



APLICAÇÃO DE ALGORITMO GENÉTICO ACOPLADO AO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS NO PLANEJAMENTO CIRÚRGICO TRIDIMENSIONAL OTIMIZADO DA OSTEOTOMIA PERIACETABULAR

Daniel Souza Ferreira, Universidade Federal de Juiz de Fora, danielsouza.ferreira@estudante.ufjf.br, <http://orcid.org/0000-0002-5155-4973>

Marcus Vinícius de Souza Ferraz, Universidade Federal de Juiz de Fora, marcus.ferraz@engenharia.ufjf.br, <http://orcid.org/0000-0002-7083-1657>

Flávia de Souza Bastos, Universidade Federal de Juiz de Fora, flavia.bastos@engenharia.ufjf.br, <http://orcid.org/0000-0001-9573-8996>

Bruno Gonçalves Schröder e Souza, Universidade Federal de Juiz de Fora, brunogss01@yahoo.com.br, <http://orcid.org/0000-0002-8394-6840>

Sara Del Vecchio, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais, sara.vecchio@ifsudestemg.edu.br, <http://orcid.org/0000-0002-8060-7958>

Resumo. A displasia do desenvolvimento do quadril (DDQ) é uma patologia que se caracteriza pela relação anormal entre cabeça femoral e acetábulo. A osteotomia periacetabular (OPA) é uma cirurgia preservadora do quadril, que visa corrigir a DDQ, através do reposicionamento da articulação coxofemoral. Tendo em vista a complexidade apresentada, tanto pela curva de aprendizado quanto pela realização do procedimento cirúrgico, com o objetivo de auxiliar o cirurgião em sua realização, este trabalho consiste no desenvolvimento e implementação de ferramentas computacionais para auxílio no planejamento cirúrgico, na tentativa de encontrar os ângulos de rotação que correspondam ao melhor cenário ou posição ótima para o fragmento acetabular que reflitam em uma maior área de contato e menores pressões de contato na interface de interesse. Assim sendo, busca-se aplicar um algoritmo genético em conjunto com simulações via método dos elementos finitos por meio do software ABAQUS, em um modelo geométrico obtido através de uma tomografia computadorizada de uma paciente específica. Foram realizados testes analisando a reposição dos indivíduos por intermédio de 3 técnicas cujos resultados de reorientações do acetábulo apresentaram melhora da área de contato entre as superfícies, com valores de aptidões próximos. Isso leva a concluir que o método utilizado apresenta-se como uma ferramenta promissora no campo das cirurgias preservadoras do quadril, especialmente no planejamento cirúrgico.

Palavras chave: displasia do desenvolvimento do quadril, osteotomia periacetabular, algoritmo genético, método dos elementos finitos, otimização

1. INTRODUÇÃO

Na ortopedia, diversas deformidades patológicas do quadril que causam limitações físicas, desconforto e dor intensa se enquadram em uma grande parcela dos desafios encarados pela área. Tais problemas, se identificados e tratados previamente, podem ser revertidos, consequentemente melhorando a qualidade de vidas dos pacientes acometidos.

A displasia do quadril, considerada a causa mais comum de artrose do quadril (DEZATEUX; ROSENDAHL, 2007) é definida como uma deformidade congênita e de desenvolvimento caracterizada pela má orientação e pela redução da área de contato entre o fêmur e o acetábulo. Nos pacientes acometidos, essa redução provoca, na realização de atividade cotidianas, um aumento da pressão de contato na articulação do quadril.

A artrose do quadril se encaixa como a doença reumática mais prevalente entre indivíduos cuja idade supera os 65 anos. Estudos americanos apontam que mais de 50 milhões de pessoas sofrem com essa enfermidade (COIMBRA et al., 2004), sendo que 10% da população mundial acima dos 60 anos é afetada, 80% dessa parcela apresentam restrições nos movimentos e 25%, limitações funcionais ao realizar atividades do dia-a-dia (CORTI; RIGON, 2003).

