

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de 13/09/2025.



UNESP - Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho”
Faculdade de Odontologia de Araraquara



Luiz Henrique Soares Torres

Avaliação mecânica e por elementos finitos de métodos de fixação com e sem travamento empregados na osteotomia Le Fort I

Araraquara

2023



UNESP - Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho”
Faculdade de Odontologia de Araraquara



Luiz Henrique Soares Torres

Avaliação mecânica e por elementos finitos de métodos de fixação com e sem travamento empregados na osteotomia Le Fort I

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Odontologia de Araraquara, para obtenção do título de Doutor em Ciências Odontológicas, na Área de Diagnóstico e Cirurgia.

Orientador: Prof. Dr. Valfrido Antonio Pereira Filho

Araraquara

2023

T693a Torres, Luiz Henrique Soares
Avaliação mecânica e por elementos finitos de métodos de
fixação com e sem travamento empregados na osteotomia Le
Fort I / Luiz Henrique Soares Torres. -- Araraquara, 2023
62 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Odontologia, Araraquara
Orientador: Valfrido Antonio Pereira-Filho

1. Osteotomia de Le Fort. 2. Dispositivos de fixação cirúrgica.
3. Testes mecânicos. 4. Análise de elementos finitos.. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da
Faculdade de Odontologia, Araraquara. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Luiz Henrique Soares Torres

Avaliação mecânica e por elementos finitos de métodos de fixação com e sem travamento empregados na osteotomia Le Fort I

Comissão julgadora

Tese para obtenção do grau de Doutor em Ciências Odontológicas

Presidente e orientador: Prof. Dr. Valfrido Antonio Pereira Filho

2º Examinador: Prof. Dr. José Maurício dos Santos Nunes Reis

3º Examinador: Prof. Dr. Marcelo Gonçalves

4º Examinador: Prof. Dr. Pedro Yoshito Noritomi

5º Examinador: Prof. Dr. Alexander Tadeu Sverzut

Araraquara, 13 de setembro de 2023.

DADOS CURRICULARES

Luiz Henrique Soares Torres

- Nascimento** 11/10/1992 – Aimorés, Minas Gerais, Brasil
- Filiação** Leuzi Lopes Soares
Cláudio Souza Torres
- 2011 - 2015** Graduação em Odontologia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo, Brasil
- 2016 – 2018** Residência em Cirurgia e Traumatologia Bucomaxilofacial, Universidade de Pernambuco, Faculdade de Odontologia de Pernambuco, Hospital Universitário Oswaldo Cruz. Recife, Pernambuco, Brasil. Bolsista do Ministério da Saúde – Residência Multiprofissional.
- 2019 - 2023** Doutorado em Ciências Odontológicas, área de Diagnóstico e Cirurgia (Conceito CAPES 5) pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, UNESP, Brasil. Orientador: Prof. Dr. Valfrido Antonio Pereira Filho. Bolsista: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, Brasil. Grande área: Ciências da Saúde.

Para Leuzi Lopes Soares, sentimento
que transcende o tempo e vence distâncias. Cuidado que traz sentido à vida. Para
Noêmia Rodrigues Soares, agora, vó, quando perguntar: “Falta muito para acabar
lá?”. Enfim posso responder: terminei.

AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares, por todo suporte, apoio e confiança. Por sempre acreditarem e incentivarem nossos estudos, não medindo esforços para que nossos sonhos se realizassem.

Ao meu irmão, Lucas Torres de Souza, colega de profissão e parceiro de vida. Uda, nossa conexão é alma, qualquer projeto se torna leve quando estamos perto.

À minha noiva e amiga, Luiza Monzoli Côvre, por todo o amor, paciência, incentivo e apoio durante o período de pós-graduação. Araraquara e Araçatuba nunca estiveram tão próximas desde que chegamos. Dentre as jornadas da vida que decidi dividir com você, conseguimos mais uma. Acredite, ainda é só o começo.

À família Carnellosi Appendino por abrirem as portas da casa e do coração para me receber como um de vocês. Do acolhimento sem receio às buscas no Trevo de Santa Adélia e às idas ao Sítio, hoje vocês são parte de mim e eu, sem dúvida, me sinto em casa. Em especial, agradeço ao meu amigo e irmão Mateus Carnellosi Appendino. Obrigado pela convivência, nem sempre pacífica, mas sempre honesta e leal. Existem pessoas na vida que a gente esbarra, outras a gente encontra.

Ao amigo Rafael Pinatti, por ser parte desde capítulo em Araraquara, pela confiança e lealdade de sempre.

Ao meu orientador Prof. Dr. Valfrido Antonio Pereira Filho, pela amizade, consideração, trabalhos e conselhos. Agradeço por toda atenção durante a pós-graduação. Apesar de não parecer, eu sempre soube: o trabalho é para ontem, filho!

