5.34 - Reações estimadas na ATM do lado esquerdo (vermelho) e direito (azul) em mandíbula simétrica com o valor das forças musculares indicadas na Tabela 5.5, para a tarefa 4, com o transdutor de forças presente nos incisivos frontais da mandíbula. A picotado encontram-se os valores dispostos na Figura 5.31, para comparação.....	59
Figura 5.35 - Força muscular estimada de cada músculo do lado esquerdo da mandíbula com o valor das forças musculares indicadas na Tabela 5.5, para a tarefa 4, com o transdutor de forças presente nos incisivos frontais da mandíbula (legenda: ver Figura 5.2).....	60
Figura 5.36 - Força muscular estimada de cada músculo do lado direito da mandíbula com o valor das forças musculares indicadas na Tabela 5.5, para a tarefa 4, com o transdutor de forças presente nos incisivos frontais da mandíbula (legenda: ver Figura 5.2).....	60
Figura 6.1 - Força média nas articulações [50].....	64
Figura 6.2 - Força média do músculo temporal [50].....	64
Figura 6.3 - Força média do musculo masséter [50].....	64
Figura 6.4 - Diagrama representativo da validação experimental.....	67
Figura 6.5 - Modelo simplificado em CAD do simulador da mandíbula utilizado.....	68
Figura 6.6 - Prótese da mandíbula (Sawbones®). Músculos: a) masséter; b) temporal; c) pterigóideo medial.....	69
Figura 6.7 - Dispositivo experimental.	69
Figura 6.8 - Modo manual.	70
Figura 6.9 - Peças maquinadas para a realização da atividade experimental. A) Peças do dispositivo para medição. B) Bloco. C) Dispositivo para medição.....	71
Figura 6.10 - Aparelho de teste, legenda: 1- Simulador; 2- Roldanas; 3- Mandíbula; 4- Sistema de cordas; 5- Bloco; 6- Dispositivo para medição; 7- Chapa deformável; 8- Extensômetro; 9- Recolha de dados.	74
Figura 6.11 - Reações obtidas em cada ponto da mandíbula.....	75

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Músculos da mastigação e suas ações [11].	10
Tabela 3.1 - Patologias e taxas de incidência para artroplastia da ATM [34].	18
Tabela 4.1 - Músculos analisados nos diversos trabalhos [16,36,37].	22
Tabela 4.2 - Propriedades dos modelos analisados.....	23
Tabela 5.1 - Forças musculares e reações nas ATM para as diferentes tarefas.	37
Tabela 5.2 - Implicação de cada grupo muscular nas reações na ATM.....	46
Tabela 5.3 - Máxima reação observada nas ATM consoante a localização do transdutor de forças durante a tarefa 4.	54
Tabela 5.4 - Força máxima muscular normal e direção das suas componentes descritos por diversos autores.....	57
Tabela 5.5 - Valores experimentais utilizados no modelo multi-corpo.....	58
Tabela 5.6 - Resultados para a tarefa 4 com valores experimentais de diferentes autores.	61
Tabela 6.1 - Parâmetros musculares obtidos por Mesnard [15].	65
Tabela 6.2 - Parâmetros do modelo experimental [16]......	66
Tabela 6.3 - Atividade muscular medida em diferentes estudos.....	66
Tabela 6.4 - Valores da força máxima muscular para cada músculo, utilizadas no modelo multi-corpo.	72
Tabela 6.5 - Valores da força muscular de cada músculo obtidos a partir de simulações no modelo multi-corpo para a tarefa 4 com valores de força musculares máximos retirados da Tabela 5.1, para diferentes pontos de aplicação da força.	73
Tabela 6.6 - Forças musculares utilizadas no sistema experimental, a 50%.	73
Tabela 6.7 - Resultados experimentais	75

Capítulo 1 - Introdução

1.1 Enquadramento

A articulação temporomandibular é a articulação que liga o côndilo da mandíbula ao crânio. É uma das mais complexas articulações do corpo humano, pois é a única articulação que se move sincronizada com outra simétrica no lado oposto do crânio, envolvendo complexos movimentos de deslizamento e rotação. Além da sua elevada complexidade, esta articulação é a mais solicitada do corpo, com mais de dois mil movimentos por dia, em atividades como mastigar, falar ou bocejar [1]. É constituída por três ligamentos principais e uma cápsula, contendo um disco articular. Este disco é a componente mais importante da articulação pois tem como função a absorção das tensões durante o movimento.

O conjunto de patologias associadas a articulação temporomandibular designam-se de disfunções temporomandibulares, e estima-se que um terço da população mundial apresentou em algum momento da sua vida algum sintoma destas disfunções, tais como dor facial ou dificuldade de movimentação mandibular [2]. O distúrbio mandibular mais comum é o deslocamento do disco articular da sua posição normal, o que resulta numa limitação da abertura máxima da mandíbula e na ocorrência de estalidos aquando da abertura.

A análise e estudo dos movimentos da mandíbula em atividades como a mastigação tem sido amplamente estudada em diversos trabalhos onde se pretende replicar em modelos multi-corpo as ações e contribuições dos grupos musculares presentes na articulação.

1.2 Objetivos

O foco principal desta dissertação centra-se no estudo de um modelo multi-corpo da articulação, de forma a prever o comportamento dos principais músculos envolvidos nas diferentes atividades diárias. Foram efetuadas diversas simulações numéricas com o objetivo de determinar quais os grupos musculares que mais tem influência nos movimentos articulares, e também obter as reações a que a articulação fica sujeita quando são aplicadas forças em diversos pontos da mandíbula.

A lista de objetivos deste estudo são os seguintes:

- Estudo de um modelo multi-corpo da articulação temporomandibular.
- Implementação de movimentos de mastigação.
- Cálculo das principais ações musculares envolvidas na articulação.
- Validação experimental com simulador.
- Correlação com a bibliografia existente.

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta tese de mestrado encontra-se organizada em sete capítulos, incluindo a introdução. O capítulo 2 começa com uma extensa apresentação das características anatómicas e da biomecânica da articulação em estudo.

O capítulo 3 aborda as diferentes patologias associadas a articulação temporomandibular, as suas taxas de incidência e ainda os seus métodos de tratamento.

No capítulo 4 é feita um estado de arte dos diversos modelos multi-corpo já criados, indicando algumas das suas características e feita uma comparação entre os modelos já existentes. Seguidamente é feita uma análise em detalhe ao modelo multi-corpo que foi usado para a realização desta dissertação.

No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos das diversas simulações numéricas efetuadas no modelo, onde se pretende analisar a contribuição muscular e as reações envolvidas na articulação na tarefa da mordida. Posteriormente serão apresentadas novas simulações, mas com dados anatómicos de outra atividade experimental, para assim comparar resultados.

O capítulo 6 aborda modelos experimentais, onde é descrito as propriedades da articulação estudada, e de que forma foram obtidos os valores das forças ou propriedades musculares. Posteriormente, é apresentado um simulador músculo-pneumático presente no Laboratório de Biomecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro que foi utilizado para validar simulações efetuadas no modelo multi-corpo.

Por último, no capítulo 7, são apresentadas as conclusões e as propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2 - Articulação

A articulação temporomandibular é uma articulação bilateral sinovial presente entre a mandíbula e o osso temporal, tradicionalmente conhecida por ATM. Esta articulação é considerada uma das mais complexas do organismo humano devido à combinação de movimentos de deslizamento e rotação, sendo a grande responsável pelos movimentos exercidos ao falar, bocejar e principalmente pelos movimentos envolvidos na mastigação [3]. Uma articulação sinovial é uma articulação que se move livremente e é caracterizada por ter as superfícies ósseas cobertas por cartilagem articular e uma cápsula articular, sendo que a ATM possui também um disco intra-articular constituído de fibrocartilagem que subdivide a articulação em dois compartimentos, superior e inferior. O disco articula-se com o côndilo da mandíbula no compartimento inferior e contra a eminência articular do osso temporal no compartimento superior [4]. Durante os movimentos mandibulares o disco articular desempenha um papel importante na absorção de tensões durante o movimento, resultando numa distribuição de cargas pela articulação [5].

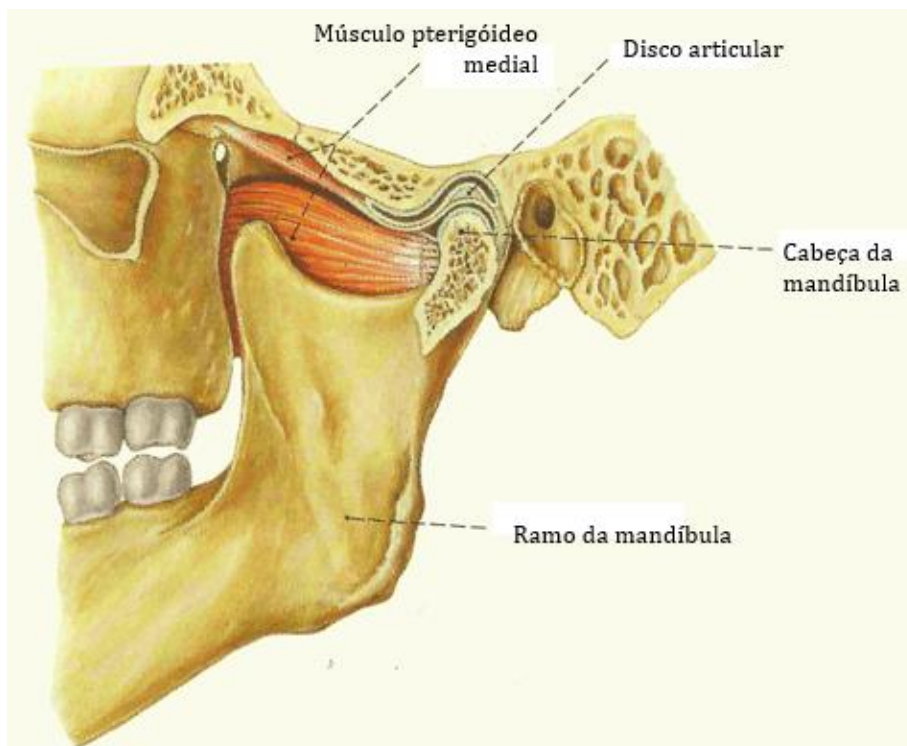


Figura 2.1 - Articulação temporomandibular, vista lateral. Adaptado de [6].

2.1 Anatomia

2.1.1 Estrutura óssea

As duas estruturas ósseas nas quais se encontra alojada a articulação temporomandibular (ATM) são, tal como o nome sugere, o osso temporal e a mandíbula. A mandíbula divide-se fundamentalmente em três partes, o corpo horizontal, curvo e convexo, e as duas partes laterais, os ramos. O corpo é encurvado em forma de ferradura e divide-se ainda em face interna, face externa e dois bordos, o superior ou alveolar, e o inferior [7]. Os ramos da mandíbula são retangulares e alargam no sentido de cima para baixo. Apresentam duas faces, uma lateral e outra medial, quatro bordos e dois processos. Os componentes associados à ATM incluem o processo condilar no posterior, seguido do ângulo e ramo da mandíbula inferior e exteriormente (Figura 2.2).

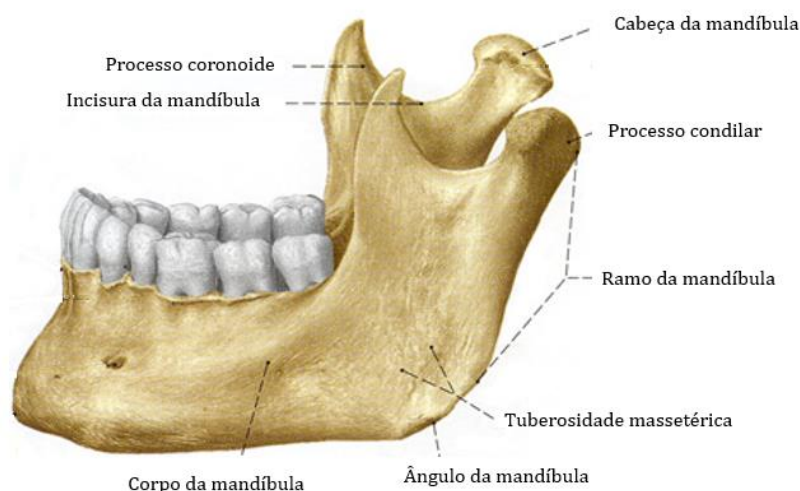


Figura 2.2 - Mandíbula, vista súpero-lateral. Adaptado de [6].

Os ossos temporais são estruturas idênticas localizadas nas superfícies laterais do crânio inferiores aos ossos parietais, posteriores ao osso esfenóide e anteriores ao osso occipital (Figura 2.3). Formam parte das fossas cranianas média e posterior e contribuem para a base do crânio. Além de proteger o cérebro, cada osso temporal abriga várias estruturas importantes tais como a orelha interna, incluindo o labirinto coclear, o nervo vestibulo-coclear, o nervo facial ou a artéria carótida interna. Para o osso temporal os componentes associados à ATM são a fossa mandibular, o processo zigomático e o processo estiloide (Figura 2.4).

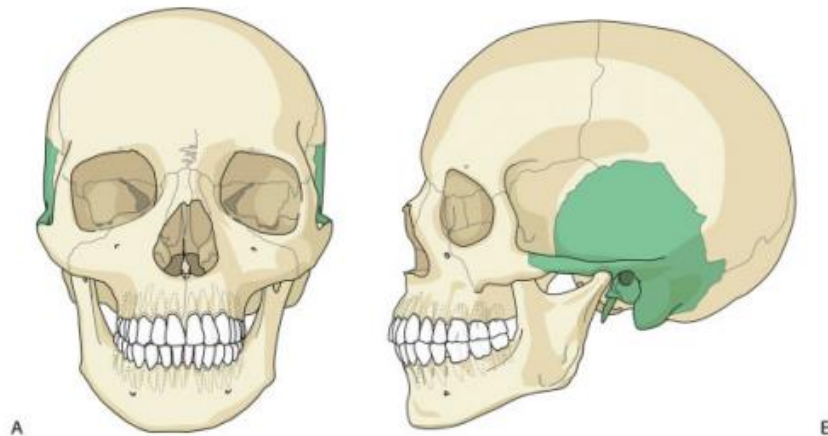


Figura 2.3 – Localização dos ossos temporais. Vista anterior (A) e vista lateral (B) [8].

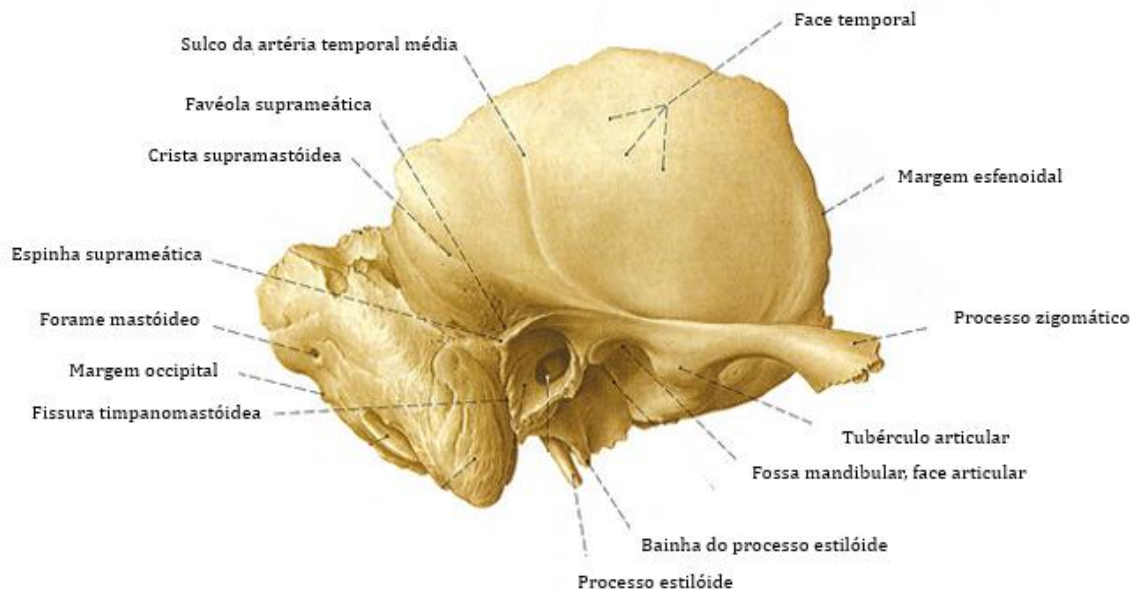


Figura 2.4 - Osso temporal, vista lateral. Adaptado de [6].

2.1.2 Ligamentos e outras estruturas

O ligamento lateral, também designado por ligamento temporomandibular, encontra-se ligado anteriormente ao côndilo e disco mandibular, estendendo-se até ao processo zigomático do osso temporal, e tem como função delimitar movimentos descendentes, posteriores e laterais da mandíbula [7]. O ligamento esfenomandibular liga a espinha do osso esfenóide e estende-se para o meio do ramo na superfície interna da mandíbula, suspendendo a mandíbula e limitando o movimento anterior excessivo. O ligamento estilomandibular corre do processo estilóide do osso temporal até ao limite posterior inferior do ramo da mandíbula. Encontra-se entre os músculos

masséter e pterigóideo medial e tem um papel na limitação do movimento anterior excessivo. A cápsula articular envolve a ATM anexando-se superiormente ao tubérculo articular e a fossa do osso temporal, e inferiormente ao côndilo da mandíbula. O disco articular está conectado à cápsula e ao tendão do músculo pterigóideo lateral, dividindo o espaço da junção em dois compartimentos separados, a superior e inferior. A superfície superior é ao mesmo tempo côncava e convexa para acomodar a forma da fossa, enquanto que a superfície inferior é apenas côncava, acomodando a superfície convexa do côndilo e permitindo que a articulação permaneça congruente ao longo do movimento. Como o disco articular está mais firmemente ligado à mandíbula do que o osso temporal, ele permite que este avance para o côndilo da mandíbula quando a boca se abre, retornando posteriormente quando a boca se fecha [7].

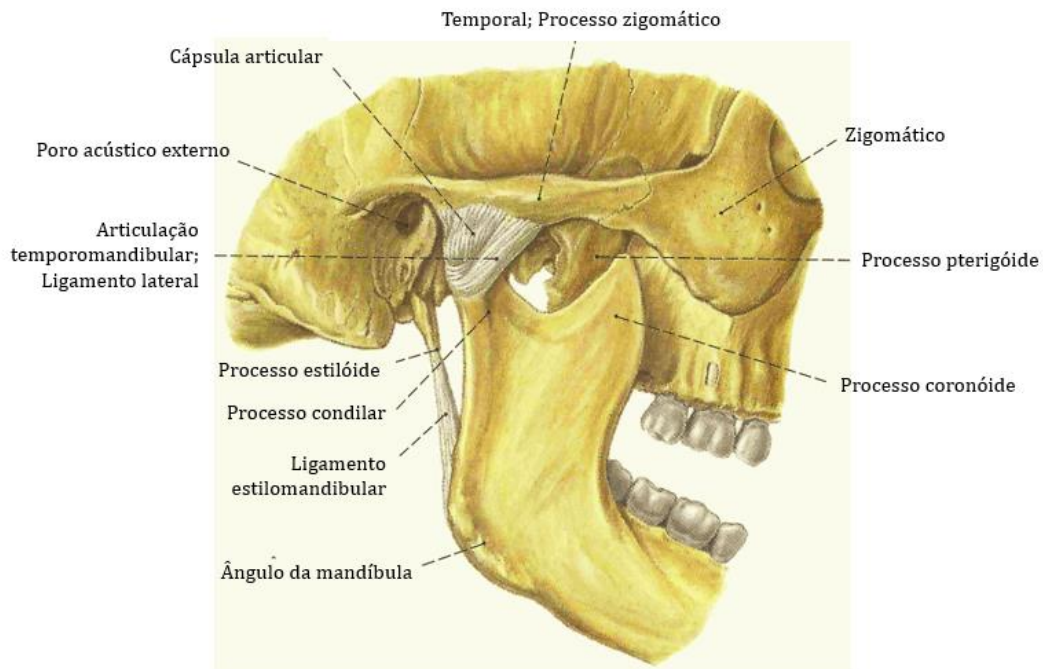


Figura 2.5 - Articulação temporomandibular, vista lateral. Adaptado de [6].

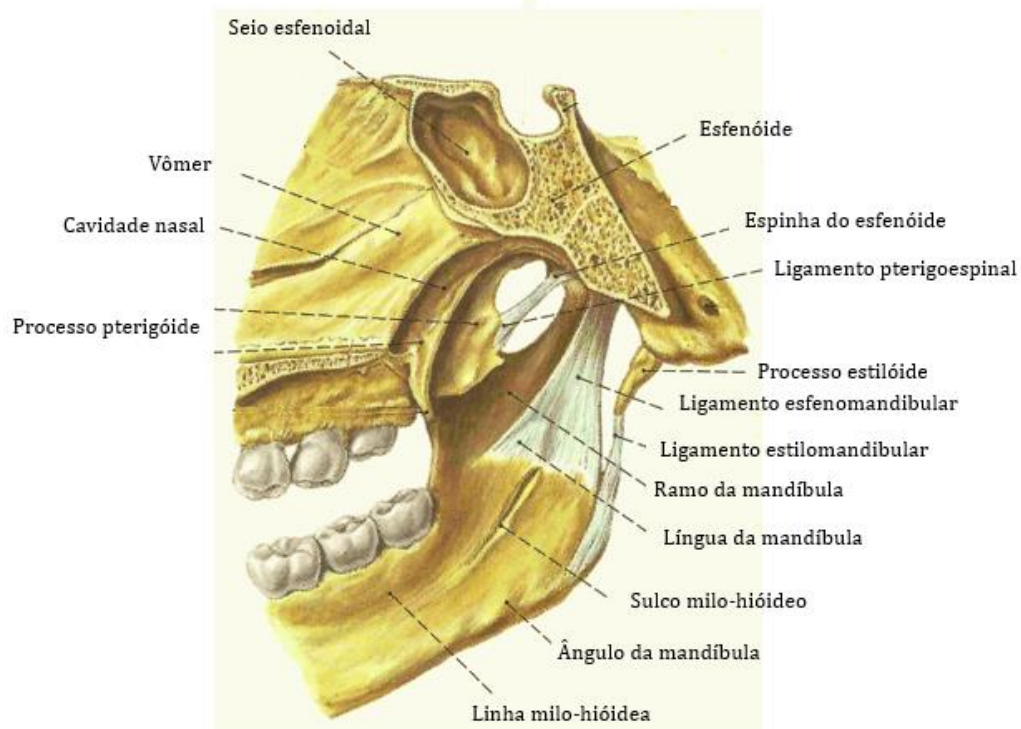


Figura 2.6 - Articulação temporomandibular, vista medial em corte. Adaptado de [6].

O disco articular tem uma forma oval e é a estrutura mais importante da articulação temporomandibular. Tem como funções permitir uma ação de rotação bem como ações de deslizamento entre o osso articular temporal e mandibular. Os movimentos de deslizamento ocorrem no compartimento superior enquanto que os de rotação ocorrem na parte inferior. Os tecidos de fixação retrodiscal são a parte intra-articular da articulação posterior ao côndilo e ao disco, atuando como uma almofada elástica nos movimentos mandibulares. Estes esticam instantaneamente nos movimentos de translação do côndilo (abertura da mandíbula), e dobram, sendo comprimidos contra o espaço articular, no fecho da mandíbula [3].

2.1.3 Músculos

Os principais músculos que controlam a articulação temporomandibular são o masséter, o temporal, o pterigóideo medial e o pterigóideo lateral, sendo este conjunto de músculos muitas vezes referido como os músculos da mastigação já que são estes os principais atuadores nos movimentos envolvidos na mastigação [7].

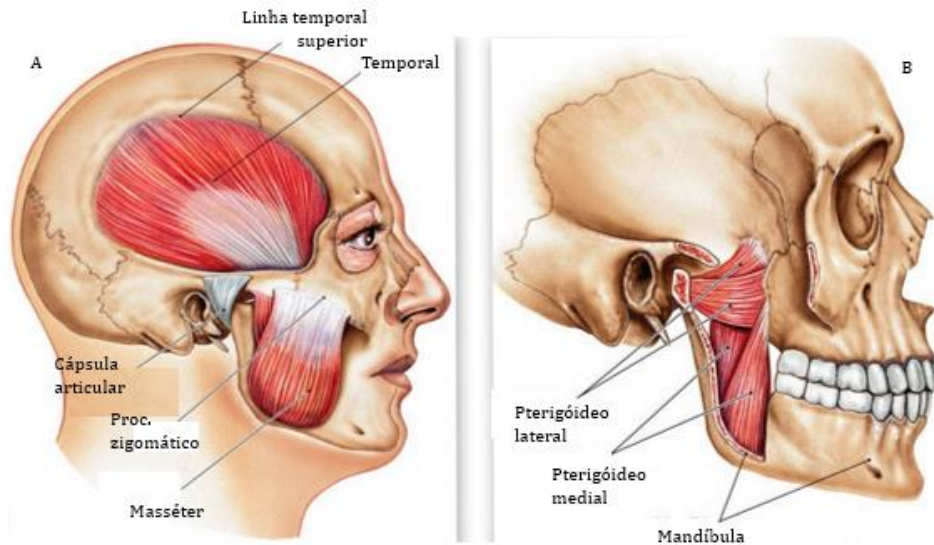


Figura 2.7 - Estrutura muscular. A: Vista lateral. B: Vista lateral, músculos pterigóideos expostos. Adaptado de [9].

O masséter é um músculo poderoso, espesso, que preenche a parte posterior da bochecha entre o ângulo mandibular e o arco zigomático. Divide-se em duas partes, a maior, superficial, e a menor, profunda. Ambas as partes correm de forma inferior e posterior, juntando-se para fixar no ângulo e no processo coronoide da mandíbula. Ambas as partes atuam como um músculo para elevar (fechar) a mandíbula. Atuando unilateralmente, o masséter contribui para os movimentos laterais (didução).

O temporal é um musculo plano e achatado que se encontra alojado na fossa temporal do crânio. Devido a sua forma achatada, as fibras mais anteriores correm quase verticalmente, as do meio estão em diagonal e as fibras posteriores estão quase horizontais. Da fossa temporal, as fibras ligam-se para formar um tendão que passa para o arco zigomático onde se insere no processo coronoide e na borda superior do ramo da mandíbula. A principal função do temporal é a de elevar a mandíbula, no entanto devido a diversa orientação das fibras o músculo também participa nas ações de retração da mandíbula. Em movimentos laterais, o músculo temporal contrai no lado para onde a mandíbula se move.

Embora seja menos poderoso, o pterigóideo medial é muito semelhante ao músculo masséter. Está localizado no lado medial (dentro) do ramo da mandíbula, enquanto que o masséter mais superficial está no lado lateral (fora). Este músculo surge do lado medial do osso esfenoidal e da tuberosidade da maxila, fixando-se no lado medial do ramo e ângulo da mandíbula. O pterigóideo medial participa nas ações de elevação, protrusão e desvio lateral da mandíbula.

O pterigóideo lateral é um musculo curto de forma cônica com duas cabeças, a superior e a inferior. A cabeça superior surge da superfície lateral da asa maior do osso esfenoide, enquanto que a inferior é originária da placa de pterigóideo lateral. As

suas fibras passam horizontalmente para trás e lateralmente, para serem inseridas numa depressão diante do pescoço do côndilo da mandíbula e na margem anterior do disco articular e na cápsula [7]. Este músculo fecha e protraí a mandíbula, sendo que a cabeça inferior participa na abertura da mandíbula [6].

2.2 Cinemática

Os músculos envolvidos na articulação temporomandibular são responsáveis por quatro movimentos característicos da mandíbula, apresentados na Figura 2.8. A elevação é considerada o movimento de fecho da boca, enquanto que a depressão da mandíbula é a abertura desta, onde o pterigóideo lateral é o principal músculo responsável por esta ação. A protrusão é a translação anterior da mandíbula causada pela contração simultânea do pterigóideo lateral e medial, enquanto que a retração corresponde à translação posterior da mandíbula devido à contração das fibras horizontais do músculo temporal.

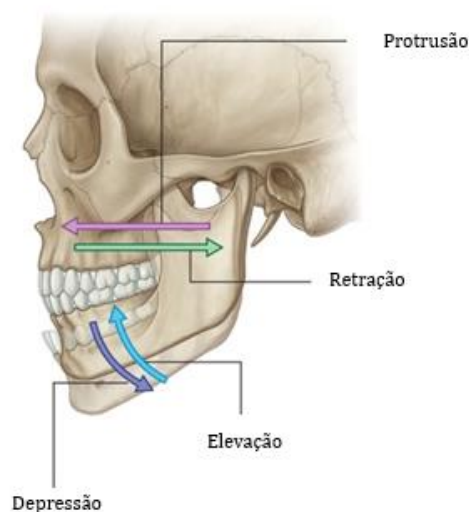


Figura 2.8 - Movimentos da mandíbula. Adaptado de [10].

O músculo temporal, masséter e pterigóideo medial elevam a mandíbula com grande força contra os maxilares. O pterigóideo lateral tem como função auxiliar a abertura da boca, no entanto a sua principal função é a de fazer avançar o côndilo e o disco articular para que a mandíbula protruda e os incisivos inferiores sejam projetados na frente da parte superior. Esta ação é assistida pelo pterigóideo medial. A mandíbula é retraída pelas fibras posteriores do músculo temporal. Se ambos os pterigóideos medial e lateral de um lado contraírem, esse mesmo lado da mandíbula é puxado para a frente enquanto que o côndilo oposto permanece fixo. A alternância desde tipo de movimento de ambos os lados é característica dos movimentos que ocorrem durante a trituração dos alimentos e é designada de didução [10].

Tabela 2.1 - Músculos da mastigação e suas ações [11].

Músculo	Função
Temporal	Elevação e retração da mandíbula; envolvido na didução
Masséter	Elevação e projeção da mandíbula; envolvido na didução
Pterigóideo lateral	Projeção e depressão da mandíbula; envolvido na didução
Pterigóideo medial	Projeção e elevação da mandíbula; envolvido na didução

2.2.1 Movimentos da mandíbula

Por ser uma articulação sinovial as ATM permitem que a mandíbula se mova livremente em qualquer eixo, envolvendo movimentos tanto de rotação como de translação. O movimento de rotação da mandíbula ocorre quando a boca abre e fecha em torno de um ponto fixo ou eixo dos côndilos, e pode ocorrer em três planos anatómicos [12]. No plano horizontal o movimento assemelha-se ao de uma dobradiça e é o único movimento de rotação pura que ocorre (Figura 2.9 - A) já que em todos os outros movimentos a rotação é acompanhada pela translação de um eixo.

No eixo vertical o movimento de rotação ocorre quando um côndilo se move anteriormente para fora da posição terminal de rotação com o eixo frontal do côndilo oposto, permanecendo na posição terminal de rotação.

No eixo sagital a rotação ocorre quando o côndilo se move para baixo, enquanto que o outro permanece na posição terminal de rotação.

Os movimentos de translação ocorrem quando a mandíbula se move para a frente, como no caso da protrusão, em que os côndilos se movem todos na mesma direção e angulação. Os movimentos de translação ocorrem dentro da cavidade articular superior do disco articular e a superfície inferior da fossa articular.

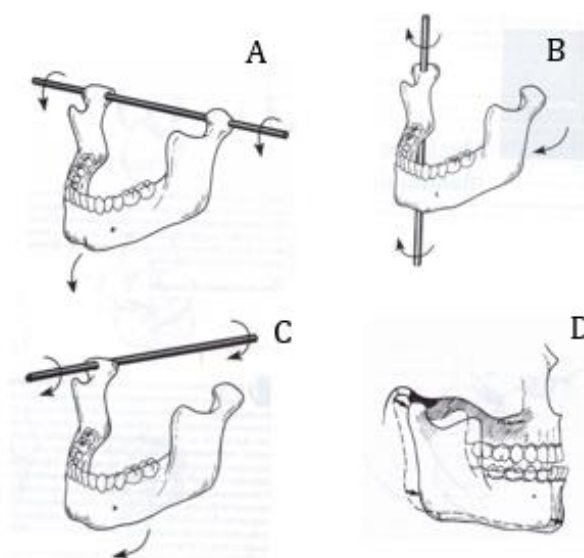


Figura 2.9 - A: Rotação da mandíbula sobre eixo horizontal. B: Rotação da mandíbula sobre eixo vertical. C: Rotação da mandíbula sobre eixo sagital. D: Movimentos de translação da mandíbula. Adaptado de [12].

2.2.2 Ciclo de abertura da mandíbula

Na fase inicial do ciclo de abertura da mandíbula, o movimento é principalmente rotativo do côndilo dentro da fossa, mas após os primeiros 20 milímetros de abertura o movimento passa a ser uma combinação de translações e rotações [13] pois para que a boca abra mais o côndilo e o disco tem de sair da fossa, abaixo da superfície côndilar. Nesta segunda fase, o movimento ocorre devido à tensão dos ligamentos temporomandibulares que, com a continuação da abertura, provocam uma translação anterior e inferior dos côndilos, sendo a abertura máxima alcançada quando os ligamentos capsulares impedem movimentos adicionais do côndilo [12]. A grande maioria dos estudos efetuados apontam para que a abertura máxima da mandíbula (distância entre os dentes superiores e inferiores) esteja diretamente relacionada com a altura e peso, sendo que a média ronda os 50 mm para a abertura máxima da mandíbula num adulto [14].