Nesse contexto, uma opção de tratamento escolhida para pacientes sintomáticos maduros com displasia do quadril sem desenvolvimento da osteoartrose é o procedimento cirúrgico denominado osteotomia periacetabular de Bernese-Ganz (SOUZA et al., 2020; LEUNIG; GANZ, 1998). Esse procedimento propõe uma remodelação cirúrgica do cingulo pélvico com o objetivo de mudar a biomecânica patológica do quadril, rotacionando e fixando o acetábulo em uma angulação que aumente a superfície de carga enquanto mantém ou melhora a estabilidade articular (RODRIGUES et al., 2018).

A osteotomia periacetabular possui algumas vantagens quando comparada a outros tipos de osteotomias da pelve (RO-



DRIGUES et al., 2018). Contudo, esse procedimento é extremamente complexo e exigente com uma curva de aprendizado acentuada. Existe a possibilidade de ocorrerem complicações diretamente relacionadas à técnica utilizada, como fraturas intra-articulares, fraturas na coluna posterior e danos vasculares a estruturas e nervos (SOUZA et al., 2020). O sucesso do procedimento cirúrgico e da correção posterior ao mesmo está intimamente ligada à condição clínica do paciente, em conjunto com a gravidade da doença, além da experiência do cirurgião (ZOU et al., 2013).

Nesse contexto, o uso de ferramentas computacionais no planejamento cirúrgico, além de viável, vem se mostrando bem eficaz, auxiliando o cirurgião, ao aumentar a precisão cirúrgica e acurácia do procedimento (LIU et al., 2014). Diversos autores reportam vantagens potenciais ao utilizar esses recursos, como economia de tempo de cirurgia e uma diminuição nas taxas de complicações (SOUZA et al., 2020; LEUNIG; GANZ, 1998).

Uma interessante abordagem de otimização é encontrada no Algoritmo Genético (AG). O algoritmo genético consiste em um algoritmo evolutivo que se baseia em técnicas baseadas na teoria evolutiva de Darwin, adotando conceitos como mutação, hereditariedade, seleção natural e crossing-over. Segundo essa teoria, os seres sofrem mutações no decorrer de suas gerações, de maneira que os mais aptos, considerados melhores, sobrevivem aos outros. Inspirando-se nesses conceitos do processo evolutivo, ao adaptarmos os mesmos para outros problemas, podemos atingir uma varredura eficiente em espaços de busca, com o objetivo de se atingir resultados mais próximos da melhor solução possível (SILVA, 2011).

Diferentemente do escopo manual da otimização verificado em trabalhos recentes (ZOU et al., 2013), e tendo em vista que não se verificaram estudos relacionados com a implementação de algoritmos genéticos na otimização de variáveis necessárias no planejamento cirúrgico de cirurgias preservadoras do quadril, é interessante o estudo dessa abordagem a fim de auxiliar o cirurgião nas decisões do pré-operatório da cirurgia de osteotomia periacetabular.

Assim sendo, esse trabalho busca a implementação de um Algoritmo Genético em conjunto com análises biomecânicas pelo método dos elementos finitos, a fim de otimizar o procedimento de reorientação angular do acetábulo, adotado pelo cirurgião ao realizar a cirurgia de osteotomia periacetabular.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Detalhes de modelagem e implementação computacional são apresentados nesta seção. Para avaliar a aplicabilidade do algoritmo genético (AG) acoplado às simulações por elementos finitos via ABAQUS, para o planejamento cirúrgico da osteotomia periacetabular, levou-se em consideração um estudo de caso, descrito nas subseções seguintes. Desta forma, foram necessários o desenvolvimento e execução de vários procedimentos, divididos em etapas de acordo com o fluxo-grama representado na Fig. (1).

2.1 Construção do Modelo Geométrico

Ao utilizar ferramentas computacionais no planejamento cirúrgico da osteotomia periacetabular, o cirurgião pode vir a trabalhar com modelos geométricos baseados na anatomia do quadril do paciente. Uma forma de obter esse modelo é através de uma tomografia computadorizada da pelve e do fêmur que, com auxílio do software InVesalius 3.0, pode ser convertida em um formato utilizável em programas de modelagem tridimensional tipo CAD (Computer-assisted design = desenho assistido por computador).

