

Modelo bidimensional para avaliação de guia cirúrgica no procedimento de osteotomia periacetabular através de simulação no ABAQUS® e otimização usando Algoritmo Genético

Gustavo S. O. Marques¹, Marcus V. S. Ferraz², Flávia S. Bastos², Bruno G. S. e Souza³

¹*Dept. de Engenharia de Produção e Mecânica, Universidade Federal de Juiz de Fora
Campus UFJF - Faculdade de Engenharia - Sala 4268, 36100-040, Juiz de Fora, Brasil
gustavo.santos@engenharia.ufjf.br*

²*Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Universidade Federal de Juiz de Fora
Campus Universitário - Bairro: Martelos, 36036-330, Juiz de Fora, Brasil
flavia.bastos@ufjf.edu.br, marcus.ferraz@engenharia.ufjf.br*

³*Programa de Pós-Graduação em Saúde Coletiva, Universidade Federal de Juiz de Fora
Av. Eugênio do Nascimento s/nº - Bairro: Dom Bosco, 36038-330, Juiz de Fora, Brasil
bruno.schroder@medicina.ufjf.br*

Resumo. O presente artigo tem por objetivo avaliar a viabilidade de uma guia cirúrgica no procedimento de osteotomia periacetabular, que apresenta elevado grau de complexidade e é utilizado na correção da displasia. A função da guia consiste em definir em quais locais deverão ser realizados os cortes no osso, a fim de proporcionar uma orientação mais precisa, contudo, durante a cirurgia o ortopedista realiza diversos esforços que podem danificar a guia. Neste trabalho, verifica-se se a guia resiste às tensões exercidas durante o procedimento e quais parâmetros tornam seu uso viável, utilizando o software ABAQUS® para modelagem e simulação do problema em conjunto com o Algoritmo Genético, que irá realizar a parte de otimização. O modelo aqui proposto é bidimensional e baseia-se em uma análise estática e preliminar, usando geometrias simplificadas a fim de reduzir o custo computacional. Busca-se otimizar alguns parâmetros construtivos (espessura da guia e raio do parafuso que fixa a guia no osso) de maneira que a tensão máxima encontrada na guia seja a mínima possível (função objetivo). Verificou-se que os resultados que suportaram melhor as tensões foram aqueles com 11 mm de espessura e 3 mm de raio, respectivamente. Uma proposta para análises futuras é levar em consideração outros aspectos geométricos e construtivos (estudo tridimensional), além de avaliar novos parâmetros no Algoritmo Genético.

Palavras-Chave: Osteotomia periacetabular, Guia cirúrgica, Método dos Elementos Finitos, Algoritmo Genético

1 Introdução

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo preliminar para avaliar se a guia cirúrgica, ferramenta utilizada na operação de osteotomia periacetabular, resiste aos esforços durante o procedimento. Para tal, serão utilizados em conjunto o Método dos Elementos Finitos para avaliar as tensões (critério utilizado para verificar se suporta os esforços) e o Algoritmo Genético para a parte de otimização. A otimização no trabalho aqui proposto visa os melhores parâmetros construtivos de espessura na guia e raio do parafuso para fixar a guia no osso. Os parâmetros serão escolhidos ao levar em consideração a menor tensão máxima de Von Mises encontrada nos elementos da guia (função objetivo), de maneira que as tensões máximas não ultrapassem o limite permitido.

A osteotomia periacetabular "bernese" ou de Ganz é um procedimento cirúrgico realizado com o intuito de corrigir a displasia e prevenir a artrose, doença nas articulações que resulta na degeneração da cartilagem e do osso subjacente. O procedimento é feito segundo cortes previamente planejados que visam liberar o acetábulo, suavizando, desta maneira, o contato com o fêmur.