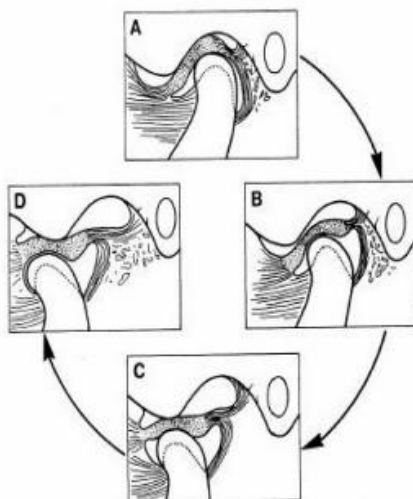


Figura 2.10 – Comportamento da articulação durante o ciclo de abertura da mandíbula.

2.2.3 Forças

A medição direta das forças atuantes na articulação temporomandibular é de dificuldade elevada devido às técnicas demasiado invasivas necessárias para a sua obtenção. Não obstante, Mesnard [15] e Koolstra *et al.* [16] apresentam estudos nos quais indicam as medições efetuadas, sendo as características das suas experiências exploradas do decorrer deste trabalho.

Para estimar as forças no ser humano recorre-se principalmente à análise de modelos gerados computacionalmente, tendo no passado sido utilizados medições diretas ou indiretas em animais. Este último método é considerado pouco exato pois a anatomia de outras espécies não representa com exatidão as peculiaridades do sistema músculo-esquelético do ser humano [17].

Capítulo 3 - Patologias

Os sintomas de dor na região orofacial representam mais de 10% dos motivos de consulta de origem não dentária. A origem destes sintomas pode ser inflamatória, vascular, músculo-esquelética, neuropática ou idiopática. As disfunções temporomandibulares e o bruxismo são as patologias mais correntes no grupo das causas músculo esqueléticas geradores de perturbações estruturais, desconforto ou incapacidade [2].

3.1 Disfunções temporomandibulares (DTM)

A principal causa de dor não dentária na região orofacial são as disfunções temporomandibulares, conjunto de disfunções e dor nos músculos da mastigação, articulações ou estruturas anexas como cabeça, ombro ou pescoço [18]. Estima-se que aproximadamente um terço da população mundial apresente algum sintoma destas disfunções, caracterizada principalmente por dor facial ou craniana, dificuldade de movimentação mandibular e sons articulares [2]. A incidência das DTM varia de acordo com diferentes estudos, mas estima-se que a sua prevalência na população mundial ronde os 5 a 25% [19].

Devido a sua complexidade as DTM encontram-se subdivididas em 4 grupos de patologias com as quais o médico deverá fazer um correto diagnóstico [2]. Os distúrbios dos músculos mastigatórios envolvem dor muscular oral, miospasmos, dor miofascial e mialgia de mediação central. Os distúrbios temporomandibulares são os mais comuns e compreendem alterações do complexo côndilo-disco, tais como deslizamentos e deslocamentos do disco articular com e sem redução, ou distúrbios inflamatórios como capsulite (inflamação da camada fibrosa externa da capsula articular) e artrite. A hipomobilidade mandibular crônica envolve contratura muscular e bloqueio coronoide, e por último os distúrbios de crescimento tais como distúrbios ósseos ou musculares congênitos e de desenvolvimento.

3.1.1 Deslocamentos discais

Um dos problemas mais comuns associado a articulação temporomandibular é o deslocamento do disco articular da sua posição normal em relação ao côndilo e fossa da mandíbula. Na grande maioria dos casos, o deslocamento do disco da sua posição natural é para a frente, pelo que se denomina deslocamento do disco anterior. A prevalência desta patologia ronda os 41% em pacientes com disfunções temporomandibulares [20]. Discos deslocados podem interferir com os movimentos do côndilo e provocar um aumento das forças aplicadas na superfície anterior dos côndilos [21].

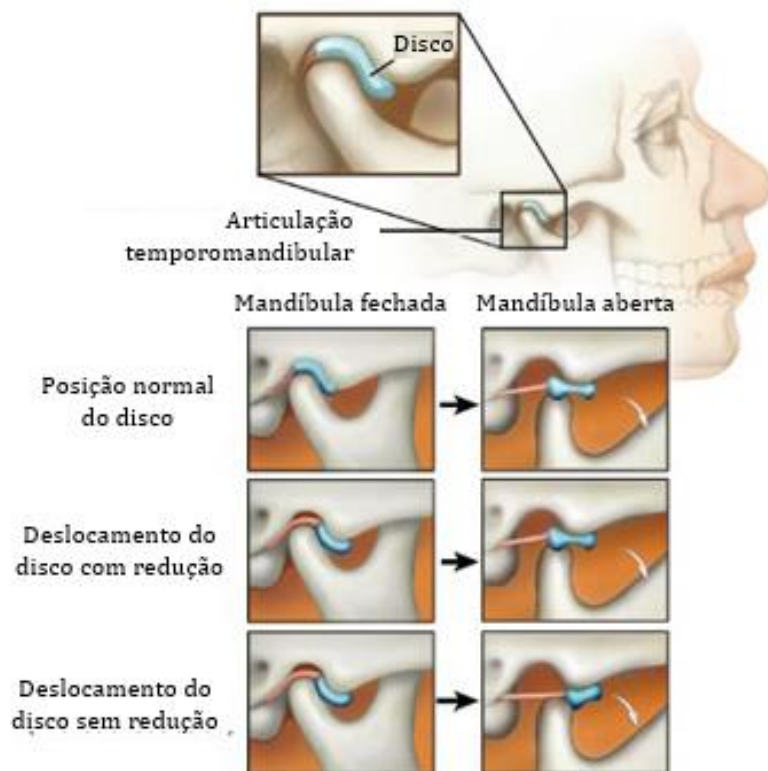


Figura 3.1 - Deslocamentos discais. Adaptado de [22].

3.1.1.1 Deslocamento do disco com redução

O deslocamento do disco com redução é o tipo mais comum de deslocamento discal [20]. É caracterizado pela presença de estalido durante o movimento da mandíbula quer no fecho ou na abertura, audível durante diferentes momentos da abertura ou fecho [23]. Ao avançar para a frente, o tecido retro discal é puxado para entre os dois ossos onde deveria estar o disco. Ao contrário do disco articular, este tecido é totalmente vascularizado e nervado pelo que geralmente causa muitas dores quando friccionado contra as estruturas ósseas. Ao estar deslocado para a frente, o disco torna-se um obstáculo para o movimento do côndilo ao abrir a mandíbula já que, para esta abrir totalmente, o côndilo tem de saltar para o centro do disco articular, voltando a deslizar para fora do disco no fecho da mandíbula. Estes “saltos” provocam um estalido na articulação sendo esta a principal característica dos deslocamentos discais com redução. Estudos realizados demonstram que estes pequenos ruídos associados a articulação temporomandibular afetam cerca de 60% da população mundial [24]. As causas deste sintoma podem provir de fatores como a hipermobilidade, alterações de forma ou adesão do disco. Estudos demonstraram que esta patologia pode permanecer estável por anos, não sendo recomendado

tratamento na ausência de dor ou restrição acentuada de movimentos, até porque é comum a articulação regenerar por si própria. Tratamentos conservativos ou não invasivos passam por técnicas de relaxamento, terapia quente-frio ou ingestão de analgésicos e apresentam uma taxa de sucesso entre 70-95% [24]. O tratamento invasivo, como cirurgia ou artroscopia, apesar de apresentar boas taxas de sucesso é apenas recomendado quando abordagens conservativas falham sucessivamente. Esta recomendação advém de existir sempre o risco de ocorrerem lesões nas estruturas articulares adjacentes aquando da cirurgia.

3.1.1.2 Deslocamento do disco sem redução

Em estados mais avançados de deslocamento do disco o côndilo mantém-se sempre atrás do disco articular, sem conseguir saltar para este. Esta condição chama-se deslocamento do disco sem redução e tem como característica uma incompleta abertura da boca muitas vezes referida como “closed lock” [5], que restringe a abertura para menos de 35mm [20], bem como dores na orelha e na zona da articulação temporomandibular. Na grande maioria dos casos, a condição resolve-se sozinha isto porque o tecido retro discal ao final de algum tempo torna-se tecido de cicatrização e consegue substituir o disco funcionalmente, estando associada uma taxa de melhoramento de 75% ao fim de dois anos e meio [20]. No entanto esta regeneração interna da ATM pode causar osteoartrite. Caso não haja melhoramento significativo ao fim de doze semanas após o deslocamento natural do disco sem redução, deve ser aplicado tratamento minimamente invasivo. Intervenções cirúrgicas só devem ser consideradas após seis meses de tratamento conservativo sem sucesso [20].

3.1.2 Disfunções inflamatórias da ATM

3.1.2.1 Osteoartrose

A osteoartrose é uma doença crónica caracterizada pela degeneração da cartilagem articular, perda óssea, formação de osteófitos e esclerose da articulação temporomandibular [21]. Esta patologia é a forma de artrite mais comum nas disfunções temporomandibulares [25] e está muitas vezes associada a disfunções dos côndilos ou anomalias estruturais da articulação, como por exemplo em deslocamentos do disco sem redução, já que se verifica a presença de osteófitos na superfície anterior do côndilo [21]. É considerada uma adaptação malsucedida da ATM quando sujeita a forças, como alterações no complexo côndilo-disco [26]. A presença de osteoartrose na população jovem e em desenvolvimento pode interferir com a correta formação dos côndilos o que leva a desvios mandibulares e retração da mandíbula [21].

3.1.2.2 Artrite reumatoide

A artrite reumatoide é uma doença crônica e inflamatória que, primeiramente, afeta estruturas como a membrana sinovial, cápsula, tendões e ligamentos. Posteriormente envolve a cartilagem articular e o osso subcondral [27]. Na ATM existe a proliferação da inflamação sinovial sobre a superfície da cartilagem, produzindo um tecido de granulação que destrói a cartilagem e o osso subcondral [28]. Quando esta condição afeta o crescimento mandibular designa-se artrite reumatoide juvenil [29]. Um estudo efetuado revelou que mais que 90% dos pacientes com artrite reumatoide no maxilar apresentam sintomas de disfunções temporomandibulares [30].

3.2 Bruxismo

O bruxismo é um hábito oral voluntário ou involuntário, consciente ou inconsciente, que pode ocorrer durante a vigília ou durante o sono de caráter rítmico de fracionamento dentário ou aperto da mandíbula [2]. Existem dois tipos de bruxismo, o que ocorre acordado e o que ocorre durante o sono, estando esta patologia diretamente relacionada com o sistema nervoso [31]. Esta é uma patologia frequente na população mundial, já que cerca de 85% das pessoas relatam episódios de ranger ou apertar de dentes em algum momento das suas vidas [2]. As causas do bruxismo permanecem controversas, no entanto a literatura tende para uma hipótese multifatorial, justificando a existência de bruxismo com fatores de origem sistémica, psicológica, ocupacional ou fatores relacionados com distúrbios do sono [2]. As possíveis consequências do bruxismo incluem dores nos músculos do maxilar ou na articulação temporomandibular, dores de cabeça, desgaste dentário e fraturas ou falhas na reestruturação dentária [31]. No entanto, a dor associada ao bruxismo nem sempre está presente pois vários pacientes que apresentaram evidência de bruxismo não sofriam de dor muscular nos músculos da mastigação [32].

3.3 Tratamentos das DTM

Como referido anteriormente, grande parte das patologias associadas à ATM pode ser tratada por tratamentos conservativos, como repouso ou com recurso a medicamentos. No entanto em casos mais complexos será necessária a intervenção cirúrgica, encontrando-se nesta secção exposto as operações mais comuns realizadas na articulação temporomandibular. Técnicas cirurgicamente minimamente evasivas como a artrocentese e a artroscopia são atualmente cada vez mais aplicadas em situações mais precoces, estando associadas a técnicas de reabilitação funcional contribuindo para uma melhoria dos resultados terapêuticos.

3.3.1 Artrocentese

Conhecida vulgarmente como “lavagem da articulação” [2], a artrocentese envolve a lavagem do compartimento da parte superior da articulação, que força o disco a separar-se da fossa, possibilitando a lavagem e remoção de componentes inflamados [33]. É uma técnica realizada normalmente por meio de uma dupla punção no compartimento superior e a apresenta uma morbidade muito baixa e com custos reduzidos. É muitas vezes aplicada para solucionar problemas relacionados com o disco articular que restringem a abertura total da boca, podendo ser também indicada para solucionar alguns casos de doença degenerativa como osteoartrose ou artrite reumatoide. Este tratamento serve principalmente para melhorar a mobilidade do disco e eliminar a resistência da translação condiliana, bem como eliminar a inflamação articular e a dor. É necessário tratamento oclusal e fisioterapia intensiva após a realização desta técnica. A taxa de sucesso global ronda os 80%, e constitui um recurso válido a ter em conta antes de aplicar técnicas mais invasivas como a artroscopia [2].

3.3.2 Artroscopia

Uma artroscopia é uma operação cirúrgica minimamente invasiva em que o cirurgião examina a articulação através da inserção de um aparelho chamado artroscópico numa pequena incisão, instrumento que tem uma pequena câmara que permite ao operando visualizar e tratar danos existentes. A abordagem cirúrgica da ATM faz-se através da introdução de uma cânula com cerca de 3mm de diâmetro perto da cartilagem do trágus, na orelha, sendo atualmente considerado um método cirúrgico de primeira linha no tratamento da disfunção temporomandibular [2]. A fase cirúrgica consiste na remoção de aderências, tratamento de zonas de sinovite e reposicionamento do disco articular. Além da capacidade de diagnóstico, a artroscopia pode dividir-se em dois grupos de atuação, a lise lavagem, ou a cirurgia propriamente dita. Devido a sua natureza muito pouco invasiva a artroscopia é um método muito viável para corrigir problemas na articulação quando os tratamentos mais conservadores falham. A artroscopia tem como grande vantagem o curto espaço de tempo em que o paciente pode retomar a sua atividade normal após a cirurgia, bem como uma elevada taxa de melhoria no decréscimo da dor ou na capacidade de abertura da boca, melhorias que rondam os 90%. Os contras desta intervenção são claramente os elevados custos, quer de operação quer dos equipamentos necessários, tais como a câmara de vídeo com óticas de dimensões muito pequenas [2].

3.3.3 Artroplastia

Também conhecida como cirurgia aberta da articulação temporomandibular, a artroplastia tem como objetivo a reestruturação da anatomia e função da ATM. É a abordagem cirúrgica de excelência para a remodelação e reparação das estruturas articulares. É muitas vezes aplicada como último recurso quando métodos de tratamento mais conservadores falham. Quando aplicada à ATM, permite a visualização e acesso direto à articulação, possibilitando a reparação, fixação ou substituição do disco articular (discectomia), a remodelação do côndilo mandibular, remoção de blocos anquilóticos e a realização de biopsias quando necessário. A artroplastia é geralmente aplicada quando existe uma luxação não redutível do disco articular, alterações degenerativas importantes da articulação, anquilose (rigidez da articulação), entre outras. A incidência de complicações no pós-operatório é muito reduzida, rondando apenas os 1% [2].

Os motivos da necessidade de uma cirurgia de reconstrução total da articulação temporomandibular podem provir de patologias degenerativas, como anquilose ou formas de artrite, ou fraturas condilares. Um estudo [34] analisou um grupo de 27 pacientes que necessitaram da substituição total da ATM por próteses aloplásticas, realizadas entre 1996 e 2011, onde as taxas de incidência e causas da cirurgia encontram-se apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Patologias e taxas de incidência para artroplastia da ATM [34].

Patologia	Taxa de incidência (%)
Anquilose	18,5
Poliartrite	18,5
Mutilação da TMJ	22,2
Fratura condilar	14,8
Reabsorção condilar idiopática	11,1
Neoplasias	7,4
Agenesia condilar	7,4

Capítulo 4 – Modelos multi-corpo da ATM

A análise dinâmica é um método essencial para compreender a complexa biomecânica e anatomia do sistema mastigatório. A análise através da dinâmica de corpo rígido transforma forças em movimentos, é muito flexível e permite a investigação da influencia da ativação muscular nos movimentos do corpo [16], [35]. A complexidade do sistema mastigatório torna difícil e muitas vezes impossível a medição direta das propriedades físicas e fisiológicas, pelo que os modelos clarificam as relações entre estruturas e respetivas funções. Os vários grupos musculares existentes e a sua complexa interação para produzir forças numa mandíbula limitada por articulações de formas irregulares tornam impossível a medição exata de variáveis, como cargas ou tensões musculares, ou a relação física entre a estrutura óssea e as suas funções [35]. Muitos músculos abrangem a articulação temporomandibular e o movimento pode ser produzido por uma combinação infinita de forças musculares. A modelação computacional é o único meio disponível para quantificar as forças de músculos, articulações e implantes de forma não invasiva durante o movimento [36]. Estes modelos clarificam as relações entre estrutura e função, sendo muito utilizados eficientemente em muitas outras regiões músculo esqueléticas. Os modelos permitem de uma forma muito facilitada a alteração de parâmetros dos seus componentes ou na sua estrutura, utilizar data incompleta e permitir o cálculo hipotético de variáveis em falta [35]. Diversos modelos da mandíbula já foram criados, demonstrando mecânicas musculares bastante plausíveis, principalmente para simular condições estáticas para validar dados obtidos em medições experimentais. Existem também modelos dinâmicos, que oferecerem uma abordagem sofisticada para análise tridimensional e simulação, uma vez que permitem a desmontagem do sistema e a exploração dos fatores que formam o movimento da mandíbula [35]. Estes modelos mais complexos apresentam-se como uma das formas práticas de prever as variáveis como tensões musculares e cargas articulares em seres humanos, estudar causas e efeitos e prever os resultados prováveis de intervenções cirúrgicas. É imperativo compreender que os modelos multi-corpo são modelos hipotéticos, e sempre que possível deve-se proceder à sua correção e adequação pois estes devem ser confirmados por experimento de forma a que as suas previsões sejam validadas pela comunidade científica.

4.1 Criação de um modelo

O desenvolvimento de um modelo multi-corpo é um processo bastante complexo e computacionalmente exigente. Tipicamente, a morfologia relevante a ser inserida num modelo multi-corpo da mandíbula é obtida a partir de imagens tomográficas retiradas de um paciente [35]. O detalhe estrutural requerido é

frequentemente limitado a regiões de contacto dentro das articulações e aos locais de ligação muscular. Em muitas situações a complexa anatomia da dentição e das articulações é simplificada. Modelos funcionais da fisionomia muscular são usados para possibilitar o movimento cinético da mandíbula. Não existe um comportamento padrão de um músculo para todas as situações, pelo que a modelação dos músculos é geralmente feita através das suas propriedades microscópicas ou através da relação da força muscular com a velocidade de contração. O primeiro caso é menos utilizado pois a complexidade da modulação matemática de eventos microscópicos é bastante superior, pelo que a descrição do comportamento muscular através do movimento é a mais usual. Estes modelos designados por “Hill-type models” derivam de experiências que demonstram a relação entre a força muscular e a velocidade de contração, representam a resposta mecânica do músculo e são constituídos por três elementos, um contrátil e dois elásticos, um em série e outro em paralelo. A obtenção das propriedades dos diferentes músculos é obtida em medições *in vivo* ou *in vitro*, tal como descrito mais à frente no Capítulo 6, no entanto quase todos os modelos já desenvolvidos são coincidentes na anatomia. O resultado das medições *in vitro* levadas a cabo no trabalho de Koolstra *et al.* [16] é apresentado na Tabela 6.2, onde se encontram presentes as forças máximas suportadas por cada músculo bem como o seu comprimento máximo. Nas próximas secções deste capítulo serão descritos três modelos multi-corpo já desenvolvidos e validados pela comunidade científica.

4.2 Modelos multi-corpo

O modelo proposto por M. de Zee *et al.* [37] foi desenvolvido com recurso ao software AnyBody™ Modeling System (AnyBody Technology A/S, Aalborg, Dinamarca). O modelo da mandíbula foi baseado em imagens obtidas por scan de num cadáver de 30 anos e posteriormente processadas utilizando um software apropriado [37]. O modelo gerado contém dois componentes rígidos, o crânio e a mandíbula. Para a fossa mandibular foi atribuída uma restrição planar num plano definido com ângulo de 30° em relação ao plano oclusal e inclinado 5° medialmente. Desta forma, cada ATM tem a possibilidade de rodar em todas as três orientações e liberdade para realizar movimentos de translação no plano definido. Cineticamente foi definido que o côndilo da mandíbula se encontra sempre em contacto com a fossa mandibular, desprezando a existência do disco articular que se encontra entre as duas superfícies. O modelo foi equipado com 24 atuadores tendo-musculares que controlam o movimento da mandíbula, tendo sido cada um deles modelado como músculo do tipo “Hill-type” compostos por elementos contrateis e elásticos [16]. Os parâmetros dos músculos atuadores, como o pico da força isométrica e o comprimento ótimo da fibra, foram atribuídos os valores indicados no trabalho de Koolstra and Van Eijden [16] e encontram-se listados na Tabela 6.2. Para o

comprimento dos elementos elásticos o software utilizado permite o ajuste do seu comprimento definindo a posição onde o músculo atinge a sua força máxima, tendo sido para este estudo arbitrado que tal acontecia a uma distância de 12mm entre os incisivos.

No trabalho apresentado por Koostra and van Eijden [16] foi criado um modelo tridimensional do sistema mastigatório com recurso ao software MADYMO (TNO Automotive, the Netherlands), um programa de simulação que combina modelação por elementos finitos e multi-corpo. O modelo contém dois corpos rígidos, o crânio e a mandíbula, que interagem através de duas articulações temporomandibulares, cada uma com seis graus de liberdade. O movimento da mandíbula em relação ao crânio foi assegurado pela adição de doze pares de músculos, tal como indicado na Tabela 4.2. Os músculos foram modelados como “Hill-type”, constituídos por um elemento contráctil, um elemento elástico paralelo e outro em série. Os parâmetros estruturais, como comprimento da fibra ou tensão máxima foram obtidos a partir do estudo de oito cadáveres [38]. Cada ATM foi modelada por duas camadas articulares deformáveis de meio milímetro de espessura que se encontram ligadas ao osso temporal e ao côndilo da mandíbula. Entre estas duas camadas foi introduzido um disco articular deformável que se move livremente. A geometria das estruturas deformáveis da articulação foi obtida a partir da ATM direita de um cadáver, sendo a articulação da esquerda modulada como simétrica da direita.

O modelo gerado foi usado para estudar o comportamento do disco articular presente na ATM e a sua influência nos movimentos da mandíbula. As simulações efetuadas foram iniciadas com a mandíbula fechada, seguidas da ativação simultânea dos músculos a 10%, 50% e 100% da sua capacidade. Os movimentos de fecho da mandíbula sem resistência dos alimentos foram realizados posteriormente, simulando a ação muscular do masséter, pterigóideo medial e músculos do temporal a 1% e a 10%. A influência da resistência de alimentos no fecho da mandíbula foi investigada adicionando uma restrição que introduz uma força constante no fecho da mandíbula. Esta força tem de magnitude 50N nos incisivos e 80N unilateralmente entre os molares superior e inferior do lado direito. Os movimentos de fecho da mandíbula com alimentos foram simulados por uma ativação de 25% dos músculos de fecho, valor suficiente para superar esta restrição.

O modelo desenvolvido por D. Ackland *et al.* [36] teve como objetivo desenvolver e testar uma prótese fabricada por impressão 3D para um paciente que necessitava de uma substituição total dos componentes da articulação temporomandibular. O paciente apresentava registos de osteoartrose na articulação do lado esquerdo da mandíbula. Para desenvolver o implante foram retiradas

imagens tomográficas da cabeça do paciente, possibilitando a reconstrução em geometria 3D do crânio, mandíbula, glenoide e discos articulares, com recurso a software apropriado. Com auxílio de outro software, foi então desenvolvida uma nova prótese “Melborne” de geometria derivada do modelo músculo-esquelético criado. O componente do côndilo da prótese foi desenhado de forma a percorrer o contorno do ramo da mandíbula, sendo a sua fixação garantida com auxílio a seis parafusos bi-corticais.

De forma a estimar a performance funcional da prótese em resposta a cargas, tais como forças da ATM ou stress nos parafusos, foi criado um modelo multi-corpo. Foi desenvolvido um modelo genérico de corpo rígido à escala da mandíbula, sendo as geometrias da mandíbula e do crânio e a arquitetura muscular baseadas no trabalho de Ackland *et al.* [39]. A mandíbula foi modelada como um corpo rígido que articula com o crânio através de duas ATM com seis graus de liberdade cada. Os músculos representados no modelo foram definidos como músculos do tipo “Hill-type” com os parâmetros descritos na Tabela 6.2.

As forças em todos os músculos da mandíbula e as forças resultantes nas ATM foram calculadas para valores de mordida normal, 200N, valor aplicado nos molares [40], [41] e para valores de fecho bilateral da mandíbula de 800N foi aplicada para o valor de força máximo, que representa o valor de carga máxima na ATM [42]. Seguidamente foi realizada virtualmente uma condilectomia, remoção do disco articular, do lado esquerdo da mandíbula e implantado a nova prótese “Melbourne”. O pterigóideo lateral foi removido da simulação para representar o desacoplamento deste músculo aquando da cirurgia. Foi definido contacto rígido entre o componente do côndilo da prótese e entre o ramo da mandíbula, já que o implante é fixado com recurso a seis parafusos. Os vetores da força muscular obtidos usando o modelo de corpo rígido para a mastigação e a mordida de força máxima foram aplicados diretamente ao modelo de elementos finitos. Todas as simulações foram repetidas após substituir a prótese pelo implante “Biomet Microfixation prosthetic TMJ”, dispositivo *standart* no mercado. Para esta simulação o componente condilar foi fixado por quatro parafusos.

Tabela 4.1 - Músculos analisados nos diversos trabalhos [16,36,37].

Temporal	Anterior; Posterior
Masséter	Superficial; Anterior; Posterior
Pterigóideo	Medial; Lateral superior; Lateral inferior
Hióideos	Digástrico anterior; Milo-hióideo anterior e posterior; Gênio-hióideo

4.3 Conclusão

Os modelos apresentados apresentam coerência ao nível dos músculos considerados responsáveis pelos movimentos da mandíbula. Todos eles utilizam os doze pares de músculos definidos por Kooltra et al. [16] e as suas respetivas propriedades musculares. Os músculos são sempre definidos como musculo-tendão atuadores do tipo “Hill-type”, modelos musculares constituídos por um elemento contrátil, e dois elásticos, um em série e outro em paralelo. O modelo proposto por M. de Zee [37] é o único dos três que não recorre a uma análise por elementos finitos, e o único que despreza a existência de um disco articular, tal como descrito na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Propriedades dos modelos analisados.

Autor	Número de músculos	Tipo de musculo-tendão	Análise por E.F.	Disco articular
M. de Zee [37]	24	“Hill-type”	X	X
Koolstra and van Eijden [16]	24	“Hill-type”	✓	✓
Ackland [36]	24	“Hill-type”	✓	✓

4.4 Modelo multi-corpo desenvolvido

Neste capítulo será descrito o modelo multi-corpo da articulação adotado para a realização deste trabalho. O modelo multi-corpo da mandíbula utilizado para efetuar as simulações será foi baseado no utilizado por Mark de Zee *et al.* [37], já indicado previamente neste capítulo, servindo esta secção para melhor introduzir as características do mesmo.

Para o desenvolvimento do modelo da articulação temporomandibular foi utilizado o software AnyBody™ Modeling System (*AnyBody Technology A/S*, Aalborg, Dinamarca). O sistema de modelação do programa permite a criação de modelos músculo-esqueléticos detalhados e simulações que preveem o comportamento do corpo humano em atividades diversas. O programa contém um reportório de modelos músculo-esqueléticos existentes, denominada de AMMR (*AnyBody™ Managed Model Repository*), sendo que estes modelos são tipicamente desenvolvidos em projetos de pesquisa em instituições académicas. Este reportório é subdividido em duas componentes. A primeira, de nome “*Body*”, contém vários ficheiros e arquivos necessários para montar um modelo genérico do corpo humano. O outro subdiretório de nome “*Application*” contém vários exemplos de demonstração, maioritariamente criados por utilizadores do software, que pretendem simular condições dinâmicas do sistema de modelagem do AnyBody™. Estes modelos mostram exemplos de vários campos como ortopedia, reabilitação, desportos ou atividades diárias. Um destes modelos disponíveis no software, que será alvo de análise neste capítulo, é um

modelo validado que simula o funcionamento da mandíbula humana em diversas atividades.

O método de análise do modelo baseia-se no uso de modelos de corpo rígido com o objetivo de calcular as forças musculares individuais e as reações nas ATM. Para tal é feita uma análise por dinâmica inversa, o que implica o conhecimento da cinemática e das forças externas do corpo, neste caso a força da mordida, para a determinação das forças internas. No entanto, para o cálculo individual das forças internas, a análise por dinâmica inversa tem um problema associado, a falta de equações de equilíbrio suficientes para determinar todas as forças musculares. A solução tradicional para este problema é a utilização de métodos de otimização [37].

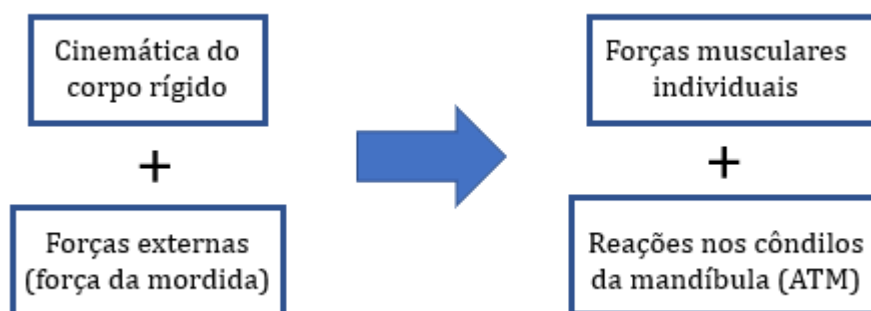


Figura 4.1 – Inputs e outputs do modelo multi-corpo.

4.4.1 O modelo da mandíbula – “*Mandible Chewing And Clenching*”

O modelo multi-corpo da mandíbula é baseado em imagens retiradas por tomografia computadorizada de um paciente do sexo masculino de 30 anos. O modelo permite simular dois casos distintos, a mordida, e os movimentos envolvidos na mastigação [37]. Adicionalmente, o modelo permite também simular os comportamentos da mandíbula em situações em que o comprimento do ramo esquerdo se encontra reduzido. No trabalho de Mark de Zee *et al.* [37] é apresentado o caso real de um paciente que apresentava hipoplasia unilateral, patologia caracterizada pelo desenvolvimento incompleto de um órgão ou tecido [43], e que por essa razão exibia uma redução no ramo esquerdo da mandíbula de 15mm.

O modelo multi-corpo criado permite-nos obter uma grande diversidade de dados a analisar. Os resultados para as diferentes análises expostas no estudo [37] encontram-se apresentados em forma de comparação entre a atividade muscular medida experimentalmente no paciente e os valores obtidos através das simulações no modelo. Existem algumas particularidades importantes de serem referidas antes de serem apresentados os resultados. Por exemplo, nas medições *in vivo* efetuadas no paciente apenas foi possível medir a atividade EMG a partir da parte anterior do músculo temporal, embora no modelo multi-corpo este músculo encontre-se dividido numa parte superior e inferior. Isto leva a que apenas seja possível apresentar

resultados comparativos entre a atividade estimada no modelo e aquela medida pelos eletrodos. Além disso, foi apenas inserido um eletrodo de arame em cada músculo pterigóideo lateral, enquanto que no modelo este músculo se encontra subdividido em duas partes, a inferior e superior. Desta forma, as atividades estimadas do pterigóideo lateral superior e inferior foram comparadas com a atividade EMG medida por um par de eletrodos.

O modelo da mandíbula utilizado foi validado através da medição dos movimentos do maxilar de um paciente de 33 anos. Para tal foi utilizado um pequeno magneto que foi fixado nos incisivos inferiores. A atividade elétrica (EMG) dos músculos temporal e masséter foi medida bilateralmente com eletrodos de superfície, enquanto que a atividade dos músculos pterigóideos lateral e medial foi medida com eletrodos de fio inseridos de acordo como descrito por um estudo anterior. As forças da mordida foram medidas com um transdutor de força. Ao paciente foi pedido que realizasse durante um período de 10 segundos as seguintes tarefas:

Tarefa 1: Movimento de protrusão cíclica da posição intercuspal para protrusão submáxima correspondente à posição incisivo-incisivo (Figura 4.2) com uma frequência de aproximadamente 0,5 Hz.

Tarefa 2: Movimento de mastigação vazio, mas sem produzir uma força de mordida com uma frequência de aproximadamente 1 Hz.

Tarefa 3: Mordida com o transdutor de força entre os incisivos. Com as tarefas de aperto, o sujeito foi solicitado a aumentar lentamente sua força de mordida para atingir um pico próximo ao máximo em torno de 5 s, após o que a força de mordida lentamente poderia diminuir novamente.