O modelo geométrico utilizado no presente trabalho foi obtido de um estudo recente (SOUZA et al., 2020), onde uma paciente do sexo feminino (28 anos, dentista, branca, brasileira) compareceu à consulta relatando dor inguinal direita há um ano e desconforto trocântérico em períodos prolongados e foi avaliada e diagnosticada com displasia do quadril direito.

As imagens resultantes da tomografia computadorizada foram importadas para o software InVesalius 3.0 no formato eletrônico DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) e convertidas para o formato STL. Contudo, ao gerar a imagem facetada que simula o objeto original, o software InVesalius acaba por gerar arquivos que possuem um número extremamente grande de pontos, o que se torna necessário o tratamento e suavização da malha, que especificamente neste trabalho, se deu através do software Meshmixer. A etapa final da construção do modelo geométrico consistiu em preservar as características refinadas apenas das áreas de interesse para a simulação, eliminando e simplificando consideravelmente as restantes áreas dos objetos, de modo a tornar a simulação menos custosa computacionalmente.

2.2 Modelagem Computacional via ABAQUS

Nessa etapa busca-se adaptar o modelo geométrico construído para a realização de uma simulação utilizando elementos finitos no software ABAQUS. Dessa forma, será possível avaliar o impacto que a reorientação do fragmento acetabular gera no contato entre a cavidade acetabular e a cabeça do fêmur ao analisarmos grandezas como a pressão e a área de contato.



2.2.1 Adaptação das características do modelo geométrico ao importar para o ABAQUS

As imagens obtidas no formato (.stl) consistem em malhas superficiais, e para atribuir características aos materiais é necessário modificar a malha superficial para uma malha volumétrica (modelo sólido). Este procedimento é realizado através de ferramentas no software ABAQUS. Em seguida, são obtidos os modelos tridimensionais que definem a geometria do fêmur e da pelve.

No espaço livre entre o acetábulo e a cabeça femoral dos modelos, foi criada uma cartilagem pélvica de 0,5 mm de espessura, suficiente para preencher a região de tecidos moles, pois a conversão da imagem DICOM não foi capaz de capturar a cartilagem real do quadril da paciente. Esta é considerada uma limitação do modelo, pois revela que a etapa de segmentação da imagem não foi suficientemente precisa, gerando pouco espaço para a construção da cartilagem.

Com a intenção de se evitar penetrações indesejadas no decorrer da otimização ao rotacionar a pelve, além da criação da cartilagem via offset, foi realizado um pequeno deslocamento negativo do objeto fêmur nos eixos X e Z, no sentido contrário ao deslocamento que será imposto na simulação.

Foi criado um ponto de referência (Reference Point) nas coordenadas do centroide da cabeça do fêmur. A posição de cada coordenada foi calculada utilizando ferramentas nativas do ABAQUS com base em propriedades de massa do próprio objeto, resultando em 105.75 mm no eixo X, -208.02 mm no eixo Y e 161.74 mm no eixo Z.

2.2.2 Propriedades dos materiais

As propriedades de cada material foram definidas de acordo com Lippert (2000) e Zou et al. (2013). Vale ressaltar que os materiais referentes ao fêmur, a pelve e sua cartilagem foram definidos como homogêneos - possuindo as mesmas propriedades em toda sua extensão, isotrópicos - com propriedades igualitárias em todas direções e com comportamento linearmente elástico, de maneira que sua deformação varia de forma linear a tensão aplicada. Para os ossos do fêmur e pelve foram adotados Módulo de Elasticidade (E) = 17 GPa e coeficiente de Poisson (ν) = 0,3. Para a cartilagem, assumiu-se E = 15 GPa e ν = 0,45.