Ao Prof. Dr. José Maurício dos Santos Nunes Reis, pelas orientações e suporte na etapa mecânica laboratorial deste projeto. Zé, obrigado por estar disponível e sanar as questões metodológicas.

Ao Prof. Dr. Pedro Yoshito Noritomi, por todo seu compromisso e total domínio sobre elementos finitos. Sem questionar, sua ajuda e colocações foram fundamentais para a concepção deste estudo. À toda equipe do Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer: Leonardo Mendes Ribeiro Machado, Marcília Valéria Guimarães e Ana Maria Reno Pocai, um time altamente comprometido e ciente do trabalho de alto padrão que realizam.

Aos Professores Mario Real Gabrielli, Marisa Aparecida Cabrini Gabrielli, Eduardo Hochuli Vieira, Roberto Henrique Barbeiro, José Scarso Filho, Marcelo Silva

Monnazzi, por me ensinarem a buscar a excelência na profissão e mostrarem a seriedade e compromisso com a Cirurgia Bucomaxilofacial.

Ao Cristiano Afonso Lamounier por todas as orientações, e-mails e incansável ajuda! Cristiano foi o primeiro contato que tive com a Faculdade de Odontologia de Araraquara (FOAr), desde o processo seletivo até a fase final.

À Suleima Ferreira, pela paciência nas instruções de funcionamento do laboratório e orientações no processamento das amostras (embora meu projeto não realize análise histomorfométrica), bem como, a inigualável amizade e sinceridade de sentimento. Querida Su, nossa história se conectou não somente pelos corredores da FOAr. O seu casamento ajudou que o meu noivado acontecesse.

Aos meus queridos amigos de pós-graduação, Guilherme dos Santos Trento, Pedro Henrique Azambuja Carvalho, Lilian Caldas Quirino de Almeida, Luiz Henrique Marola, Nathalia Marques, que sempre estiveram dispostos a ajudar e dividir trabalhos desta fase. Minhoca, Marole e Nathalia, vocês foram essenciais na execução deste projeto. Muito obrigado!

Aos meus outros queridos amigos da UNESP Araraquara, Beatriz D'aquino Marinho, Miguel Pereira da Mata Santos e Raphael de Marco, pela amizade, boas conversas e memórias inesquecíveis. Ainda bem que o processo seletivo fez com que nossos caminhos se cruzassem.

À cidade de Araraquara, pela receptividade e, principalmente, peculiaridade. Embora nunca estivesse em meus planos, fez com que eu concretizasse muitos deles.

À empresa Traumec Health Technology, pela confiança e apoio na execução deste projeto, provendo todo o material e insumos necessários, além de todo o apoio técnico e científico.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Unesp), em especial à Faculdade de Odontologia de Araraquara, a qual devo esse importante momento da minha formação como homem, ser humano e, principalmente, como profissional.

À CAPES. O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001.

“O tempo é teu capital; tens de o saber utilizar. Perder tempo é estragar a vida”.

KAFKA*

*Kafka F. A metamorfose. Tradução e posfácio Modesto Carone. São Paulo: Companhia das Letras; 1997.

Torres LHS. Avaliação mecânica e por elementos finitos de métodos de fixação com e sem travamento empregados na osteotomia Le Fort I [tese de doutorado]. Araraquara: Faculdade de Odontologia da UNESP; 2023.

RESUMO

A fixação interna é amplamente utilizada na estabilização das osteotomias maxilares. No entanto, alguns movimentos como os de grande avanço têm maior tendência à recidiva e menor contato ósseo. O objetivo deste estudo foi avaliar a fixação de simulações da osteotomia Le Fort I para avanço de 6 mm e reposicionamento inferior de 3 mm, utilizando placas do sistema 2,0 mm, com ou sem travamento dos parafusos e com o uso ou não de enxerto interposicional. Foi avaliada a resistência à deformação, por meio de ensaio mecânico, de 80 réplicas de crânios em poliuretano. Os modelos foram divididos em 4 grupos (n=10), a saber: Grupo 1: sem sistema de travamento e sem enxerto, Grupo 2: sem sistema de travamento e com enxerto, Grupo 3: com sistema de travamento e sem enxerto e grupo 4: com sistema de travamento e com enxerto. Para a realização do ensaio mecânico, as cargas foram aplicadas às réplicas no sentido vertical (n=40) e horizontal (n=40). Não houve diferença estatística entre os grupos fixados com placas sem ou com travamento em 1, 2 e 3 mm de deslocamento vertical, independente do uso o enxerto ou não ($p>0,05$). No sentido horizontal, os grupos com enxerto interposicional não apresentaram diferença estatística nos deslocamentos avaliados, em relação ao uso do sistema sem ou com travamento ($p>0,05$). Entretanto, para os grupos sem enxerto, houve diferença estatisticamente significativa no uso do sistema com travamento, que apresentou as maiores médias de resistência à compressão em todos os deslocamentos avaliados ($p<0,05$). Na análise de elementos finitos para o teste de carregamento vertical, a maior concentração de tensão foi observada nas placas anteriores da maxila, na região da curvatura e parafusos próximos à osteotomia. Os enxertos atuaram contra o movimento de carregamento, melhorando a resistência das placas posteriores. As menores tensões foram observadas nos grupos enxertados associados ou não com sistema de travamento, 800 MPa e 680 MPa, respectivamente. Para o carregamento horizontal, foram notados menores valores de tensão nas placas devido à influência do enxerto, em associação (170 MPa) ou não (160 MPa) com o sistema de travamento. Enquanto o sistema de travamento apresentou relevância na distribuição de tensões para as placas, parafusos e substrato. O uso de sistemas com travamento ofereceu vantagens mecânicas nos movimentos com sentido anteroposterior, mesmo quando enxerto interposicional não é utilizado. Permitiu redução das tensões distribuídas pelo sistema ao substrato, tanto na presença como na ausência de enxertos. Desta forma, é uma opção interessante para o uso em cirurgia ortognática, tanto para movimentos anteroposteriores, verticais ou associações destes.

