

ANÁLISE DE ELEMENTOS FINITOS PARA FIXAÇÃO DE OSTEOTOMIA SAGITAL DO RAMO MANDIBULAR

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF FIXATION FOR SAGITTAL OSTEOTOMY OF
THE MANDIBULAR RAMUS

ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS DE LA FIJACIÓN PARA LA OSTEOTOMÍA
SAGITAL DE LA RAMA MANDIBULAR

Mateus Zilch Scheuermann¹, Jorge Abel Flores², Pâmela Gutheil Diesel³, Felipe Wehner Flores⁴

DOI: 10.54899/dcs.v23i92.6305

Recibido: 23/06/2026 | Aceptado: 16/07/2026 | Publicación en línea: 23/07/2026.

RESUMO

A osteotomia sagital dos ramos mandibulares (OSRM) é o procedimento de escolha para a correção de diversas deformidades mandibulares, sendo a estabilidade pós-operatória fortemente influenciada pelo sistema de fixação empregado. Apesar dos avanços nas técnicas de osteossíntese, ainda existem divergências quanto ao método que proporciona o melhor desempenho biomecânico. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo comparar o comportamento biomecânico de três métodos de fixação interna rígida utilizados após a OSRM por meio da análise de elementos finitos. Foram desenvolvidos modelos tridimensionais de hemimandíbulas submetidas a avanço mandibular de 5 mm e fixadas com três parafusos bicorticais em padrão L invertido, uma placa reta do sistema 2.0 ou duas placas em L do sistema 1.5. Os modelos foram submetidos a cargas mastigatórias simuladas entre 5 e 250 N, avaliando-se o deslocamento e a distribuição de tensões. Os resultados demonstraram que a fixação com três parafusos bicorticais em padrão L invertido apresentou o menor deslocamento sob todas as cargas analisadas, evidenciando maior rigidez biomecânica em comparação aos sistemas com miniplacas monocorticais, que apresentaram deslocamentos progressivamente maiores. Conclui-se que a configuração com parafusos bicorticais oferece maior estabilidade mecânica inicial, embora a escolha clínica do método de fixação deva considerar também fatores anatômicos, cirúrgicos e as características individuais de cada paciente.

Palavras-chave: Análise de Elementos Finitos. Osteotomia Sagital do Ramo Mandibular. Cirurgia Bucal. Mandíbula.

¹ Graduando em Odontologia pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: mateus.zilch@acad.ufsm.br
Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-8180-9555>

² Doutor em Cirurgia pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS), Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: jorgeabelflores@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0009-0008-8297-3864>

³ Mestra em Prótese Dental pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Universidade Franciscana (UFN), Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: pameladiesel@ufn.edu.br
Orcid: <https://orcid.org/0009-0002-4843-4003>

⁴ Doutor em Cirurgia pela Universidade Luterana do Brasil (ULBRA), Canoas, Rio Grande do Sul, Brasil.
E-mail: felipewflores@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0009-0002-0141-331X>

ABSTRACT

Sagittal split ramus osteotomy (SSRO) is the procedure of choice for correcting various mandibular deformities, with postoperative stability strongly influenced by the fixation system employed. Despite advances in osteosynthesis techniques, there is still disagreement regarding which method offers the best biomechanical performance. Therefore, this study aimed to compare the biomechanical behavior of three rigid internal fixation methods used after SSRO using finite element analysis. Three-dimensional models of hemimandibles were created, simulating a 5 mm mandibular advancement and fixation using either three bicortical screws in an inverted-L pattern, a single straight 2.0-system plate, or two 1.5-system L-plates. The models were subjected to simulated masticatory loads ranging from 5 to 250 N, with displacement and stress distribution being evaluated. The results showed that fixation with three bicortical screws in an inverted-L pattern exhibited the least displacement under all analyzed loads, demonstrating greater biomechanical rigidity compared to monocortical miniplate systems, which showed progressively greater displacements. It is concluded that the bicortical screw configuration offers greater initial mechanical stability, although the clinical choice of fixation method must also take into account anatomical and surgical factors, as well as the individual characteristics of each patient.

Keywords: Finite Element Analysis. Osteotomy, Sagittal Split Ramus. Surgery Oral. Mandible.

RESUMEN

La osteotomía sagital de rama mandibular (OSRM) es el procedimiento de elección para corregir diversas deformidades mandibulares, y la estabilidad postoperatoria depende en gran medida del sistema de fijación empleado. A pesar de los avances en las técnicas de osteosíntesis, persiste el desacuerdo sobre qué método ofrece el mejor comportamiento biomecánico. Por ello, este estudio tuvo como objetivo comparar el comportamiento biomecánico de tres métodos de fijación interna rígida utilizados tras la SSRO mediante análisis de elementos finitos. Se crearon modelos tridimensionales de hemimandíbulas simulando un avance mandibular de 5 mm y la fijación mediante tres tornillos bicorticales en patrón de L invertida, una placa recta única del sistema 2.0 o dos placas en L del sistema 1.5. Los modelos se sometieron a cargas masticatorias simuladas de entre 5 y 250 N, evaluándose el desplazamiento y la distribución de tensiones. Los resultados mostraron que la fijación con tres tornillos bicorticales en patrón de L invertida presentó el menor desplazamiento bajo todas las cargas analizadas, demostrando una mayor rigidez biomecánica en comparación con los sistemas de miniplacas monocorticales, los cuales mostraron desplazamientos progresivamente mayores. Se concluye que la configuración con tornillos bicorticales ofrece una mayor estabilidad mecánica inicial, si bien la elección clínica del método de fijación debe considerar también factores anatómicos y quirúrgicos, así como las características individuales de cada paciente.

Palabras clave: Análisis de Elementos Finitos. Osteotomía Sagital de Rama Mandibular. Cirugía Bucal. Mandíbula.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUÇÃO

A osteotomia sagital dos ramos mandibulares (OSRM) consiste em uma técnica voltada às correções de deformidades mandibulares, tais como prognatismo, retrognatismo e deformidades de trespasse vertical (Brasileiro, 2007). Nesse sentido, sua realização em caráter bilateral constitui o método cirúrgico de escolha no que se refere aos procedimentos relacionados à correção de discrepâncias esqueléticas mandibulares (Tucker, 2002). Sob esse íterim, o desenho da OSRM permite maior contato entre as superfícies ósseas (Brasileiro, 2007).