2.2.3 Superfícies de contato e interações

Foram definidas 2 superfícies para o modelo total, uma representando a cabeça femoral e outra relacionada com a cartilagem gerada pelo offset na cavidade acetabular. Vale ressaltar que as superfícies foram determinadas através de seleção manual, com destaque para a cartilagem, onde se realizou a seleção unitária de cada ponto de interesse presente. A determinação do contato em si foi formulada com base na opção surface to surface, sendo a superfície da cabeça do fêmur atribuída como mestra (master) e a da cartilagem como aprendiz (slave). Tal atribuição evita a sobreposição das partes envolvidas ao realizar a simulação, como se uma superfície fosse capaz de enxergar a outra. Foram definidas para as interações propriedades que permitissem as mesmas simularem um baixo coeficiente de atrito entre suas partes quanto às direções tangenciais locais (frictionless) e considerar apenas a resistência com relação à penetração normal (hard contact).

2.2.4 Condições de contorno e restrições

O modelo da pelve foi engastado nas regiões que fixam o modelo local ao restante do corpo, ou seja, nos planos das osteotomias, conforme se verifica na Fig. (2). Quanto ao modelo do fêmur, os nós pertencentes a superfície de sua cabeça foram acoplados ao ponto referente ao centróide do mesmo, definido previamente, através de uma restrição de acoplamento cinemático. Dessa forma o fêmur irá se movimentar em conjunto com o ponto de referência, cujo movimento foi restringido na direção do eixo Y e mantido livre nos eixos X e Z. Para a movimentação do fêmur em si, foi estipulado um deslocamento de 1,1 mm na direção X e 3,3 mm na direção Z. De acordo com a restrição reference ao acoplamento cinemático do mesmo em relação ao centróide, a imposição do movimento foi feita no ponto de referência.

2.2.5 Steps

Um step denominado "Contato" foi criado com a finalidade de realizar a análise do problema por um período de 1 s. Estabeleceu-se um número máximo de incrementos igual a 100 com tamanho inicial de 0,1 s, com posterior aumento definido de forma automática. Devido a característica geometricamente não linear de todo problema de contato, a opção de não-linearidade geométrica foi ativada. Assim como em trabalhos anteriores (ZOU et al., 2013) as simulações foram realizadas considerando a posição ortostática da articulação coxofemoral, onde o indivíduo se encontra de pé.