É um procedimento que possui elevada complexidade, principalmente na acurácia dos cortes. Devido a isso, ferramentas e métodos que facilitam o procedimento e seu planejamento são muito aproveitados. Uma dessas ferramentas é a guia cirúrgica que contém as cavidades onde deverão ser efetuados os cortes, podendo ser composta de material polimérico ABS (obtida por impressão 3D) a partir de imagens geradas na tomografia (Souza [1]). A guia é específica para cada paciente devido à necessidade de ser compatível com cada anatomia (Silva [2]).

O Método dos Elementos Finitos ou MEF, como também é conhecido, é um modelo matemático capaz de determinar soluções aproximadas para problemas que anteriormente só poderiam ser determinados por soluções analíticas (reais). Este, consiste em dividir o corpo a ser estudado em vários elementos de geometria simples (triângulos e retângulos) onde o conjunto desses elementos é denominado malha. Devido às subdivisões realizadas na geometria, as equações que regem o modelo são apenas aproximações do resultado real. Em uma malha "fina" (com muitos elementos), mais próximo do resultado real será a sua solução e maior o tempo de processamento.

Entretanto, uma malha muito "grossa" (com poucos elementos) não é viável devido à falta de veracidade da solução, apesar de demandar menos tempo de processamento. Dessa maneira, é preciso fazer com que a malha atinja o ponto ideal entre velocidade e confiabilidade de resultados, procedimento conhecido como teste de convergência de malha.

O Algoritmo Genético é um algoritmo de otimização baseado no processo de seleção natural proposto por Darwin, onde os indivíduos mais adaptados transmitem suas características para as gerações seguintes.

Inicialmente, é gerado uma população inicial na base escolhida (decimal ou binário) na qual são definidos os genes (parâmetros de interesse) e quais seus respectivos limites (valores de máximo e mínimo). Após a geração da primeira população, é associado o valor da função objetivo (resultado de interesse) a cada indivíduo.

Para identificar os indivíduos mais adaptados é utilizada a "fitness function", um tipo de função que retorna valores segundo os mais adaptados. Após definidos os mais adaptados, é efetuado o cruzamento, onde dois "pais" (indivíduos adaptados) selecionados aleatoriamente irão mesclar seu material genético formando as "proles". Após gerada uma nova população, é aplicada a mutação, que consiste na probabilidade aleatória previamente definida de mudar o gene de um indivíduo aleatoriamente. Para a geração seguinte ainda pode ser aplicado um processo conhecido como elitismo, onde alguns dos indivíduos mais adaptados de uma população já são automaticamente transferidos para a geração seguinte.

Depois de atingido um determinado número de gerações estipulado ou quando é atingido uma convergência dos valores esperados, o algoritmo é encerrado.

2 Metodologia

2.1 Construção do modelo

Para realizar a análise será utilizado o ABAQUS® de versão 6.13, software de análise de elementos finitos desenvolvido em 1978, atualmente sendo distribuída pela Simulia. A licença foi disponibilizada pelo MAC (Departamento de Mecânica Aplicada e Computacional) da UFJF (Universidade Federal de Juiz de Fora).

O modelo do ABAQUS® (.CAE) baseia-se na construção de um modelo contendo, de forma hipotética, a pelve (osso do quadril que será cortado durante o procedimento cirúrgico), o formão de corte (ferramenta onde é aplicada a martelada para romper o osso) e a guia em plástico ABS, todos construídos de maneira simplificada (retângulos) visando uma otimização mais rápida (Fig. 1). Objetiva-se, assim, determinar a melhor espessura e o comprimento do raio do parafuso para a confecção da guia, de modo que ela resista aos esforços emitidos pelo formão de corte durante o procedimento.

O formão possui 150 mm de altura e 19 mm de largura. A guia é dividida em duas partes localizadas nas extremidades do formão, cada uma tendo 25 mm de largura e 10 mm de altura/espessura (contudo, essa espessura será modificada no algoritmo genético). O osso contém 10 mm de altura e 69 mm de largura. Vale mencionar que não existe folga entre guia e formão. As propriedades de material atribuídas ao osso do quadril são aquelas especificadas por Dalstra et al. [3], enquanto que para o formão de corte de aço inoxidável 420 assume-se Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson conforme AK Steel [4] e Askeland and Phulé [5], respectivamente. As propriedades para o plástico ABS foram disponibilizadas por Silva [2] (Tabela 1).