A estabilidade pós-cirúrgica é essencial para garantir o sucesso da técnica, visto que a manutenção das alterações faciais e oclusais - obtidas por meio do procedimento cirúrgico, nos sentidos horizontal e vertical - é dependente dela (Siqueira *et al.*, 2007). Ademais, a estabilidade pode ser influenciada pelo deslocamento do côndilo na cavidade articular, pela ação muscular e dos tecidos moles, pela falta de controle do segmento proximal durante o procedimento cirúrgico, pelo período e tipo de fixação, pela magnitude do avanço mandibular, pelo crescimento pós-cirúrgico, pelos distúrbios da articulação temporomandibular (ATM) e pela idade do paciente (Joss, 2009; Haas *et al.*, 2019; Eckmüller *et al.*, 2022; Alrashidi *et al.*, 2024).

Nesse sentido, para que o processo de estabilidade óssea ocorra de forma satisfatória, acompanhado de um menor tempo de cicatrização e de maior conforto ao paciente, diversas modificações nos sistemas de fixação têm surgido (Erkmen *et al.*, 2005; Maurer *et al.*, 2003; Stringhini *et al.*, 2016). Sob essa perspectiva, a fixação interna foi um aprimoramento capaz de diminuir significativamente a morbidade do procedimento cirúrgico e gerar resultados satisfatórios (Tucker, 2002). Além disso, a evolução das técnicas de osteossíntese desde o uso do fio de aço até os sistemas de placas e parafusos foi fundamental para o favorecimento funcional da fixação, embora a movimentação interfragmentária não tenha sido totalmente prevenida com tais métodos. Por conseguinte, o uso de placas do sistema 1.5 e 2.0 tornou a OSRM a técnica de escolha para manipulações mandibulares em avanço, recuo, mordida aberta e laterognatismo nas cirurgias ortognáticas, mediante o fornecimento de maior estabilidade. Além disso, a OSRM permite retorno rápido da função prévia à cirurgia, melhor suporte nutricional, melhor manutenção das vias aéreas e redução da recidiva esquelética. (Shetty *et al.*, 1996; Dolce *et al.*, 2000; Borstlap *et al.*, 2004; Peterson *et al.*, 2005; Pereira Filho *et al.*, 2013)

A utilização de três parafusos bicorticais em padrão L invertido ou de dois parafusos bicorticais lineares permite fixação dos cotos ósseos com mínima micromovimentação cirúrgica.

Contudo, apresenta riscos de danos ao feixe neurovascular e possibilidade de imprecisão condilar. (Shetty *et al.*, 1996; Borstlap *et al.*, 2004; Valladares-Neto *et al.*, 2014; Pachnicz *et al.*, 2021). Assim sendo, atualmente, o uso de miniplacas e parafusos tem sido a escolha preferencial, dada a facilidade de fixação, o mecanismo de remoção intraoral, o menor risco de injúria ao nervo alveolar e a mínima torção no reposicionamento condilar (Borstlap *et al.*, 2004; Özden *et al.*, 2006; Valladares-Neto *et al.*, 2014; Altuncu *et al.*, 2023).

Nessa perspectiva, o uso de ensaios *in vitro* para a melhor compreensão do comportamento mecânico da fixação em OSRM é essencial (Bredbener *et al.*, 2000). Com isso, a análise de elementos finitos é uma técnica importante (Lotti *et al.*, 2006; Ren *et al.*, 2003; Altuncu *et al.*, 2023), a qual é constituída por um modelo matemático computacional eficiente que visa avaliar o comportamento biomecânico (Jesus *et al.*, 2013). Essa análise matemática baseia-se na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos, porém mantendo as propriedades do meio original (Lotti *et al.*, 2006). Dessa forma, permite-se a reprodução do modelo e a aplicação de cargas, assim como a distribuição das mesmas no modelo computacional, o que permite a avaliação das forças e tensões na OSRM em cada porção do material analisado (Jesus *et al.*, 2013). A partir disso, esse método possui aplicações em diversas áreas das ciências exatas e biológicas, com características positivas tais como aplicabilidade ampla e eficiência satisfatória na análise de cargas, tensões ou deslocamentos (Lotti *et al.*, 2006; Ren *et al.*, 2003).

Enquanto a estabilidade da OSRM é menor quando fixada com placas e parafusos quando comparada com a fixação exclusivamente com parafusos (Lyrio, 2009; Kuik *et al.*, 2019), a rotação dos côndilos mandibulares é menor com o uso de placas em comparação com os parafusos bicorticais (Scheerlink *et al.*, 1994; Pachnicz *et al.*, 2021). Paralelamente, em casos de grandes movimentações e assimetrias, há predileção pelas miniplacas, visto que toda a carga fica concentrada ao redor do sistema de ligação - o que reduz, consequentemente, a resistência dessa técnica em comparação com a dos parafusos bicorticais (Sato *et al.*, 2010). Assim sendo, a literatura acerca da temática apresenta diversas lacunas, as quais versam especialmente sobre a dificuldade de obter um método capaz de combinar pontos positivos das diferentes técnicas e, assim, possibilitar um melhor prognóstico aos procedimentos (Sato *et al.*, 2014). Dessa maneira, a análise dos elementos finitos pode ser uma importante ferramenta (Lotti *et al.*, 2006). Com isso, o objetivo do presente estudo é comparar o comportamento biomecânico de três diferentes métodos de fixação interna rígida (FIR) empregados após osteotomia sagital do ramo mandibular por meio da análise de elementos finitos, de forma a avaliar o deslocamento e a distribuição de

tensões sob diferentes cargas mastigatórias simuladas.

REFERENCIAL TEÓRICO

A OSRM é uma técnica amplamente utilizada (Puthumana *et al.*, 2022), mas que passou por um processo progressivo de incorporação de aprimoramentos (Brasileiro, 2007). A osteotomia horizontal foi substituída por uma osteotomia vertical localizada entre o primeiro e o segundo molar (Dal Pont, 1961). De forma semelhante, uma modificação foi introduzida com o objetivo de reduzir o deslocamento do músculo masseter, limitar a dissecação medial até a línula e, assim, minimizar o edema, o trauma vascular e o risco de necrose óssea (Epker, 1977). Além disso, o traçado da osteotomia sagital foi alterado para um corte ósseo horizontal perpendicular à cortical óssea vestibular - aproximadamente oito milímetros abaixo da margem cervical dos dentes -, distalmente ao segundo molar mandibular, estendendo-se oito milímetros para anterior, com o fito de favorecer o reposicionamento do côndilo na fossa mandibular (Wolford *et al.*, 1987).

No que tange aos testes *in vitro* - tais como o de elementos finitos (Lotti *et al.*, 2006), utilizado no presente estudo -, a utilização de materiais diferentes da própria mandíbula humana é validado, dada a avaliação satisfatória de substitutos em testes de torque de inserção e retirada de parafusos em diferentes materiais: mandíbula humana, costela bovina, costela suína, madeira de carvalho, resina epóxi fotoelástica e poliuretano (Bredbener *et al.*, 2000). Especialmente, o uso de hemimandíbulas de resina epóxi fotoelástica e poliuretano possui as vantagens de eliminação de variáveis éticas e legais associadas à diversidade biológica e de reprodução adequada das características ósseas mandibulares (Van Sickels *et al.*, 2005; Sato *et al.*, 2010; Sato *et al.*, 2012; Pereira Filho *et al.*, 2013).