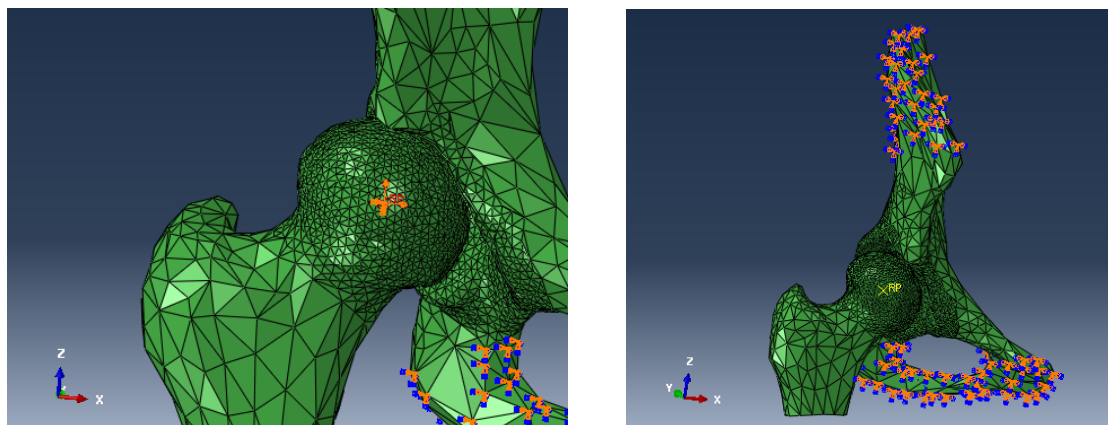


Figure 1. Condições de contorno e restrições aplicados na pelve e fêmur

2.3 Implementação do algoritmo genético (AG)

O algoritmo foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação Python, o que facilitou sua integração com o software ABAQUS. Estabelecendo um paralelo com o conceito de otimização, as características do problema apresentado e a simulação de interesse, buscou-se realizar uma série de testes analíticos que correspondessem ao contato estabelecido entre a cabeça do fêmur e o acetábulo do paciente, sob diferentes angulações. Deve-se então utilizar alguma estratégia que possibilite escolher de forma inteligente esses ângulos, visando obter melhores resultados. A estratégia de otimização seguida pelo AG levará em conta os resultados anteriores a fim de promover uma “evolução” dos resultados posteriores. Deve-se então adaptar o que determinará um indivíduo presente na população, que terá influência nas populações de gerações futuras. Para representar um indivíduo foi implementada uma classe denominada "Individual". Tal classe terá como campos principais:

- Um atributo *index* assumindo um valor numérico, que funcionará como uma forma de identificação do indivíduo perante os demais. (Ex: Indivíduo 3 possui index igual a 3);
- Três atributos (*x angle*, *y angle*, *z angle*) responsáveis por armazenar os valores dos ângulos nos quais o acetábulo será rotacionado;
- Um atributo *fitness value* para armazenar o valor de aptidão do indivíduo.

Tendo em vista que o objetivo principal da realização da osteotomia periacetabular é o de diminuir a dor do paciente na região do quadril ao se movimentar, o interesse é analisar as grandezas referentes a pressão de contato e a área de contato resultantes da simulação em elementos finitos.

Algo que se observou ao realizar testes envolvendo o AG para o problema foi que, ao rotacionarmos a pelve em diferentes angulações, a simulação era afetada das seguintes formas:

- A simulação rodava em toda sua completude, retornando sucesso;
- A simulação retornava sucesso porém o contato entre o fêmur e o acetábulo não ocorria;
- A simulação não rodava em sua completude e retornava erro.

Tais pontos se apresentaram como um desafio na determinação da forma de avaliação dos resultados, uma vez que indivíduos com simulações que retornavam erro poderiam influenciar negativamente no desempenho do genético, na possibilidade de favorecer um indivíduo com base em um resultado “falso”, e indivíduos que retornavam sucesso mas não estabeleciam contato eram mais numerosos que os que estabeleciam de fato.

A estratégia adotada baseou-se em provocar um deslocamento no fêmur que muito provavelmente provocaria um erro na simulação, porém possibilitaria o contato e a análise dos resultados obtidos até o ponto em que a simulação foi abortada. Para que essa análise fosse justa e não favorecesse um indivíduo que prosseguiu mais em sua simulação, ou até mesmo a completou, tendo em vista a extrema dificuldade de prever quais angulações resultariam em erro ou sucesso na simulação, optou-se por normalizar o ponto de análise das simulações obtidas.

Os resultados das simulações no ABAQUS são divididas em incrementos, o que torna possível verificar seus valores no decorrer da mesma. Dessa forma, verificou-se o incremento em que a pressão de contato máxima no acetábulo atingia



um valor limitante, a fim de realizar a análise dos resultados apenas no incremento em questão. O valor limitante foi adotado com base em estudos preliminares (FERRAZ et al., 2021), verificando que o valor de 13.5 MPa era condizente com indivíduos válidos.

Na análise em si, optou-se por relacionar as duas grandezas da seguinte forma:

$$F_i = p_i * a_i \quad (1)$$

sendo:

- i o primeiro incremento da simulação a atingir ou superar o valor limitante adotado;
- F_i a força resultante obtida com base nas pressões de contato e pela área de contato em todos os pontos do acetábulo no incremento i ;
- p_i a média das pressões de contato em cada ponto da superfície do acetábulo no incremento i ;
- a_i o somatório das áreas de contato em cada ponto da superfície do acetábulo no incremento i .