Tabela 1. Propriedades de materiais do modelo, Silva (2017)

Material	Módulo de Elasticidade (MPa)	Coef. de Poisson
Aço 420	200000	0,28
Ossos do quadril	24500	0,40
Plástico ABS	1681,5	0,37

Para simular a fixação da guia no osso, foram construídas duas regiões representadas por retas, de comprimento igual a 4 mm na superfície inferior da guia e na superfície superior do osso, que representam os parafusos

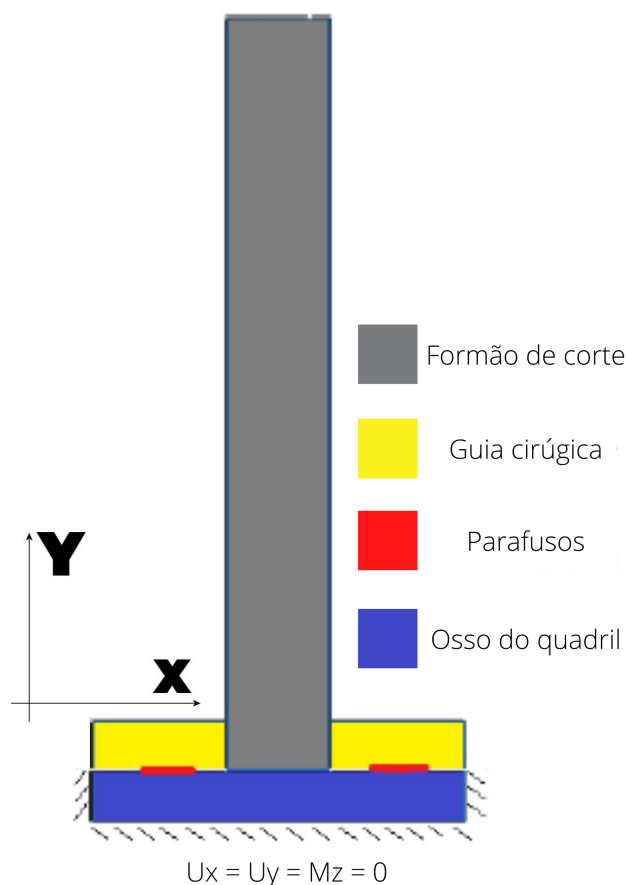


Figura 1. Representação do modelo CAE

usados na cirurgia (o valor será modificado durante o algoritmo). As propriedades para a interação de contato foram estabelecidas de modo a evitar a sobreposição das partes e de forma a considerar somente penetração normal e livre de atrito em relação às direções tangenciais.

No decorrer da cirurgia o ortopedista martela o formão de corte contra o osso do quadril fraturando-o. A penetração do formão de corte no osso é direcionada pela guia cirúrgica. A martelada imposta ao formão é excêntrica na maioria das vezes e consequentemente gera torque na base da guia podendo levar à sua falha/ruptura. Para simular esse procedimento, a análise foi dividida em dois modelos, um considerando uma martelada centrada (deslocamento) e o outro uma excêntrica (pressão/força distribuída). As condições de contorno aplicadas aos modelos foram as de contato entre as partes (formão-osso, formão-guia, osso-guia) e as de fixação do osso em suas extremidades.

No modelo do deslocamento foi imposto ao formão de corte um deslocamento na direção y a fim de contactá-lo com o osso. Sabendo que segundo İplikçioğlu and Akça [6] são necessárias tensões entre 100 MPa e 130 MPa para fraturar o osso do quadril, ao deslocar o formão em 0,031 mm, foi gerada uma tensão de 116,5 MPa. A partir da tensão obtida, contabilizou-se o somatório das forças na direção y e nos nós da região de contato entre formão e osso, obtendo 2053,85 N.