METODOLOGIA

Seleção da Amostra

Utilizaram-se 30 réplicas de hemimandíbulas sintéticas de poliuretano, contendo a OSRM previamente manufaturada (Nacional Ossos®, Jaú, SP, Brasil). O cálculo amostral foi fundamentado em dois estudos prévios presentes na literatura (Özden *et al.*, 2006; Pereira Filho

et al., 2013). Para minimizar variáveis oriundas do processo de fabricação, todas as amostras foram selecionadas de um único lote.

Preparo da Amostra

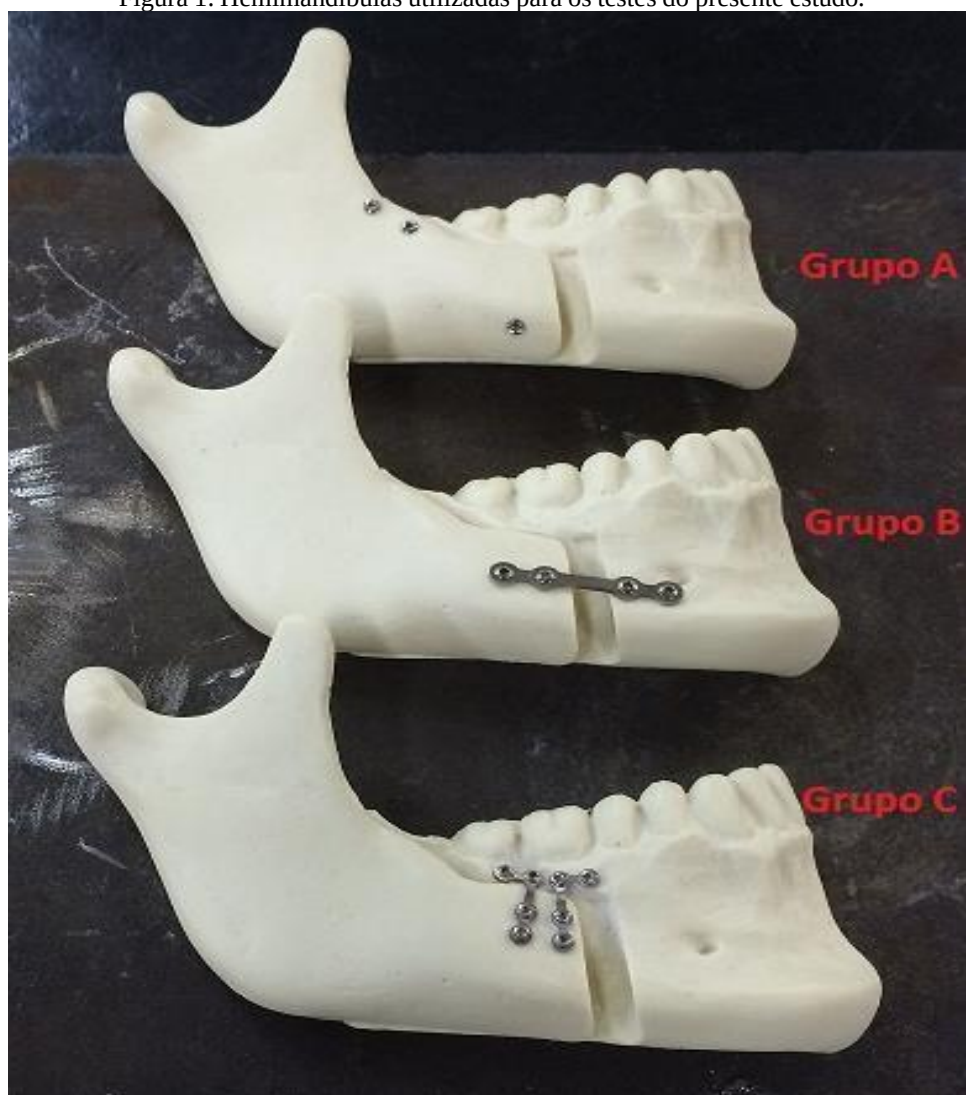
Foi realizado um avanço de cinco milímetros no segmento distal de todos os espécimes, mensurado com o auxílio de uma régua milimetrada. Em seguida, os espécimes foram divididos em três grupos, cada um contendo 10 hemimandíbulas (n=10). A fixação de todos os espécimes foi conduzida pelo mesmo cirurgião.

No Grupo A, a osteossíntese simulada foi realizada com três parafusos bicorticais de titânio, com 12 milímetros de comprimento (HealTech LTDA, Sapucaia do Sul, RS, Brasil), dispostos em padrão L invertido (Figura 1).

O Grupo B recebeu uma osteossíntese simulada com uma placa reta de titânio do sistema 2.0 intervalada (HealTech LTDA, Sapucaia do Sul, RS, Brasil), fixada na região da osteotomia com quatro parafusos monocorticais de cinco milímetros, de forma a promover a aproximação entre os segmentos proximal e distal (Figura 1).

No Grupo C, a osteossíntese simulada foi realizada com duas placas de titânio do sistema 1.5 em formato de L. Cada microplaca foi fixada com quatro parafusos monocorticais de cinco milímetros (HealTech LTDA, Sapucaia do Sul, RS, Brasil), com um total de oito parafusos posicionados na região anterior da OSRM; quatro deles foram inseridos no segmento ou coto proximal (Figura 1).

Figura 1. Hemimandíbulas utilizadas para os testes do presente estudo.



Fonte: Adaptado de SONEGO, C. L. *et al.* In vitro study of a modified sagittal split osteotomy fixation technique of the mandible: a mechanical test. *Int. J. Oral Maxillofac. Surg.*, v. 47, n. 10, 2018. (Sonego *et al.*, 2018).

Análise de Elementos Finitos

Uma tomografia computadorizada (TC) de uma hemimandíbula foi obtida através do Serviço de Radiologia do Hospital Universitário de Santa Maria (HUSM), vinculado à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Os dados coletados a partir do exame de imagem supracitado foram obtidos em DICOM e analisados no Programa de Pós-Graduação em Odontologia da Universidade Luterana do Brasil (ULBRA - Canoas, RS, Brasil).

Foi utilizado o programa ANSYS Workbench 19.0 para gerar a geometria de uma hemimandíbula. Além disso, utilizou-se o software InVesalius 3.1 para processamento da imagem e criação de um modelo STL, o qual, posteriormente, foi convertido para geometria

CAD (computer aid-designed) - com o software Solidworks 2018 - e exportado para análise de elementos finitos com o software ANSYS Workbench 19.0.