Tarefa 4: Mordida unilateral com o transdutor de força entre os primeiros pré-molares esquerdos.

Tarefa 5: Mordida unilateral com o transdutor de força entre os primeiros pré-molares direito.

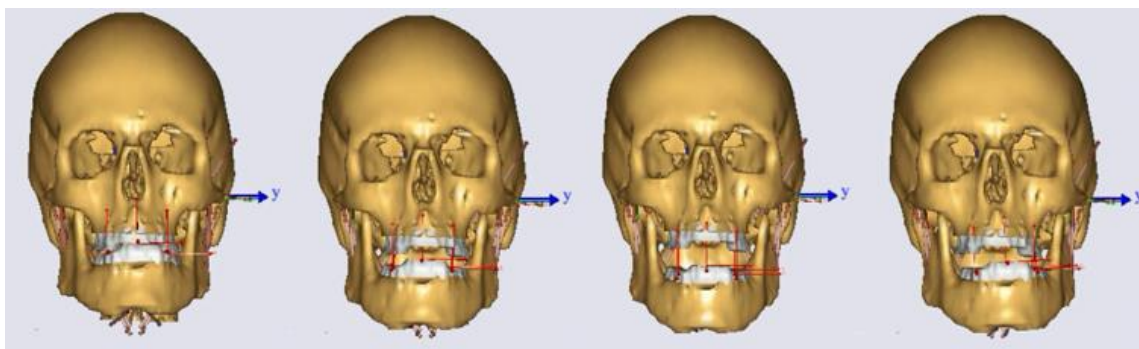


Figura 4.2 - Tarefa 1, movimento cíclico.

Os registos de EMG obtidos foram então processados de forma a ser possível a sua comparação com os valores da atividade muscular obtidos nas simulações do modelo músculo-esquelético. A atividade muscular estimada foi definida como a força do músculo dividida pela força máxima muscular para esse músculo particular nesse particular instante de tempo. Os dados cinemáticos dos movimentos da mandíbula para a tarefa 1 registados pelo magneto fixado nos incisivos frontais do maxilar e a força simulada, presente na Figura 4.4, foram introduzidos no modelo, enquanto que a força da mordida registada pelo transdutor de força, apresentada na Figura 4.3, foi utilizada como input no modelo para as simulações da mordida.

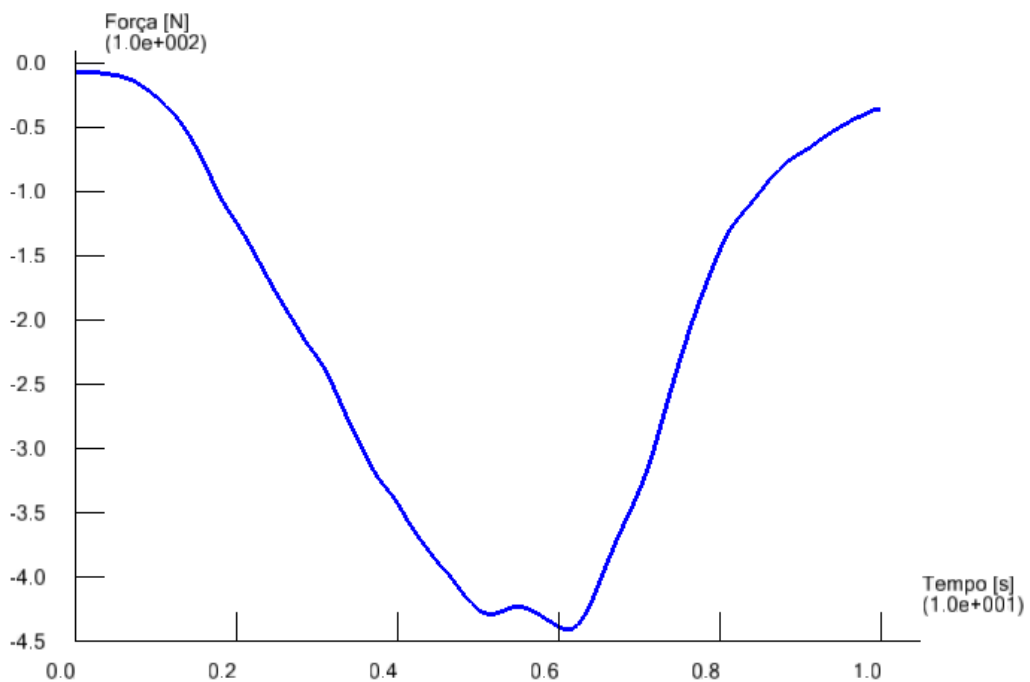


Figura 4.3 - Força medida durante a mordida unilateral, apresentando um valor máximo de 441N.

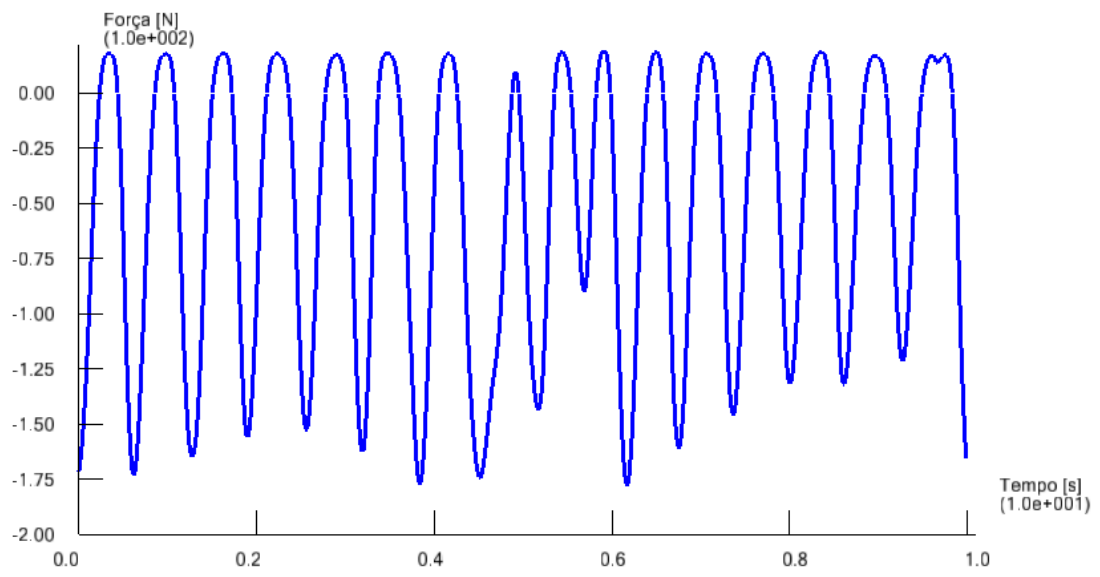


Figura 4.4 - Força simulada utilizada para o movimento cíclico de mastigação, presente na tarefa 1.

Capítulo 5 - Resultados modelo AnyBody

Neste capítulo encontram-se expostos os resultados extraídos através das simulações efetuadas no modelo AnyBody referentes às tarefas da mordida e do movimento cíclico de mastigação. As simulações foram efetuadas para o caso da mandíbula simétrica em ambas as tarefas e para uma situação de redução do ramo esquerdo de 3 mm, para a tarefa 4. Esta redução foi considerada de forma poder analisar as diferenças de comportamento numa mandíbula sem o disco articular. Os gráficos foram extraídos diretamente do modelo e representam as reações presentes em ambas as articulações temporomandibulares, bem como o comportamento e contribuição dos músculos durante a realização das tarefas. O conjunto das diferentes simulações apresentadas neste capítulo encontram-se dispostas na Figura 5.1, onde é indicado as características de cada uma, tendo-se obtido as forças de cada grupo muscular e as reações nas articulações.

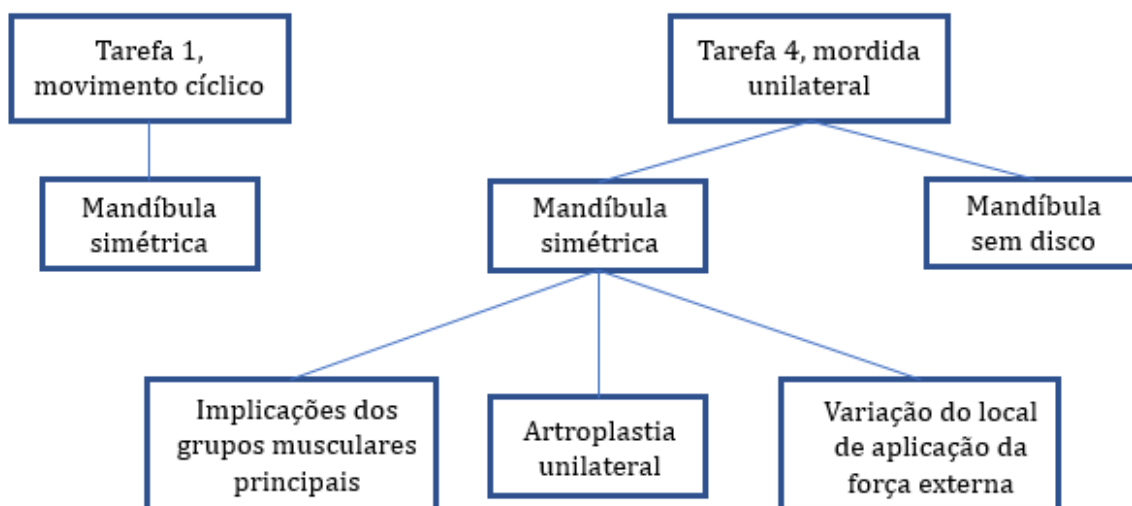


Figura 5.1 - Conjunto de simulações efetuadas no modelo.

Tal como descrito anteriormente, o modelo individualiza a contribuição muscular de cada músculo na realização das tarefas. Nos resultados não se encontram presentes os músculos ditos passivos, entre os quais o digástrico anterior, milo-hióideo anterior e posterior e gênio-hióideo, pois a sua contribuição tanto para a mordida ou para a mastigação são praticamente inexistentes, como apresentado na Tabela 5.1. Desta forma encontram-se presente nos gráficos das forças musculares os valores da força dos quatro grupos musculares principais, designados de músculos da mastigação, o grupo masséter, temporal, pterigóideo lateral e pterigóideo medial [6], [7], [10] sendo que a todos os gráficos se aplica a legenda genérica presente na Figura 5.2.

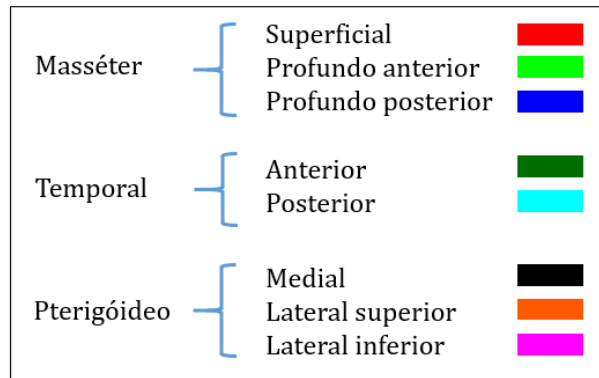


Figura 5.2 - Legenda dos músculos presentes nos gráficos.

5.1 Movimento cíclico de mastigação (tarefa 1)

A Figura 5.3 mostra o valor das reações nas articulações na realização da tarefa 1 (movimento cíclico de mastigação). Para esta tarefa foi utilizado um valor simulado de força de mordida, presente na Figura 4.4. Os músculos que apresentam maior atividade muscular são o masséter superficial e temporal anterior, existindo também uma contribuição menor do pterigóideo medial e do pterigóideo lateral inferior, este último bem mais acentuado no lado direito da mandíbula.

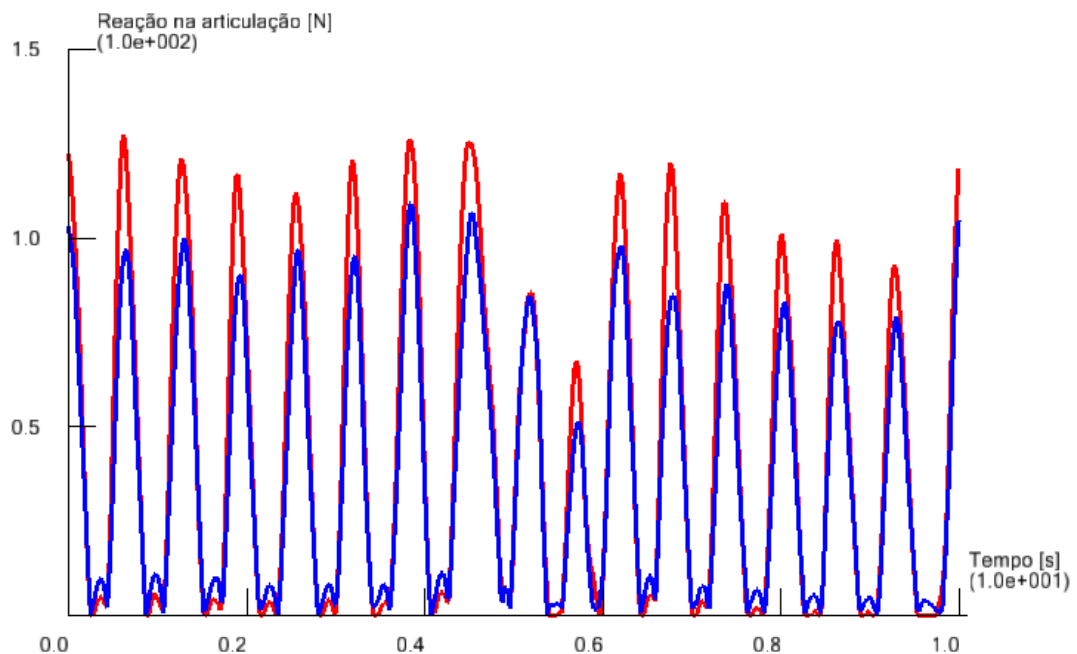


Figura 5.3 - Reações estimadas na ATM do lado esquerdo (vermelho) e direito (azul) em mandíbula simétrica para a tarefa 1 (mastigação).

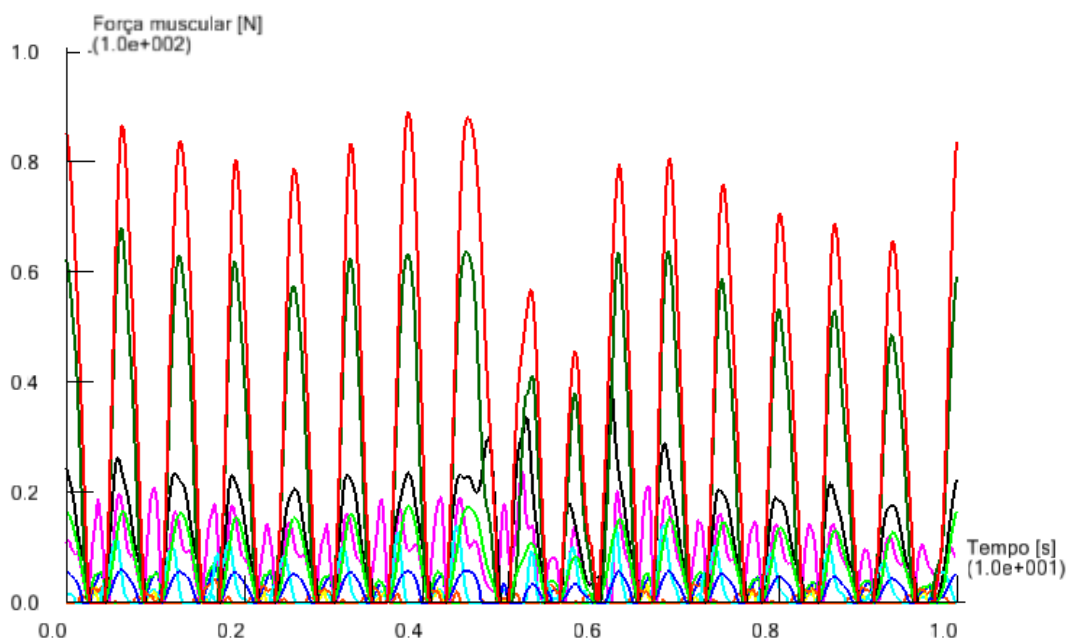


Figura 5.4 - Força muscular estimada de cada músculo do lado esquerdo em mandíbula simétrica para a tarefa 1 (legenda: ver Figura 5.2).

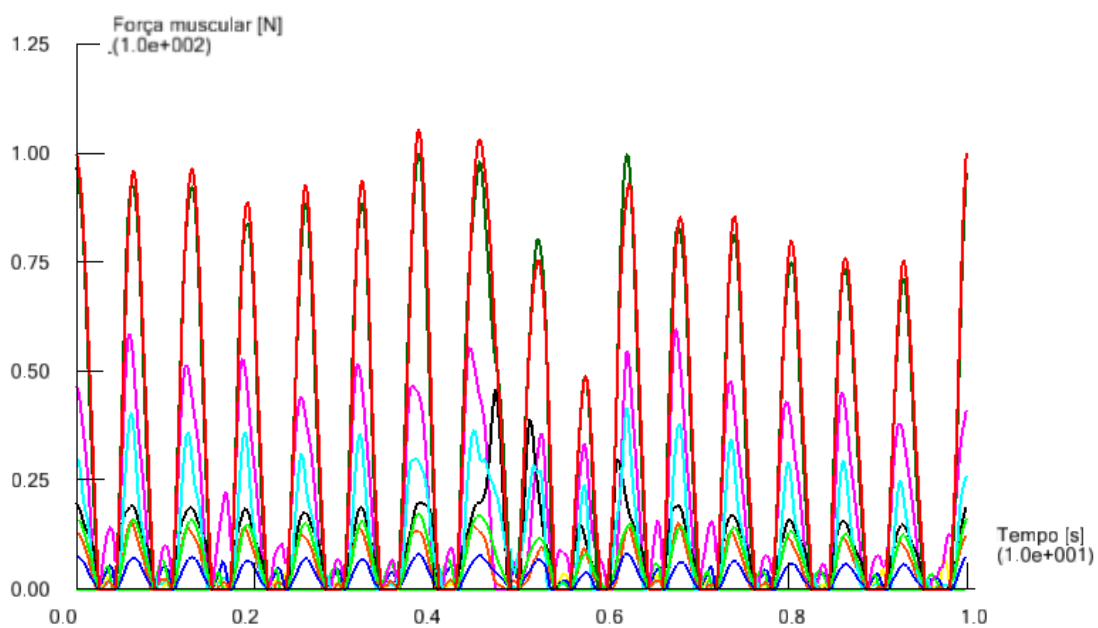


Figura 5.5 - Força muscular estimada de cada músculo do lado direito em mandíbula simétrica para a tarefa 1 (legenda: ver Figura 5.2).

5.2 – Mordida unilateral com o transdutor de força presente entre os primeiros pré-molares do lado esquerdo da mandíbula (Tarefa 4).

5.2.1 – Caso simétrico

Nas Figuras 5.6, 5.7 e 5.8 encontra-se descrito as forças presentes nas articulações temporomandibulares e a atividade muscular estimada para a realização da tarefa 4, mordida unilateral com o transdutor de força entre os primeiros pré-molares do lado esquerdo da mandíbula. A força da mordida, que foi utilizada como input no modelo, encontra-se disposta na Figura 6.1 e teve um valor máximo de 441N. Esta tarefa é caracterizada por uma força muscular bastante mais acentuada do masséter superior, temporal anterior e pterigóideo medial quando comparado com os restantes grupos musculares. As forças registadas nos músculos do lado esquerdo da mandíbula são na generalidade superiores às presentes do lado direito, principalmente para o temporal anterior e pterigóideo medial. A reação obtida na ATM da direita é ligeiramente superior à do lado esquerdo. Isto é o esperado pois o transdutor de força encontra-se do lado esquerdo, sendo este o lado ativo da mandíbula onde é exercida a pressão contra o transdutor de forças.

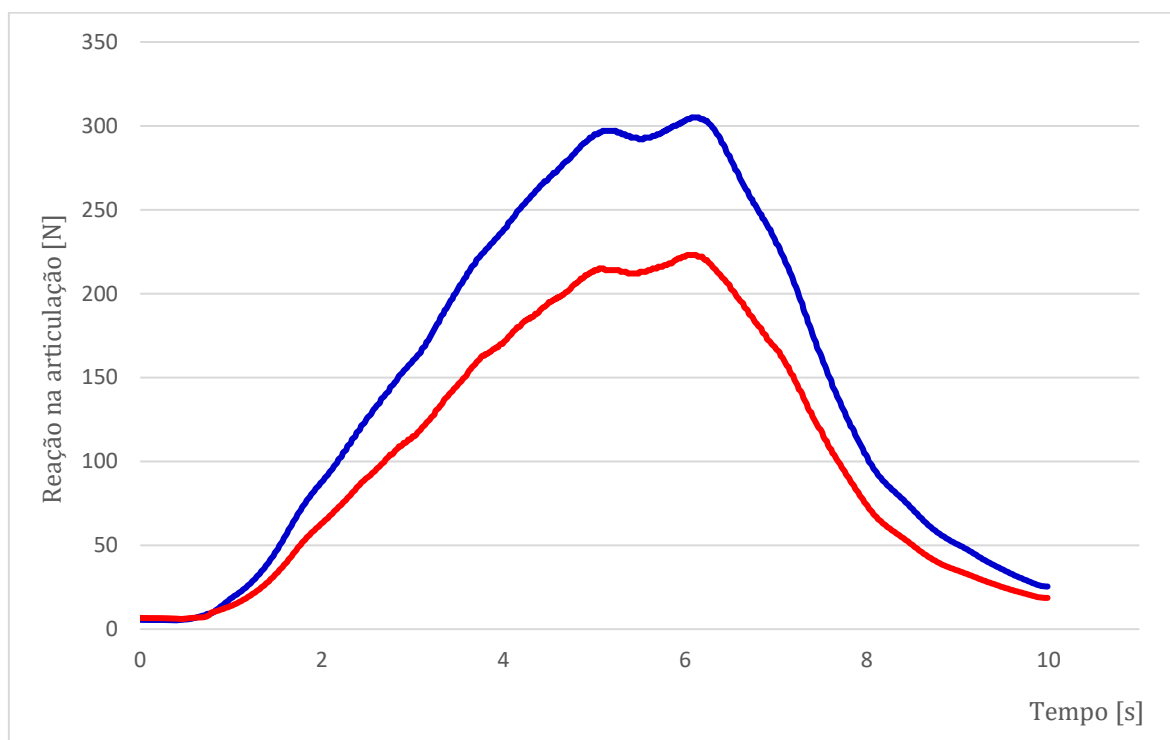


Figura 5.6 - Reações estimadas na ATM do lado esquerdo (vermelho) e direito (azul) em mandíbula simétrica para a tarefa 4.

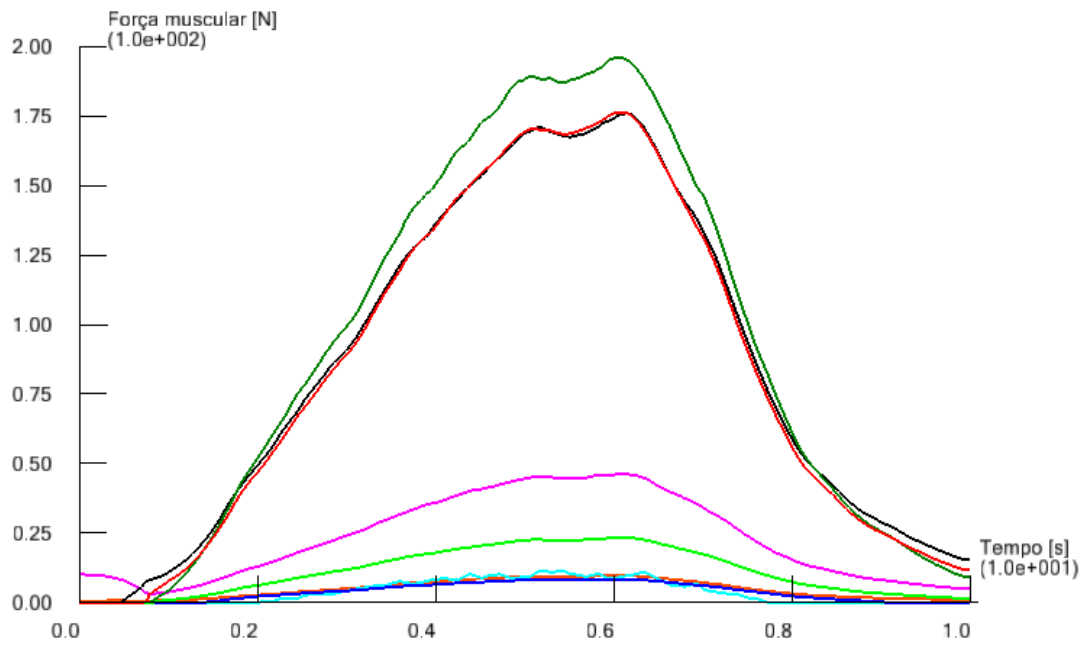


Figura 5.7 - Força muscular estimada de cada músculo do lado esquerdo (ativo) da mandíbula simétrica para a tarefa 4 (legenda: ver figura 5.2).

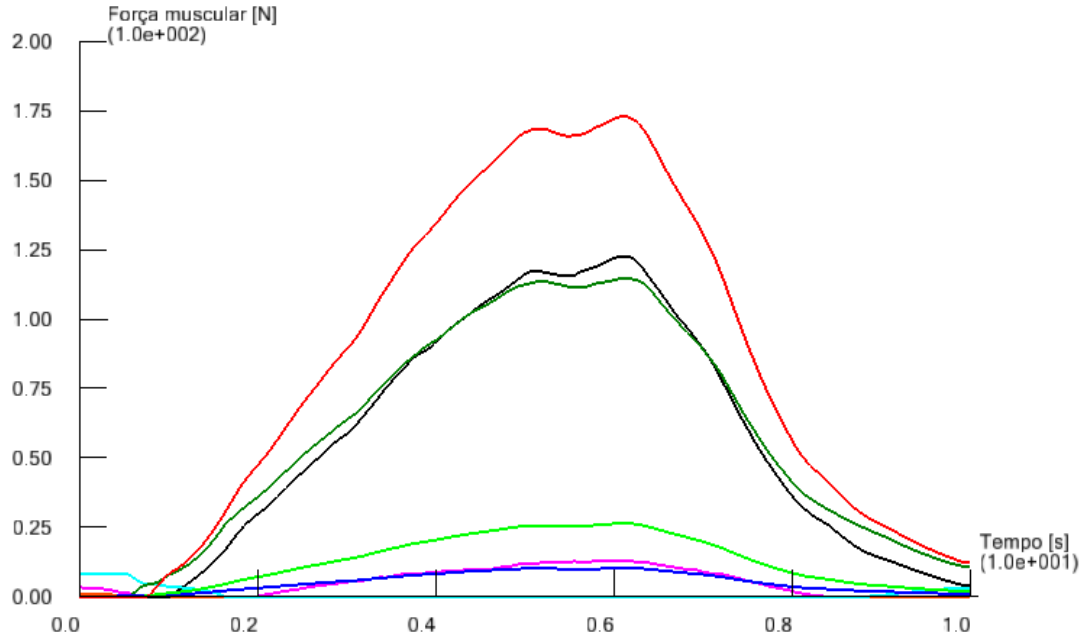


Figura 5.8 - Força muscular estimada de cada músculo do lado direito (passivo) da mandíbula simétrica para a tarefa 4 (legenda: ver figura 5.2).

5.2.2 – Simulações com modelo sem disco do lado ativo

O modelo criado foi ajustado de modo a que o ramo do lado ativo da mandíbula fosse encurtado em 3mm, de forma a mostrar de que forma as reações nas articulações se comportam na ausência do disco articular. O comportamento muscular e as reações nas articulações encontram-se dispostos nos gráficos seguintes. Verifica-se uma diminuição ligeira no valor da reação obtida do lado ativo (esquerdo) e um aumento ligeiro no lado passivo (direito) da mandíbula. Para a atividade muscular praticamente não existem alterações no comportamento dos três principais grupos musculares ativos, masséter superficial, temporal anterior e pterigóideo medial.

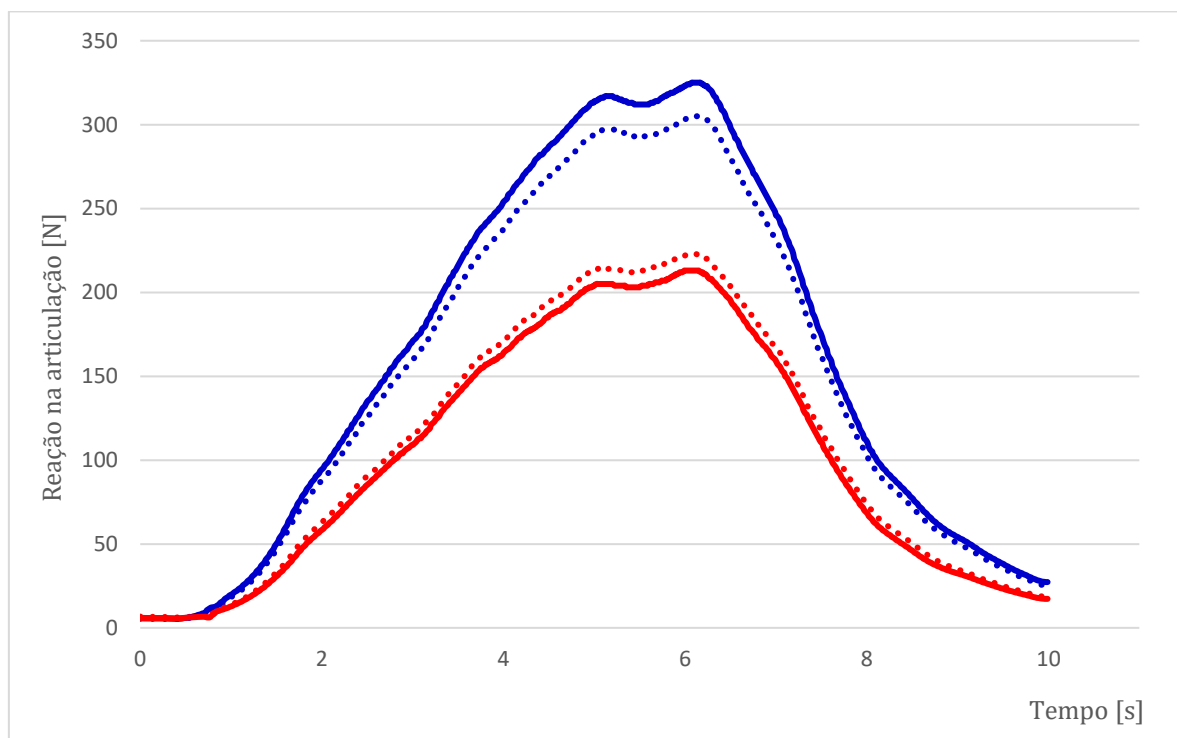


Figura 5.9 - Reações estimadas na ATM do lado esquerdo (vermelho) e direito (azul) em mandíbula com ramo reduzido em 3mm do lado esquerdo, para a tarefa 4. A picotado encontram-se os valores dispostos na Figura 5.6, para comparação.

A redução de 3mm do ramo esquerdo da mandíbula, simulando a ausência do disco articular, provocou ligeiras alterações nas reações obtidas nos cêndilos. A alteração da anatomia da mandíbula levou a que no lado ativo, esquerdo, a reação máxima reduzisse em cerca de 4%, e no lado passivo, direito, aumente em 7%.

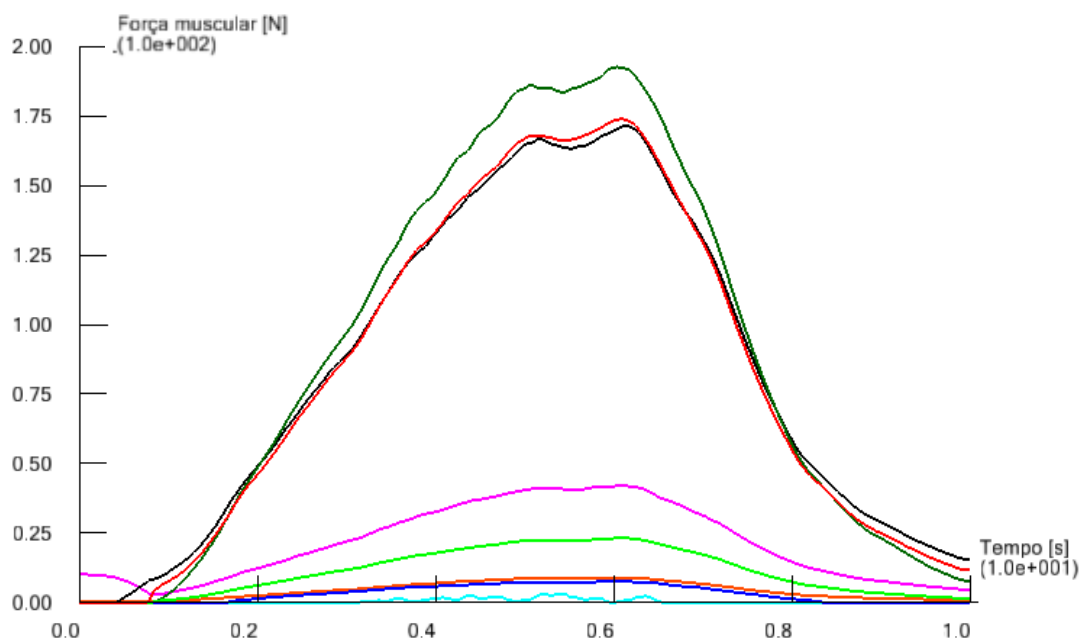


Figura 5.10 - Força muscular estimada de cada músculo do lado esquerdo (ativo) em mandíbula com ramo reduzido em 3mm do lado esquerdo, para a tarefa 4 (legenda: ver figura 5.2).