Palavras – chave: Osteotomia de Le Fort. Dispositivos de fixação cirúrgica. Testes mecânicos. Análise de elementos finitos.

Torres LHS. Mechanical and finite element evaluation of fixation methods with and without locking system used in Le Fort I osteotomy [tese de doutorado]. Araraquara: Faculdade de Odontologia da UNESP; 2023.

ABSTRACT

Internal fixation is widely used to stabilize maxillary osteotomies. However, some movements, such as those with great advancement, have a greater tendency to relapse and have less bone contact. The objective of this study was to evaluate the fixation of Le Fort I osteotomy simulations for 6 mm advancement and 3 mm inferior repositioning, using 2.0 mm system plates, with or without screw locking and with or without the use of interpositional grafts. The resistance to deformation was evaluated, through mechanical testing, of 80 polyurethane skull replicas. The models were divided into 4 groups (n=10), namely: Group 1: without locking system and without graft, Group 2: without locking system and with graft, Group 3: with locking system and without graft, and Group 4: with locking system and with graft. To carry out the mechanical test, loads were applied to the replicas in the vertical (n=40) and horizontal (n=40) directions. There was no statistical difference between the groups fixed with plates without or with locking at 1, 2, and 3 mm of vertical displacement, regardless of whether the graft was used or not ($p>0.05$). In the horizontal direction, the groups with interpositional graft showed no statistical difference in the displacements evaluated, in relation to the use of the system without or with locking ($p>0.05$). However, for the groups without graft, there was a statistically significant difference in the use of the locking system, which presented the highest average compression resistance in all displacements evaluated ($p<0.05$). In the finite element analysis for the vertical loading test, the highest stress concentration was observed in the anterior plates of the maxilla, in the curvature region, and screws close to the osteotomy. The grafts acted against the loading movement, improving the resistance of the posterior plates. The lowest stresses were observed in the grafted groups associated or not with a locking system, 800 MPa, and 680 MPa, respectively. For horizontal loading, lower stress values were noted in the plates due to the influence of the graft, in association (170 MPa) or not (160 MPa) with the locking system. While the locking system was relevant in the distribution of stresses to the plates, screws, and substrate. The use of locking systems offered mechanical advantages in anteroposterior movements, even when an interpositional graft is not used. It allowed the reduction of tensions distributed by the system to the substrate, both in the presence and absence of grafts. Therefore, it is an interesting option for use in orthognathic surgery, both for anteroposterior and vertical movements or combinations of these.

Keywords: Osteotomy, Le Fort. Surgical fixation devices. Mechanical tests. Finite element analysis.

LISTA DE ABREVIações

.step = Standard for the Exchange of Product Data (Padrão para troca de dados de produtos, em tradução livre)

.STL = Formato de arquivo padrão Industrial para representação em geometrias em malhas de triângulos por superfície

3D = Tridimensional

AEF = Análise por elementos finitos

AMM = Avanço maxilomandibular

ANOVA = Análise de variância

CAD = Computer Aided Design (Desenho Assistido por Computador, em tradução livre)

DICOM = Digital Imaging and Communications in Medicine (Comunicação de Imagens Digitais em Medicina, em tradução livre)

IAH = Índice de apneia-hipopneia

kN = Kilonewton

LFI = Le Fort I

MPa = Megapascal

N = Newton

N.mm = Newton vezes milímetro

NURBS = Non-Uniform Rational B-Splines (B-Spline Racional Não Uniforme, em tradução livre – modelo de função matemática usada para criar objetos bidimensionais e tridimensionais)