Três modelos de elementos finitos tridimensionais foram criados, cada um correspondendo a um dos métodos de fixação. No modelo tridimensional fabricado a partir da TC de uma hemimandíbula, a estrutura interna simulou a do poliuretano. O módulo elástico (E) e a razão de Poisson para o poliuretano e a liga de titânio foram atribuídos de acordo com estudos prévios (Sato *et al.*, 2012; Albougha *et al.*, 2015). O poliuretano possui as seguintes propriedades: E=624.42; Mpa e razão de Poisson=0,28. Já as propriedades das placas e parafusos são as que seguem: E=114; Gpa e razão de Poisson=0,4.

Três modelos digitais diferentes de placas de titânio e parafusos foram criados conforme orientação do fabricante HealTech LTDA (Sapucaia do Sul, RS, Brasil) para simular a osteossíntese da OSRM realizada no modelo hemimandibular. Todos os espécimes foram submetidos a um avanço de 5mm e representam três diferentes formas de FIR: fixação com três parafusos bicorticais de 12mm em padrão L invertido (espécime A); fixação com placa reta do sistema 2.0, intervalada, estabilizada com 4 parafusos monocorticais de 5mm (espécime B); e fixação com duas placas em L do sistema 1.5, estabilizadas com 4 parafusos monocorticais de 5mm em cada placa (totalizando 8 parafusos) na região anterior da osteotomia sagital do ramo mandibular (espécime C).

Os modelos foram considerados homogêneos (mesma propriedade mecânica em todos os pontos), isotrópicos (as propriedades mecânicas em todos os pontos não alteram com a direção) e elástico lineares (retorna à forma original quando as forças de tensões são removidas). Os materiais de osteossíntese utilizados foram as placas de titânio puro grau II (ASTM F67) e os parafusos de titânio com alumínio e nióbio (Ti-6Al-&Nb) de acordo com o fabricante HealTech LTDA (Sapucaia do Sul, RS, Brasil).

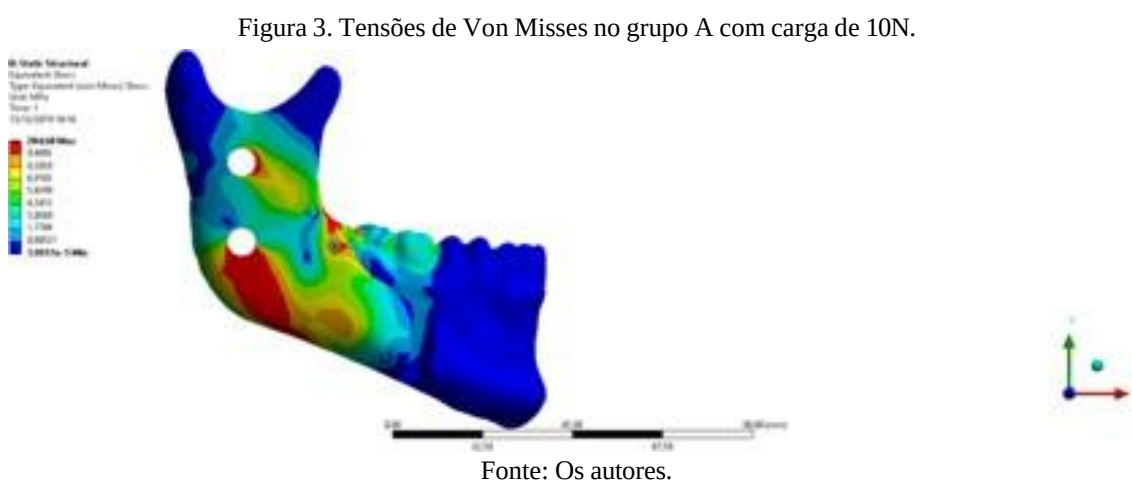
Na análise de elementos finitos foi testado o deslocamento máximo que os corpos de prova atingiram no eixo Y no mesmo ponto de aplicação de carga. Os modelos foram submetidos a uma única direção de força perpendicular, com cargas que variaram de 5N a 250N na região condizente com o plano oclusal do primeiro molar. A carga aplicada seguiu os parâmetros de um estudo prévio (Sonego *et al.*, 2018).

RESULTADOS

Os resultados de elementos finitos serão descritos a seguir, conforme os grupos experimentais.

Grupo A

A análise de elementos finitos no modelo do Grupo A, com três parafusos bicorticais, obteve resultados inexpressivos no que tange ao deslocamento no ponto de carga no primeiro molar quando foram aplicadas forças de até 50N. Paralelamente, a aplicação de uma força de 100N resultou em um deslocamento de 0,0047mm, o qual aumentou para 0,0063mm em carga de 200N, até atingir 0,0079mm na carga de 250N (Figuras 2 e 3).



Grupo B

O modelo do Grupo B, fixado com barra reta, apresentou valores de deslocamento no ponto de carga no primeiro molar maiores que o Grupo A já em carga de 5N, no qual o deslocamento apresentado foi de 0,37mm. Esse deslocamento aumentou conforme a carga aplicada, sendo 0,73mm para carga de 10N, 1,83mm em carga de 25N e 3,67mm em carga de 50N (Figuras 4 e 5).

Figura 4. Deslocamento sofrido no ponto de carga com 50N no Grupo B.