A otimização teve como finalidade identificar o indivíduo com maior valor no cálculo de F . A implementação das técnicas utilizadas foi fortemente baseada nas fundamentações de Arora (2019). A inicialização da primeira população foi feita de forma randômica, com auxílio da biblioteca *random*, tendo indivíduos possuindo material genético representado por codificação binária. Dessa forma outros 3 atributos da classe "Individual" foram necessários a fim de se armazenar o conteúdo dos genes para utilização em procedimentos do genético, como as mutações e recombinações. O escopo final da classe se encontra na Fig. (3).



Figure 2. Classe *Individual* representando o indivíduo de cada população e seus atributos

Foram obtidas, em conjunto com o cirurgião ortopedista responsável pela cirurgia da paciente cujo modelo computacional foi baseado, os limites de angulação nos planos x, y e z (Tab. (1)).

Table 1. Intervalos a serem adotados pelos ângulos de cada indivíduo gerado.

Eixo	Limite inferior	Limite superior
x	0	20
y	-35	0
z	0	15

Um resumo das estratégias adotadas se encontra na Tab. (2).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Seguindo os parâmetros da Tab. (2), as 3 tentativas realizadas foram concluídas em um tempo médio de 39,5 horas cada uma, realizando 460 simulações por tentativa. As Tabelas (3) e (4) apresentam os resultados obtidos pelas tentativas, em comparação com o modelo sem sofrer nenhuma rotação e o modelo cuja pelve sofreu rotação com base nos ângulos utilizados no planejamento via experiência médica:

Table 2. Parâmetros utilizados no Algoritmo Genético

Parâmetro	Valor
Codificação do genótipo	Binária (Cadeia de bits)
Probabilidade de recombinação	100%
Chance de ocorrer mutação	30%
Seleção dos genitores	Torneio
Formação da nova população	Parental (Elitismo) Regime Completa
Indivíduos por população	20
Número de gerações	22

Table 3. Comparação entre os ângulos do planejamento e dos resultados pelo AG (em graus)

Modelo	Ângulo X	Ângulo Y	Ângulo Z
Sem rotação	0	0	0
Planejamento	14.88	8.93	-28.38
AG Reposição completa	15.53	0.71	-26.90
AG Reposição em regime	19.92	0	-24.02
AG Reposição parental	12.31	5.18	-33.76

Table 4. Comparação dos valores obtidos na equação 1 com os resultados pelo AG

Modelo	p	a	F
Sem rotação	0.049693008395	19.3174531162	0.959942359873
Planejamento	0.127345098832	29.6218593121	3.77219860169
AG Reposição completa	0.161678056668	59.1008890867	9.5553168949
AG Reposição em regime	0.171045980983	56.2053272724	9.61369533977
AG Reposição parental	0.163768445583	49.1064937413	8.04209414805

Ao analisar os resultados da Tab. (3), é perceptível que os valores de X e Z tiveram uma aproximação considerável quanto aos ângulos utilizados no planejamento. Tal aproximação não se reflete na escolha do ângulo em Y, uma vez que, de acordo com os resultados pela função objetivo, os melhores valores serão atingidos em um ângulo Y que se aproxima a 0 graus.

A Tabela (4) contém os valores assumidos pela função utilizada e suas variáveis para cada caso. De acordo com a função objetivo adotada, o melhor resultado foi alcançado ao se utilizar o AG com reposição em regime, seguidos



da reposição completa e parental. Como esperado, o modelo cuja pelve não sofreu nenhuma rotação apresenta o pior resultado com relação ao valor F . O modelo que utilizou os ângulos baseados no planejamento indicam uma melhora quando comparados ao valor de aptidão obtido pela posição original da pelve, o que demonstra a capacidade da função escolhida em indicar melhoras consideráveis na área de contato quanto a reorientação do acetábulo.

Os valores obtidos para a na tabela 4 demonstram a melhora na área de contato obtida tanto pela reorientação com base no planejamento médico quanto pelos resultados obtidos pelas 3 tentativas.