Para a construção do modelo no qual é imposto uma pressão na extremidade do formão, foi aplicada uma força distribuída em uma de suas extremidades, que é dada pelo somatório das forças dividido pela área aproximada da cabeça do martelo (aproximadamente 3,38 mm), chegando a 607,65 MPa, garantindo a excentricidade da martelada.

A malha das três partes é triangular do tipo CPS3, lineares de três nós. Optou-se por avaliar a convergência das malhas ao avaliar somente a tensão de Von Mises ("S Mises") em um nó, tomando por base o modelo da força distribuída (pressão), de modo que a diferença percentual de uma malha para outra não ultrapasse 3%.

Para a convergência do osso e do formão, utilizou-se o artifício "Local Seed Edges", que consiste em refinar a malha segundo uma direção e sentido. No caso do formão, foi feita uma partição em suas laterais em 8% de sua altura (12 mm) e o refinamento seguiu em direção ao contato com o osso e guia (sentido negativo de y). Para o osso, não foi feita nenhuma partição e o sentido escolhido foi o de contato com a guia e formão (sentido positivo

de y). Assim, ao final da análise adotou-se a configuração de malha com 372 elementos, tamanho global de 5 mm e tamanho mínimo local de 3 mm para o formão e 350 elementos e tamanho global de 2 mm para o osso (Tabela 2).

Para a análise de convergência da malha da guia, variou-se somente o tamanho global da malha. Ao final do teste de convergência, adotou-se uma malha com 408 elementos e com tamanho global aproximado de 1,6 mm (Tabela 3).

Tabela 2. Convergência de Malha para Formão e Osso, G. Marques e M. Ferraz (2020)

FORMÃO				
Global/Local Size Máx.	Local Size Min.	Número de Elementos	S Mises (MPa)	Diferença Percentual
5	5	360	447,034	-
5	4,5	372	509,906	14,06%
5	4	372	509,906	0,00%
5	3,5	372	526,764	3,31%
5	3	372	542,909	3,06%
5	2,5	372	557,297	2,65%
5	2	384	568,021	1,92%
5	1,5	384	581,543	2,38%
5	1	396	590,049	1,46%
5	0,5	408	594,599	0,77%
OSSO				
Global/Local Size Máx.	Local Size Min.	Número de Elementos	S Mises (MPa)	Diferença Percentual
2	2	350	13,4753	-
2	1,7	350	13,4753	0,00%
2	1,5	420	13,4013	0,55%
2	1,3	420	13,2253	1,31%
2	1,1	490	13,1586	0,50%
2	0,9	490	12,9541	1,55%
2	0,7	560	12,879	0,58%

Tabela 3. Convergência de Malha para a Guia Cirúrgica, G. Marques e M. Ferraz (2020)

Global Size	Número de Elementos	S Mises (MPa)	Diferença Percentual
1,6	408	12,8348	-
1,44	476	12,7882	0,36%
1,28	640	12,7387	0,39%
1,12	792	12,7857	0,37%
0,96	1040	12,9677	1,42%
0,8	1612	12,8021	1,28%

2.2 Confeção do script

A parte de modelagem e da captura dos resultados pode ser feita de maneira automatizada ao usar o interpretador de Python dentro do próprio ABAQUS® ao rodar um script, que permite a implementação de algoritmos de otimização.

Para a construção do script no ABAQUS®, inicialmente não foi utilizado nenhum comando de programação. Foi criado um modelo na interface do programa evitando ao máximo utilizar comandos com o "mouse" e verificou-se os arquivos com as extensões ".rpy" e ".jnl" gerados em conjunto com o modelo, que armazenam os comandos em Python utilizados. Os comandos após sofrerem as devidas adaptações foram copiados para um arquivo de extensão ".py", onde o programa o executará como script.

O principal material de consulta foi a Simulia [7], que lista quais comandos estão disponíveis dentro de cada instância e objeto. Os parâmetros que serão modificados para garantir a otimização são a espessura da guia e o raio do parafuso que fixa a guia no osso.