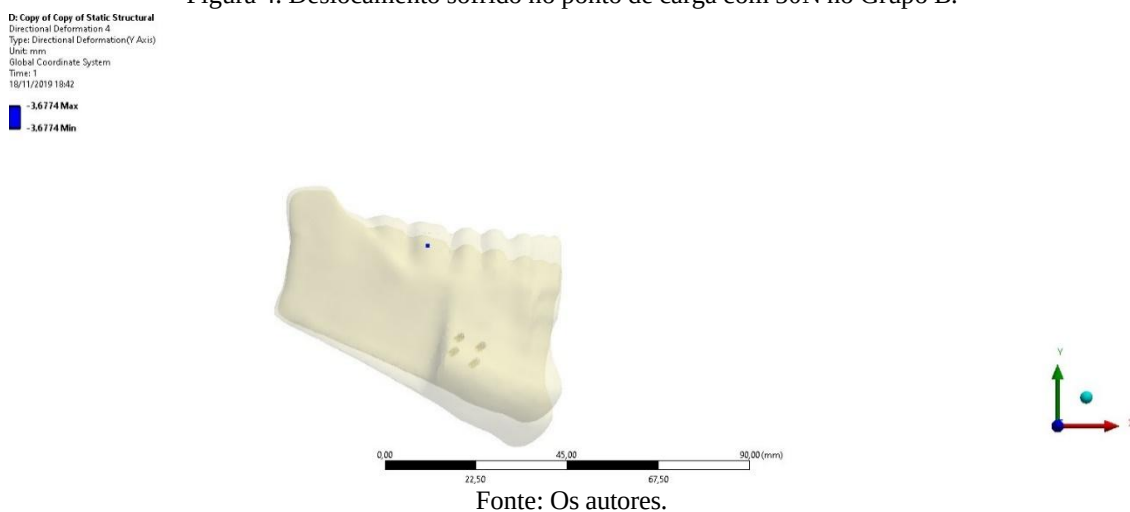
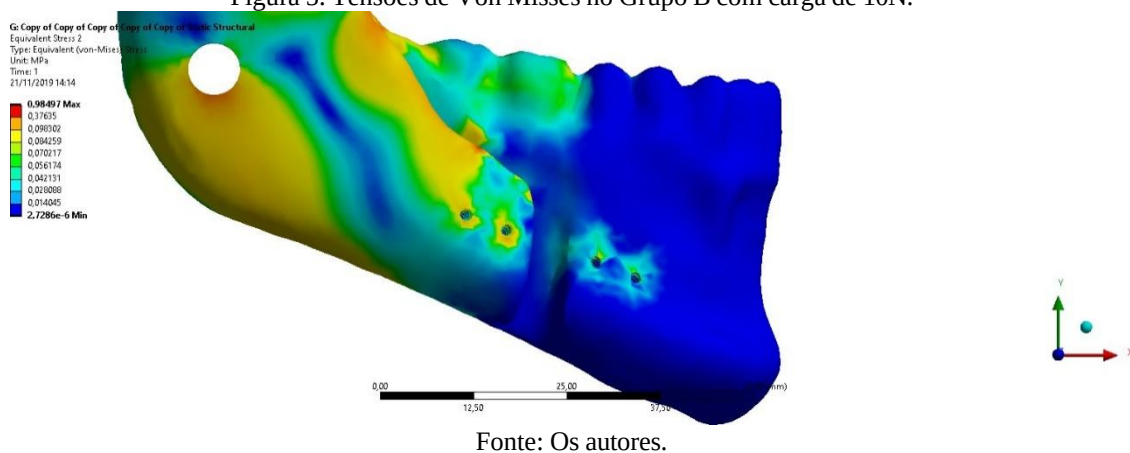


Figura 5. Tensões de Von Mises no Grupo B com carga de 10N.



Grupo C

O modelo do Grupo C, fixado com duas barras L, apresentou valores de deslocamento no ponto de carga no primeiro molar maiores quando comparado ao Grupo B (Gráfico 1). O

deslocamento registrado foi de 0,66mm em carga de 5N, 1,32mm em carga de 10N, 3,31mm em carga de 25 N e 6,63mm em carga de 50N (Figura 6 e 7).

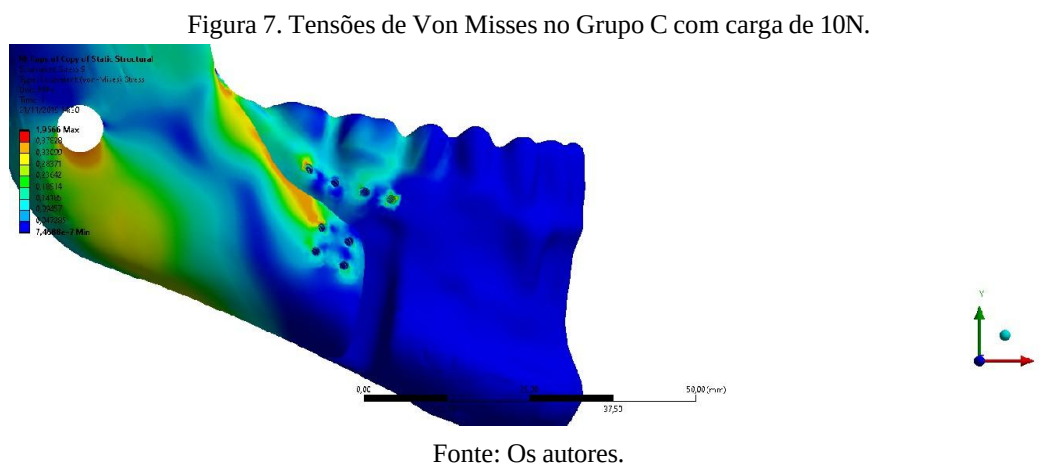
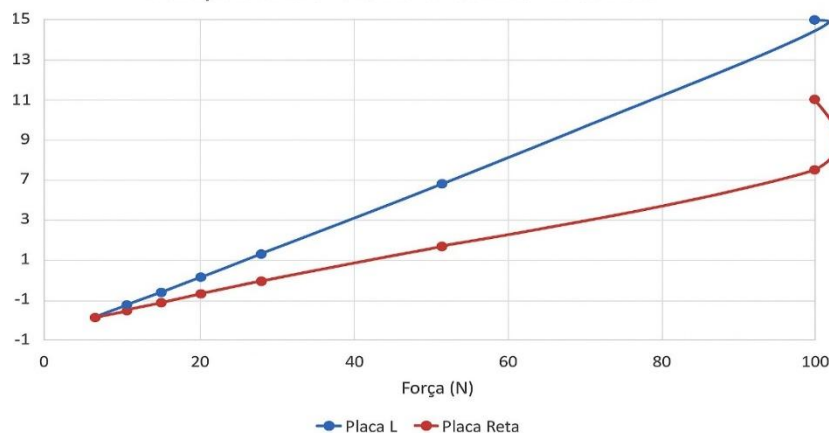


Gráfico 1. Comparativo do deslocamento e da carga dos grupos B e C.
Comparativo entre Placa em L e Placa Reta



DISCUSSÃO

O presente estudo demonstrou que a fixação com três parafusos bicorticais em padrão L invertido (Grupo A) apresentou o menor deslocamento entre os sistemas avaliados, mantendo comportamento praticamente estável mesmo sob cargas progressivas de até 250N. Esses achados convergem com estudos biomecânicos que demonstram que a fixação exclusivamente com parafusos bicorticais proporciona maior rigidez estrutural em comparação aos sistemas baseados em miniplacas monocorticais, em razão da estabilização promovida pela compressão interfragmentária e pelo maior travamento entre os segmentos ósseos (Kuik *et al.*, 2019). Além disso, dentre as diferentes configurações de parafusos bicorticais, o padrão em L invertido apresenta maior resistência mecânica quando comparado à disposição linear, sendo considerado um arranjo biomecanicamente mais favorável para a estabilização da osteotomia (Foley *et al.*, 1989; Ardary, 1989). Estudos mais recentes corroboram que esse método apresenta maior resistência às cargas mastigatórias e menor micromovimentação na interface da osteotomia, características que favorecem a estabilidade biomecânica inicial, especialmente em avanços mandibulares de maior magnitude (Kuik *et al.*, 2019; Puthumana *et al.*, 2022). Contudo, embora a maior rigidez constitua uma vantagem mecânica, deve-se considerar que esse sistema também está associado a maior risco de torque do segmento proximal, deslocamento condilar e lesão do nervo alveolar inferior, aspectos amplamente discutidos na literatura e que devem ser ponderados na escolha clínica do método de fixação (Aslanidou *et al.*, 2020; Pachnicz *et al.*, 2021).