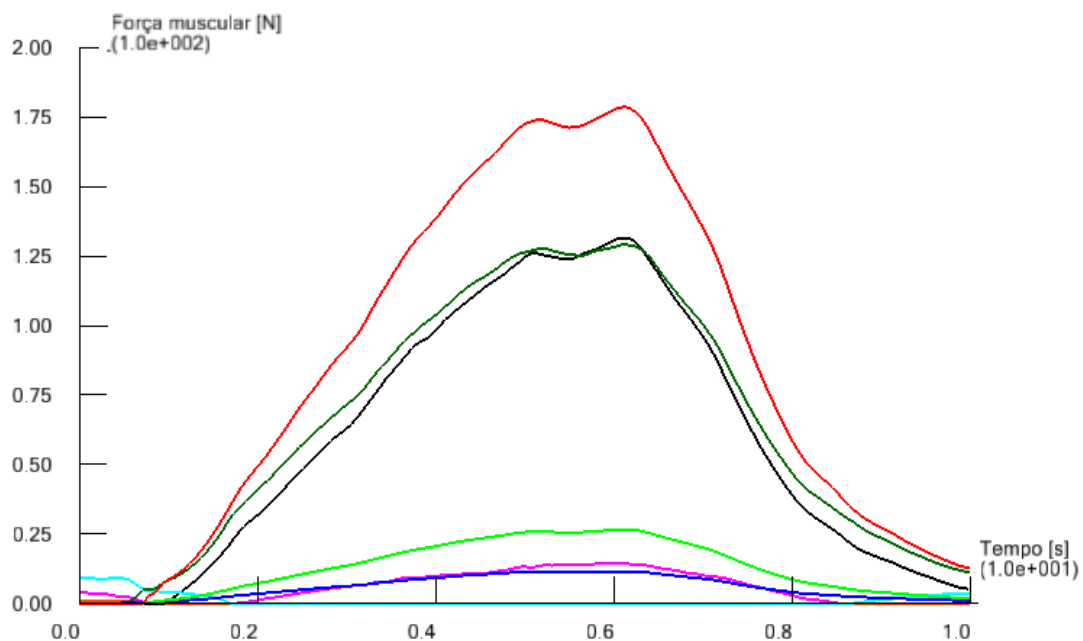


Figura 5.11 - Força muscular estimada de cada músculo do lado direito (passivo) em mandíbula com ramo reduzido em 3mm do lado esquerdo, para a tarefa 4 (legenda: ver figura 5.2).

5.3 – Resultados

As simulações efetuadas até este ponto são equivalentes às levadas a cabo por Mark de Zee *et al.* [37]. Embora os resultados não estejam apresentados de forma semelhante, já que a comparação dos valores retirados do modelo é feita com uma atividade experimental, aqui pretende-se uma análise mais completa às funcionalidades do modelo AnyBody. No trabalho de Mark de Zee *et al.* [37] são exploradas as variações das forças musculares numa situação de perda óssea, enquanto que neste trabalho optou-se por encontrar as implicações da falta do disco articular do lado ativo da mandíbula para as simulações da mordida unilateral. Os grupos musculares que apresentam maior atividade no movimento da mandíbula são, tal como descrito no trabalho [37], o masséter, o temporal e o pterigóideo medial.

Para além dos casos presentes no trabalho [37], o primeiro referente ao movimento de mastigação e o segundo à mordida com análise no transdutor de força inserido nos pré-molares esquerdos, ambos já analisados, o modelo permite explorar o modelo de diversas outras formas. Por exemplo, tendo retirado a contribuição muscular de cada um dos músculos, seria interessante observar como a mandíbula se comportaria caso um destes músculos estivesse em falta. Esta análise é de extrema utilidade já que como descrito anteriormente, em situações em que é necessária intervenção cirúrgica, muitas vezes é necessário cortar alguns músculos de forma a atingir, como no caso de uma artroplastia, o disco articular, o que invalida os músculos danificados. Um dos aspetos comum a todas as simulações foi para as forças obtidas, estas foram todas retiradas por um transdutor de força localizado no lado esquerdo da mandíbula. Para as simulações na mandíbula simétrica, seria interessante verificar que caso o transdutor de força estivesse localizado do lado direito as forças analisadas seriam iguais ao simulado para o lado esquerdo. Adicionalmente, todas as simulações foram efetuadas com o transdutor localizado entre os pré-molares, no entanto seria interessante ser possível efetuar as mesmas simulações, mas com o dispositivo localizado noutros pontos da mandíbula. O modelo permite de uma forma simples efetuar todas estas medições, pelo que em seguida se encontram os valores retirados. Optou-se por variar os parâmetros apenas para a tarefa 4, pois para além das contribuições de cada músculo serem mais facilmente identificáveis, é nesta tarefa que os músculos atingem forças próximas do seu limite.

Tabela 5.1 - Forças musculares e reações nas ATM para as diferentes tarefas.

Simulação	Tarefa 1		Tarefa 4		Tarefa 4, sem disco	
	Lado	Esquerdo	Direito	Esquerdo	Direito	Esquerdo
Músculos	Força (N)					
Mas. Sup.	89,065	105,438	176,366	173,004	173,864	178,537
Mas. Pro. Ant.	17,566	17,197	23,377	26,392	23,169	26,678
Mas. Pro. Post.	6,022	8,151	8,391	10,174	7,582	11,483
Temp. Ant.	68,078	100,122	195,898	114,723	192,574	129,049
Temp. Post.	14,071	41,663	11,386	8,254	3,079	9,097
Pte. Med.	39,725	45,648	175,923	122,579	171,428	131,453
Pte. Lat. Sup.	4,202	15,415	9,689	0,891	8,962	1,038
Pte. Lat. Inf.	23,909	59,581	46,236	13,115	42,009	14,551
Dig. Anterior	7,327	6,935	1,539e-8	1,68	1,696e-8	1,638
Génio-hióideo	7,150	6,235	1,284e-8	1,012	1,601e-8	0,865
Mil. Anterior	3,599	7,115	0,065	1,095e-8	0,207	1,401e-8
Mil. Posterior	2,402	2,834	0,904	1,452e-9	0,977	1,263e-9
ATM	127,18	109,12	223	305	213	325

5.4 - Implicações dos grupos musculares

Tal como visível nos dados obtidos nas simulações anteriores, a maior implicação muscular na dentada unilateral provem dos músculos masséter, temporal e pterigóideo medial. O modelo permite-nos avaliar a implicação de cada grupo muscular nas reações, através da omissão de um ou mais músculos, simulando assim a tarefa pretendida apenas com a contribuição dos músculos desejados. Foram efetuadas quatro simulações, apresentadas em seguida, em que a tarefa 4 foi realizada com a contribuição de três grupos musculares em vez dos tradicionais quatro, ou seja, ao modelo foi retirado de ambos os lados o grupo muscular masséter, seguidamente foi retirado todo o músculo temporal, pterigóideo medial e por último o pterigóideo lateral.

5.4.1 – Influência do músculo masséter

Os gráficos presentes nas Figuras 5.12, 5.13 e 5.14 são referentes à tarefa 4, mordida sobre os pré-molares esquerdos, sem a presença do grupo muscular masséter (masséter superficial, profundo anterior e profundo posterior). Na atividade muscular é visível, principalmente no pterigóideo medial, o fenómeno de “overload” muscular. Isto significa que o músculo, para realizar a tarefa, ultrapassou o valor definido com o stress máximo capaz de aguentar (Tabela 6.2).

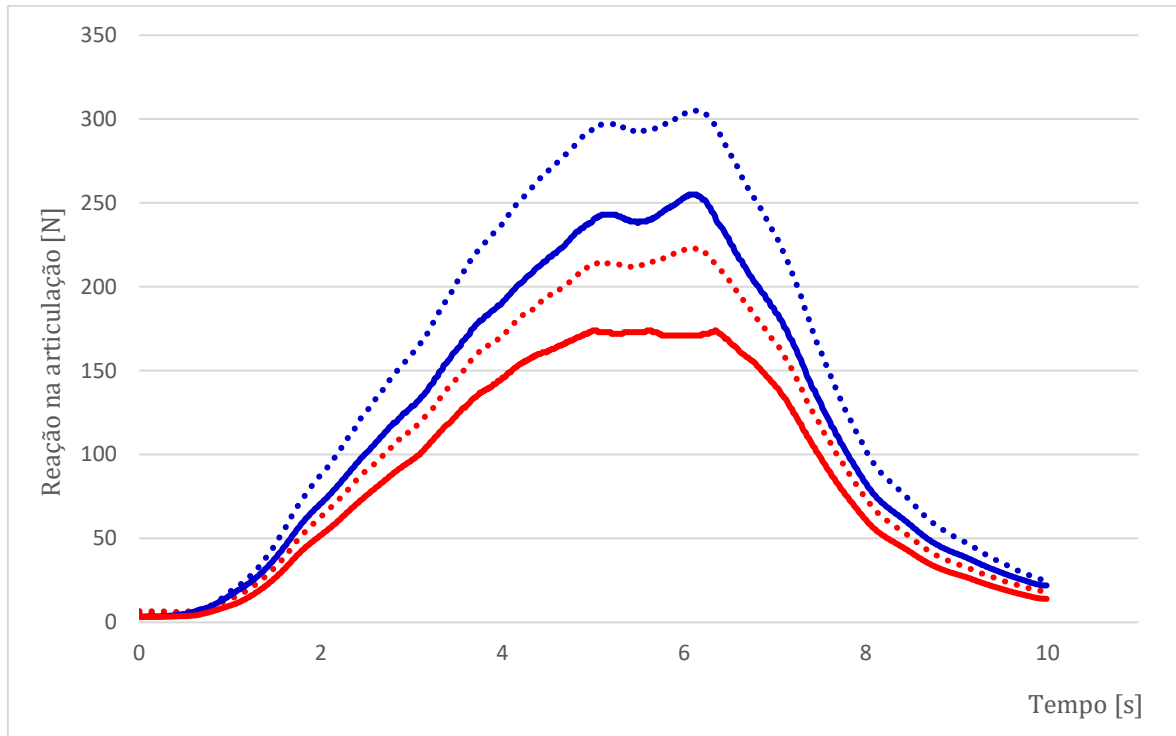


Figura 5.12 - Reações estimadas na ATM do lado esquerdo (vermelho) e direito (azul) em mandíbula simétrica para um caso hipotético de ausência do grupo muscular masséter, para a tarefa 4. A picotado encontram-se os valores dispostos na Figura 5.6, para comparação.

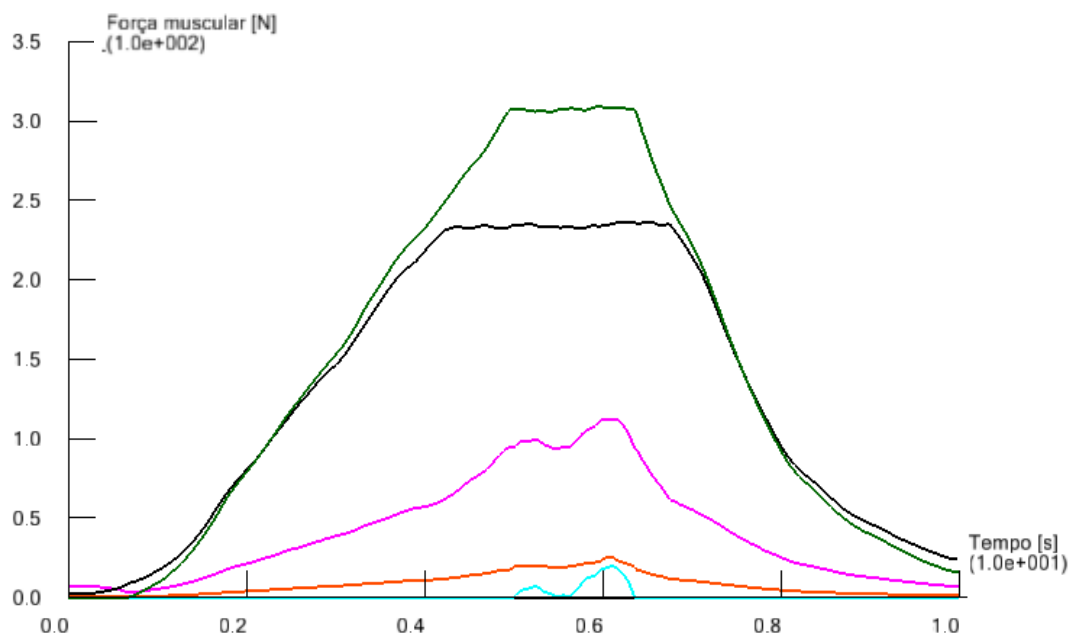


Figura 5.13 - Força muscular estimada de cada músculo do lado esquerdo (ativo) da mandíbula simétrica para um caso hipotético de ausência do grupo muscular masséter, para a tarefa 4 (legenda: ver Figura 5.2).

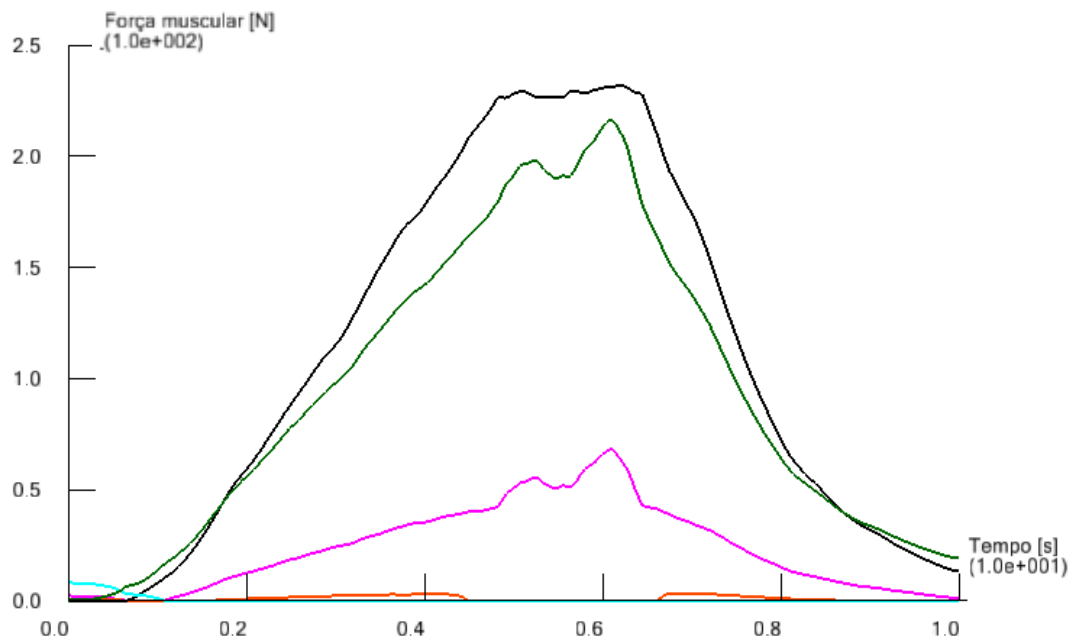


Figura 5.14 - Força muscular estimada de cada músculo do lado direito (passivo) da mandíbula simétrica para um caso hipotético de ausência do grupo muscular masséter, para a tarefa 4 (legenda: ver Figura 5.2).

5.4.2 - Influência do músculo temporal

Os gráficos presentes nas Figuras 5.15, 5.16 e 5.17 são referentes à tarefa 4 sem a presença do grupo muscular temporal (temporal anterior e temporal posterior) de ambos os lados.

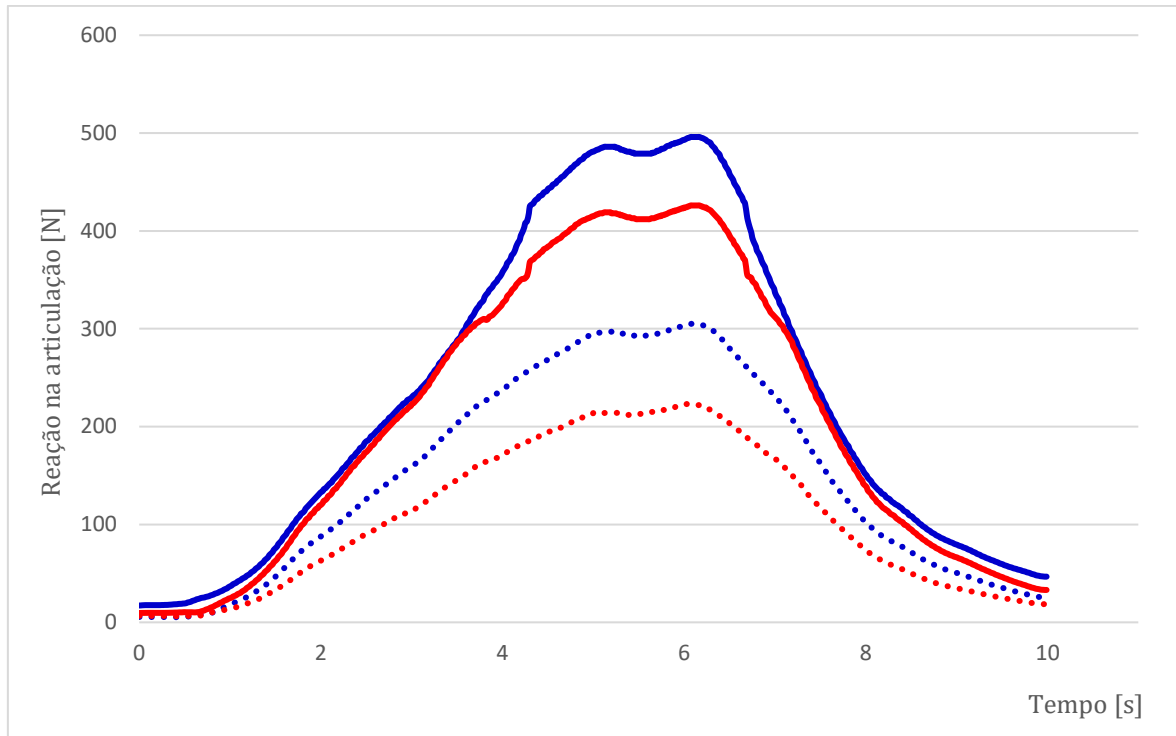


Figura 5.15 - Reações estimadas na ATM do lado esquerdo (vermelho) e direito (azul) em mandíbula simétrica para um caso hipotético de ausência do grupo muscular temporal, para a tarefa 4. A picotado encontram-se os valores dispostos na Figura 5.6, para comparação.

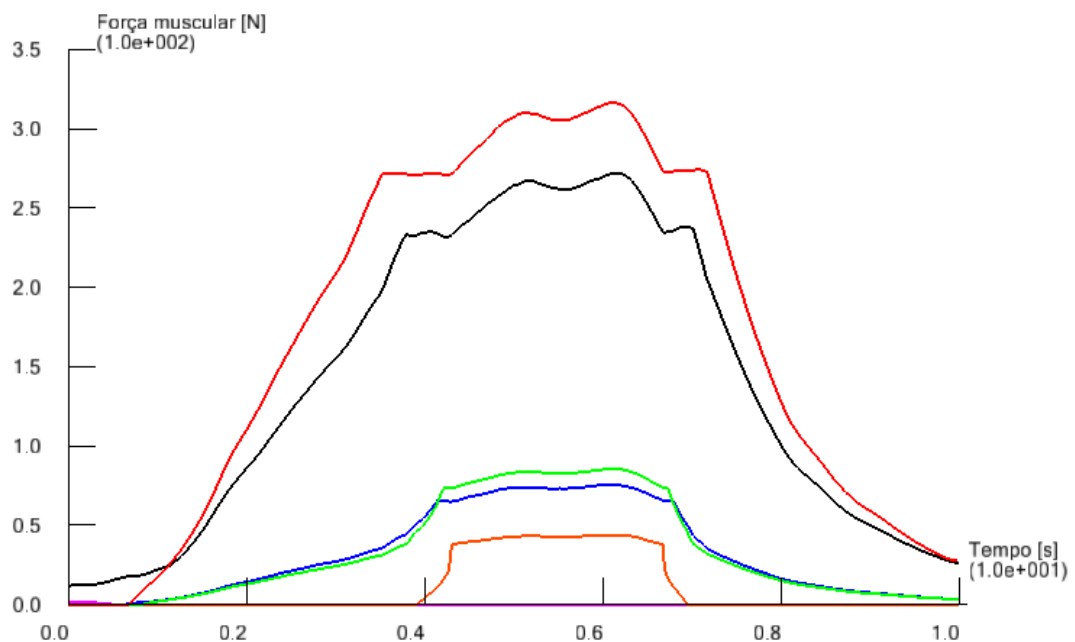


Figura 5.16 - Força muscular estimada de cada músculo do lado esquerdo (ativo) da mandíbula simétrica para um caso hipotético de ausência do grupo muscular temporal, para a tarefa 4 (legenda: ver Figura 5.2).

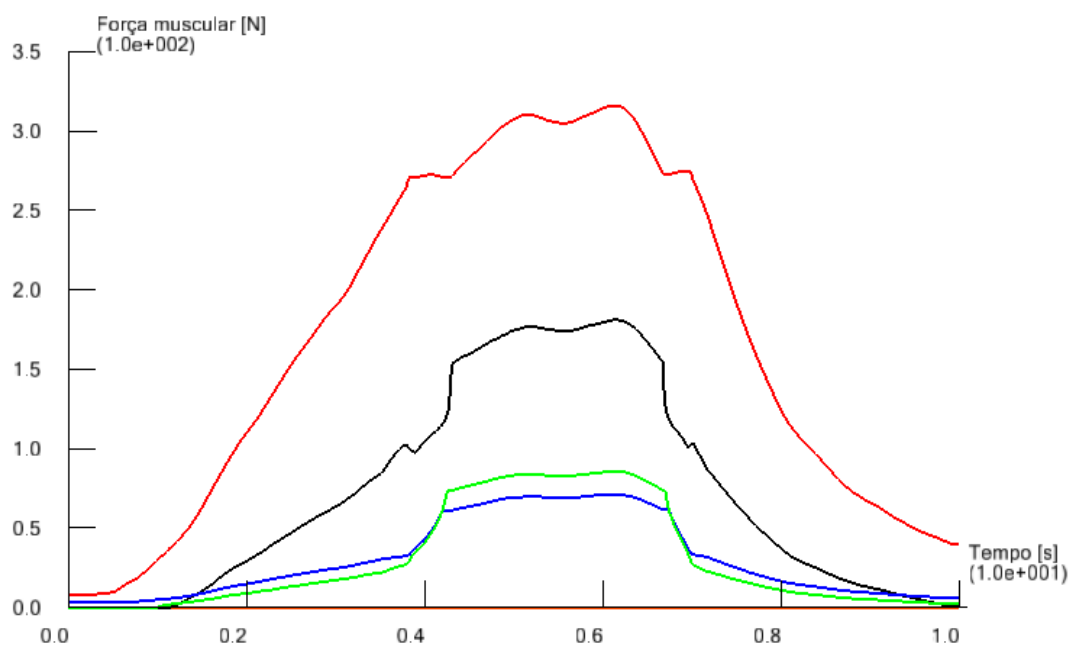


Figura 5.17 - Força muscular estimada de cada músculo do lado direito (passivo) da mandíbula simétrica para um caso hipotético de ausência do grupo muscular temporal, para a tarefa 4 (legenda: ver Figura 5.2).

5.4.3 - Influência do músculo pterigóideo medial

Os gráficos presentes nas figuras 5.18, 5.19 e 5.20 são referentes à tarefa 4 sem a presença do músculo pterigóideo medial. Na ausência deste grupo muscular é visível um ligeiro aumento das reações verificadas nos côndilos da mandíbula, bem como um aumento das forças exercidas pelos restantes grupos musculares, sendo perceptível também que o músculo masséter superficial atinge o valor máximo de carga suportada de 272,8 N (Tabela 5.2).

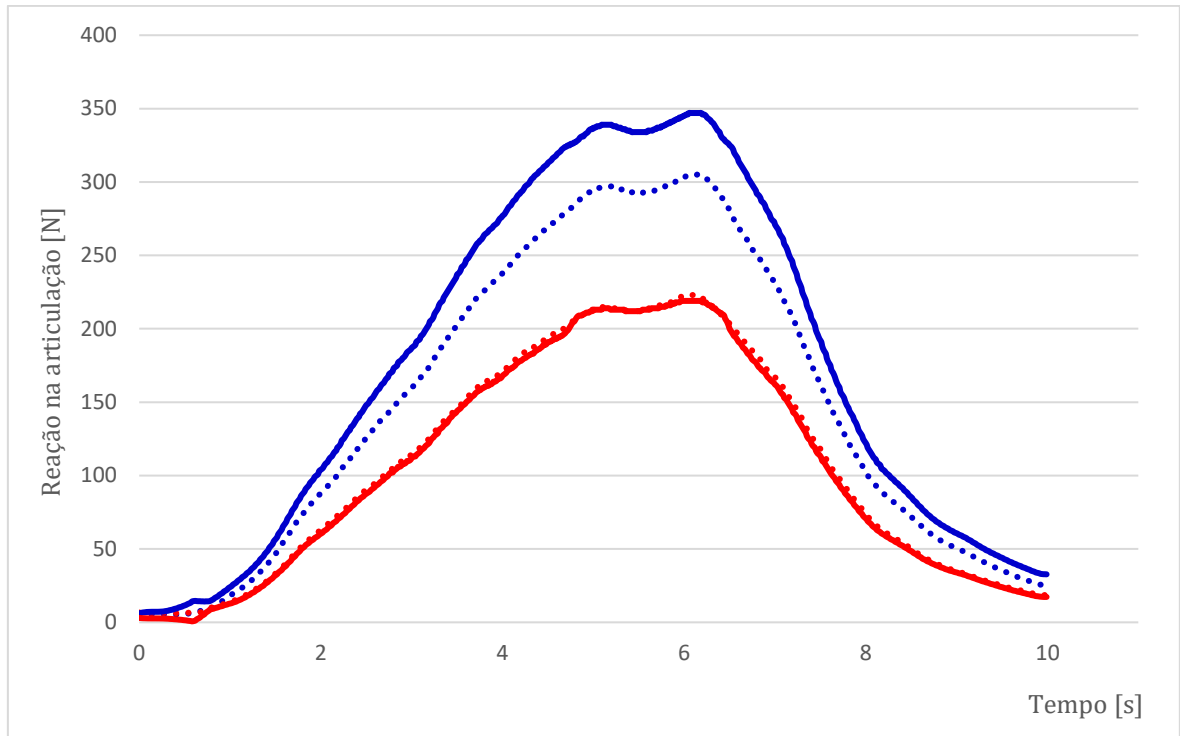


Figura 5.18 - Reações estimadas na ATM do lado esquerdo (vermelho) e direito (azul) em mandíbula simétrica para um caso hipotético de ausência do músculo pterigóideo medial, para a tarefa 4. A picotado encontram-se os valores dispostos na Figura 5.6, para comparação.

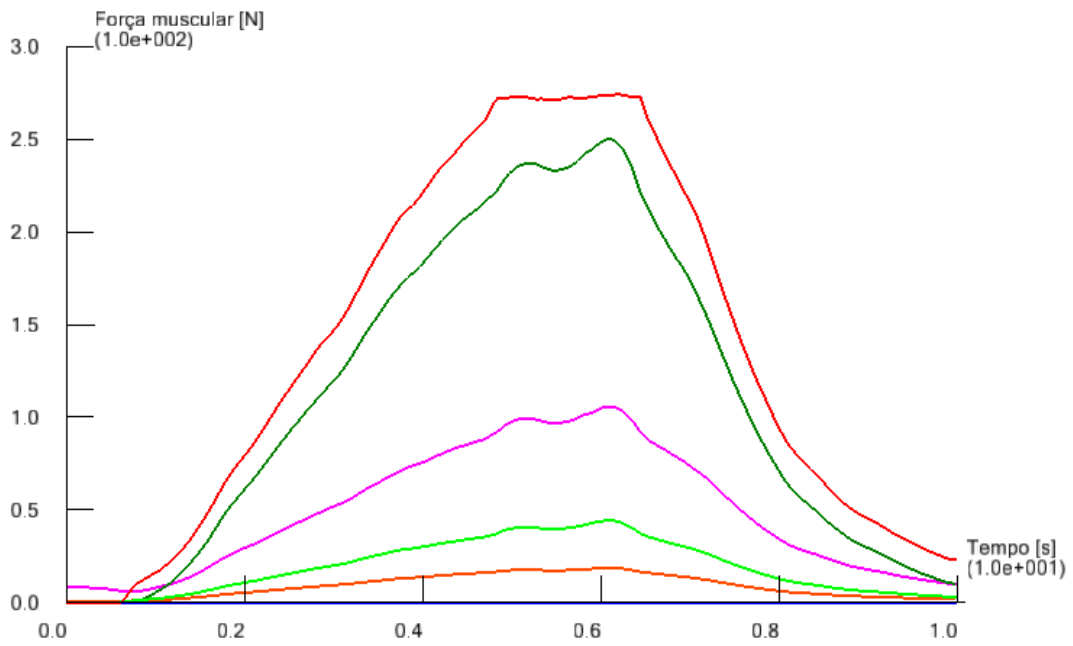


Figura 5.19 - Força muscular estimada de cada músculo do lado esquerdo (ativo) da mandíbula simétrica para um caso hipotético de ausência do músculo pterigóideo medial, para a tarefa 4 (legenda: ver Figura 5.2).

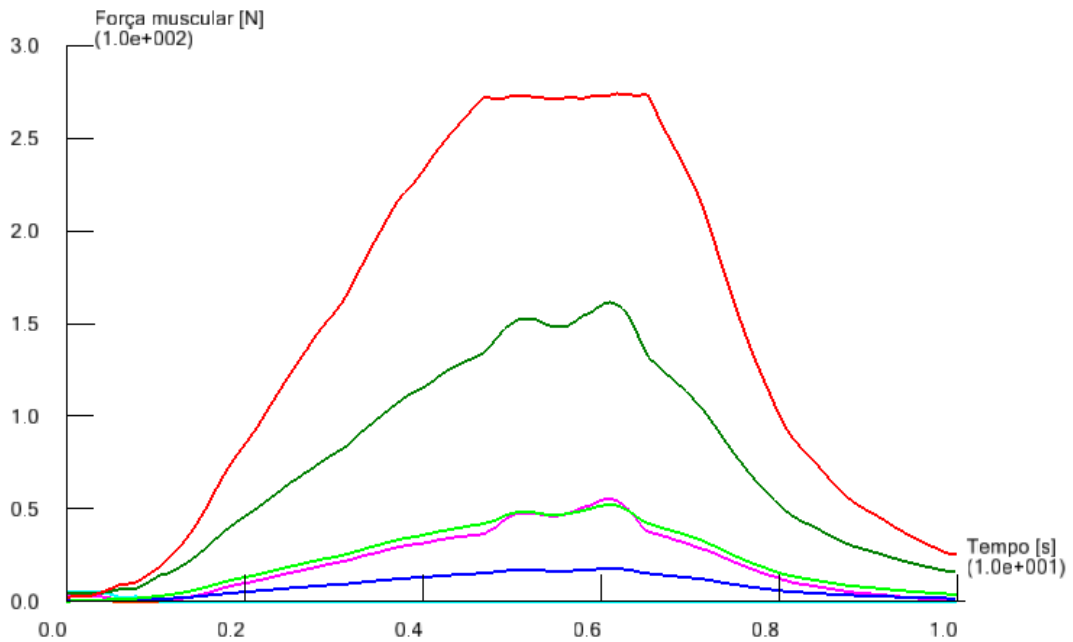


Figura 5.20 - Força muscular estimada de cada músculo do lado direito (passivo) da mandíbula simétrica para um caso hipotético de ausência do músculo pterigóideo medial, para a tarefa 4 (legenda: ver Figura 5.2).

5.4.4 – Influência do músculo pterigóideo lateral

Os gráficos presentes nas Figuras 5.21, 5.22 e 5.23 são referentes à mordida unilateral com o transdutor de força localizado entre os primeiros pré-molares esquerdos, sem a presença dos músculos pterigóideo lateral superior e lateral inferior de ambos os lados. As variações observadas, quer nas reações nas ATM, quer nas forças de cada um dos restantes músculos, são mínimas.