OSRM = Osteotomia sagital do ramo mandibular

SAOS = Síndrome da apneia obstrutiva do sono

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	PROPOSIÇÃO	14
3	MATERIAL E MÉTODO	15
3.1	Réplicas Maxilares e Dispositivos de Fixação.....	15
3.2	Grupos Experimentais.....	17
3.3	Ensaio Mecânico.....	18
3.4	Confecção dos Modelos Tridimensionais.....	20
3.5	Características das Malhas dos Elementos Finitos.....	22
3.6	Contatos Mecânicos, Condições de Contorno, Carregamento e Simulação Virtual.....	25
3.7	Delineamento Estatístico	28
4	RESULTADOS.....	29
4.1	Ensaio Mecânico.....	29
4.2	Ensaio de Elementos Finitos.....	32
5	DISCUSSÃO.....	44
6	CONCLUSÃO.....	51
	REFERÊNCIAS	52
	ANEXO A.....	58

1 INTRODUÇÃO

A osteotomia Le Fort I (LFI), introduzida por Herman Wassmund, em 1921, é a primeira escolha para o reposicionamento maxilar. Por meio de uma fratura planejada, a maxila pode ser mobilizada em bloco único ou segmentado, com o intuito de otimizar a função e/ou estética do paciente¹. Embora seja uma técnica estável e segura, uma taxa de recidiva que varia de 10% a 18% é relatada nos movimentos horizontais, principalmente nos primeiros 06 meses de acompanhamento pós-operatório, quando enxertos ósseos não são utilizados^{1,2}. Em contrapartida, a estabilidade da osteotomia pode ser aumentada com o uso da combinação de fixação interna e uso de enxertia, com taxas de recidiva de 3,5% e 5%, para movimentos de reposicionamento anterior e inferior, respectivamente³.

Dentre os fatores que estão relacionados à recidiva, estão: a amplitude e direção do reposicionamento, a associação de enxertos e o método de fixação utilizado^{4,5}. A literatura descreve que os movimentos complexos e instáveis da maxila devem ser realizados com indicações precisas, atenção à fixação e necessidade de interposição de enxerto ósseo, principalmente nos avanços maxilares maiores de 5 mm e no reposicionamento inferior⁶.

Nos últimos anos, o avanço maxilomandibular (AMM) tem sido descrito como opção efetiva e segura para o tratamento da síndrome da apneia obstrutiva do sono (SAOS), com evidência clara de aumento significativo da dimensão da via aérea faríngea e melhora nos valores finais de índice de apneia-hipopneia (IAH)^{1,7,8}. Apesar de estudos descreverem que o AMM seja estável, Fahradyan et al.⁹ relatam uma correlação positiva entre a magnitude do avanço maxilar e recidiva horizontal, o que compromete a estabilidade pós-cirúrgica da maxila.

Numerosas alternativas para a melhora da estabilidade óssea na LFI são descritas na literatura, por exemplo: alterações no desenho da osteotomia¹⁰; uso de substitutos ósseos e enxertos autógenos^{6,11}; modificações nos métodos de fixação, que podem variar entre quatro placas convencionais em “L”; apenas duas placas na região anterior¹² ou posterior¹³; materiais de titânio ou biodegradáveis¹⁴; placas pré-dobradas e fios de aço cirúrgico¹⁵. Entretanto, tais modificações nem sempre são clinicamente significantes^{10,13,16}.

Diversos sistemas de fixação são relatados e comparados na literatura visando buscar um modelo de síntese que apresente melhor resistência mecânica, a fim de

estabelecer um padrão de fixação que seja estável e eficiente^{3,16,17}. Embora as placas de titânio sejam a principal escolha para procedimentos orais e maxilofaciais^{18,19}; um menor contato ósseo entre os segmentos e a falha à resistência do material contribuem para a recidiva óssea^{1,20}.

Apesar dos estudos biomecânicos serem amplamente realizados para avaliar as técnicas de fixação mandibular²¹, os ensaios em maxila ainda são poucos na literatura. Pesquisas têm sido feitas a respeito do tamanho, modelo, número e à biomecânica dos sistemas de placas e parafusos com o interesse de melhorar os resultados cirúrgicos²². Dentre estes, o uso do sistema de travamento associado ao sistema de fixação apresenta vantagens, tais como: menor necessidade de adaptação das placas ao osso subjacente, menor índice de soltura dos parafusos, menor alteração dos segmentos ósseos, melhor estabilidade primária, além de menor interferência na circulação sanguínea subjacente ao material^{23–25}. Em uma revisão sistemática publicada por Chranovic²³, o autor declara que não há diferenças estatísticas para infecções pós-operatórias, maloclusão, falha ou remoção das placas, parestesia ou deiscência de feridas, no uso de placas com e sem sistema de travamento para síntese de fraturas mandibulares.

A literatura cita variadas metodologias para a avaliação das opções de fixação em cirurgia ortognática, que incluem ensaios laboratoriais e clínicos^{14,26}. Além dos ensaios compressivos, a utilização da modelagem computacional é relatada como uma ferramenta auxiliar na determinação do comportamento mecânico e distribuição de tensões dos sistemas de fixação quando submetidos às forças oclusais^{18,27,28}. Ataç et al.¹⁸, por meio de análise de elementos finitos, demonstraram que o uso de 4 placas convencionais em “L” produz menor tensão nos ossos maxilares e materiais de fixação, quando comparado ao uso de apenas duas placas. Entretanto, ainda não há estudos in vitro que unam ensaios mecânicos e por elementos finitos para a avaliação de movimentos instáveis de simulações clínicas em maxila associado ao uso de sistemas de travamento ou não.