Por outro lado, os modelos fixados com placa reta (Grupo B) e com duas placas em L (Grupo C) apresentaram deslocamentos progressivamente maiores à medida que a carga foi aumentada, sendo que o Grupo C apresentou os maiores valores em todas as cargas analisadas. Esses resultados sugerem menor rigidez do sistema quando comparado à fixação com parafusos bicorticais, refletindo a maior flexibilidade inerente às miniplacas monocorticais. Esse comportamento está de acordo com estudos de análise por elementos finitos e ensaios mecânicos, os quais demonstram que sistemas monocorticais apresentam maior deformação sob carregamento, embora mantenham níveis de estabilidade considerados clinicamente aceitáveis para a consolidação óssea na maioria dos casos (Kuik *et al.*, 2019; Altuncu *et al.*, 2023). Apesar da menor resistência mecânica observada, as miniplacas continuam sendo amplamente empregadas na prática clínica devido às vantagens relacionadas ao menor risco de deslocamento

condilar, à preservação do feixe neurovascular, à menor probabilidade de posicionamento inadequado do segmento proximal e à possibilidade de instalação exclusivamente por acesso intraoral (Aslanidou *et al.*, 2020; Puthumana *et al.*, 2022). Dessa forma, a literatura demonstra que não existe consenso quanto à superioridade absoluta de um sistema de fixação, uma vez que cada técnica apresenta vantagens e limitações biomecânicas e clínicas (Sato *et al.*, 2010; Sato *et al.*, 2014). Assim, a seleção do método de fixação deve considerar não apenas a resistência mecânica do sistema, mas também fatores como o padrão da deformidade, a magnitude do avanço mandibular, as condições anatômicas do paciente e a experiência do cirurgião, de modo a alcançar um equilíbrio entre estabilidade e segurança clínica (Puthumana *et al.*, 2022; Sato *et al.*, 2014).

De qualquer forma, a osteossíntese pode influenciar na estabilidade pós-cirúrgica, no torque condilar, na falta de controle do segmento proximal, na magnitude do avanço mandibular e na maior ou menor morbidade cirúrgica, o que influencia, indiretamente, na decisão do paciente em optar ou não pela cirurgia (Peres *et al.*, 2011). Nesse sentido, o uso de FIR na osteotomia mandibular favorece o reparo ósseo por primeira intenção (Reitzik, 1983) e, além disso, no momento da cirurgia, facilita o posicionamento funcional dos segmentos ósseos, o que garante força suficiente contra a tração muscular sobre o esqueleto facial, e mantém a posição cirúrgica planejada durante a fase de reparação (Assael, 1998).

O presente estudo apresenta limitações inerentes ao modelo experimental empregado, as quais devem ser consideradas na interpretação dos resultados. A utilização de hemimandíbulas sintéticas, embora amplamente empregada em estudos biomecânicos pela elevada padronização e reprodutibilidade, não reproduz integralmente as condições clínicas encontradas em mandíbulas íntegras. Além disso, a ausência do lado contralateral reduz a estabilidade global do modelo, favorecendo movimentos de rotação e deslocamentos para a cortical lingual durante a aplicação das cargas, fenômenos superiores aos esperados em uma mandíbula completa; paralelamente, a rotação do espécime promoveu deslocamento do ponto de aplicação da carga da superfície oclusal para a face vestibular dos dentes, influenciando o comportamento biomecânico observado - porém, tais comportamentos não repercutiram significativamente nos testes de elementos finitos. Sob essa perspectiva, dadas as propriedades do poliuretano, cujo comportamento mecânico pode incluir deformações permanentes após determinadas magnitudes de carga, o modelo computacional empregado na análise por elementos finitos ganha ainda mais destaque, no qual os materiais foram considerados homogêneos, isotrópicos e elástico-lineares, retornando à sua configuração original após a remoção da carga. Assim sendo, o presente estudo apresenta vários

pontos fortes: a análise por elementos finitos possibilitou a modelagem matemática de geometrias complexas e a aplicação controlada de cargas em diferentes direções e magnitudes, permitindo a avaliação detalhada da distribuição de tensões e dos deslocamentos em regiões específicas do sistema de fixação e eliminando interferências decorrentes da rotação dos corpos de prova (Lotti *et al.*, 2006; Altuncu *et al.*, 2023). Adicionalmente, a interpretação dos resultados é fortalecida pela concordância com análises fotoelásticas previamente realizadas utilizando o mesmo modelo experimental (Scheuermann *et al.*, 2025), as quais evidenciaram padrões de concentração de tensões compatíveis com aqueles observados na análise por elementos finitos, demonstrando a complementaridade entre as metodologias e reforçando a confiabilidade dos achados biomecânicos.

CONCLUSÃO

A análise por elementos finitos demonstrou que a fixação com três parafusos bicorticais em padrão L invertido apresentou o menor deslocamento sob aplicações progressivas de carga, indicando maior rigidez biomecânica quando comparada aos sistemas de fixação com miniplacas monocorticais. Contudo, embora os Grupos B e C tenham apresentado maiores deslocamentos, as diferentes técnicas de fixação possuem características biomecânicas e clínicas próprias, de modo que a escolha do método deve considerar tanto a estabilidade mecânica quanto às particularidades anatômicas e cirúrgicas de cada caso. Pois, a análise por elementos finitos consiste em uma ferramenta útil para a compreensão do comportamento biomecânico dos sistemas de fixação empregados na osteotomia sagital do ramo mandibular, na medida em que contribui para subsidiar a tomada de decisão clínica.

REFERÊNCIAS

ALBOUGH, S.; DARWICH, K.; DARWICH, M. A.; ALBOGHA, M. H. Assessment of sagittal split ramus osteotomy rigid internal fixation techniques using a finite element method. *Int. J. Oral Maxillofac. Surg.*, v. 44, n. 7, p. 823-829, jul. 2015.