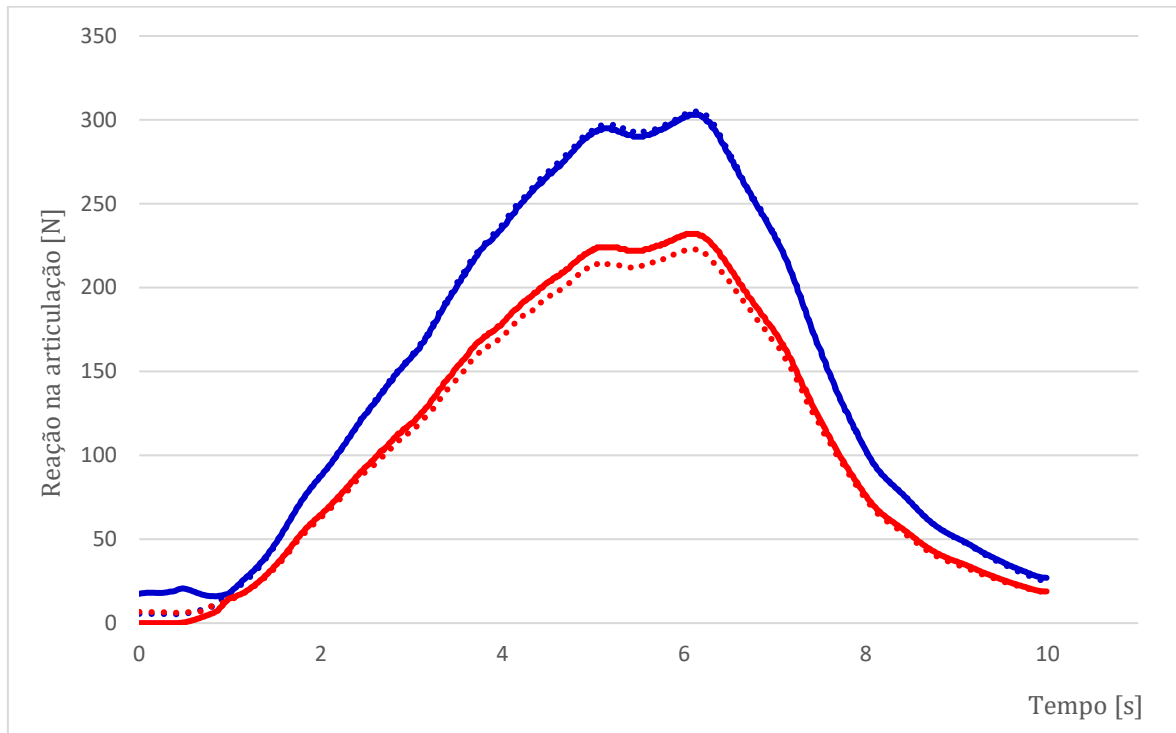


Figura 5.21 - Reações estimadas na ATM do lado esquerdo (vermelho) e direito (azul) em mandíbula simétrica para um caso hipotético de ausência do músculo pterigóideo lateral inferior e superior, para a tarefa 4. A picotado encontram-se os valores dispostos na Figura 5.6, para comparação.

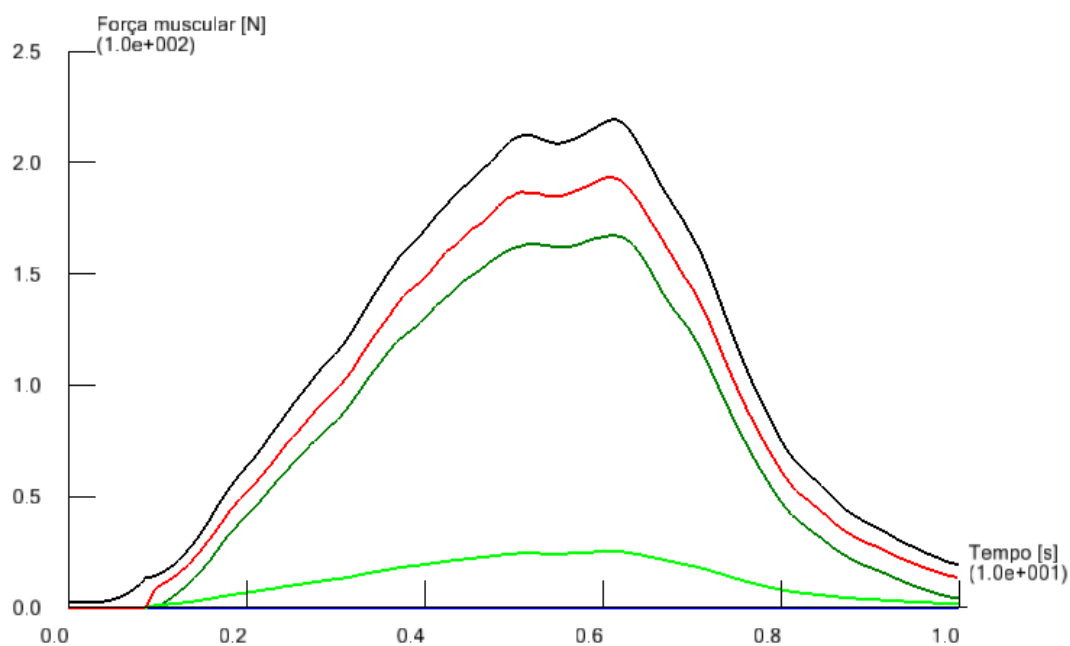


Figura 5.22 - Força muscular estimada de cada músculo do lado esquerdo (ativo) da mandíbula simétrica para um caso hipotético de ausência do músculo pterigóideo lateral, para a tarefa 4 (legenda: ver Figura 5.2).

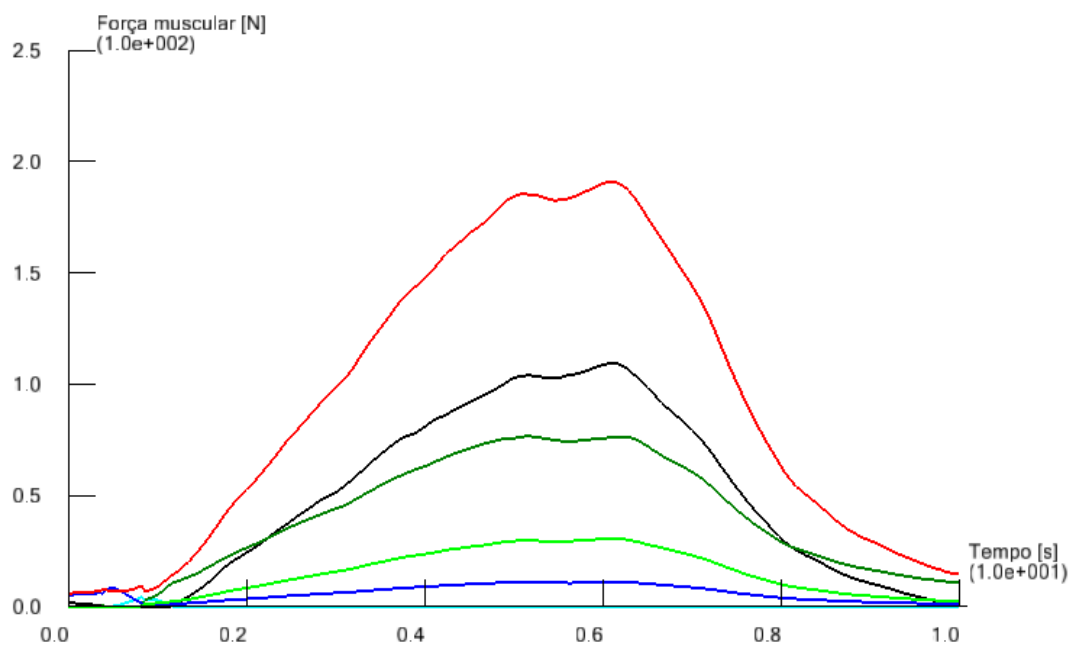


Figura 5.23 - Força muscular estimada de cada músculo do lado direito (passivo) da mandíbula simétrica para um caso hipotético de ausência do músculo pterigóideo lateral, para a tarefa 4 (legenda: ver Figura 5.2).

5.4.5 – Resultados implicação muscular

Na Tabela 5.2 são apresentados os valores máximos das reações nas articulações, obtidas para as simulações dispostas anteriormente, relativas a implicação muscular de cada um dos músculos, sendo apresentado também o valor obtido para a simulação da mordida unilateral para o caso da mandíbula simétrica com todos os grupos musculares ativos, presente na Figura 5.6.

Tabela 5.2 - Implicação de cada grupo muscular nas reações na ATM

Músculo ausente	Reação máxima na ATM (N)	
	Esquerda	Direita
Masséter	174	255
Temporal	426	496
Pterigóideo medial	220	347
Pterigóideo lateral	232	303
Mandíbula com todos os músculos ativos	223	305

5.5 – Artroplastia unilateral

Outra análise efetuada foi a simulação para a mordida unilateral considerando que apenas alguns dos músculos do lado esquerdo se encontra ativo. O objetivo desta simulação é de averiguar o comportamento da mandíbula numa situação hipotética de realização de uma artroplastia, substituição total dos componentes articulares de um dos lados da mandíbula. Diversos autores [44],[45] descrevem no procedimento desta intervenção cirúrgica a necessidade de separar os músculos masséter e pterigóideo medial do ramo da mandíbula, para que desta forma a componente mandibular protésica seja fixada. Por esta razão, estes dois músculos foram removidos do modelo no lado esquerdo (ativo), sendo o conjunto de resultados apresentados nas figuras seguintes.

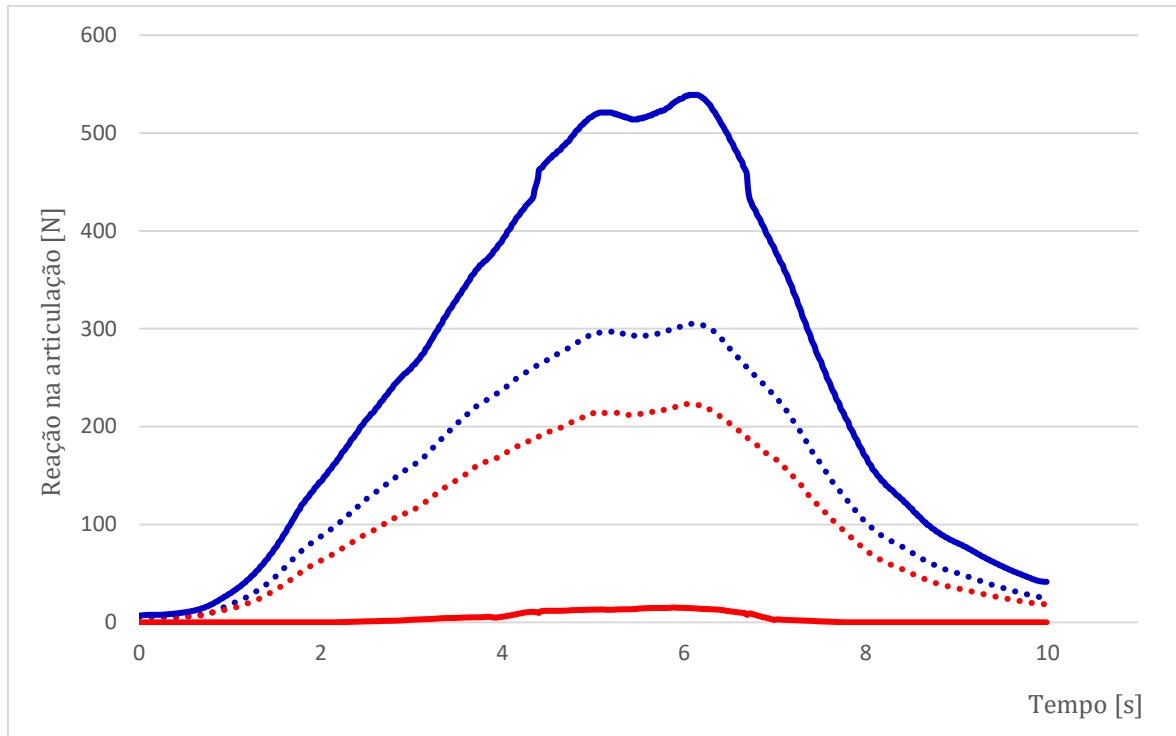


Figura 5.24 - Reações estimadas na ATM do lado esquerdo (vermelho) e direito (azul) em mandíbula simétrica para um caso hipotético de necessidade de artroplastia unilateral do lado esquerdo, para a tarefa 4. A picotado encontram-se os valores dispostos na Figura 5.6, para comparação.

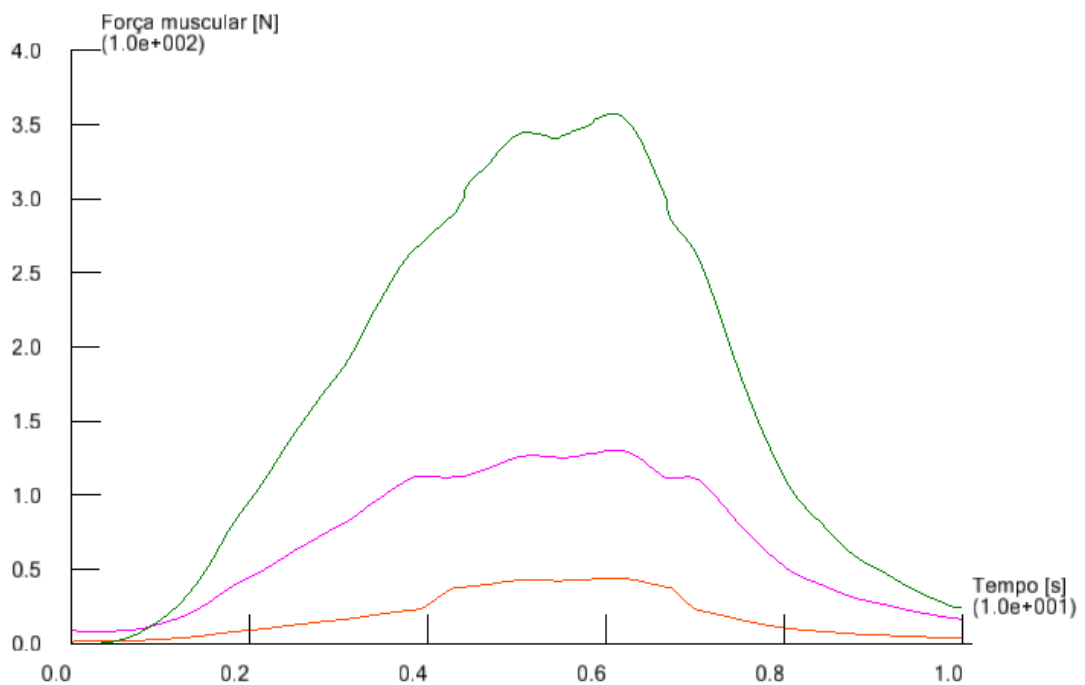


Figura 5.25 - Força muscular estimada de cada músculo do lado esquerdo (ativo) da mandíbula simétrica para um caso hipotético de necessidade de artroplastia unilateral do lado esquerdo, para a tarefa 4 (legenda: ver Figura 5.2).

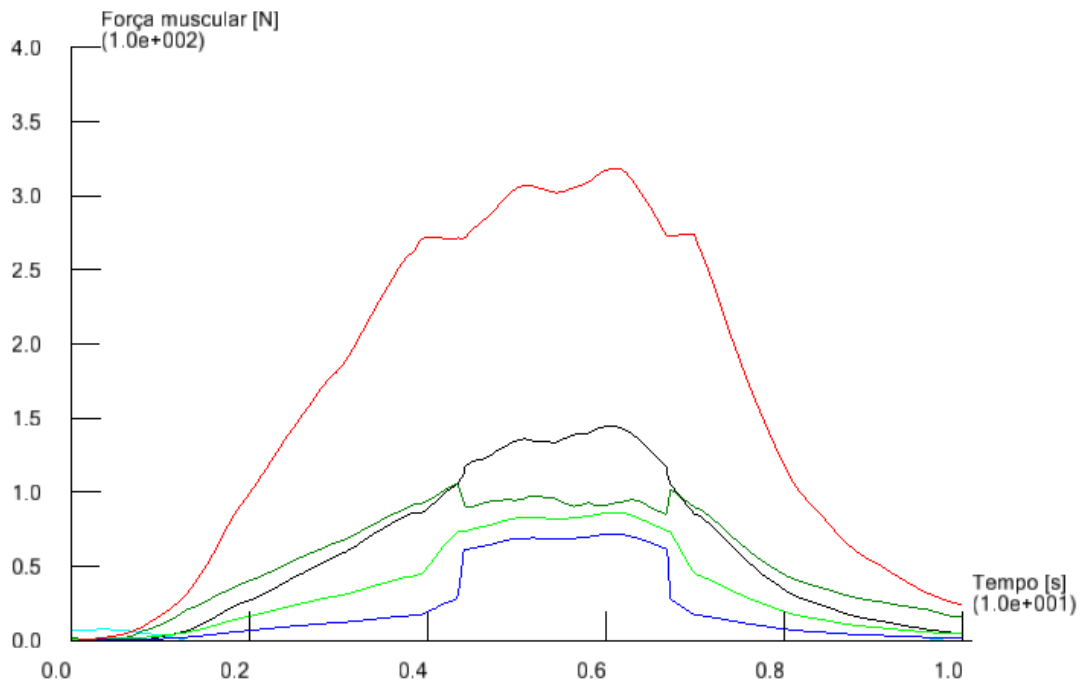


Figura 5.26 - Força muscular estimada de cada músculo do lado passivo (direito) da mandíbula simétrica para um caso hipotético de necessidade de artroplastia unilateral do lado esquerdo, para a tarefa 4 (legenda: ver Figura 5.2).

A ausência do grupo muscular masséter e pterigóideo medial, dois principais músculos elevadores, do lado esquerdo da mandíbula leva a que os restantes músculos sejam bastante mais solicitados de forma a compensar esta ausência. Um paciente que necessite de uma artroplastia do lado esquerdo da mandíbula recorrerá muito mais ao músculo temporal esquerdo para a sua elevação do que um indivíduo com todos os grupos musculares. Nas reações obtidas, é claro o aumento do valor da reação no cêndilo direito (76,7%) pois é neste lado da mandíbula que são exercidos os maiores esforços.

5.6 – Influência da posição do transdutor

Outro aspeto avaliado foi o local da inserção do transdutor de forças dentro da mandíbula. A alteração da sua posição permite-nos avaliar de que forma o local onde é aplicada a força afeta as reações geradas nas articulações temporomandibulares e as variações na contribuição de cada músculo. Até agora as simulações efetuadas continham o dispositivo localizado sobre os primeiros pré-molares esquerdos da mandíbula, no entanto, o modelo permite de uma forma muito simples alterar o local onde a força é aplicada. Foram criados diversos sistemas de eixos com localizações

variadas no interior da mandíbula na superfície dos dentes, pelo que é bastante acessível variar o ponto de localização virtual do transdutor de força. Foram realizadas simulações com o ponto de aplicação da força localizado nos primeiros pré-molares direitos (a), nos primeiros molares esquerdos (b) e direitos (c), e entre os incisivos frontais (d), tal como explicito na Figura 5.27. Nas Figuras 5.28-5.31 encontram-se os valores das reações nas articulações temporomandibulares para a realização da tarefa 4 com o transdutor de força presente em várias posições. São também apresentados os gráficos referentes à atividade muscular para a tarefa 4, mordida unilateral, com o transdutor de forças presente nos incisivos frontais para posterior comparação.

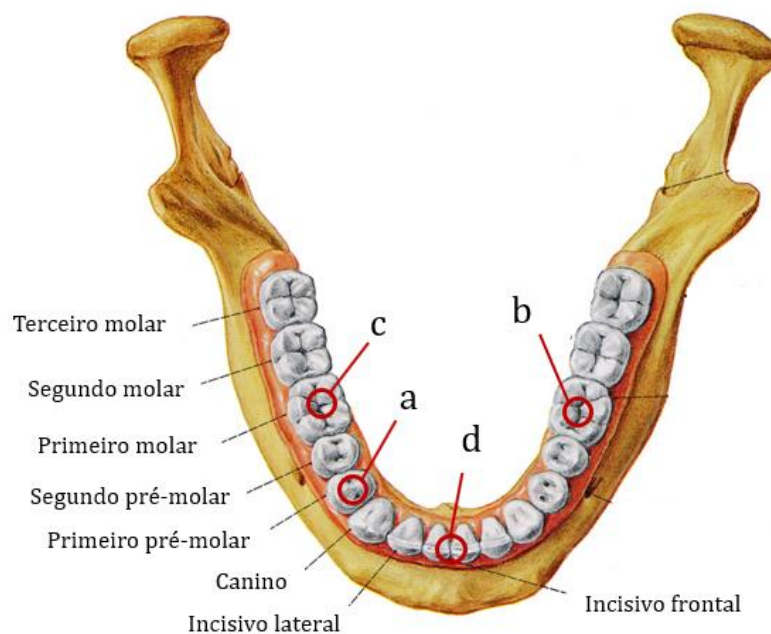


Figura 5.27 - Mandíbula, arco dental inferior, vista por cima. Adaptado de [6].

Na Figura 5.28 é apresentado o gráfico referente à mordida unilateral com o transdutor de forças localizado no primeiro pré-molar direito (Figura 5.27 a). Como o ponto de aplicação da força mudou de lado, é de esperar que a reação no côndilo do lado direito, lado ativo nesta simulação, apresente uma reação inferior ao do lado passivo, tal como acontece. No entanto a diferença entre as reações de ambos os lados não é tao significativa como a obtida quando o transdutor se encontra no lado esquerdo da mandíbula.

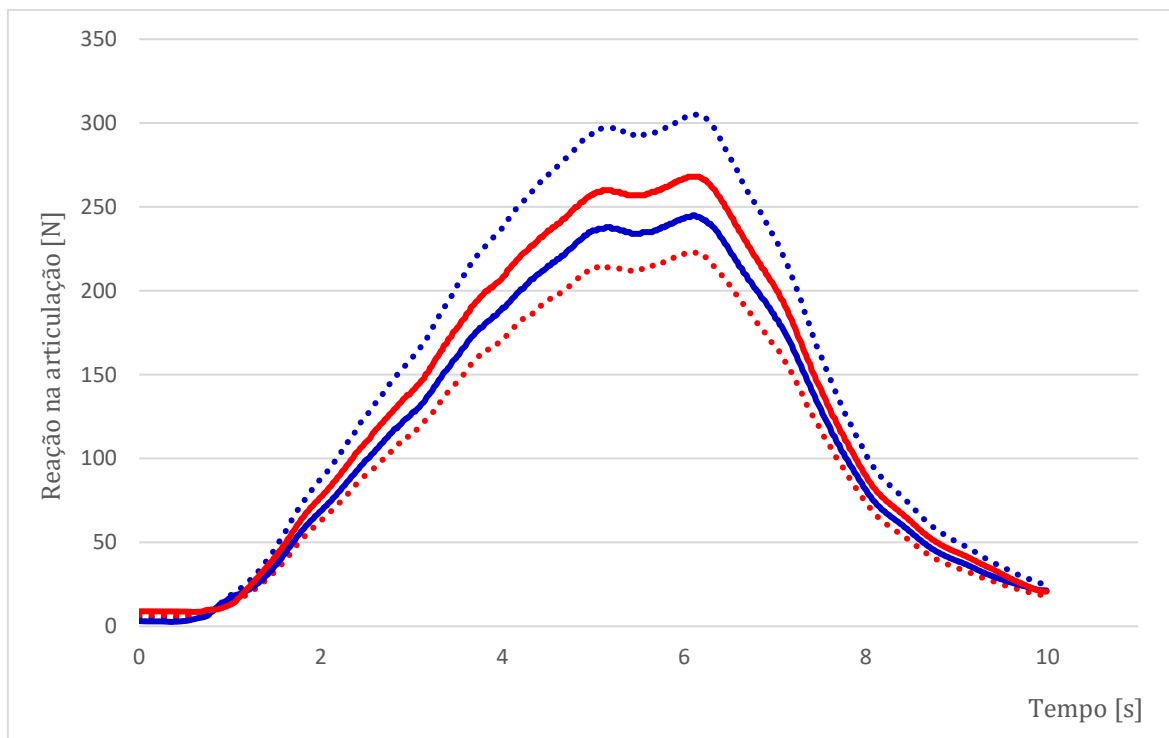


Figura 5.28 - Reações estimadas na ATM do lado esquerdo (vermelho) e direito (azul) em mandíbula simétrica com o transdutor de força localizado entre os primeiros pré-molares do lado direito, para a tarefa 4. A picotado encontram-se os valores dispostos na Figura 5.6, para comparação.

As reações obtidas para o transdutor de forças localizado entre os molares esquerdos e direitos encontram-se respectivamente indicados nas Figuras 5.29 e 5.30. O valor da reação obtida no lado passivo (direito na Figura 5.29, esquerdo na Figura 5.30) é sempre superior ao lado ativo. Tal como aconteceu para as simulações com o sensor nos pré-molares, a diferença entre as reações do lado ativo e passivo são mais evidentes para as medições efetuadas com o transdutor localizado no lado esquerdo da mandíbula. O valor das reações é inferior ao obtido para as medições com o sensor nos pré-molares, isto porque a distância entre o sensor e o côndilo diminui o que, para uma força igual de mordida, reduz o valor da reação na articulação.

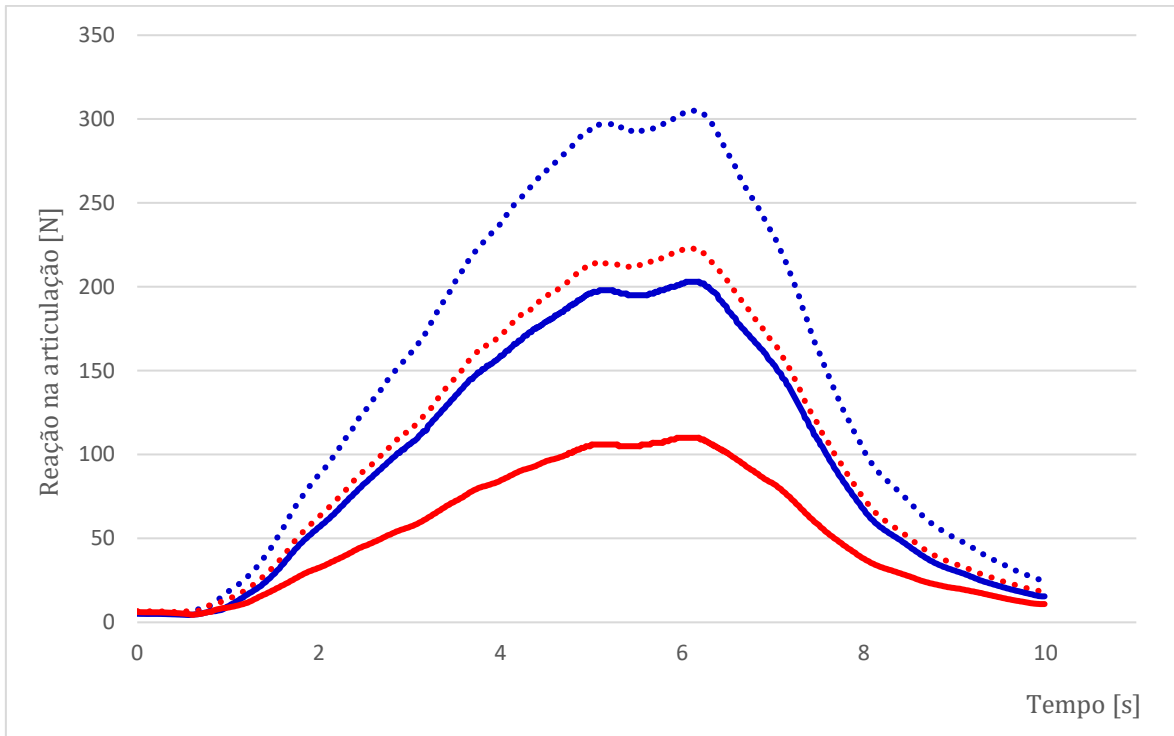


Figura 5.29 - Reações estimadas na ATM do lado esquerdo (vermelho) e direito (azul) em mandíbula simétrica com o transdutor de força localizado entre os primeiros molares do lado esquerdo, para a tarefa 4. A picotado encontram-se os valores dispostos na Figura 5.6, para comparação.

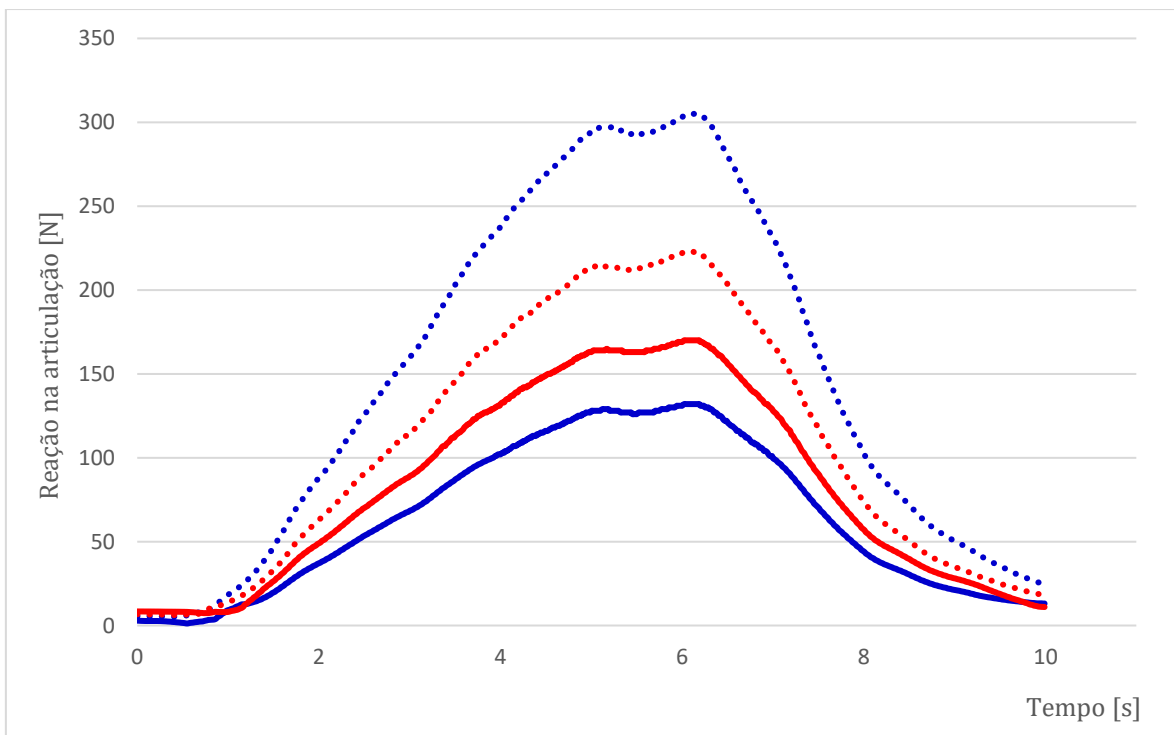


Figura 5.30 - Reações estimadas na ATM do lado esquerdo (vermelho) e direito (azul) em mandíbula simétrica com o transdutor de força localizado entre os primeiros molares do lado direito, para a tarefa 4. A picotado encontram-se os valores dispostos na Figura 5.6, para comparação.

Por último o transdutor de forças foi reposicionado sobre os incisivos frontais da mandíbula, tendo sido obtidas as reações presentes na Figura 5.31. Os valores das reações ao longo da simulação são superiores às obtidas até agora, isto porque os incisivos frontais correspondem ao ponto da mandíbula mais afastado das articulações, o que implica maiores reações nos cêndilos. Nas Figuras 5.32 e 5.33 são indicadas as forças musculares de cada um dos músculos atuantes no modelo.