6 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos por meio das metodologias aplicadas neste estudo, foi possível concluir que:

O uso de sistemas com travamento oferece vantagens mecânicas nos movimentos com sentido anteroposterior, mesmo quando enxerto interposicional não é utilizado. Permite, também, a redução das tensões distribuídas pelo sistema ao osso, tanto na presença como na ausência do enxerto interposicional. Desta forma, é uma opção interessante para o uso em cirurgia ortognática, tanto para movimentos anteroposteriores, verticais ou associações destes.

REFERÊNCIAS*

1. Dowling PA, Espeland L, Sandvik L, Mobarak KA, Hogevoold HE. LeFort I maxillary advancement: 3-year stability and risk factors for relapse. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2005; 128(5): 560–7.
2. Hoffman GR, Brennan PA. The skeletal stability of one-piece Le Fort 1 osteotomy to advance the maxilla: part 1. stability resulting from non-bone grafted rigid fixation. *Br J Oral Maxillofac Surg.* 2004; 42(3): 221–5.
3. Kerawala CJ, Stassen LFA, Shaw IA. Influence of routine bone grafting on the stability of the non-cleft Le Fort 1 osteotomy. *Br J Oral Maxillofac Surg.* 2001; 39(6): 434–8.
4. Lee HJ, Park HS, Kyung HM, Kwon TG. Soft tissue changes and skeletal stability after modified quadrangular le Fort i osteotomy. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2015; 44(3):3 56–61.
5. Ragaey M, Van Sickels JE. Stability of large maxillary advancements using a combination of prebent and conventional plates for fixation. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol.* 2017; 123(1): 29–36.
6. Alyahya A, Swennen GRJ. Bone grafting in orthognathic surgery: a systematic review. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2019; 48(3): 322–31.
7. Zhou N, Ho JPTF, Spijker R, Aarab G, de Vries N, Ravesloot MJL, et al. Maxillomandibular Advancement and Upper Airway Stimulation for Treatment of Obstructive Sleep Apnea: A Systematic Review. *J Clin Med.* 2022; 11(22): 6782.
8. Giralt-Hernando M, Valls-Ontañón A, Guijarro-Martínez R, Masià-Gridilla J, Hernández-Alfaro F. Impact of surgical maxillomandibular advancement upon pharyngeal airway volume and the apnoea-hypopnoea index in the treatment of obstructive sleep apnoea: Systematic review and meta-analysis. *BMJ Open Respir Res.* 2019; 6(1): e000402.
9. Fahradyan A, Wolfswinkel EM, Clarke N, Park S, Tsuha M, Urata MM, et al. Impact of the Distance of Maxillary Advancement on Horizontal Relapse After Orthognathic Surgery. *Cleft Palate Craniofac J.* 2018; 55(4): 546–53.
10. Kurohara K, Tomomatsu N, Nakakuki K, Arai N, Yoda T. Skeletal stability after maxillary step osteotomy compared with original Le Fort I osteotomy during one-year of follow-up. *Sci Rep.* 2019; 1;9(1): 9742.
11. Zanettini LMS, Fritscher GG, De Marco RG, De Oliveira Andriola F, Pagnoncelli RM. Bone Substitutes in le Fort i Osteotomy to Promote Bone Union and Skeletal Stability. *J Craniofac Surg.* 2017; 28(2): 492–5.
12. Susarla SM, Ettinger R, Preston K, Kapadia H, Egbert MA. Two-point nasomaxillary fixation of the Le Fort I osteotomy: assessment of stability at one year postoperative. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2020; 49(4): 466–70.

* De acordo com o Guia de Trabalhos Acadêmicos da FOAr, adaptado das Normas Vancouver. Disponível no site da Biblioteca: <http://www.foar.unesp.br/Home/Biblioteca/guia-de-normalizacao-atualizado.pdf>