ALRASHIDI, H. A.; ALMUTAIRI, M. H.; ALMOHAIMEED, S. M.; HOMDI, L. A.; ALHARBI, A. F.; ALAZMI, G. S.; *et al.* Evaluating post-surgical stability and relapse in orthognathic surgery: a comprehensive review. *Cureus*, v. 16, n. 10, e72163, out. 2024.

ALTUNCU, F.; KAZAN, D.; ÖZDEN, B. Comparative evaluation of the current and new

design miniplate fixation techniques of the advanced sagittal split ramus osteotomy using three-dimensional finite element analysis. *Med. Oral Patol. Oral Cir. Bucal*, v. 28, n. 6, p. e553-e561, nov. 2023.

ARDARY, W. C.; TRACY, D. J.; BROWNRIDGE, G. W. 2nd; URATA, M. M. Comparative evaluation of screw configuration on the stability of the sagittal split osteotomy. *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol.*, v. 68, n. 2, p. 125–129, ago. 1989.

ASLANIDOU, K.; XIE, R.; CHRISTOU, T.; LAMANI, E.; KAU, C. H. Evaluation of temporomandibular joint function after orthognathic surgery using a jaw tracker. *J. Orthod.*, v. 47, n. 2, p. 140-148, jun. 2020.

ASSAEL, L. A. Stable internal fixation of osteotomies of the facial skeleton. In: PREIN, J. (ed.). *Manual of internal fixation in the cranio-facial skeleton: techniques recommended by the AO/ASIF Maxillofacial Group*. Berlin: Springer, 1998. p. 185-198.

BORSTLAP, W. A.; STOELINGA, P. J. W.; HOPPENREIJS, T. J. M.; VAN'T HOF, M. A. Stabilisation of sagittal split advancement osteotomies with miniplates: a prospective, multicentre study with two-year follow-up. Part I. Clinical parameters. *Int. J. Oral Maxillofac. Surg.*, v. 33, n. 5, p. 433-441, jul. 2004.

BRASILEIRO, B. F. Avaliação biomecânica *in vitro* de técnicas de fixação rígida metálica para osteotomia sagital do ramo mandibular em movimentos de avanço e recuo. 2007. 166f. Tese (Doutorado em Odontologia) – Faculdade de Odontologia de Piracicaba, Universidade Estadual de Campinas, Piracicaba, 2007.

BREDBENNER, T. L.; HAUG, R. H. Substitutes for human cadaveric bone in maxillofacial rigid fixation research. *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol. Oral Radiol. Endod.*, v. 90, n. 5, p. 574-580, nov. 2000.

DAL PONT, G. Retromolar osteotomy for the correction of prognathism. *J. Oral Surg. Anesth. Hosp. Dent. Serv.*, v. 19, p. 42-47, jan. 1961.

DOLCE, C.; VAN SICKELS, J. E.; BAYS, R. A.; RUGH, J. D. Skeletal stability after mandibular advancement with rigid versus wire fixation. *J. Oral Maxillofac. Surg.*, v. 58, n. 11, p. 1219-1227, nov. 2000.

ECKMÜLLER, S.; PADDENBERG, E.; HILLER, K.-A.; PROFF, P.; KNÜTTTEL, H.; KIRSCHNECK, C. Relapse in class II orthognathic surgery: a systematic review. *BMC Oral Health*, v. 22, n. 1, art. 605, dez. 2022.

EPKER, B. N. Modifications in the sagittal osteotomy of the mandible. *J. Oral Surg.*, v. 35, n. 2, p. 157-159, fev. 1977.

ERKMEN, E.; SIMSEK, B.; YÜCEL, E.; KURT, A. Comparison of different fixation methods following sagittal split ramus osteotomies using three-dimensional finite elements analysis. Part 1: advancement surgery-posterior loading. *Int. J. Oral Maxillofac. Surg.*, v. 34, n. 5, p. 551-558, jul. 2005.

FOLEY, W. L.; FROST, D. E.; PAULIN JUNIOR, W. B.; TUCKER, M. R. Internal screw fixation: comparison of placement pattern and rigidity. *J. Oral Maxillofac. Surg.*, v. 47, n. 7, p. 720-723, jul. 1989.

HAAS JUNIOR, O. L.; GUIJARRO-MARTÍNEZ, R.; DE SOUSA GIL, A. P.; DA SILVA MEIRELLES, L.; SCOLARI, N.; MUÑOZ-PEREIRA, M. E.; HERNÁNDEZ-ALFARO, F.; DE OLIVEIRA, R. B. Hierarchy of surgical stability in orthognathic surgery: overview of systematic reviews. *Int. J. Oral Maxillofac. Surg.*, v. 48, n. 11, p. 1415-1433, nov. 2019.

DE JESUS, G. P. Avaliação do comportamento mecânico de três tipos de osteossíntese em fratura de côndilo mandibular: análise por elementos finitos 3D. 2013. 66 f. Tese (Doutorado em Odontologia) – Faculdade de Odontologia de Araraquara, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2013.

JOSS, C. U.; VASSALLI, I. M. Stability after bilateral sagittal split osteotomy advancement surgery with rigid internal fixation: a systematic review. *J. Oral Maxillofac. Surg.*, v. 67, n. 2, p. 301-313, fev. 2009.

KUIK, K.; CHANDRAN, R.; HELLINGMAN, C. A.; TUINZING, D. B.; ROSENBERG, A. J. W. P.; ZHANG, G.; MAAL, T. J. J.; BERGSMA, J. E. Biomechanical evaluation of fixation methods after bilateral sagittal split osteotomy using three-dimensional finite element analysis: a systematic review. *Int. J. Oral Maxillofac. Surg.*, v. 48, n. 2, p. 212-221, fev. 2019.

LOTTI, R. S.; MACHADO, A. W.; MAZZIEIRO, Ê. T.; LANDRE JÚNIOR, J. Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. *Dental Press J. Orthod.*, v. 11, n. 2, p. 35-43, mar./abr. 2006.

LYRIO, M. C. N. Análise mecânica e fotoelástica das técnicas de fixação interna rígida da osteotomia sagital utilizando placa convencional e placa com sistema de travamento em avanços mandibulares. 2009. 117f. Tese (Doutorado em Odontologia) – Faculdade de Odontologia de Piracicaba, Universidade Estadual de Campinas, Piracicaba, SP, 2009.

MAURER, P.; KNOLL, W. D.; SCHUBERT, J. Comparative evaluation of two osteosynthesis methods on stability following sagittal split ramus osteotomy. *J. Craniomaxillofac. Surg.*, v. 31, n. 5, p. 284-289, out. 2003.

ÖZDEN, B.; ALKAN, A.; ARICI, S.; ERDEM, E. *In vitro* comparison of biomechanical characteristics of sagittal split osteotomy fixation techniques. *Int. J. Oral Maxillofac. Surg.*, v. 35, p. 837-841, 2006.