Algo a se considerar é que, mesmo obtendo um bom resultado, a reposição completa talvez não seja a técnica mais indicada para resolução do problema, considerando que não necessariamente um resultado bom, como o presente na tabela, será alcançado. Tal raciocínio vem do fato de que o resultado exibido não estava presente na última geração, uma vez que se observou que essa técnica não necessariamente irá melhorar os resultados ou garantir que os mesmos não irão piorar com o passar das gerações.

Na coluna referente aos valores de p é perceptível o valor consideravelmente pequeno obtido pelos modelos. Isso se deveu ao fato de que a média das pressões de contato foi calculada levando em consideração todos os pontos da superfície, de forma que nem todos os pontos foram submetidos a uma pressão, possuindo resultado nulo. Isso resultou em uma média extremamente pequena devido ao número de pontos na superfície. Tal característica, porém, não impactou, na prática, o cálculo do valor F , uma vez que todos os indivíduos possuíam o mesmo número de pontos na superfície em questão. Consequentemente isso também não impactou no cálculo, e posterior comparação, do valor de aptidão entre os indivíduos.

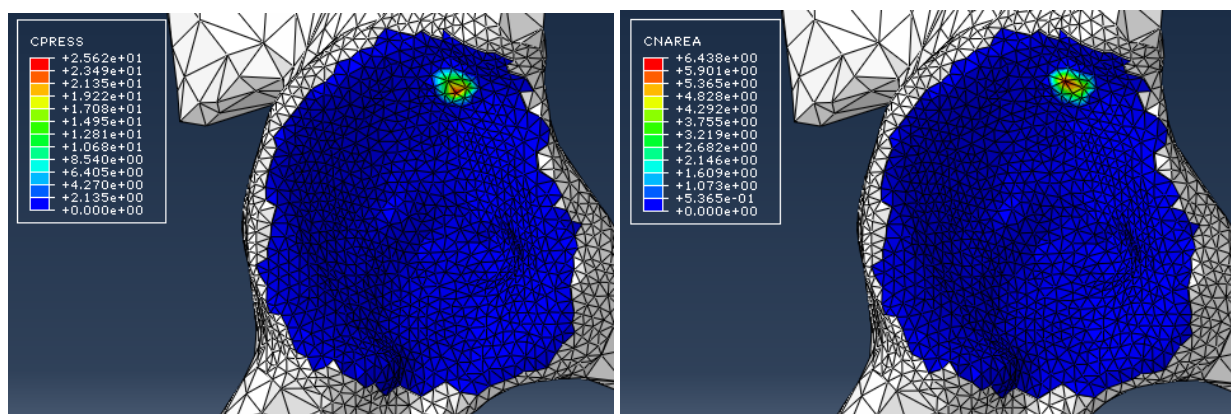


Figure 3. Resultados obtidos com o modelo rotacionado com base nos ângulos utilizados no planejamento médico

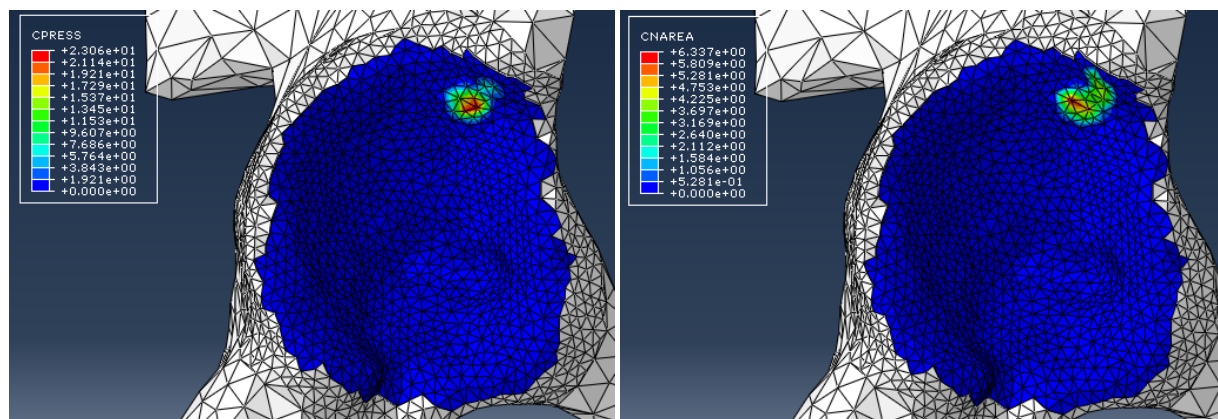


Figure 4. Resultados obtidos com o modelo rotacionado para o melhor resultado obtido pelo AG com reposição em regime