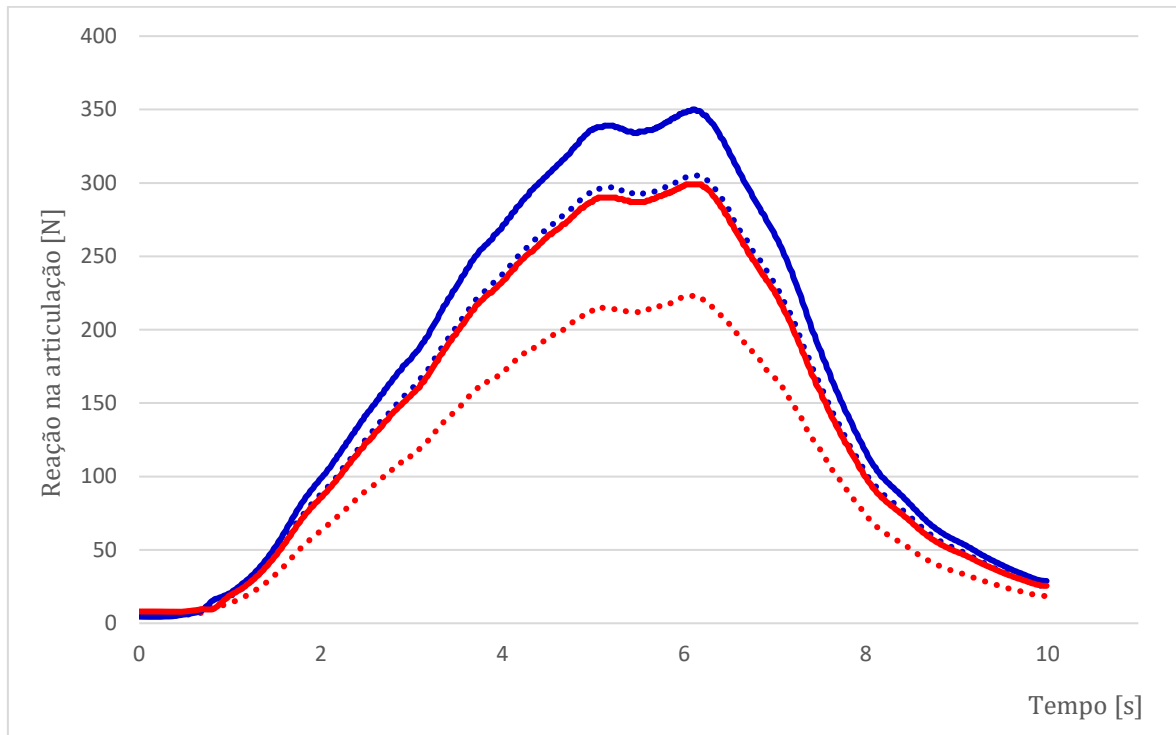


Figura 5.31 - Reações estimadas na ATM do lado esquerdo (vermelho) e direito (azul) em mandíbula simétrica com o transdutor de força localizado entre os incisivos inferiores frontais, para a tarefa 4. A picotado encontram-se os valores dispostos na Figura 5.6, para comparação.

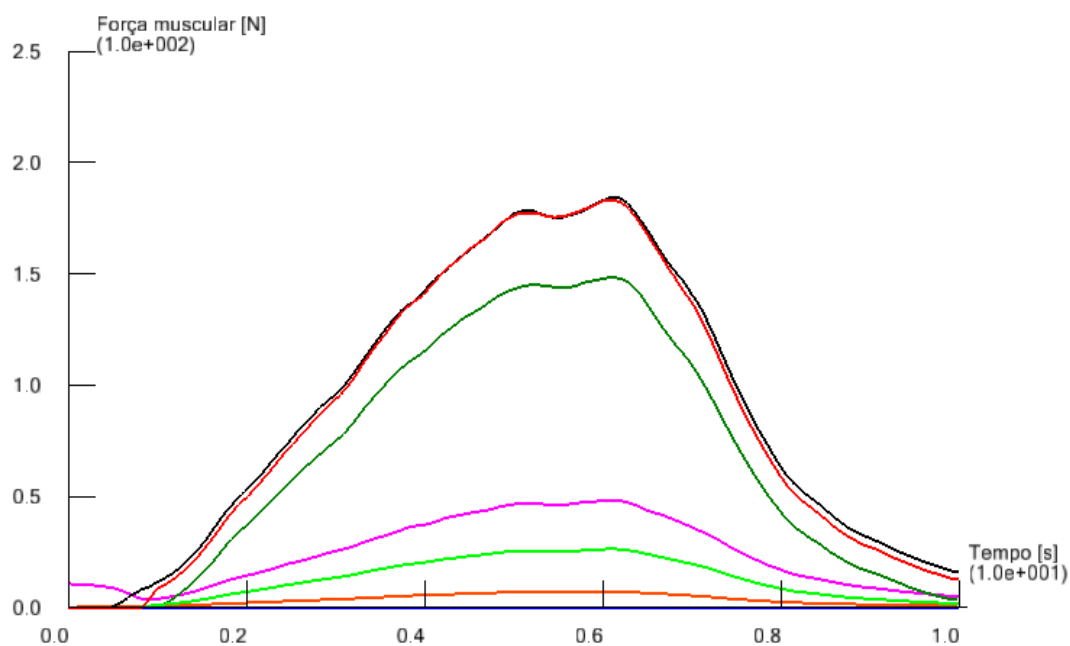


Figura 5.32 - Força muscular estimada de cada músculo do lado esquerdo da mandíbula simétrica para a tarefa 4 com o transdutor de forças localizado nos incisivos frontais da mandíbula (legenda: ver Figura 5.2).

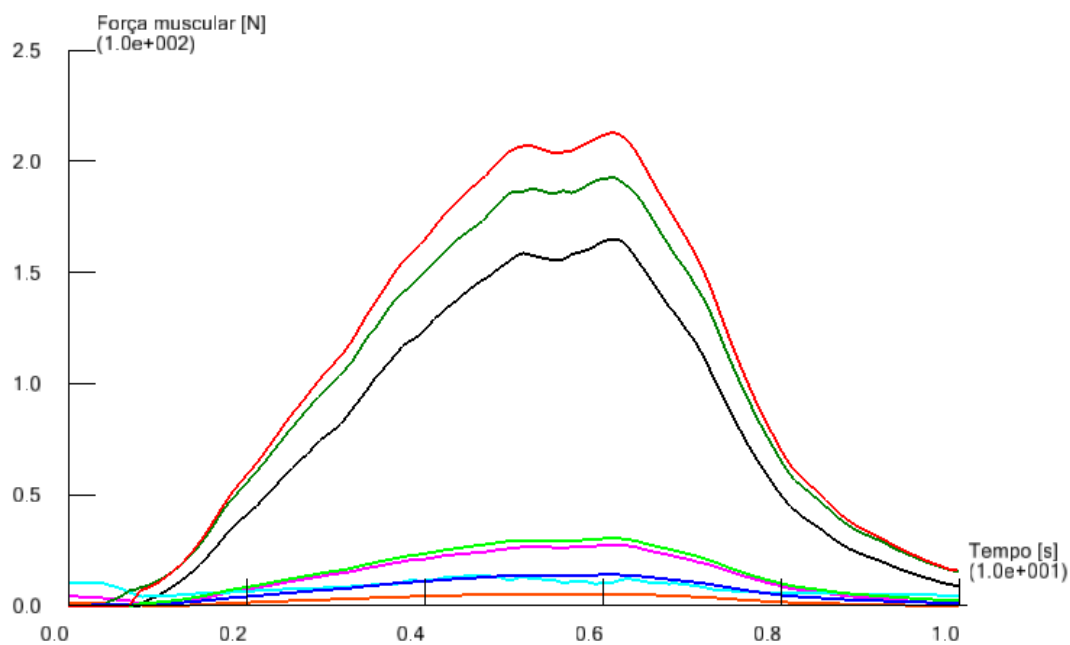


Figura 5.33 - Força muscular estimada de cada músculo do lado direito da mandíbula simétrica para a tarefa 4 com o transdutor de forças localizado nos incisivos frontais da mandíbula (legenda: ver Figura 5.2).

Os valores das reações máximas obtidas nos côndilos da mandíbula para diferentes posições do sensor encontram-se dispostas na Tabela 5.3, onde é feita a comparação com o valor base das reações obtidas na simulação com o sensor localizado entre os pré-molares esquerdos.

Tabela 5.3 - Máxima reação observada nas ATM consoante a localização do transdutor de forças durante a tarefa 4.

Localização	Reação na ATM (N)	
	Esquerda	Direita
Pré-molar esquerdo	223	305
Pré-molar direito	268 (+20,1%)	245 (-19,6%)
Molar esquerdo	110 (-50,6%)	203 (-33,4%)
Molar direito	170 (-23,8%)	132 (-56,7%)
Incisivos	299 (+34%)	350 (+14,8%)

5.7 Discussão de resultados do modelo multi-corpo

O modelo gerado permite o cálculo das forças através do método dinâmica inversa. Este método computacional tem como funcionalidade o cálculo de forças internas, assumindo que tanto o movimento e forças externas são conhecidos. O registo dos movimentos de mastigação foi efetuado através de um teste experimental em que foi colocado um magneto sobre os incisivos frontais de um voluntário.

Os resultados das simulações efetuadas para o movimento cíclico de mastigação encontram-se dispostos nas Figuras 5.3, 5.4 e 5.5. Para esta simulação foram utilizados valores das coordenadas medidas experimentalmente e uma força simulada de mordida. As reações obtidas nas ATM são bastante inferiores às da tarefa 4, já que para a tarefa 1 não foram introduzidos os valores da mordida máxima medidos no paciente na atividade experimental, de 441N. É curioso notar que apesar de no geral serem inferiores à da tarefa 4, os valores máximos registados para a reação na articulação esquerda (127,18 N) são superiores às da direita (109,12 N). Isto acontece porque para o caso de movimento cíclico, o ponto no modelo onde é localizada a força simulada de mordida encontra-se no primeiro pré-molar direito, ao invés do esquerdo, como é apresentado para a tarefa 4, sendo este o lado ativo, pelo que é normal obter reações inferiores. Pelos gráficos das atividades musculares, torna-se evidente que todos os músculos presentes contribuem para o movimento cíclico da mandíbula. Os que mais se destacam são o masséter superficial e o temporal anterior, sendo também evidente a contribuição do pterigóideo lateral inferior principalmente no lado ativo (direito), ao contrario do que representado pela tarefa estática da mordida. Tal confirma o disposto anteriormente, indicando o pterigóideo lateral como responsável pelos movimentos de didução da mandíbula [10,11].

As forças de reação nas articulações temporomandibulares para a tarefa 4 com o transdutor de força localizado nos primeiros pré-molares esquerdos da mandíbula, para a situação de mordida unilateral numa mandíbula simétrica, encontram-se

dispostos na Figura 5.6. A força máxima obtida no lado esquerdo foi de 223 N e no lado direito de 305 N, o que releva um valor bastante aproximado dos presentes no trabalho de Mark de Zee *et al.* [37], que indica 234 N para a ATM direita e 336 N para a esquerda. Para uma situação de mordida unilateral, é perfeitamente normal que as reações obtidas do lado ativo sejam inferiores às do lado passivo. Nas simulações efetuadas com a mandíbula reduzida em 3 mm do lado esquerdo, obtiveram-se valores para a ATM esquerda de 213 N e para a direita de 325. Isto significa que removendo o disco leva a uma menor reação da mandíbula desse lado, mas um aumento da reação do lado passivo, pois é necessário que haja uma compensação dos músculos do lado direito. Tal vai de encontro ao descrito no trabalho [37], em que com uma redução do ramo esquerdo da mandíbula ainda mais acentuada, de 15mm, leva a uma maior variação dos valores das reações (Anexo A). Estas diferenças substanciais são justificadas pela alteração da geometria do modelo, variação da orientação do plano oclusal onde são aplicadas as forças, relativamente à mandíbula simétrica. Com esta variação, a direção onde é aplicada a força da mordida relativamente às articulações é alterada, já que esta força foi definida como diretamente perpendicular ao plano oclusal, pelo que para que o paciente aplique a mesma força, de 441N, tem de alterar o seu recrutamento muscular.

Comparando os dados da atividade muscular obtidos para o modelo de mandíbula simétrica (Figuras 5.6-5.8) e para o caso de mandíbula reduzida (Figuras 5.9-5.11), não são visíveis grandes alterações. Tal pode ser justificado com a pouca redução (3mm) do ramo da mandíbula, já que com uma redução mais acentuada (Anexos) as diferenças na força muscular exercida pelos músculos são mais facilmente identificáveis. No lado ativo, onde é aplicada a força, é visível a redução da força muscular exercida pelos músculos, enquanto que no lado passivo a força muscular aumenta. O músculo em que é mais notável esta variação é o temporal anterior. No entanto, o que é mais evidente tanto no caso simétrico como em ambas as reduções, é a maior contribuição muscular de três grupos musculares, o masséter superficial, temporal anterior e pterigóideo medial. Tal vai de encontro ao já exposto, em que é afirmado que os três grupos musculares principais responsáveis pela elevação da mandíbula (contração), são os grupos masséter, temporal e pterigóideo medial [10,11]. Estes três são claramente os que mais força muscular apresentam nas simulações da mordida unilateral tanto para o caso simétrico como para o de mandíbula reduzida. Por outro lado, é praticamente inexistente a contribuição do pterigóideo lateral para os movimentos de elevação. Mais uma vez, vai de encontro ao descrito na teoria [10,11], que afirma que este grupo muscular é mais ativo nos movimentos laterais (didução) da mandíbula, e que pouco ou nada participa em movimentos de elevação.

Os valores das reações para as diferentes localizações do transdutor de força encontram-se apresentados na Tabela 5.3. A alteração do ponto de aplicação do lado esquerdo para o lado direito, tanto para o primeiro pré-molar como para o primeiro

molar, provoca uma redução do valor da reação medida no lado passivo e um aumento da reação medida no lado ativo. Em condições de simetria, seria de esperar que as reações tivessem o mesmo valor quando apenas se variasse o lado da aplicação da força. Ora como já explicado, condições de perfeita simetria não se verificam na realidade e o modelo da mandíbula, retirado a partir de um paciente, não é perfeitamente simétrico pelo que é normal que haja ligeiras variações dos valores das reações nas articulações. No geral, as reações medidas são superiores nos incisivos e inferiores nos molares. Isto é o esperado pois estando a medir os valores nas articulações, quanto mais afastado for o ponto de aplicação da força em relação as ATM, maior será o valor da reação. As reações obtidas nos incisivos centrais foram de 299 N para a articulação esquerda e de 350 N para a direita. Mais uma vez, perante uma mandíbula simétrica e estando o transdutor localizado num ponto considerado central da mandíbula, seria esperado um valor semelhante das reações, mas tal como explicado condições de perfeita simetria não se verificam em situações reais.

Para demonstrar a contribuição de cada grupo muscular para a realização da tarefa 4, foram realizadas simulações sem cada um dos grupos musculares. Para o caso em que o grupo muscular temporal foi removido, observou-se um aumento considerável nas reações obtidas nas articulações, de 91% para a reação no côndilo esquerdo, e de 62,6% para o direito. Isto acontece porque existe um menor número de músculos a contribuir para o fecho da mandíbula, pelo que as forças exercidas pelos restantes músculos aumentam para compensar esta ausência. Nas simulações efetuadas sem o pterigóideo lateral, a variação nas reações obtidas foi praticamente nula, já que se apenas registou um aumento da reação do lado esquerdo em 4% e uma diminuição de 0,7% para o lado direito. Mais uma vez, tal vai de encontro ao facto deste grupo muscular pouco contribuir para as tarefas de elevação da mandíbula. As reações obtidas para a remoção do masséter foram de 174 N do lado esquerdo e 255 N para o direito. Isto apresenta uma redução das reações nas articulações, quando o esperado ao se remover um dos grupos musculares que mais contribuem para esta ação seria o aumento das reações nos côndilos. Estes valores são justificados devido a um erro na simulação, designado de "*Overloaded muscle configuration*", também presente nas simulações da tarefa 4 sem o pterigóideo medial. Este erro é bastante comum neste tipo de simulações, e está associado ao excesso de força suportado pelos músculos em questão. Um exemplo presente na Figura 5.13, mostra o excesso de carga muscular presente no temporal anterior e no pterigóideo medial. Para estes músculos foi definido como carga máxima suportada de 308 N e 240 N respetivamente (Tabela 6.2), e nas simulações efetuadas sem o masséter o valor de carga recrutada por estes músculos ultrapassa os seus limites. Isto significa que os músculos em questão não têm força suficiente para suportar as cargas externas requeridas [46]. Na teoria isto significaria a rotura do músculo, mas o modelo prossegue com a simulação considerando que o músculo suporta o valor de carga máxima atribuída.

5.8 Validação do modelo multi-corpo com outros resultados *in vivo*.

As propriedades musculares utilizadas no modelo foram todas baseadas na atividade experimental levada a cabo por Koolstra *et al.* [16] tal como apresentadas na Tabela 6.2. Estas características foram obtidas a partir de medições *in vitro*, pelo que neste capítulo serão realizadas simulações com propriedades musculares provenientes de medições *in vivo*, já que as forças resultantes na articulação são influenciadas diretamente pelas propriedades anatómicas dos músculos [36]. No caso de um modelo que recorra a músculos do tipo “*Hill-type*”, a força muscular é influenciada pelos valores das propriedades mecânicas e estruturais dos atuadores musculares, tais como o pico da força isométrica e o correspondente comprimento da fibra do músculo [47]. Na atividade experimental levada a cabo por Mesnard [15] os músculos considerados como elevadores da mandíbula foram o masséter profundo e superficial, o músculo temporal anterior, medial e posterior e o pterigóideo medial. Os valores da força máxima e as suas direções de cada músculo registados na experiência encontram-se presentes na Tabela 5.4, onde também é possível observar os dados referentes a outros estudos, incluindo aquele que é utilizado no modelo multi-corpo.

Tabela 5.4 - Força máxima muscular normal e direção das suas componentes descritos por diversos autores.

Autor	Direção	Força muscular (N)						
		MS	MPA	MPP	TA	TP	TM	PM
Koolstra and Van Eijden [16]	Força	272,8	73,8	65,8	308	222	-	240
	Fx	109,49	38,01	14,15	-34,26	-163,97	-	107,41
	Fy	-19,12	-10,66	-14,15	-45,68	-77,81	-	112,78
	Fz	249,12	62,35	62,68	302,66	127,84	-	182,60
A.Ramos et al. [48]	Força	184,35	129,47**	-	0,39*	-	9,41	286,76
	Fx	12,11	22,68**	-	-0,13*	-	-7,44	-77,3
	Fy	12,87	7,78**	-	0,06*	-	0,97	140,38
	Fz	183,5	127,23**	-	0,37*	-	5,68	237,8
Michel Mesnard [15]	Força	303,3	129,6**	-	115,2	37,8	64,8	382,5
	Fx			-				
	Fy			-				
	Fz			-				

Forças musculares: MS – Masséter superficial; MPA – Masséter profundo anterior; MPP – Masséter profundo posterior; TA – Temporal anterior; TP – Temporal posterior; TM – Temporal medial; PM – Pterigóideo medial.

*O autor não faz referência ao músculo “temporal anterior”, mas sim apenas a “temporal”, pelo que o valor indicado corresponde ao músculo temporal embora tenha sido enquadrado na coluna do músculo temporal anterior.

**O autor não separa o músculo em componentes anterior e posterior, referindo-se apenas ao músculo como masséter profundo embora os valores tenham sido introduzidos na coluna do “masséter posterior anterior”.

Replicou-se a simulação da tarefa 4 para o caso de mandíbula simétrica com o transdutor de forças localizado nos incisivos frontais com os dados experimentais das forças musculares *in vivo* [15], sendo efetuadas as seguintes considerações:

Na atividade experimental os músculos considerados elevadores foram apenas seis, em contraste com os doze pares musculares presentes no modelo. Por esta razão, os restantes músculos descritos no modelo foram desprezados.

A atividade experimental considera que o grupo muscular temporal é subdividido em três componentes, o temporal anterior, temporal medial e temporal posterior, enquanto que o modelo apenas separa este músculo em componente anterior e posterior. Embora fosse possível a criação de um novo músculo designado de temporal medial, optou-se por juntar a componente medial à componente anterior, isto porque quer na bibliografia [16] quer nos valores registados nas simulações (Tabela 5.1), a componente anterior apresenta valores de força muscular máxima superiores à componente posterior. Desta forma o número de músculos utilizados é reduzido para cinco pares, além de que o temporal anterior passa a ter uma força máxima de 180 N, que corresponde à soma dos valores das forças musculares definidos por Mesnard [15] para a componente anterior e medial do músculo temporal.

O modelo experimental divide o masséter profundo em duas componentes, anterior e posterior, enquanto que Mesnard [15] não faz distinção entre ambas. Optou-se por desprezar na simulação a componente posterior já que esta apresentava, segundo Koolstra and Van Eijden [16], uma menor força muscular, e atribuir o valor proposto por Mesnard [15] à componente masséter profundo anterior.

Na atividade experimental, Mesnard [15] utiliza apenas como descritores das propriedades do músculo a sua força máxima e a secção de área transversal máxima, obtida diretamente por análise a imagens de ressonância magnética. Por outro lado, os parâmetros descritores das propriedades musculares presentes no modelo são muito mais extensos, tal como explicito na Tabela 6.2. Desta forma, o único parâmetro possível de se alterar é a força máxima muscular, já que na atividade experimental levada a cabo por Mesnard [15] este não obteve dados capazes de ser introduzidos no modelo. O conjunto final de dados a ser introduzidos no modelo multi-corpo é apresentado na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Valores experimentais utilizados no modelo multi-corpo.

Músculo	MS	MP	TA	TP	PM
Força muscular máxima (N)	303,3	129,6	180	37,8	382,5

As reações obtidas nos cêndilos para simulações com o transdutor de forças localizado nos incisivos frontais, utilizando os forças musculares descritas na Tabela 5.5, encontram-se dispostas nos gráficos das Figuras 5.34. A contribuição muscular efetiva de cada grupo muscular em cada lado da mandíbula é apresentada nas Figuras 5.35 e 5.36.

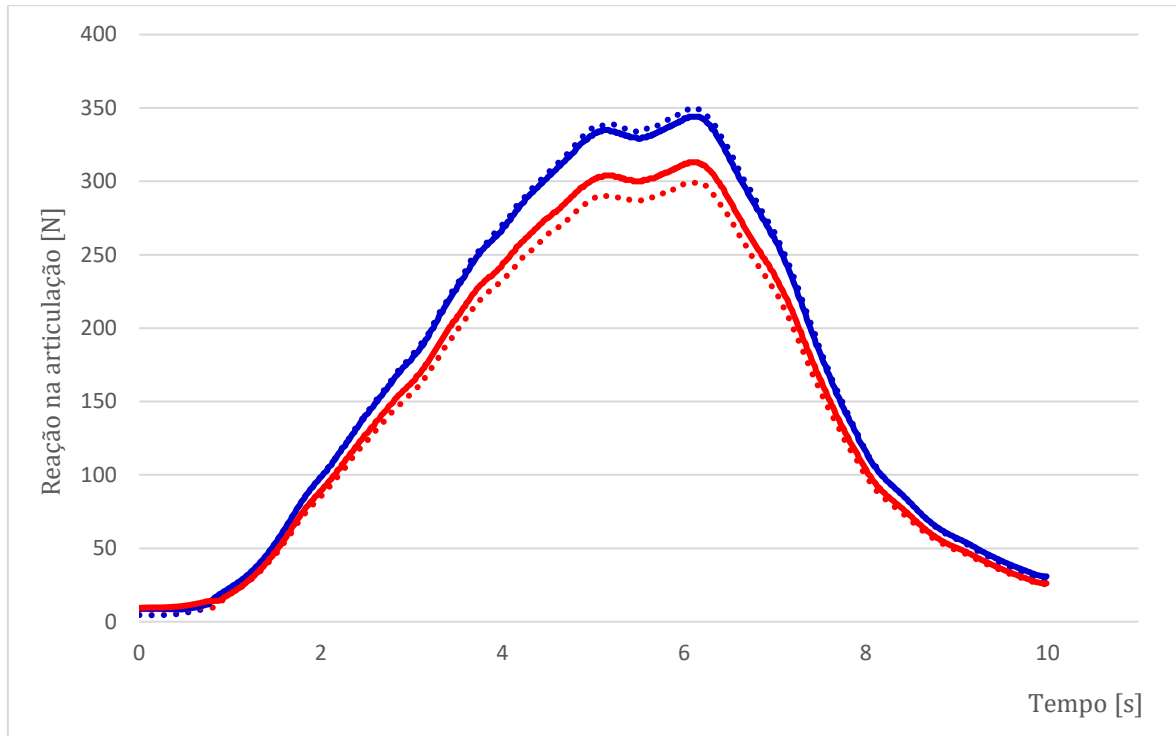


Figura 5.34 - Reações estimadas na ATM do lado esquerdo (vermelho) e direito (azul) em mandíbula simétrica com o valor das forças musculares indicadas na Tabela 5.5, para a tarefa 4, com o transdutor de forças presente nos incisivos frontais da mandíbula. A picotado encontram-se os valores dispostos na Figura 5.31, para comparação.

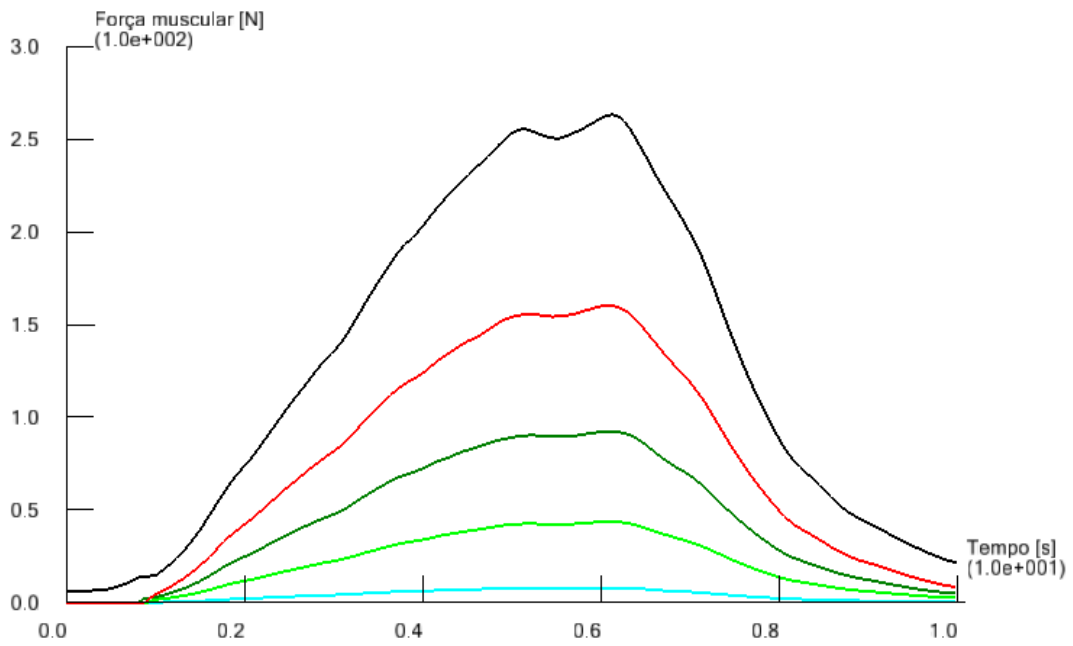


Figura 5.35 - Força muscular estimada de cada músculo do lado esquerdo da mandíbula com o valor das forças musculares indicadas na Tabela 5.5, para a tarefa 4, com o transdutor de forças presente nos incisivos frontais da mandíbula (legenda: ver Figura 5.2).

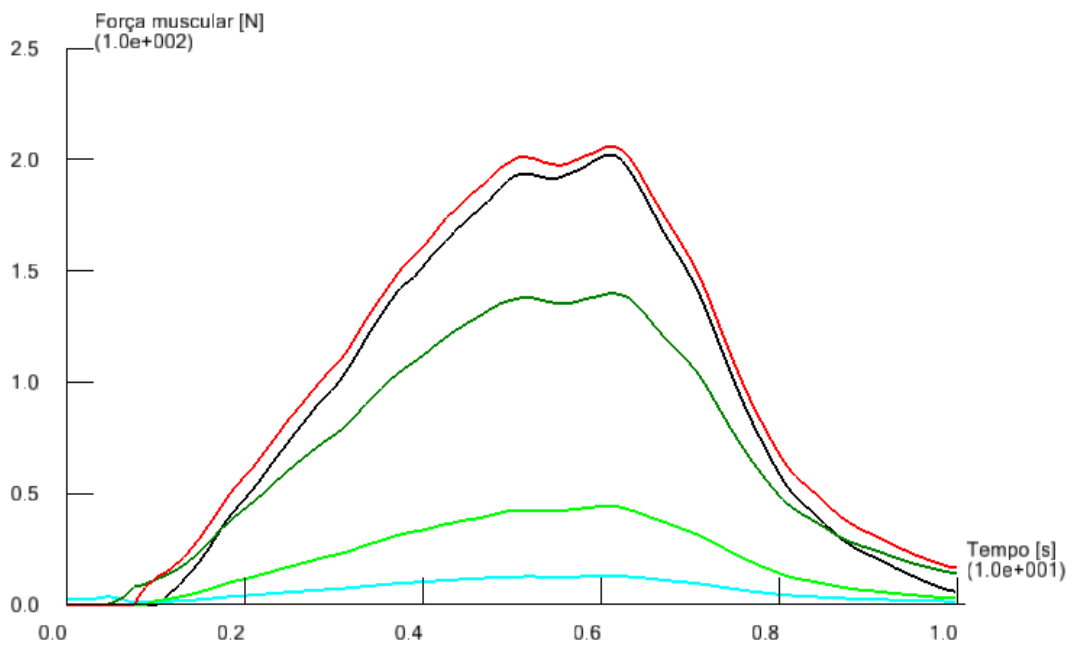


Figura 5.36 - Força muscular estimada de cada músculo do lado direito da mandíbula com o valor das forças musculares indicadas na Tabela 5.5, para a tarefa 4, com o transdutor de forças presente nos incisivos frontais da mandíbula (legenda: ver Figura 5.2).

5.8.1 Conclusões

A alteração das forças musculares máximas dos músculos elevadores levou a uma variação do comportamento dos músculos na realização da mordida unilateral. O valor da força muscular obtido por Mesnard [15] para o músculo temporal é substancialmente inferior ao descrito no trabalho de Koolstra and Van Eijden [16], pelo que a contribuição deste músculo na realização da tarefa é mais reduzida. Por outro lado, o pterigóideo medial suporta cargas mais elevadas nas simulações com os dados obtidos *in vivo* já que para ele foram atribuídos valores máximos superiores. É curioso verificar que mesmo apesar das propriedades musculares terem sido alteradas, os valores das reações observadas nos côndilos da mandíbula são bastantes semelhantes em ambas as simulações, já que a variação das forças foi de apenas 4,7% para a articulação esquerda e de 1,7% para a direita (Tabela 5.6).

Tabela 5.6 - Resultados para a tarefa 4 com valores experimentais de diferentes autores.

Autor	Força (N)					
	Koolstra [16]			Mesnard [15]		
Lado	Esquerdo	Direito	Máxima	Esquerdo	Direito	Máxima
Músculos						
Mas. Sup.	183,225	212,811	272,8	158,074	203,334	303,3
Mas. Pro. Ant.	26,284	30,337	73,8	43,190	44,281	129,6
Mas. Pro. Post.	1,376e-8	13,952	65,8	-	-	-
Temp. Ant.	148,397	192,819	308	89,172	136,62	180
Temp. Post.	2,041e-9	13,784	222	7,278	12,473	37,8
Pte. Med.	184,539	164,713	240	263,003	199,857	382,5
Pte. Lat. Sup.	7,232	5,332	38	-	-	-
Pte. Lat. Inf.	48,354	27,329	112,8	-	-	-
Reação ATM	299	350	-	313	344	-

Capítulo 6 – Modelos experimentais ATM

6.1 Medições *in vivo*

Como mencionado previamente a obtenção de parâmetros dos músculos envolvidos nos movimentos da mandíbula é bastante complicada, principalmente devido a invasividade das técnicas de medição. No entanto a medição *in vivo* das tensões é usualmente efetuada por eletromiografia, técnica que mede a atividade elétrica produzida pelos músculos através da inserção de elétrodos de agulha na pele [49]. A exatidão desta técnica é muitas vezes posta em causa, isto porque não é possível ao certo fazer com que a agulha penetre no ponto exato desejado no músculo que se pretende medir.

O modelo experimental apresentado por B. May *et al.* [50] teve como principal objetivo o desenvolvimento de um modelo matemático para estudar a magnitude e as direções das forças envolvidas na articulação temporomandibular aquando do fecho da mandíbula. A determinação das forças na articulação foi possível através da medição da atividade muscular por eletromiografia e a sua correlação com as áreas transversais de cada músculo.

A área transversal de cada músculo é necessária para determinar a magnitude da força que cada músculo contribui para o sistema, tendo esta sido retirada a partir de imagens scan de um estudo anterior. As linhas de ação de cada músculo e os pontos de aplicação das forças da articulação e da mordida foram determinadas a partir de um cadáver.

Posteriormente, um conjunto de voluntários foi selecionado para medição das atividades musculares através do uso de elétrodos de superfície, colocados a 20 mm de distância ao longo do centro de cada músculo. Aos pacientes foi pedido que comprimissem os maxilares com força máxima três vezes ao longo de três segundos, com dez segundos de intervalo, tendo os valores da força na mordida sido registados com sensores de força. A medição da atividade muscular dos músculos masséter e temporal é relativamente simples utilizando elétrodos de superfície, no entanto para os pterigóideos medial e lateral, devido a estes estarem localizados numa posição mais profunda no crânio, é necessário estimar matematicamente os valores das suas forças.

Os resultados da atividade muscular obtidos não podem ser utilizados diretamente no modelo, pelo que é necessário combinar os valores da área transversal com os sinais EMG medidos. Como o número de equações é inferior ao número de variáveis que se pretende descobrir, o modelo foi sujeito a métodos de otimização, sendo ao todo utilizado quatro métodos distintos para obter os resultados.

Os resultados obtidos para o valor das forças musculares medidas no masséter, temporal e das reações calculadas para a articulação foram separados em três amostras, uma referente aos pacientes com a articulação intacta do sexo masculino, do sexo feminino, e por último uma com o grupo de pacientes que apresentava algum sintoma de disfunções temporomandibulares.