2.3 Confeção do Algoritmo Genético

Para a construção do Algoritmo Genético foi usada a linguagem de programação Python 2 e a IDE Spyder® em conjunto com Notepad++®, além do próprio ABAQUS® como ferramenta de programação. Para o desenvolvimento do algoritmo, foram utilizados os conceitos presentes no livro Arora [8] e sua construção seguiu os conceitos introduzidos neste artigo sobre o assunto.

O algoritmo foi construído especificamente para o problema proposto, sem o uso de qualquer biblioteca pronta para o uso de Algoritmos Genéticos, pois a maioria dos algoritmos e bibliotecas encontrados não satisfazem as necessidades específicas do problema.

O número de gerações e indivíduos foram respectivamente de 25 e 20, esses valores foram definidos tomando como base o trabalho de conclusão de curso do aluno Garcia [9], que também consiste em aplicar Algoritmo Genético em um problema de biomecânica.

O algoritmo usa base binária pois tornou mais fácil manipular o cruzamento, a mutação e a precisão da população. A seleção dos "pais" (mais adaptados) foi feita por torneio pois este procedimento assemelha-se mais a seleção natural, o processo consiste em comparar os valores de "fitness" de dois indivíduos, onde é escolhido aquele que possuir o maior valor. O cruzamento é do tipo "single-point", onde a cadeia de bits de um "pai" é inteiramente copiada até determinado ponto de parada, e o restante é composto pela cadeia de outro "pai". A probabilidade para ocorrência de mutação é de dez por cento. Não foi aplicado o elitismo pois verificou-se mais vantajoso aplicar maior diversidade nas populações, sendo elas inteiramente compostas por "proles".

2.4 Código contendo script e Algoritmo Genético

Para fazer o script e o Algoritmo Genético atuarem em conjunto, o código foi feito levando em consideração o interpretador de Python dentro do ABAQUS®.

A parte do script trata-se de uma função dentro do código chamada para cada indivíduo que o impede de seguir para as etapas de otimização antes de finalizar todas as análises da população. Seu objetivo é construir e analisar o modelo de elementos finitos, atuar como a função objetivo do Algoritmo Genético e encontrar a maior tensão na guia.

O Algoritmo Genético deve ser responsável por modificar os parâmetros de interesse, chamar o script para efetuar as análises e realizar a parte de otimização.

Para armazenar as informações das análises, é gerado um arquivo de texto contendo os índices das gerações e indivíduos, para cada indivíduo é associado os dados dos genes e tensão máxima na guia.

3 Resultados e Discussões

Na Fig. 2 é possível observar as tensões de Von Mises geradas pelo ABAQUS® na região em destaque do modelo completo, na guia e no osso. A tensão está na escala de MPa e o modelo em questão possui 10 mm de espessura e 2 mm de raio de parafuso. As regiões em vermelho indicam as áreas onde há maior concentração de tensões.

Ao final de todas as análises (quinhentas ao todo), é possível avaliar que a grande maioria dos indivíduos "campeões" (indivíduo com maior "fitness" na última população) apresentam genes na faixa de 11 mm para a espessura e 3 mm para o raio do parafuso, o que é muito próximo de seus valores máximos (limites superiores),