A Figura (3) apresenta os resultados de pressão de contato e área de contato na cartilagem pélvica para o modelo planejado pelo cirurgião ortopedista através de sua experiência médica. Enquanto que a Fig. (4) ilustra os resultados



obtidos pelo modelo gerado pela técnica de reposição em regime (melhor resultado em termos de F). É possível verificar que, embora a pressão de contato não tenha sido menor no segundo caso em comparação com o primeiro, a área de contato é relativamente maior no segundo, como se vê na Figura 4. Diante desse fato, pode vir a ser interessante o uso de uma função objetivo que considere outros fatores do modelo.

4. CONCLUSÃO

Através da análise dos valores numéricos obtidos pelas grandezas biomecânicas analisadas, e da visualização dos mesmos na interface gráfica do ABAQUS, conclui-se que uma otimização do planejamento cirúrgico da cirurgia, aliando o uso do AG com simulações utilizando o MEF, além de possível, permite um *feedback* quanto a qualidade biomecânica que a mudança da reorientação do fragmento acetabular ocasionará para o paciente que será submetido ao procedimento.

5. REFERÊNCIAS

- ARORA, R. K. **Optimization: algorithms and applications**. [S.l.]: Chapman and Hall/- CRC, 2019
- COIMBRA, I. et al. Osteoartrite (artrose): tratamento. **Revista Brasileira de Reumatologia**, SciELO Brasil, v. 44, p. 450–453, 2004.
- CORTI, M. C.; RIGON, C. Epidemiology of osteoarthritis: prevalence, risk factors and functional impact. **Aging clinical and experimental research**, Springer, v. 15, n. 5, p. 359–363, 2003.
- DEZATEUX, C.; ROSENDAHL, K. Developmental dysplasia of the hip. **The Lancet**, vol. 369, no. 9572, pp. 1541–1552, 2007. Disponível em: <[https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736\(07\)60710-7/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(07)60710-7/fulltext)>. Acesso em: 15 jan. 2022. doi: 10.1016/S0140-6736(07)60710-7.
- FERRAZ, M. V. S.; SOUZA, B. G. S.; BASTOS, F. S.; VECCHIO, S. D. Validação biomecânica do planejamento cirúrgico digital tridimensional para osteotomia periacetabular do quadril. **53º Congresso Brasileiro de Ortopedia e Traumatologia**, 2021.
- LEUNIG, M.; GANZ, R. The bernese periacetabular osteotomy. *Der Orthopäde*, Springer, v. 27, n. 11, p. 743–750, 1998.
- RODRIGUES, V. d. B. et al. Osteotomia periacetabular do quadril para tratamento da displasia residual: resultados preliminares. **Revista brasileira de ortopedia**, SciELO Brasil, v. 53, p. 332–336, 2018.
- SILVA, F. B. S. Algoritmos genéticos para otimização de estruturas reticuladas baseadas em modelos adaptativos e lagrangeano aumentado, **Dissertação de Mestrado**. Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora. 2011.
- SOUZA, B. G. Schröder e et al. Three-dimensional digital surgical planning and rapid prototyped surgical guides in bernese periacetabular osteotomy. **Case Reports in Orthopedics**, Hindawi, v. 2020, 2020.
- ZOU, Z. et al. Optimization of the position of the acetabulum in a ganz periacetabular osteotomy by finite element analysis. **Journal of Orthopaedic Research**, Wiley Online Library, v. 31, n. 3, p. 472–479, 2013.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e à UFJF pelo apoio financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa e publicação do presente artigo.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.