13. Fujio M, Sayo A, Ogisu K, Chang Q, Tsuboi M, Hibi H. Comparison study of the Le Fort I osteotomy using 2 and 4-plate fixation. *Nagoya J Med Sci.* 2023; 85(1): 70–8.
14. Ueki K, Okabe K, Moroi A, Marukawa K, Sotobori M, Ishihara Y, et al. Maxillary stability after Le Fort I osteotomy using three different plate systems. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2012; 41(8): 942–8.
15. Carneiro Júnior JT, Voss de Oliveira D, Goodday R. Maxillary stability following Le Fort I osteotomy using prebent plates and wire fixation in patients undergoing surgery for OSAS. *J Craniomaxillofac Surg.* 2018; 46(9): 1448–54.
16. Passeri LA, Bento AM, Vanni T. Resorbable Versus Titanium Fixation of Le Fort I Osteotomy. *J Craniofac Surg.* 2020; 31(4): 934–9.
17. Ragaey M, Van Sickels JE. Stability of large maxillary advancements using a combination of prebent and conventional plates for fixation. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol.* 2017; 123(1): 29–36.
18. Atac MS, Erkmen E, Yucel E, Kurt A. Comparison of biomechanical behaviour of maxilla following Le Fort I osteotomy with 2- versus 4-plate fixation using 3D-FEA. Part 1: advancement surgery. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2008; 37(12): 1117–24.
19. Hingsammer L, Grillenberger M, Schagerl M, Michael M, Stefan H. Biomechanical testing of zirconium dioxide osteosynthesis system for Le Fort I advancement osteotomy fixation. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2018; 77: 34–9.
20. Lye KW, Waite PD, Wang D, Sittitavornwong S. Predictability of Prebent Advancement Plates for Use in Maxillomandibular Advancement Surgery. *J Oral Maxillofac Surg.* 2008; 66(8): 1625–9.
21. Pozzer L, Olate S, Cavalieri-Pereira L, Navarro P, de Albergaria Barbosa JR. Mechanical stability of 2-plate versus 4-plate osteosynthesis in advancement Le Fort I osteotomy. An in vitro study. *J Stomatol Oral Maxillofac Surg.* 2017; 118(1): 2–4.
22. Chrcanovic BR. Fixation of mandibular angle fractures: In vitro biomechanical assessments and computer-based studies. *Oral Maxillofac Surg.* 2013; 17: 251–68.
23. Chrcanovic BR. Locking versus non-locking plate fixation in the management of mandibular fractures: A meta-analysis. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2014; 13: 1243–50.
24. Herford AS, Ellis E. Use of a locking reconstruction bone plate/screw system for mandibular surgery. *J Oral Maxillofac Surg.* 1998; 56(11): 1261–5.
25. Alpert B, Gutwald R, Schmelzeisen R. New innovations in craniomaxillofacial fixation: the 2.0 lock system. *Keio J Med.* 2003; 52(2): 120–7.

26. Esen A, Celik B, Dolanmaz D. Biomechanical evaluation of two miniplate fixations applied in the anterior region after Le Fort I osteotomy: an experimental study. *Br J Oral Maxillofac Surg.* 2022; 60(2): 152–6.
27. Uckan S, Veziroglu F, Soydan SS, Uckan E. Comparison of stability of resorbable and titanium fixation systems by finite element analysis after maxillary advancement surgery. *J Craniofac Surg.* 2009; 20(3): 775–9.
28. Şimşek B, Erkmen E, Yilmaz D, Eser A. Effects of different inter-implant distances on the stress distribution around endosseous implants in posterior mandible: A 3D finite element analysis. *Med Eng Phys.* 2006; 28(3): 199–213.
29. Epker BN, Fish LC, Paulus PJ. The surgical-orthodontic correction of maxillary deficiency. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1978; 46(2): 171–205.
30. Oguz Y, Watanabe ER, Reis JM, Spin-Neto R, Gabrielli MA, Pereira-Filho VA. In vitro biomechanical comparison of six different fixation methods following 5-mm sagittal split advancement osteotomies. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2015; 44(8): 984–8.
31. De Oliveira LB, Reis JMN, Spin-Neto R, Gabrielli MAC, Oguz Y, Pereira-Filho VA. Mechanical evaluation of six techniques for stable fixation of the sagittal split osteotomy after counterclockwise mandibular advancement. *Br J Oral Maxillofac Surg.* 2016; 54(5): 573–8.
32. Kuik K, Ho JPTF, Klop C, de Ruiter MHT, Kleverlaan CJ, de Lange J, et al. Biomechanical Evaluation of a New Fixation Method for Stabilization of Sagittal Split Ramus Osteotomy After Mandibular Advancement. *Br J Oral Maxillofac Surg.* 2021; 59(4): 466–471.
33. De Lima VN, Hadad H, Suguimoto RM, Magro-Filho O. Mechanical Comparison of Four Different Types of Osteosynthesis in a 11-mm Advancement le Fort i Osteotomy. *J Craniofac Surg.* 2022; 33(4): 1255–9.
34. Coskunes FM, Kan B, Mutlu I, Cilasun U, Celik T. Evaluation of prebent miniplates in fixation of le Fort I advancement osteotomy with the finite element method. *J Craniomaxillofac Surg.* 2015; 43(8): 1505–10.
35. Huang SF, Lo LJ, Lin CL. Biomechanical optimization of a custom-made positioning and fixing bone plate for Le Fort I osteotomy by finite element analysis. *Comput Biol Med.* 2016; 68: 49–56.
36. Sigua-Rodriguez EA, de Medeiros RC, Goulart DR, Bomfim-Azevedo VL, Olate S, de Albergaria-Barbosa JR. Comparative evaluation of different fixation techniques of the sagittal split ramus osteotomy in 10 mm advancements: mechanical testing and screw insertion torque. *J Craniomaxillofac Surg.* 2018; 46(12): 2082–7.
37. Choi H, Hong MH. Finite Element Analysis of the Effect of Tightening Torque on the Connection Stability of a Two-Piece Zirconia Implant System. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2022.