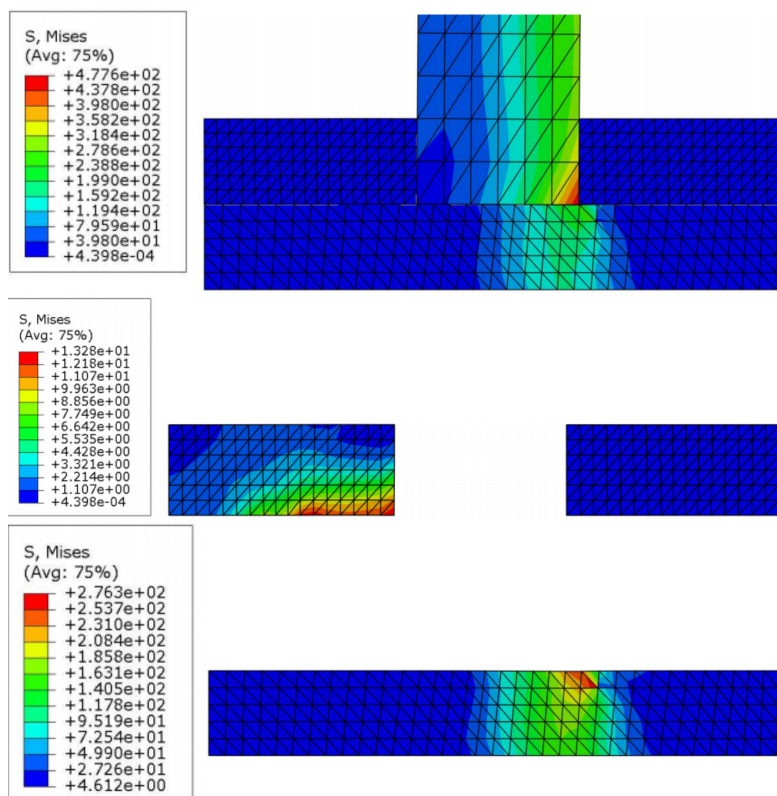


Figura 2. Tensões geradas no modelo CAE

que eram respectivamente 12 mm e 4 mm. A tensão máxima encontrada nesses indivíduos foi na faixa dos 15 MPa, que é metade do limite permitido pela guia (30 MPa). Na Fig. 3 encontra-se os resultados do arquivo de texto gerado.

Geracao 0	Geracao 24
parametros: [[[11.8571], [4.0]], [[6.8571], [3.0]], [[8.8571], [3.0]]]	parametros: [[[11.8571], [3.0]], [[11.8571], [3.0]], [[11.8571], [3.0]]]
0: tensao: 15.708773613, espessura: 11.8571, raio: 4.0	0: tensao: 15.0480422974, espessura: 11.8571, raio: 3.0
1: tensao: 15.352224426, espessura: 6.8571, raio: 3.0	1: tensao: 15.0480422974, espessura: 11.8571, raio: 3.0
2: tensao: 15.6613607407, espessura: 8.8571, raio: 3.0	2: tensao: 15.0480422974, espessura: 11.8571, raio: 3.0
3: tensao: 15.7247581482, espessura: 11.7143, raio: 2.0	3: tensao: 15.0480422974, espessura: 11.8571, raio: 3.0
4: tensao: 16.0234489441, espessura: 11.0, raio: 2.0	4: tensao: 15.0480422974, espessura: 11.8571, raio: 3.0
5: tensao: 20.0104427338, espessura: 3.1429, raio: 1.0	5: tensao: 15.0480422974, espessura: 11.8571, raio: 3.0
6: tensao: 18.0272464752, espessura: 3.5714, raio: 3.0	6: tensao: 15.0480422974, espessura: 11.8571, raio: 3.0
7: tensao: 17.3361854553, espessura: 4.4286, raio: 3.0	7: tensao: 15.0480422974, espessura: 11.8571, raio: 3.0
8: tensao: 15.6682081223, espessura: 11.8571, raio: 2.0	8: tensao: 15.0480422974, espessura: 11.8571, raio: 3.0
9: tensao: 17.2978591919, espessura: 10.1429, raio: 1.0	9: tensao: 15.0480422974, espessura: 11.8571, raio: 3.0
10: tensao: 18.0272464752, espessura: 3.5714, raio: 3.0	10: tensao: 15.0480422974, espessura: 11.8571, raio: 3.0
11: tensao: 15.2942066193, espessura: 11.1429, raio: 3.0	11: tensao: 15.0480422974, espessura: 11.8571, raio: 3.0
12: tensao: 16.5165405273, espessura: 5.0, raio: 3.0	12: tensao: 15.0480422974, espessura: 11.8571, raio: 3.0
13: tensao: 15.5732221603, espessura: 10.4286, raio: 3.0	13: tensao: 15.0480422974, espessura: 11.8571, raio: 3.0
14: tensao: 17.881937027, espessura: 9.2857, raio: 1.0	14: tensao: 15.0480422974, espessura: 11.8571, raio: 3.0
15: tensao: 17.4918365479, espessura: 11.4286, raio: 1.0	15: tensao: 15.0480422974, espessura: 11.8571, raio: 3.0
16: tensao: 17.9482517242, espessura: 6.0, raio: 1.0	16: tensao: 15.0480422974, espessura: 11.8571, raio: 3.0
17: tensao: 15.4516267776, espessura: 9.2857, raio: 3.0	17: tensao: 15.0480422974, espessura: 11.8571, raio: 3.0
18: tensao: 15.1413879395, espessura: 7.1429, raio: 3.0	18: tensao: 15.708773613, espessura: 11.8571, raio: 4.0
19: tensao: 16.2155456543, espessura: 5.2857, raio: 2.0	19: tensao: 15.0480422974, espessura: 11.8571, raio: 3.0