PACHNICZ, D.; RAMOS, A. Mandibular condyle displacements after orthognathic surgery: an overview of quantitative studies. *Quant. Imaging Med. Surg.*, v. 11, n. 4, p. 1628-1650, abr. 2021.

- PEREIRA FILHO, V. A.; IAMASHITA, H. Y.; MONNAZZI, M. S.; GABRIELLI, M. F. R.; VAZ, L. G.; PASSERI, L. A. *In vitro* biomechanical evaluation of sagittal split osteotomy fixation with a specifically designed miniplate. *Int. J. Oral Maxillofac. Surg.*, v. 42, n. 3, p. 316-320, mar. 2013.
- PERES, F. G.; RIBEIRO JÚNIOR, P. D.; PADOVAN, L. E. Osteossíntese para a fixação da osteotomia sagital de mandíbula: revisão de literatura. *Rev. Bras. Cir. Bucomaxilofac.*, v. 11, n. 2, p. 59-66, 2011.
- PETERSON, G. P.; HAUG, R. H.; VAN SICKELS, J. A biomechanical evaluation of bilateral sagittal ramus osteotomy fixation techniques. *J. Oral Maxillofac. Surg.*, v. 63, n. 9, p. 1317-1324, set. 2005.
- PUTHUMANA, J. S.; LOPEZ, C. D.; MAGRATH, W. J.; LAKE, I. V.; GIRARD, A. O.; REDETT, R. J.; STEINBACHER, D. M.; GRANT, M. P.; LOPEZ, J.; YANG, R. A comprehensive review of orthognathic surgery: fixation, relapse, and complications. *Face*, v. 3, n. 2, p. 350-361, jun. 2022.
- REITZIK, M. Cortex-to-cortex healing after mandibular osteotomy. *J. Oral Maxillofac. Surg.*, v. 41, n. 10, p. 658-663, out. 1983.
- REN, Y.; MALTHA, J. C.; KUIJPERS-JAGTMAN, A. M. Optimum force magnitude for orthodontic tooth movement: a systematic literature review. *Angle Orthod.*, v. 73, n. 1, p. 86-92, fev. 2003.
- SATO, F. R. L.; ASPRINO, L.; CONSANI, S.; MORAES, M. de. Comparative biomechanical and photoelastic evaluation of different fixation techniques of sagittal split ramus osteotomy in mandibular advancement. *J. Oral Maxillofac. Surg.*, v. 68, n. 1, p. 160-166, jan. 2010.
- SATO, F. R. L.; ASPRINO, L.; CONSANI, S.; NORITOMI, P. Y.; MORAES, M. de. A comparative evaluation of the hybrid technique for fixation of the sagittal split ramus osteotomy in mandibular advancement by mechanical, photoelastic, and finite element analysis. *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol. Oral Radiol.*, v. 114, n. 5 Suppl, p. S60-S68, nov. 2012.
- SATO, F. R. L.; ASPRINO, L.; MOREIRA, R. W. F.; MORAES, M. de. Comparison of postoperative stability of three rigid internal fixation techniques after sagittal split ramus osteotomy for mandibular advancement. *J. Craniomaxillofac. Surg.*, v. 42, n. 5, p. e224-e229, jul. 2014.
- SCHEERLINCK, J. P.; STOELINGA, P. J.; BLIJDORP, P. A.; BROUNS, J. J.; NIJS, M. L. Sagittal split advancement osteotomies stabilized with miniplates: a 2–5-year follow-up. *Int. J. Oral Maxillofac. Surg.*, v. 23, n. 3, p. 127-131, jun. 1994.
- SCHEUERMANN, M. Z.; FLORES, J. A.; DIESEL, P. G.; ÖZKÖMÜR, A.; FLORES, F. W. Análise fotoelástica de fixação de osteotomia sagital do ramo mandibular. *Revista DCS*, v. 22, n. 84, p. 01-14, 2025. DOI: 10.54899/dcs.v22i84.3636.
- SHETTY, V.; FREYMILLER, E.; McBREARTY, D.; CAPUTO, A. A. Functional stability of sagittal split ramus osteotomies: effects of positional screw size and placement configuration. *J.*

Oral Maxillofac. Surg., v. 54, n. 5, p. 601-609, maio 1996.

SIQUEIRA, D. F.; CASTRO, A. M. A.; SANTOS JÚNIOR, J. A.; MALTAGLIATI, L. Á.; ANGELIERI, F. A estabilidade do avanço mandibular cirúrgico por meio da osteotomia bilateral sagital: uma revisão. *R. Dental Press Ortodon. Ortop. Facial*, v. 12, n. 5, p. 126-132, set./out. 2007.

SONEGO, C. L.; SCHEFFER, M. A. R.; CHAGAS JÚNIOR, O. L.; VETROMILLA, B. M.; FERNANDES, L. P.; OZKOMUR, A.; SILVA JÚNIOR, A. N.; MIGUENS JÚNIOR, S. A. Q.; HERNANDEZ, P. A. G. *In vitro* study of a modified sagittal split osteotomy fixation technique of the mandible: a mechanical test. *Int. J. Oral Maxillofac. Surg.*, v. 47, n. 10, p. 1330-1335, out. 2018.

STRINGHINI, D. J.; SOMMERFELD, R.; UETANABARO, L. C.; LEONARDI, D. P.; ARAÚJO, M. R.; REBELLATO, N. L. B.; COSTA, D. J.; SCARIOT, R. Resistance and stress finite element analysis of different types of fixation for mandibular orthognathic surgery. *Braz. Dent. J.*, v. 27, n. 3, p. 284-291, maio/jun. 2016.

TUCKER, M. R. Management of severe mandibular retrognathia in the adult patient using traditional orthognathic surgery. *J. Oral Maxillofac. Surg.*, v. 60, n. 11, p. 1334-1340, nov. 2002.

VALLADARES-NETO, J.; CEVIDANES, L. H.; ROCHA, W. C.; ALMEIDA, G. A.; PAIVA, J. B.; RINO-NETO, J. TMJ response to mandibular advancement surgery: an overview of risk factors. *J. Appl. Oral Sci.*, v. 22, n. 1, p. 2-14, jan./fev. 2014.

VAN SICKELS, J. E.; PETERSON, G. P.; HOLMS, S.; HAUG, R. H. An *in vitro* comparison of an adjustable bone fixation system. *J. Oral Maxillofac. Surg.*, v. 63, n. 11, p. 1620-1625, nov. 2005.

WOLFORD, L. M.; BENNETT, M. A.; RAFFERTY, C. G. Modification of the mandibular ramus sagittal split osteotomy. *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol.*, v. 64, n. 2, p. 146-155, ago. 1987.