38. Pereira Filho VA, Iamashita HY, Monnazzi MS, Gabrielli MFR, Vaz LG, Passeri LA. In vitro biomechanical evaluation of sagittal split osteotomy fixation with a specifically designed miniplate. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2013; 42(3): 316–20.
39. Pereira-Filho VA, de Oliveira Gorla LF, Dos Santos JC, Monnazzi MS, dos Santos Nunes Reis JM, de Moraes M, et al. In vitro mechanical test of grid plates for mandibular angle fractures. *Br J Oral Maxillofac Surg.* 2022; 60(8): 1125-1130.
40. Vollmer D, Meyer U, Joos U, Vègh A, Piffkò J. Experimental and finite element study of a human mandible. *J Craniomaxillofac Surg.* 2000; 28(2): 91–6.
41. Rangel Goulart D, Takanori Kemmoku D, Noritomi PY, de Moraes M. Development of a Titanium Plate for Mandibular Angle Fractures with a Bone Defect in the Lower Border: Finite Element Analysis and Mechanical Test. *J Oral Maxillofac Res.* 2015; 6(3): 1-7.
42. Lisiak-Myszke M, Marciniak D, Bieliński M, Sobczak H, Garbacewicz Ł, Drogoszewska B. Application of finite element analysis in oral and maxillofacial surgery-A literature review. Vol. 13, *Materials (Basel).* 2020; 9; 13(14): 3063.
43. Sato FRL, Asprino L, Noritomi PY, Da Silva JVL, De Moraes M. Comparison of five different fixation techniques of sagittal split ramus osteotomy using three-dimensional finite elements analysis. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2012; 41(8): 934–41.
44. Lisiak-Myszke M, Marciniak D, Bieliński M, Sobczak H, Garbacewicz Ł, Drogoszewska B. Application of finite element analysis in oral and maxillofacial surgery-A literature review. Vol. 13, *Materials (Basel).* 2020; 9; 13(14): 3063.
45. Lauria A, de Medeiros RC, Rodrigues DC, Sato FRL, Moreira RWF. Evaluation of cyclic and linear mechanical resistance of prebent and manually-bent plates used for maxillary advancement in orthognathic surgery. *Br J Oral Maxillofac Surg.* 2016; 54(9): 987–91.
46. Gutwald R, Schön R, Metzger M, Kreutzer K, Rahn B, Schmelzeisen R, et al. Miniplate osteosynthesis with four different systems in sheep. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2011; 40(1): 94–102.
47. Ataç MS, Erkmen E, Yucel E, Kurt A, Ataç MS, Erkmen E, et al. Comparison of biomechanical behavior of maxilla following Le Fort I osteotomy with 2- versus 4-plate fixation using 3D-FEA. Part 2: impaction surgery. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2009; 38(1): 1117–24.
48. Aubert K, Germaneau A, Rochette M, Ye W, Severyns M, Billot M, et al. Development of Digital Twins to Optimize Trauma Surgery and Postoperative Management. a case study focusing on tibial plateau fracture. *Front Bioeng Biotechnol.* 2021; 9.
49. Ahmed H, Devoto L. The Potential of a Digital Twin in Surgery. *Surg Innov.* 2021; 28(4): 509–10.