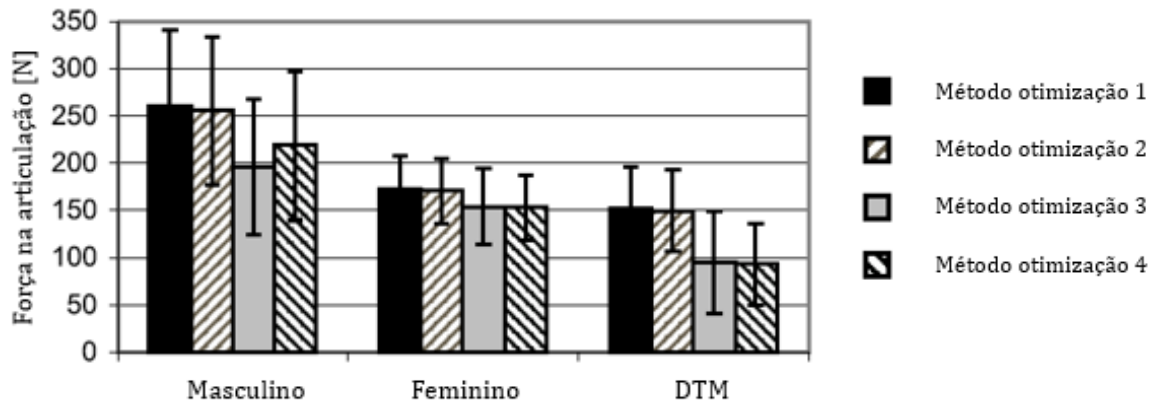


Figura 6.1 - Força média nas articulações [50].

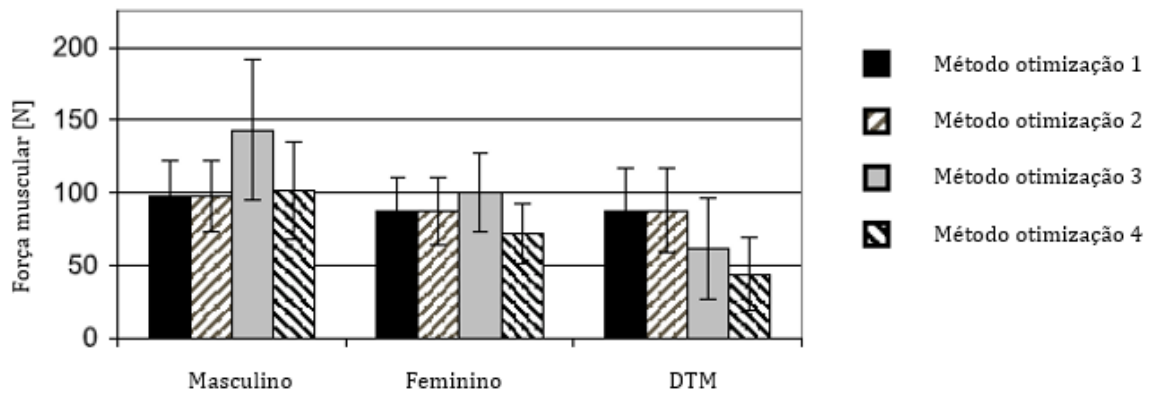


Figura 6.2 - Força média do músculo temporal [50].

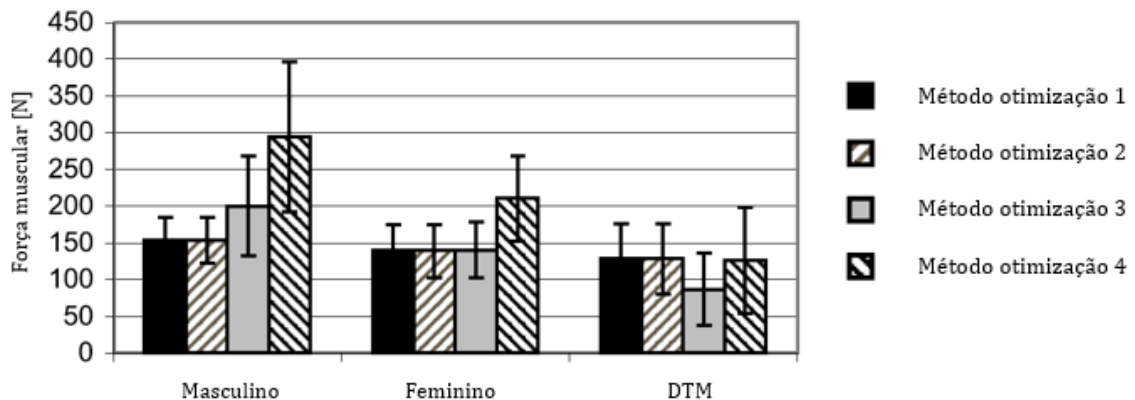


Figura 6.3 - Força média do músculo masséter [50].

Mesnard [15], no seu trabalho de doutoramento, procurou desenvolver e validar um protocolo de caracterização da articulação temporomandibular. Para quantificar as forças foram medidos os sinais elétricos através de eletromiografia em 32 cobaias. Os elétrodos foram posicionados em ambos os lados da mandíbula e o sensor das forças sobre os incisivos, os primeiros pré-molares e os primeiros molares. Foram considerados seis músculos na elevação da mandíbula: músculo temporal anterior, medial e posterior; masséter profundo e superficial e pterigóideo medial. O valor da secção transversal de cada músculo, determinado previamente através da análise de imagens captadas por ressonância magnética, é então correlacionado com os valores dos sinais elétricos captados de forma a calcular as forças envolvidas:

Tabela 6.1 - Parâmetros musculares obtidos por Mesnard [15].

Músculo	Força máxima [N]	Secção transversal do músculo [mm ²]
Masséter profundo	129,6	144
Masséter superficial	303,3	337
Temporal anterior	115,2	128
Temporal medial	64,8	72
Temporal posterior	37,8	42
Pterigóideo medial	382,5	425

6.2 Modelos *in vitro*

O objetivo do artigo apresentado por A. Ramos *et al.* [19] é de apresentar e avaliar uma abordagem inovadora de implementação de um implante intramedular para a reconstrução total da articulação. Para a validação do modelo experimental foi utilizado a mandíbula cadavérica de um homem de 50 anos. Um dos testes efetuados consistiu em fixar o côndilo intacto numa máquina de compressão e sujeitar este a diferentes forças de 100 N, 200 N e 300 N, estando este último valor acima do valor máximo que se obtém na ATM ao mastigar, segundo simulações prévias. Foram efetuadas dez medições de 20 segundos de duração para cada força, sendo possível assim calcular as deformações médias e os desvios do côndilo.

O estudo levado a cabo por Koolstra and Van Eijden [16] teve como objetivo a caracterização da arquitetura e propriedades dos diferentes músculos envolvidos nos movimentos de mastigação. A obtenção das propriedades musculares foi feita através da dissecação de oito cadáveres, em que os dados foram utilizados como “*input*” para um modelo que prevê o comprimento da fibra e a força muscular ativa em função da posição mandibular [16]. As propriedades musculares obtidas são apresentadas na Tabela 6.2, e são as utilizadas em grande parte dos modelos multi-corpo desenvolvidos, incluindo os três modelos multi-corpo descritos no Capítulo 4.

Tabela 6.2 - Parâmetros do modelo experimental [16].

Momentos de inércia	Massa (kg)	I_{xx} (kg m ²)	I_{yy} (kg m ²)	I_{zz} (kg m ²)
Mandíbula	0,44	0,00086	0,00029	0,00061
Músculos	Força máxima (N)		Comprimento de fibra ideal (mm)	
Masséter superficial	272,8		22,6	
Masséter profundo anterior	73,8		21,8	
Masséter profundo posterior	65,8		15,0	
Temporal anterior	308,0		30,7	
Temporal posterior	222,0		31,3	
Pterigóideo medial	240,0		14,1	
Pterigóideo lateral superior	38,0		21,5	
Pterigóideo lateral inferior	112,8		22,3	
Digástrico anterior	46,4		42,6	
Génio-hióideo	38,8		35,3	
Milo-hióideo anterior	63,6		24,0	
Milo-hióideo posterior	21,2		39,7	

6.3 Conclusão

Os estudos apresentados revelam diversas abordagens à obtenção dos valores das forças musculares. Para os modelos *in vivo*, Brian May et al. [50] determinou experimentalmente, através da medição com elétrodos de superfície, o valor das forças musculares dos músculos masséter e temporal, e através de um modelo matemático estimou as forças dos dois pterigóideos, medial e lateral. Michel Mesnard [15], na sua atividade experimental, obteve o valor da força máxima de seis músculos por medição dos sinais elétricos, também através de eletromiografia.

Nos modelos *in vitro*, Koolstra and van Eijden [16] através da dissecação de oito cadáveres, obteve as propriedades musculares de doze músculos.

Tabela 6.3 - Atividade muscular medida em diferentes estudos.

Autor	B. May [50]	M. Mesnard [15]	Koolstra and van Eijden [16]
	Masséter	Masséter (superficial; profundo)	Masséter (superficial; profundo anterior e posterior)
	Temporal	Temporal (anterior; medial; posterior)	Temporal (anterior; posterior)
Músculos analisados		Pterigóideo medial	Pterigóideo (medial; lateral superior e inferior)
			Hióideos (Digástrico anterior; génio-hióideo; milo-hióideo anterior e posterior)

6.4 Validação experimental

O pretendido nesta secção foi a de validar experimentalmente, com o grau de exatidão possível, algumas simulações efetuadas no modelo multi-corpo descrito, de forma a validar experimentalmente as forças atuantes nos diferentes pontos da mandíbula. O modelo computacional desenvolvido determina as forças dos diferentes músculos considerados da mandíbula a partir da introdução de uma força, neste caso de 441N, atribuída como a força máxima da mordida, e das propriedades individuais de cada músculo, tais como a força máxima suportada. Replicar isto num contexto real é impraticável, pois estaríamos perante um sistema com inúmeras incógnitas (músculos e reações nas ATM) para apenas uma variável conhecida, a força da mordida. A metodologia utilizada para a confirmação experimental é descrita no esquema presente na Figura 6.4, onde é feita a comparação com o método de análise do modelo multi-corpo. Para realizar a experiência foi utilizado um simulador presente no Laboratório de Biomecânica do Departamento da Universidade de Aveiro.

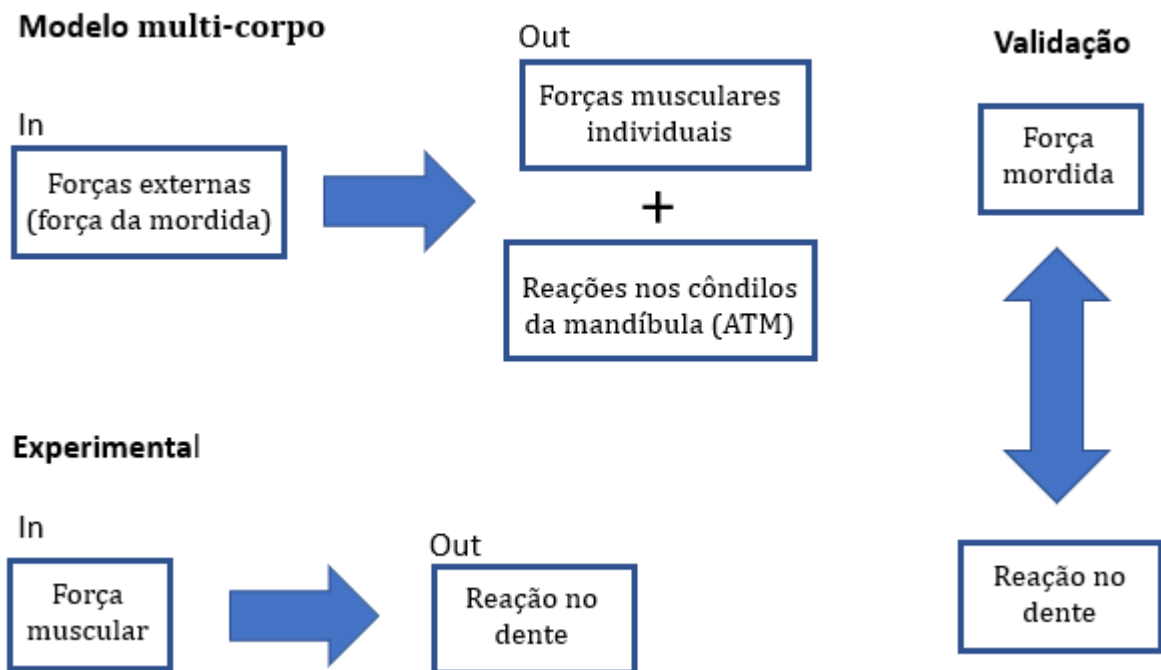


Figura 6.4 - Diagrama representativo da validação experimental.

6.4.1 Aparelho de teste

Existem diversos simuladores da articulação temporomandibular desenvolvidos por outros grupos de investigação, alguns estáticos outros dinâmicos, encontrando-se as suas características tais como modo de acionamento, controlo, ou grupos musculares representados, mais elaboradamente explicitas no trabalho de Azevedo [51]. O simulador estático-dinâmico no qual foram efetuados os testes com os valores obtidos nas simulações feitas no modelo computacional encontra-se representado na Figura 6.5.

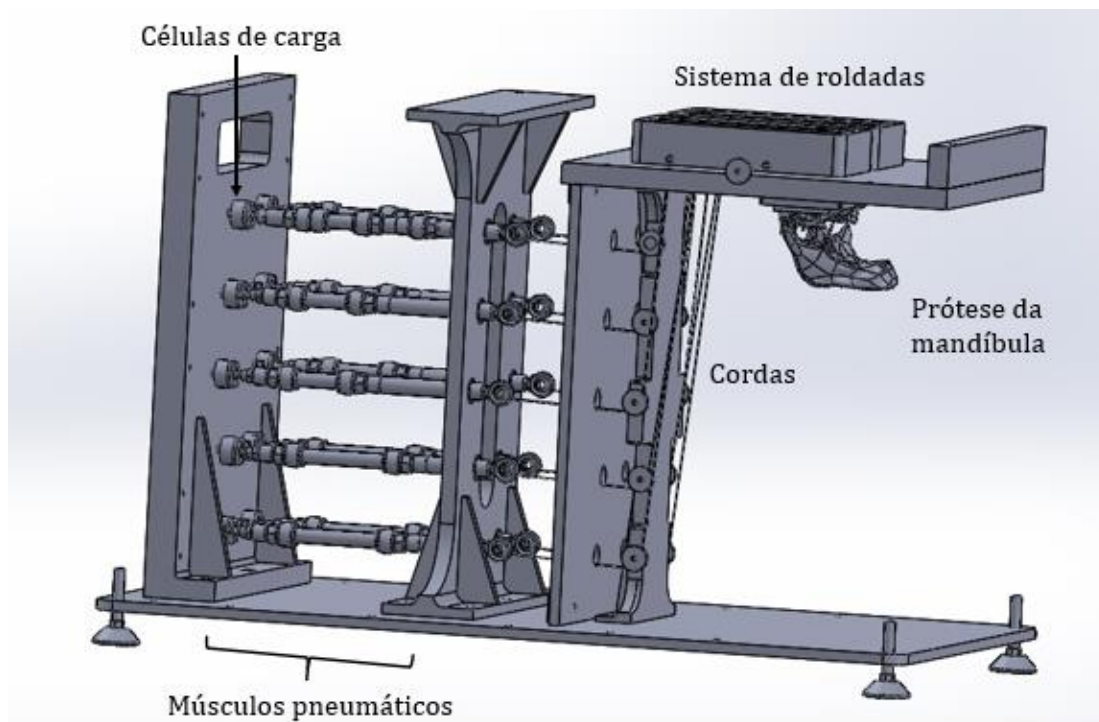


Figura 6.5 - Modelo simplificado em CAD do simulador da mandíbula utilizado.

O simulador mandibular foi utilizado com o objetivo de replicar a articulação temporomandibular numa posição estática sobre o plano oclusal, representando a posição de mandíbula fechada, embora seja possível posicionar a mandíbula com qualquer ângulo de abertura. A mandíbula de ensaio (Figura 6.6), feita de um material polimérico (Sawbones®, modelo SKU #5114-1), é mantida na posição graças a um sistema de cordas que conecta a mandíbula ao simulador.

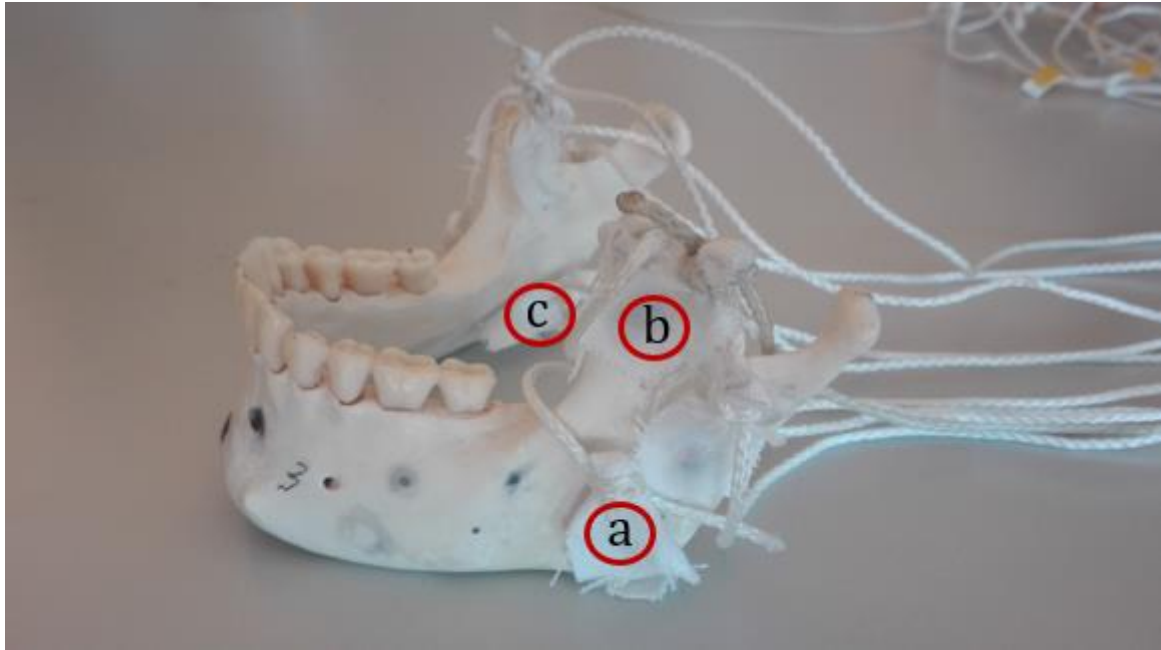


Figura 6.6 - Prótese da mandíbula (Sawbones®). Músculos: a) masséter; b) temporal; c) pterigóideo medial.

A componente electropneumática do simulador é constituída por dez músculos pneumáticos (DMSP-10-40N-AM-AM e DMSP-10-80N-AM-AM, FESTO), cada um com um grau de liberdade, todos independentes entre sim. Os músculos pneumáticos têm como função recriar os músculos reais existentes na mandíbula que atuam nos movimentos da mesma, sendo a cada um associado uma célula de carga (U9B, HBM) com a função de medir a força registada por cada um deles. A ligação entre os músculos pneumáticos e a prótese é feita pelo sistema de cordas, tal como visível na Figura 6.7.



Figura 6.7 - Dispositivo experimental.

O simulador é controlado por uma interface feita em LabView (National Instruments, Austin, TX, USA), responsável pela operação e monitorização do simulador (Figura 6.8). Esta interface é de uso muito simples, permitindo a fácil execução de tarefas interactivamente. Utilizou-se o modo de controlo manual, sendo que ao utilizador apenas é requerido que defina, para cada um dos pneumáticos, o valor da força que se quer replicar.

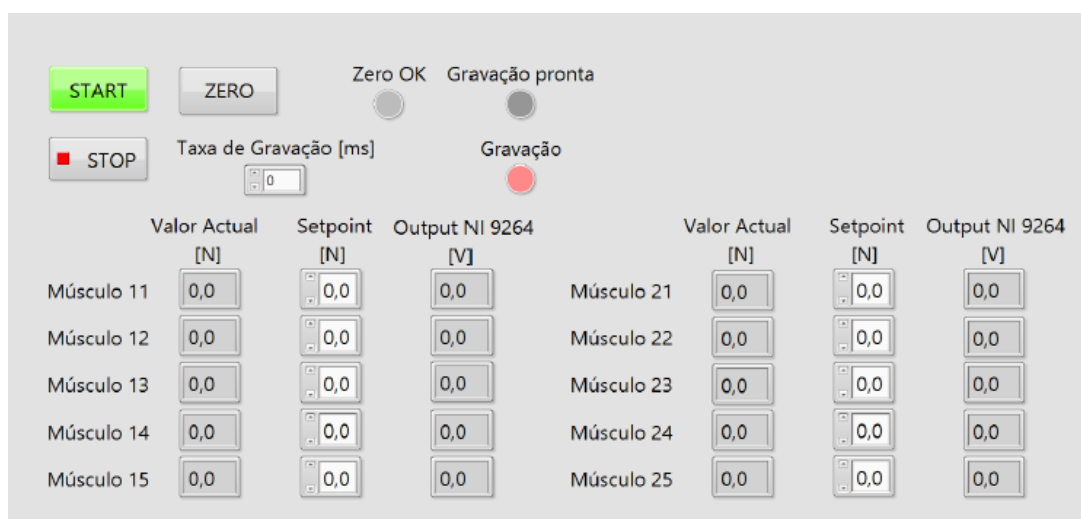


Figura 6.8 - Modo manual.

Para o sistema foram considerados três pares de músculos responsáveis pelos movimentos de fecho da mandíbula, sendo estes os indicados como maiores influentes nestes movimentos nas simulações efetuadas no modelo multi-corpo, o musculo masséter, o temporal e o pterigóideo medial. Procurou-se replicar com o grau de exatidão possível a direção atuante de cada um dos músculos, sendo para tal colados pequenos bocados de pano na mandíbula nas localizações definidas no multi-corpo como os pontos em que se localizam as fibras da mandíbula, aos quais é amarrada uma corda que conecta ao músculo pneumático correspondente, passando por um sistema de roldanas. É requerido que a mandíbula se encontre numa posição fixa e a força seja aplicada numa direção perpendicular ao plano oclusal, tal como acontece no multi-corpo. Como o simulador só contém uma superfície que permite o alojamento dos côndilos, necessitou-se de maquinar um conjunto de peças capazes de manter o correto posicionamento da prótese. Estas peças foram maquinadas no laboratório do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro com a ajuda do Técnico António Festas, sendo indicadas na Figura 6.9.

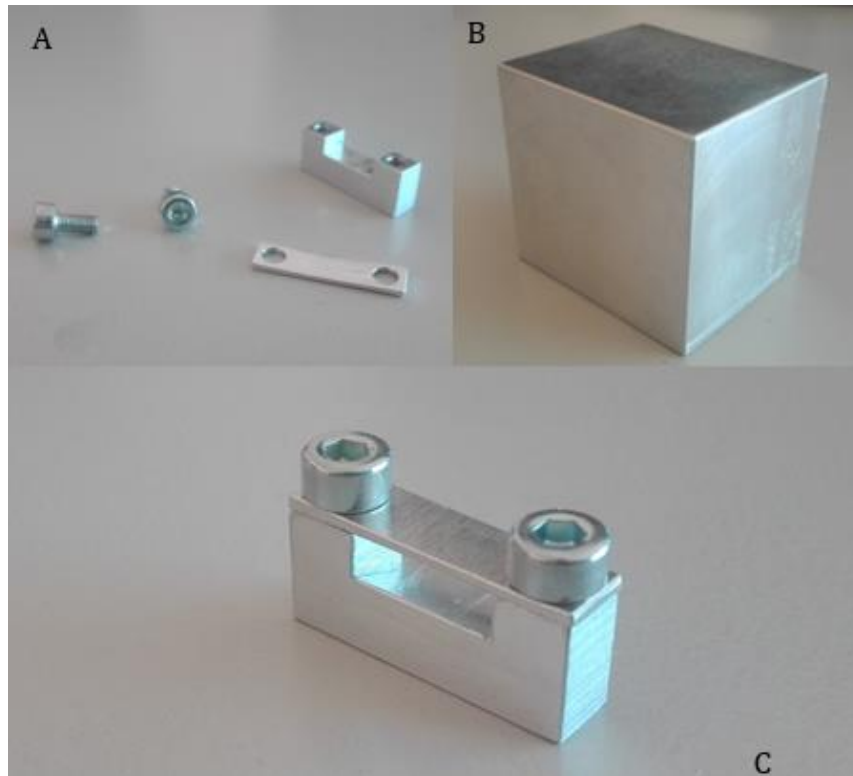


Figura 6.9 - Peças maquinadas para a realização da atividade experimental. A) Peças do dispositivo para medição. B) Bloco. C) Dispositivo para medição.

As diferentes alturas dos dentes da mandíbula quando esta se encontra na posição oclusal causa a variação do plano em que a prótese se encontra quando pressionada contra o cimo do simulador. Para colmatar estas variações de altura, maquinou-se um bloco (46x50x54), Figura 6.9 - B, de forma a que variando a posição deste, consoante o ponto na mandíbula que se pretende determinar a força, a distância entre o topo do simulador e o plano que passa sobre os incisivos da mandíbula seja constante e de 53mm. São possíveis três combinações possíveis para os três pontos de medida de força pretendidos, no molar, pré-molar e nos incisivos frontais. Para tal, a dimensão de 46mm deve ser a usada entre a mandíbula e topo do simulador para as medições nos incisivos, a de 50mm para as medições nos pré-molares, e a de 54mm para as medições nos molares. A este bloco é acoplado um dispositivo para medição, Figura 6.9 - C, com o objetivo de possibilitar a medição das forças verificadas na mandíbula. Este conjunto contém uma fina chapa metálica, Figura 6.9 - A, que tem o objetivo de deformar quando sujeito a forças de compressão. A esta chapa metálica foi colada um extensómetro (1mm) na parte superior (Figura 6.9), estando este conectado a um sistema de aquisição de dados (UBM Spider8) capaz de ler e registar as deformações observadas. Para a obtenção das reações a partir das deformações medidas, considerou-se que o sistema se podia resumir a um problema de flexão de uma viga duplamente encastrada, sendo para tal utilizado o conjunto de equações listadas em seguida:

$$\text{Lei de Hooke: } \sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

$$\text{Tensão máxima: } \sigma = \frac{M_{\text{máx}} \cdot h/2}{I_z} \quad (2)$$

$$\text{Momento de inércia de seção retangular: } I_z = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (3)$$

$$\text{Momento fletor associado a barra duplamente encastrada } M_{\text{fletor}} = \frac{P \cdot L}{8} \quad (4)$$

Variáveis:

Comprimento da barra: L=0,02m

Espessura da barra: h=0,001m

Modulo elasticidade do alumínio: E=69GPa

6.4.2 Forças musculares aplicadas

O aparelho de teste desenvolvido permite a utilização de diferentes estratégias para a determinação das forças atuantes, tal como a adoção de forças simétricas ou a variação das cargas exercidas por cada músculo pneumático.

No estudo realizado, as forças utilizadas no simulador foram previamente obtidas no modelo multi-corpo da mandíbula. Segundo os dados obtidos em capítulos anteriores (Tabela 5.1), utilizando os valores para as propriedades musculares definidos por Koosltra *et al.* [16], são três os pares de grupos musculares que mais têm impacto na mordida da mandíbula, sendo eles o músculo masséter, o temporal e o pterigóideo medial, já que a sua remoção provoca variações significativas nas reações registadas em ambos os côndilos da mandíbula (ver Tabela 5.2). Como o simulador permite no máximo cinco pares musculares, optou-se por juntar as componentes anterior e posterior do músculo masséter profundo já que na literatura há poucas referências à individualização deste grupo [15], [48]. Realizaram-se então as simulações no modelo multi-corpo referentes à tarefa da mordida com os cinco pares musculares já referidos, em que é definido o músculo masséter profundo como um único músculo, com o valor da força resultante da soma das forças máximas musculares de ambas as componentes, anterior e posterior, do masséter profundo, tal como indicado na Tabela 6.4. Para estas simulações foram retirados todos os músculos que não se encontram descritos na Tabela 6.1 já que as suas contribuições são mínimas, tendo sido efetuadas simulações para três pontos diferentes de local de aplicação da força da mordida, nos incisivos, pré-molares e molares do lado direito, encontrando-se os resultados dispostos na Tabela 6.5.

Tabela 6.4 - Valores da força máxima muscular para cada músculo, utilizadas no modelo multi-corpo.

Músculo	MS	MP	TA	TP	PM
Força muscular máxima (N)	272,8	139,6	308	222	240

Tabela 6.5 – Valores da força muscular de cada músculo obtidos a partir de simulações no modelo multi-corpo para a tarefa 4 com valores de força musculares máximos retirados da Tabela 5.1, para diferentes pontos de aplicação da força.

Músculo	Lado	Força muscular (N)		
		Incisivos	Pré-molares	Molares
Masséter superficial	Direito	211,89	196,38	147,48
	Esquerdo	183,06	146,77	103,76
Masséter profundo	Direito	81,79	69,42	49,57
	Esquerdo	67,25	59,81	44,07
Pterigóideo medial	Direito	145,69	166,32	131,19
	Esquerdo	207,43	141,64	87,32
Temporal anterior	Direito	168,45	193,61	163,88
	Esquerdo	92,57	23,42	35,01
Temporal posterior	Direito	5,02	39,33	54,08
	Esquerdo	2,65e-9	1,77e-9	1,53e-9

Os resultados obtidos do modelo multi-corpo foram sujeitos a análise tendo sido efetuadas algumas alterações. Os valores para as forças do músculo masséter superficial são bastante superiores aos verificados para a componente profunda, assim como os valores da força do temporal anterior são mais significativos do que para a componente posterior. Posto isto, foi optado por juntar ambas as componentes, reduzindo o número de músculos para três, sendo eles o grupo masséter, o temporal e o pterigóideo medial. Relembrando que para os valores obtidos está uma força associada ao apoio da mandíbula de 441N, considerou-se prudente, principalmente devido à pouca resistência do material da prótese já que os dentes são postos superficialmente na mandíbula e à débil resistência das colagens, reduzir todos estes valores para metade. Desta forma, como indicado na Tabela 6.6, os valores a ser introduzidos no simulador correspondem a 50% do valor registado no modelo multi-corpo, sendo por isso desejado obter uma reação na mandíbula de 220,5N.

Tabela 6.6 - Forças musculares utilizadas no sistema experimental, a 50%.

Músculo	Força muscular(N)							
	Pneumático		Molares		Pré-molares		Incisivos	
Lado	Dir	Esq	Dir	Esq	Dir	Esq	Dir	Esq
Temporal	11	21	109	18	116	13	86	46
Masséter	12	22	98	74	132	103	147	125
Pterigóideo medial	13	23	66	44	83	71	73	104

6.4.3 Procedimento experimental

Todo o sistema foi montado manualmente de acordo como indicado na Figura 6.10. Com as estruturas corretamente colocadas, introduziu-se os valores desejados para as medições com o dispositivo nos molares. Foi aplicada tensão nos cabos de forma a que os pneumáticos atingissem a força desejada. Assim que os valores da força medidos pelos sensores se encontravam minimamente estabilizados, foram recolhidos os valores para as forças medidas pelos sensores e a deformação medida pelo extensómetro. Este procedimento foi repetido pelo menos três vezes, sendo que entre cada medição as forças aplicadas pelos pneumáticas foram repostas a zero. O dispositivo contendo a chapa foi ajustado para as restantes duas posições, pré-molares e incisivos, e o bloco foi recolocado de forma a manter a mesma distância entre a superfície do dente e o topo do simulador, sendo registado os valores das deformações para as forças musculares respetivas.

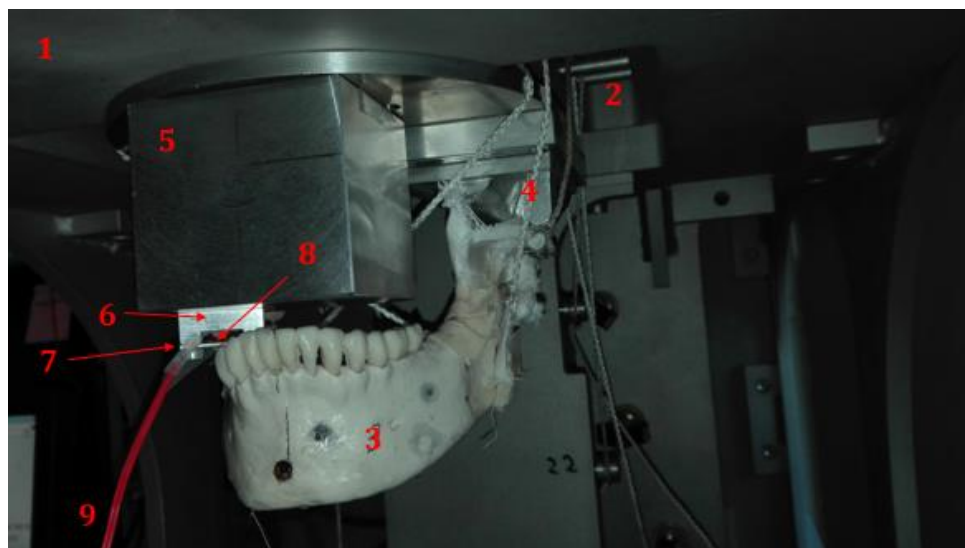


Figura 6.10 - Aparelho de teste, legenda: 1- Simulador; 2- Roldanas; 3- Mandíbula; 4- Sistema de cordas; 5- Bloco; 6- Dispositivo para medição; 7- Chapa deformável; 8- Extensómetro; 9- Recolha de dados.