Figura 3. Resultados gerados no arquivo de texto

4 Conclusões

O estudo preliminar apresentado é um bom indício que a guia cirúrgica feita em impressora 3D possui a capacidade de resistir aos esforços às quais é submetida durante a cirurgia de osteotomia periacetabular. Também é

possível notar a possibilidade do uso de Algoritmos Genéticos em conjunto com o Método dos Elementos Finitos para resolver problemas de otimização em biomecânica.

Para estudos posteriores, a pretensão é aplicar um estudo tridimensional que, apesar de ser mais próximo do real, leva muito mais tempo do que a análise apresentada. A nível de comparação, uma análise tridimensional desse tipo similar a apresentada aqui, sem o algoritmo de otimização, leva cerca de duas horas para ser efetuada, enquanto que todas as quinhentas análises bidimensionais levaram cerca de três horas para serem finalizadas.

Agradecimentos. Os autores agradecem à Universidade Federal de Juiz de Fora pela concessão de auxílios e bolsas de iniciação científica que proporcionaram o desenvolvimento deste trabalho e a continuidade deste estudo.

Declaração de autoria. Os autores confirmam que são os únicos responsáveis pela autoria deste trabalho, e que todo o material aqui incluído como parte do presente artigo é propriedade (e autoria) dos autores, ou tem a permissão dos proprietários para serem incluídos aqui.

Referências

- [1] Souza, B. G. S. & Bastos, F. S., 2020. Three-dimensional digital surgical planning and rapid prototyped surgical guides in bernese periacetabular osteotomy. *Case Reports in Orthopedics*.
- [2] Silva, F. G., 2017. Projeto de guia adaptável no quadril em plástico abs para a cirurgia de osteotomia periacetabular.
- [3] Dalstra, M., Huiskes, R., Odgaard, A., & Van Erning, L., 1993. Mechanical and textural properties of pelvic trabecular bone. *Journal of biomechanics*, vol. 26, pp. 523–535.
- [4] AK Steel, 2007. *420 stainless steel data sheet*. AK Steel Corporation.
- [5] Askeland, D. R. & Phulé, P. P., 2008. Cengage Learning.
- [6] İplikçioğlu, H. & Akça, K., 2002. Comparative evaluation of the effect of diameter, length and number of implants supporting three-unit fixed partial prostheses on stress distribution in the bone. *Journal of Dentistry*, vol. 30, pp. 41–46.
- [7] Simulia, 2013. *Abaqus Scripting Reference Guide*. Dassault Systèmes Simulia Corp.
- [8] Arora, R. K., 2015. CRC Press.
- [9] Garcia, P. H., 2013. Aplicação de um algoritmo genético para a determinação da orientação ótima de um mini-implante ortodôntico visando à minimização da tensão no sistema mini-implante/maxila. *Princípio: Caminhos da Iniciação Científica*.