50. Huang SF, Lo LJ, Lin CL. Biomechanical interactions of different mini-plate fixations and maxilla advancements in the Le Fort I Osteotomy: a finite element analysis. *Comput Methods Biomech Biomed Engin.* 2016; 19(16): 1704–13.
51. Ribeiro-Junior PD, Magro-Filho O, Shastri KA, Papageorge MB. In Vitro Biomechanical Evaluation of the Use of Conventional and Locking Miniplate/Screw Systems for Sagittal Split Ramus Osteotomy. *J Oral Maxillofac Surg.* 2010 ;68(4): 724–30.
52. Esen A, Isik K, Saglam H, Ozdemir YB, Dolanmaz D. Biomechanical evaluation of different fixation systems after Le Fort I osteotomy in polyurethane models of unilateral clefts. *Br J Oral Maxillofac Surg.* 2016; 54(7) :757–61.
53. De Medeiros RC, De Moura AL, Sawazaki R, Fernandes Moreira RW. Comparative in vitro mechanical evaluation of techniques using a 2.0 mm locking fixation system for simulated fractures of the mandibular body. *J Craniomaxillofac Surg.* 2015; 43(3): 302–5.
54. Murray RA, Upton LG, Rottman KR. Comparison of the postsurgical stability of the Le Fort I osteotomy using 2- and 4-plate fixation. *J Oral Maxillofac Surg.* 2003; 61(5): 574–9.
55. Araujo MM, Waite PD, Lemons JE. Strength analysis of le fort I osteotomy fixation: Titanium versus resorbable plates. *J Oral Maxillofac Surg.* 2001; 59(9): 1034–9.
56. Yazar L, Aydil BA, Ayhan M, Çömlekçioğlu Y. Comparison of standard miniplates and locked miniplates in post-traumatic fracture stabilization. *Ulus Travma Acil Cerrahi Derg.* 2022; 28(6): 715-722.
57. Meira JBC, Landgraf H, Shinohara EH, Luz JGC, Ballester RY. A new way of evaluating the biomechanics of the mandible with freedom in three axes in space: Technical note. *J Oral Maxillofac Surg Med Pathol.* 2018; 30(5): 405–8.
58. Choi YJ, Lim H, Chung CJ, Park KH, Kim KH. Two-year follow-up of changes in bite force and occlusal contact area after intraoral vertical ramus osteotomy with and without le Fort I osteotomy. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2014; 43(6): 742–7.
59. Song HC, Throckmorton GS, Iii EE, Sinn DP. Functional and Morphologic Alterations After Anterior or Inferior Repositioning of the Maxilla. *Oral Maxillofac Surg.* 1997; 55(1): 41-9;60.
60. Veiga C, Davim JP, Loureiro AJR. Properties and applications of titanium alloys: a brief review. *Rev. Mater. Sci.* 2012; 32: 133-148.
61. Muftuoglu G, Bayram B, Aydin P. Comparison of locking and non-locking reconstruction plate-screw system in lateral mandibular defects by finite element analysis. *J Stomatol Oral Maxillofac Surg.* 2021; 122(4) :65–9.
62. Elias CN, Fernandes DJ, Resende CRS, Roestel J. Mechanical properties, surface morphology and stability of a modified commercially pure high strength titanium alloy for dental implants. *Dent Mater.* 2015; 31(2): 1–13.

63. Erkmen E, Ataç MS, Yücel E, Kurt A. Comparison of biomechanical behaviour of maxilla following Le Fort I osteotomy with 2- versus 4-plate fixation using 3D-FEA. Part 3: inferior and anterior repositioning surgery. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2009; 38(2): 173–9.
64. Ataç MS, Erkmen E, Yücel E, Kurt A. Comparison of biomechanical behaviour of maxilla following Le Fort I osteotomy with 2- versus 4-plate fixation using 3D-FEA. Part 1: advancement surgery. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2008; 37(12): 1117–24.
65. Ataç MS, Erkmen E, Yücel E, Kurt A. Comparison of biomechanical behaviour of maxilla following Le Fort I osteotomy with 2- versus 4-plate fixation using 3D-FEA. Part 2: impaction surgery. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2009; 38(1): 58–63.
66. Rohner D, Hailemariam S, Hammer B. Le fort I osteotomies using Bio-Oss® Collagen to promote bony union: a prospective clinical split-mouth study. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2013; 42(5): 585–91.
67. Naros A, Bayazeed B, Schwarz U, Nagursky H, Reinert S, Schmelzeisen R, et al. A prospective histomorphometric and cephalometric comparison of bovine bone substitute and autogenous bone grafting in Le Fort I osteotomies. *J Craniomaxillofac Surg.* 2019; 47(2): 233–8.
68. Schlegel KA, Fichtner G, Schultze-Mosgau S, Wiltfang J. Histologic findings in sinus augmentation with autogenous bone chips versus a bovine bone substitute. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2003; 18(1): 53-58.
69. Bouchard C, Sanscartier PK. Nonunion in Orthognathic Surgery: a case-series of 15 patients. *J Oral Maxillofac Surg.* 2023; 81(8): 973-978.
70. Santos SE, Moreira RWF, De Moraes M, Asprino L, Araujo MM. Skeletal stability after inferior maxillary repositioning without interpositional graft. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2012; 41(4): 477-81.
71. Major PW, Philippon GE, Glover KE, Grace MGA. Stability of maxilla downgrafting after rigid or wire fixation. *J Oral Maxillofac Surg.* 1996; 54(11): 1287-91.
72. Kuvat SV, Çizmecı O, Biçer A, Marşan G, Hocaoglu E, Bilgiç B, et al. Improving bony stability in maxillofacial surgery: use of osteogenetic materials in patients with profound (≥ 5 mm) maxillary advancement, a clinical study. *J Plast Reconstr Aesthet Surg.* 2009; 62(5): 639-45.
73. Stringhini DJ, Sommerfeld R, Uetanabaro LC, Leonardi DP, Araújo MR, Rebellato NLB, et al. Resistance and stress finite element analysis of different types of fixation for mandibular orthognathic surgery. *Braz Dent J.* 2016; 27(3): 284–91.