6.4.4 Resultados

As deformações no sensor de apoio foram registadas para com o dispositivo inserido em três posições diferentes: entre os molares do lado direito, os pré-molares do lado direito e entre os incisivos frontais (Tabela 6.7). Foram consideradas cinco medições para as medições entre os molares, e três para os pré-molares e incisivos para análise. Os valores para as deformações registadas para cada caso vão geralmente diminuindo teste após teste, apesar de se ter optado por reiniciar todo o procedimento de definição das cargas após cada medição, o que pode significar algum acomodamento dos músculos pneumáticos.

Tabela 6.7 - Resultados experimentais

Posição	Teste	Deformação (ϵ)	Força aplicadas do músculo pneumático (N)					
			11	12	13	21	22	23
Molar	1	1035	108	98	65	17	72	40
	2	908	110	98	64	18	73	40
	3	882	108	97	66	18	71	43
	4	896	108	97	65	18	73	42
	5	883	109	98	65	17	72	45
Pré-Molar	1	1105	116	131	83	13	100	70
	2	1070	115	130	82	13	102	70
	3	1036	116	131	82	12	104	70
Incisivo	1	1050	85	145	72	45	122	106
	2	1027	85	145	73	46	125	100
	3	980	86	146	71	46	127	100

Os valores para as forças foram calculados a partir das deformações registadas, através das equações (1-4), sendo os valores médios para cada posição de medição apresentados na Figura 6.11.

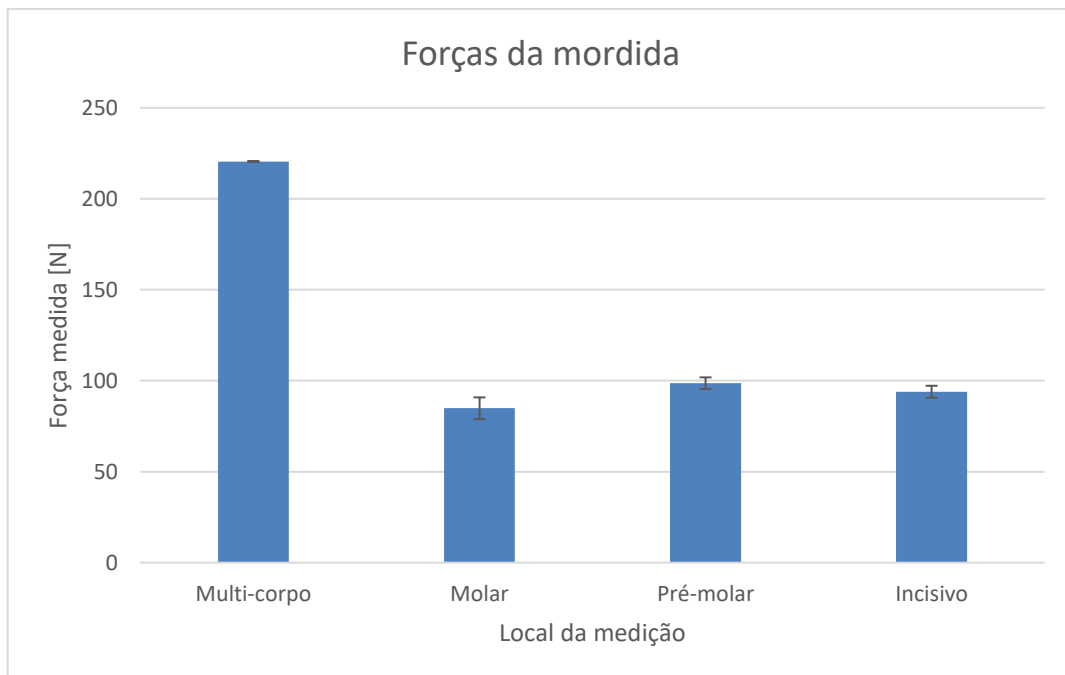


Figura 6.11 - Reações obtidas em cada ponto da mandíbula.

6.4.5 Discussão

De forma a validar o modelo multi-corpo da articulação temporomandibular utilizado foi criado um dispositivo capaz de medir as forças registadas na mordida. O aparelho foi construído recorrendo a uma mandíbula polimérica onde foram definidos três músculos atuadores de cada lado, representando os músculos que foram considerados como principais nas ações da mordida, sendo eles o masséter, temporal e pterigóideo medial.

Tal como foi descrito, o modelo multi-corpo da mandíbula possui ao todo doze pares de músculos atuantes no decorrer da tarefa da dentada, tendo os valores registados nas simulações indicado que destes, seis podem ser considerados de superior influência para esta atividade. As dimensões reduzidas da mandíbula polimérica aliadas a dificuldade da correta fixação do sistema de cordas levou-nos a optar por utilizar apenas três pares de músculos nas simulações. Esta simplificação foi considerada já que os resultados provenientes das simulações no multi-corpo revelaram baixos valores das forças para os restantes grupos musculares.

Tão importante como o valor da força de cada músculo, são as direções da sua atuação. O sistema de roldanas incorporado no sistema permite-nos uma replicação limitada das orientações consideradas no multi-corpo, sendo este o ponto que se considera como mais influente nas divergências para os resultados obtidos. Os valores das forças obtidas para os diferentes locais de medição foram substancialmente inferiores do que o valor indicado pelo modelo multi-corpo. Para os molares, foi registada uma força de mordida de $84,9 \pm 5,9\text{N}$, o que representa um decréscimo médio de 61,4% do valor da força da mordida utilizada no modelo para as mesmas forças musculares, de 220,5N. As medições com o dispositivo localizado entre os primeiros pré-molares direitos revelaram uma força de $98,6 \pm 3,2\text{N}$, o que corresponde a uma diminuição em 55,2% do valor esperado. Por último, as medições nos incisivos frontais apresentaram uma reação de $93,9 \pm 3,3\text{N}$, valor novamente aquém do indicado no modelo multi-corpo, o que significa que a média de diferenças esta situada em 55%.

6.4.6 Conclusões

A construção de um modelo experimental que replique a anatomia exata da verificada no modelo multi-corpo descrito por De Zee [37] não é de fácil execução, seja devido a anatomia das estruturas ósseas ou à localização e orientação de cada um dos músculos envolvidos. Não obstante, desenvolvemos um sistema da articulação temporomandibular que considera os principais músculos envolvidos no fecho da mandíbula. Para replicar a estrutura óssea da mandíbula foi utilizado um material polimérico, enquanto que as definições das ações musculares foram retiradas do

multi-corpo onde se consideraram apenas os três principais grupos musculares envolvidos, e replicadas através da utilização de pneumáticos.

O sistema desenvolvido permitiu-nos a obtenção das reações em três pontos distintos da mandíbula. Os valores obtidos apresentaram-se algo aquém dos indicados no multi-corpo, pelo que se admite melhoramentos à abordagem ao processo experimental. Estas discrepâncias revelaram-se bastante elevadas, podendo a sua razão ser justificada de certo modo pelas diferenças na anatomia da mandíbula, maioritariamente nas diferentes dimensões entre a presente no modelo e a utilizada no experimento, pela consideração de apenas três grupos musculares ao invés dos seis principais retratados no modelo, mas principalmente pela diferente orientação das direções de aplicação das forças musculares.

Capítulo 7 – Conclusões

De um modo geral, o objetivo de desenvolver e estudar um modelo multi-corpo da articulação temporomandibular foi atingido.

Para o estudo do modelo multi-corpo, foi utilizado o modelo proposto por De Zee [37] disponível no software AnyBody™, em que as estruturas ósseas foram baseadas em imagens tomográficas retiradas de um paciente de 30 anos. As propriedades dos músculos descritos no modelo são as descritas num outro trabalho, em que são descritas as forças máximas de cada um de doze músculos bem como o comprimento de fibra. Para avaliar a contribuição muscular e reações nos côndilos da mandíbula, foram analisadas duas tarefas distintas, uma que representa um movimento cíclico da mandíbula, e outro que analisa a mordida unilateral, sendo o valor da força da dentada obtida por um sensor. A cinemática de cada uma destas tarefas foi adquirida através de sensores colocados num voluntário ao qual foi pedido que replicasse as mesmas.

Através da cinemática da tarefa, da definição das propriedades musculares e da força atuante num ponto desejado da mordida, retirado a partir de um transdutor de forças, o modelo multi-corpo permite-nos estudar toda uma vasta gama de parâmetros durante a realização de cada tarefa. A tarefa da mordida unilateral é aquela em que os músculos são teoricamente levados ao limite, pois o voluntário encontra-se a exercer a pressão máxima no maxilar. Por esta razão esta tarefa foi aquela que foi mais explorada. O output das simulações consiste no conjunto de forças musculares de cada um dos músculos definidos, bem como o valor das reações nos côndilos da mandíbula.

De forma a averiguar a contribuição efetiva de cada um dos quatro grupos musculares, o masséter, temporal, pterigóideo lateral e medial, a tarefa foi replicada anulando individualmente cada um deles. Isto permitiu-nos, através da obtenção do valor das reações nos côndilos e da força muscular do sistema quando é desprezado um dos grupos musculares, concluir quais os grupos musculares que mais contribuem para a mordida, sendo estes o masséter temporal e pterigóideo medial. Tal vai de encontro ao descrito noutros trabalhos, que referem que são estes os principais músculos envolvidos nos movimentos de elevação da mandíbula, estando o pterigóideo lateral mais associado às tarefas de didução (movimentos laterais) da mandíbula, tal como foi possível verificar nas simulações para o movimento cíclico, onde é visível uma maior contribuição deste músculo.

Foi construído um dispositivo da articulação temporomandibular capaz de replicar a tarefa da mordida. O objetivo passou pela validação do modelo multi-corpo, utilizando um simulador da ATM equipado com músculos pneumáticos. Os dados recolhidos da força muscular efetiva de cada um dos músculos principais em simulações no modelo foram inseridos no simulador de forma a se puder obter a força presente em três locais diferentes da mandíbula. A validação do modelo ficou a

55% do valor desejado, mas recomenda-se que em futuros estudos de validação sejam considerados mais músculos, nomeadamente que sejam individualizadas as componentes superficial e profunda do masséter e anterior e posterior do temporal, e que as direções dos músculos sejam replicadas com maior exatidão.

Futuros desenvolvimentos

É reconhecido que a atividade experimental levada a cabo neste trabalho pode ser alvo de melhoramentos, principalmente ao nível das atuações musculares. Neste sentido, são propostas as seguintes abordagens:

- Tirar o máximo partido do número de pneumáticos presentes no simulador e considerar cinco pares musculares ao invés dos três considerados neste trabalho, sendo sugerido os cinco que demonstraram maiores valores de força nas simulações do modelo, sendo eles o masséter superficial e profundo, o temporal anterior e posterior, e o pterigóideo medial.
- Para além de medir as forças nos diferentes pontos da mandíbula, seria interessante também obter as reações nos côndilos da mandíbula, e comparar os valores com os obtidos no multi-corpo, verificando se são semelhantes ou se sofrem redução na mesma proporção que aquela verificada para as forças da mordida.
- Replicar os ângulos da atuação de cada músculo com um maior grau de exatidão, de forma a verificar se os resultados obtidos se aproximam mais aos indicados pelo multi-corpo.
- Utilizar algum tipo de borracha para simular a presença de um disco articular nos côndilos, e comparar com resultados obtidos na sua ausência, de forma a ser possível retirar algum tipo de conclusões sobre a influência que a presença do disco articular tem em toda a tarefa da mordida.

Bibliografia

- [1] L. Guarda-Nardini, D. Manfredini, and G. Ferronato, "Temporomandibular joint total replacement prosthesis: current knowledge and considerations for the future," *Int. J. Oral Maxillofac. Surg.*, vol. 37, no. 2, pp. 103–110, 2008.
- [2] A. Figueiredo *et al.*, *Disfunções Temporomandibulares: Uma abordagem multidisciplinar*, 2ª Edição. 2015.
- [3] X. Alomar *et al.*, "Anatomy of the Temporomandibular Joint," *Semin. Ultrasound, CT MRI*, vol. 28, no. 3, pp. 170–183, 2007.
- [4] H. J. Lundberg, *Temporomandibular Joint Total Joint Replacement – TMJ TJR*. Mercuri L. (eds), 2016.
- [5] E. Tanaka *et al.*, "Three-dimensional finite element analysis of human temporomandibular joint with and without disc displacement during jaw opening," *Med. Eng. Phys.*, vol. 26, no. 6, pp. 503–511, 2004.
- [6] R. Putz and R. Pabst, *Sobotta Atlas de Anatomia Humana*, 21ª. Guanabara Koogan, 2000.
- [7] L. S. Lippert, *CLINICAL and ANATOMY*. 2006.
- [8] A. Patel and E. Groppo, "Management of temporal bone trauma.," *Cranio-maxillofac. Trauma Reconstr.*, vol. 3, no. 2, pp. 105–13, 2010.
- [9] Tianna Meriage-Reiter, "Ouch, my jaw hurts!.....must be my TMJ, or is it?," 2014. [Online]. Available: <http://mindbodymovement.org/ouch-my-jaw-hurts-must-be-tmj/>. [Accessed: 22-Jun-2017].
- [10] A. W. M. Drake, Richard; Vogl, A. Wayne; Mitchell, *Gray's Anatomy for Students*, 2nd Editio. London: Churchill Livingstone, 2009.
- [11] R. R. Seeley, T. D. Stephens, and F. Tate, *Anatomy & Physiology*. 2016.
- [12] U. B. M. Iv, "Cinemática Mandibular."
- [13] M. B. Villamil, L. P. Nedel, C. M. D. S. Freitas, and B. Macq, "Simulation of the human TMJ behavior based on interdependent joints topology," *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 105, no. 3, pp. 217–232, 2012.
- [14] D. P. Sinn, E. A. De Assis, and G. S. Throckmorton, "Mandibular excursions and maximum bite forces in patients with temporomandibular joint disorders," *J. Oral Maxillofac. Surg.*, vol. 54, no. 6, pp. 671–679, 1996.
- [15] M. Mesnard, "Elaboration et validation d'un protocole de caractérisation de l'Articulation Temporo-Mandibulaire," L' Université Bordeaux 1, 2005.
- [16] J. H. Koolstra and T. M. G. J. Van Eijden, "Combined finite-element and rigid-body analysis of human jaw joint dynamics," *J. Biomech.*, vol. 38, no. 12, pp. 2431–2439, 2005.
- [17] L. R. Iwasaki, B. W. Baird, W. D. McCall, and J. C. Nickel, "Muscle and temporomandibular joint forces associated with chincup loading predicted by numerical modeling," *Am. J. Orthod. Dentofac. Orthop.*, vol. 124, no. 5, pp. 530–540, 2003.
- [18] C. M. De Felício, A. Mapelli, F. V. Sidequersky, G. M. Tartaglia, and C. Sforza, "Mandibular kinematics and masticatory muscles EMG in patients with short lasting TMD of mild-moderate severity," *J. Electromyogr. Kinesiol.*, vol. 23, no. 3, pp. 627–633, 2013.
- [19] A. Ramos and M. Mesnard, "A new condyle implant design concept for an alloplastic temporomandibular joint in bone resorption cases," *J. Cranio-*

-
- Maxillofacial Surg.*, vol. 44, no. 10, pp. 1670–1677, 2016.
- [20] M. Mlernik and W. Więckiewicz, “The basic conservative treatment of temporomandibular joint anterior disc displacement without reduction - Review,” *Adv. Clin. Exp. Med.*, vol. 24, no. 4, pp. 731–735, 2015.
- [21] J. Lei, J. Han, M. Liu, Y. Zhang, A. U. J. Yap, and K. Y. Fu, “Degenerative temporomandibular joint changes associated with recent-onset disc displacement without reduction in adolescents and young adults,” *J. Cranio-Maxillofacial Surg.*, vol. 45, no. 3, pp. 408–413, 2017.
- [22] B. K. Hutto, “TMJ Disorders.” [Online]. Available: <http://www.modestooralsurgery.com/tmj-disorders/>. [Accessed: 14-Jul-2017].
- [23] A. M. Almeida, J. Fonseca, and S. Félix, *Dor Orofacial e Disfunções Temporomandibulares: Tratamento Farmacológico*, 1ª Edição. 2016.
- [24] L. Sanches, G. AR, G. AS, and R. EC, “Pain & Relief Real Need for Treatment,” *J. Pain*, vol. 4, no. 5, 2015.
- [25] S. S. Atsü and F. Ayhan-Ardic, “Temporomandibular disorders seen in rheumatology practices: A review,” *Rheumatol. Int.*, vol. 26, no. 9, pp. 781–787, 2006.
- [26] E. Tanaka, M. S. Detamore, and L. G. Mercuri, “Degenerative Disorders of the Temporomandibular Joint: Etiology, Diagnosis, and Treatment,” *J. Dent. Res.*, vol. 87, no. 4, pp. 296–307, 2008.
- [27] W. L. Laskin, Daniel M.; Greene, Charles S.; Hylander, *Temporomandibular Disorders: An Evidence-Based Approach to Diagnosis and Treatment*. 2006.
- [28] A. J. Sidebottom and R. Salha, “Management of the temporomandibular joint in rheumatoid disorders,” *Br. J. Oral Maxillofac. Surg.*, vol. 51, no. 3, pp. 191–198, 2013.
- [29] S. Ringold and R. Q. Cron, “The temporomandibular joint in juvenile idiopathic arthritis: frequently used and frequently arthritic.,” *Pediatr. Rheumatol. Online J.*, vol. 7, no. 1, p. 11, 2009.
- [30] Y.-C. Lin, M.-L. Hsu, J.-S. Yang, T.-H. Liang, S.-L. Chou, and H.-Y. Lin, “Temporomandibular Joint Disorders in Patients with Rheumatoid Arthritis,” *J. Chinese Med. Assoc.*, vol. 70, no. 12, pp. 527–534, 2007.
- [31] J. M. Serra-Negra, F. Lobbezoo, C. C. Martins, E. Stellini, and D. Manfredini, “Prevalence of sleep bruxism and awake bruxism in different chronotype profiles: Hypothesis of an association,” *Med. Hypotheses*, vol. 101, pp. 55–58, 2017.
- [32] J. T. T. de Siqueira, C. M. Camparis, S. R. D. T. de Siqueira, M. J. Teixeira, L. Bittencourt, and S. Tufik, “Effects of localized versus widespread TMD pain on sleep parameters in patients with bruxism: A single-night polysomnographic study,” *Arch. Oral Biol.*, vol. 76, pp. 36–41, 2017.
- [33] J. Patel, K. Nilesh, M. Parkar, and A. Vaghasiya, “Clinical and radiological outcome of arthrocentesis followed by autologous blood injection for treatment of chronic recurrent temporomandibular joint dislocation,” *J. Clin. Exp. Dent.*, vol. 9, no. 8, pp. 0–0, 2017.
- [34] F. Briceño, R. Ayala, K. Delgado, and S. Piñango, “Evaluation of temporomandibular joint total replacement with alloplastic prosthesis: observational study of 27 patients.,” *Cranio-maxillofac. Trauma Reconstr.*, vol. 6, no. 3, pp. 171–8, 2013.
-

-
- [35] C. C. Peck and A. G. Hannam, "Human jaw and muscle modelling," *Arch. Oral Biol.*, vol. 52, no. 4, pp. 300–304, 2007.
- [36] D. C. Ackland, D. Robinson, M. Redhead, P. V. S. Lee, A. Moskaljuk, and G. Dimitroulis, "A personalized 3D-printed prosthetic joint replacement for the human temporomandibular joint: From implant design to implantation," *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 69, no. January, pp. 404–411, 2017.
- [37] M. de Zee, M. Dalstra, P. M. Cattaneo, J. Rasmussen, P. Svensson, and B. Melsen, "Validation of a musculo-skeletal model of the mandible and its application to mandibular distraction osteogenesis," *J. Biomech.*, vol. 40, no. 6, pp. 1192–1201, 2007.
- [38] T. M. van Eijden, J. H. Koolstra, and P. Brugman, "Architecture of the human pterygoid muscles," *J. Dent. Res.*, vol. 74, no. 8, pp. 1489–1495, 1995.
- [39] D. C. Ackland, A. Moskaljuk, C. Hart, P. Vee Sin Lee, and G. Dimitroulis, "Prosthesis Loading After Temporomandibular Joint Replacement Surgery: A Musculoskeletal Modeling Study," *J. Biomech. Eng.*, vol. 137, no. 4, p. 41001, 2015.
- [40] R. H. Haug, T. T. Fattahi, and M. Goltz, "A biomechanical evaluation of mandibular angle fracture plating techniques," *J. Oral Maxillofac. Surg.*, vol. 59, no. 10, pp. 1199–1210, 2001.
- [41] J. T. Hsu, H. L. Huang, M. T. Tsai, L. J. Fuh, and M. G. Tu, "Effect of screw fixation on temporomandibular joint condylar prosthesis," *J. Oral Maxillofac. Surg.*, vol. 69, no. 5, pp. 1320–1328, 2011.
- [42] S. Braun, H. P. Bantleon, W. P. Hnat, J. W. Freudenthaler, M. R. Marcotte, and B. E. Johnson, "A study of bite force, part 1: Relationship to various physical characteristics," *The Angle orthodontist*, vol. 65, no. 5, pp. 367–372, 1995.
- [43] J.M.Lackie, *The Dictionary of Cell & Molecular Biology*, 4th Editio. 2007.
- [44] M. Peter D. Quinn, DMD, "Total Mandibular Joint Replacement Surgical Guidelines." [Online]. Available: <http://www.zimmerbiomet.com/content/dam/zimmer-biomet/medical-professionals/cmf-thoracic/total-joint-replacement-system/total-mandibular-joint-replacement-surgical-guidelines.pdf>. [Accessed: 10-Oct-2017].
- [45] Dr. Larry M. Wolford, "Total Temporomandibular Joint (TMJ) Replacement." [Online]. Available: <http://www.drlarrywolford.com/tmj-temporomandibular-joint-disorders/total-temporomandibular-joint-tmj-replacement-2/>. [Accessed: 09-Oct-2017].
- [46] A. T. A/S, "AnyBody™ Tutorials," 2013. [Online]. Available: http://www.anybodytech.com/fileadmin/AnyBody/Docs/Tutorials/chapX_MuscleRecruitment/lesson3.html.
- [47] D. C. Ackland, Y. C. Lin, and M. G. Pandy, "Sensitivity of model predictions of muscle function to changes in moment arms and muscle-tendon properties: A Monte-Carlo analysis," *J. Biomech.*, vol. 45, no. 8, pp. 1463–1471, 2012.
- [48] A. Ramos, A. Completo, C. Relvas, M. Mesnard, and J. A. Simões, "Straight, semi-anatomic and anatomic TMJ implants: The influence of condylar geometry and bone fixation screws," *J. Cranio-Maxillofacial Surg.*, vol. 39, no. 5, pp. 343–350, 2011.
- [49] M. V. S?nego, M. C. Goiato, and D. M. dos Santos, "Electromyography evaluation of masseter and temporalis, bite force, and quality of life in elderly patients
-

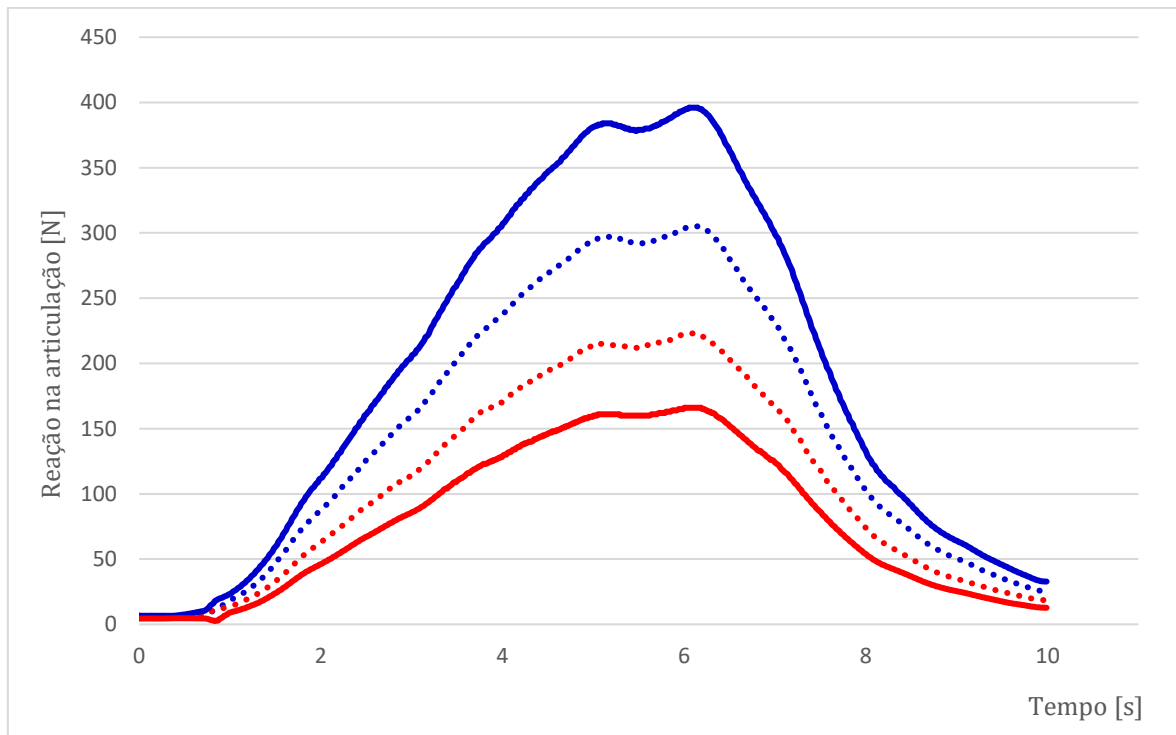
-
- during the adaptation of mandibular implant-supported overdentures," *Clin. Oral Implants Res.*, no. 2002, pp. 1–6, 2016.
- [50] B. May, S. Saha, and M. Saltzman, "A three-dimensional mathematical model of temporomandibular joint loading," *Clin. Biomech. (Bristol, Avon)*, vol. 16, no. 6, pp. 489–495, 2001.
- [51] H. Azevedo, "Desenvolvimento de sistema de controlo de um simulador para articulação Temporomandibular," Universidade de Aveiro, 2016.

Anexos

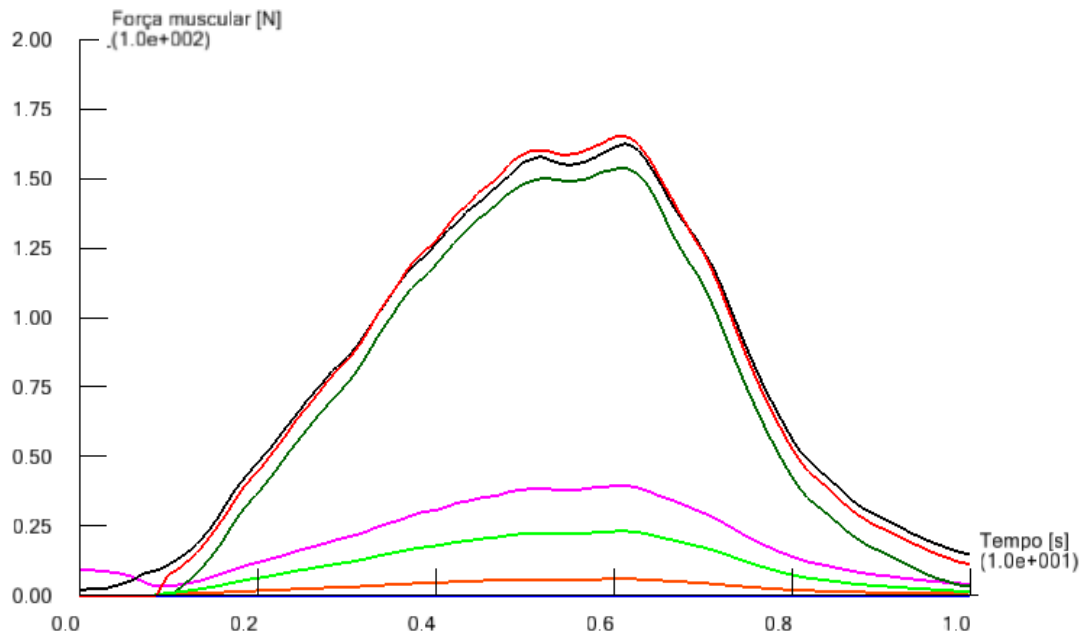
- Resultados das simulações da tarefa 4 para o caso de redução do ramo esquerdo da mandíbula em 15mm.

Valores das forças para a tarefa 4 com diferentes dimensões do ramo esquerdo da mandíbula

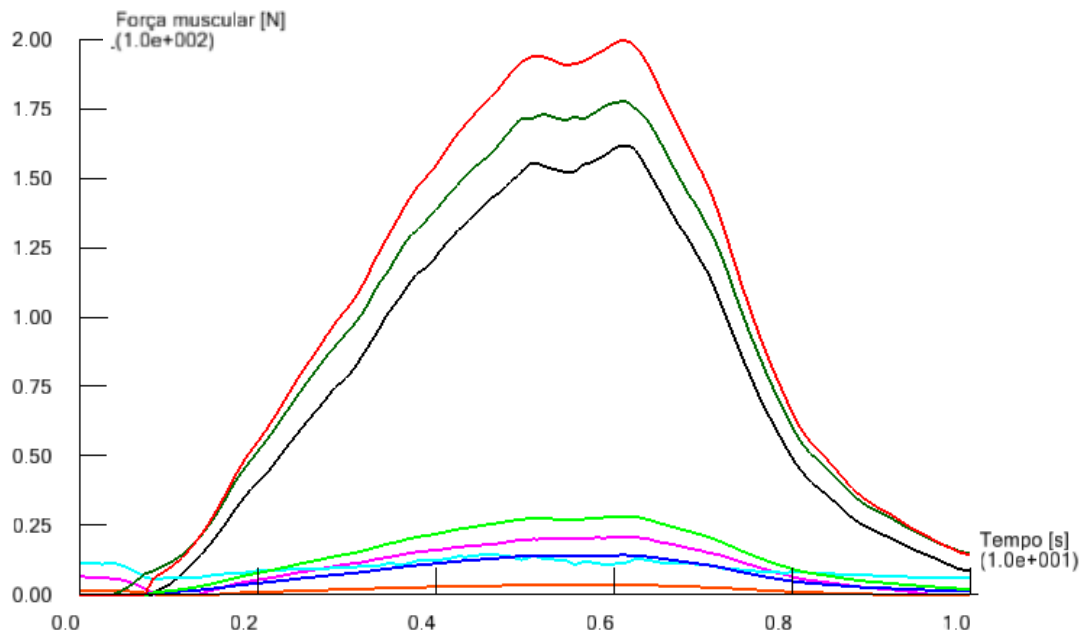
Simulação	Tarefa 4		Tarefa 4, sem disco		Tarefa 4, redução 15mm	
	Esquerdo	Direito	Esquerdo	Direito	Esquerdo	Direito
Músculos	Força (N)					
Mas. Sup.	176,366	173,004	173,864	178,537	165,235	199,501
Mas. Pro. Ant.	23,377	26,392	23,169	26,678	23,13	28,29
Mas. Pro. Post.	8,391	10,174	7,582	11,483	9,904e-9	14,229
Temp. Ant.	195,898	114,723	192,574	129,049	153,689	177,790
Temp. Post.	11,386	8,254	3,079	9,097	2,343e-9	14,571
Pte. Med.	175,923	122,579	171,428	131,453	162,334	161,642
Pte. Lat. Sup.	9,689	0,891	8,962	1,038	5,997	3,538
Pte. Lat. Inf.	46,236	13,115	42,009	14,551	39,564	20,873
Dig. Anterior	1,539e-8	1,68	1,696e-8	1,638	2,283e-9	1,791
Génio-hiódeo	1,284e-8	1,012	1,601e-8	0,865	1,495	0,964
Mil. Anterior	0,065	1,095e-8	0,207	1,401e-8	1,652	9,855e-9
Mil. Posterior	0,904	1,452e-9	0,977	1,263e-9	1,036	4,206e-9
ATM	223	305	213	325	166	396



Reações estimadas na ATM do lado esquerdo (vermelho) e direito (azul) em mandíbula reduzida do lado esquerdo para a tarefa 4. A picotado encontram-se os valores dispostos na Figura 5.6, para comparação.



Força muscular estimada de cada músculo do lado esquerdo (ativo) da mandíbula reduzida em 15mm no ramo do lado esquerdo para a tarefa 4 (legenda: ver figura 5.2).



Força muscular estimada de cada músculo do lado direito (passivo) da mandíbula reduzida em 15mm no ramo do lado esquerdo para a tarefa 4 (legenda: ver figura 5.2).