

Ferramenta computacional para planejamento cirúrgico tridimensional otimizado da osteotomia periacetabular de Ganz via Algoritmos Genéticos e Método dos Elementos Finitos

Marcus V. S. Ferraz¹, Flávia S. Bastos², Sara D. Vecchio³

¹Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional
Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)
Caixa Postal 20010 – 36036-900 – Juiz de Fora – MG – Brasil

²Departamento de Mecânica Aplicada e Computacional
Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) – Juiz de Fora, MG – Brasil.

³Departamento de Mecânica
Instituto Federal Sudeste de Minas Gerais (IFSUDESTEMG) – Juiz de Fora, MG – Brasil

marcus.ferraz@engenharia.ufjf.br, flavia.bastos@ufjf.br, sara.vecchio@ifsudestemg.edu.br

Resumo. *Este estudo desenvolve uma ferramenta computacional para o planejamento cirúrgico otimizado da osteotomia periacetabular (OPA) em pacientes com displasia do desenvolvimento do quadril (DDQ). A ferramenta é testada em casos de deformidades articulares nos quadris, utilizando parâmetros biomecânicos. O planejamento é conduzido por um cirurgião especializado, baseado em imagens de tomografia computadorizada, e as correções são otimizadas através de análise com elementos finitos e um algoritmo genético. A precisão das correções é comparada com modelos pré-operatórios e planejados virtualmente, demonstrando melhor desempenho. Os ajustes propostos pela técnica evolucionista são validados clinicamente, mostrando melhorias nos casos testados.*

1. Introdução

A displasia do quadril, comumente associada à artrose antes dos 50 anos de idade [Dezateux and Rosendahl 2007] é uma condição congênita caracterizada pela má orientação e redução da área de contato entre o fêmur e o acetábulo, sendo corrigida por técnicas operatórias de preservação do quadril [Chegini et al. 2009]. O diagnóstico por imagem da displasia acetabular é feito por meio de avaliação radiográfica de parâmetros morfológicos do quadril, permitindo uma avaliação abrangente da displasia ou do impacto femoroacetabular [Galeano et al. 2018].

A Osteotomia Periacetabular (OPA) é o tratamento preferido para pacientes com displasia sintomática, visando melhorar a cobertura da cabeça femoral e reduzir as pressões na articulação [Goetz et al. 2021]. Reconhecida pela complexidade técnica, a OPA enfrenta desafios devido à difícil acessibilidade da região de interesse e à limitação na visualização dos ossos [Fukushima et al. 2017].

O planejamento cirúrgico computadorizado tem se mostrado eficaz na realização da OPA, proporcionando maior precisão e acurácia durante a cirurgia [Liu et al. 2016].

Nesse processo digital, o cirurgião utiliza ferramentas de modelagem geométrica para definir as osteotomias na pelve e redirecionar o acetábulo, visando aumentar a cobertura da cabeça femoral de acordo com a técnica original, com base nos parâmetros clínico-radiográficos considerados normais [Souza 2020].

Este estudo combina modelagem computacional com o Método dos Elementos Finitos (MEF) e otimização por algoritmos genéticos para personalizar o planejamento cirúrgico de preservação do quadril, visando aumentar a segurança dos procedimentos e alinhar-se com a visão da Saúde 4.0 [Souza 2020], oferecendo potencial para automação e parametrização de procedimentos cirúrgicos futuros. Essa abordagem inovadora, centrada em parâmetros biomecânicos, promete desenvolver uma ferramenta para o Planejamento Cirúrgico Tridimensional Otimizado na Osteotomia Periacetabular (OPA) de Ganz, melhorando resultados clínicos de forma eficiente, reproduzível e economicamente vantajosa, com potencial para beneficiar também o Sistema Único de Saúde (SUS).

2. Materiais e Métodos

Inicialmente, para o desenvolvimento desta pesquisa, foi realizada uma revisão sistemática da literatura. Nesta, verificou-se que vários pesquisadores na área têm aplicado ferramentas de análise de elementos finitos para validar a biomecânica do planejamento cirúrgico de forma manual. Isso é feito para determinar a melhor posição do fragmento acetabular, levando em consideração a variação de parâmetros clínicos e anômicos [Chegini et al. 2009, Zou et al. 2013, Liu et al. 2016, Goetz et al. 2021, Kitamura et al. 2022].

Vale ressaltar que este trabalho contou com a parceria de um médico especialista em ortopedia e traumatologia, o qual contribuiu fornecendo imagens e modelos geométricos tridimensionais originais e planejados de três pacientes (aprovação pelo Comitê de Ética em Pesquisa sob números CAAE: 67752823.1.0000.5103 e CAAE: 67752823.1.0000.5103).

As imagens de tomografia computadorizada (TC) dos pacientes são processadas no *software InVesalius 3.0*, convertidas em formato *.stl* para modelagem tridimensional. Após a segmentação, o *software* oferece ferramentas de pós-processamento para ajustes antes da exportação. Em seguida, o *Meshmixer* é utilizado para suavizar e corrigir a malha, facilitando a manipulação dos arquivos. Nesse ambiente, o cirurgião realiza a simulação virtual da osteotomia periacetabular de Ganz, reposicionando o fêmur para restaurar a anatomia do quadril e girando o fragmento acetabular para alcançar os parâmetros radiográficos normais.

A metodologia apresentada neste estudo parte: (1) dos modelos geométricos originais (anormais) e, (2) dos modelos planejados pelo cirurgião. Duas propostas são testadas com base em (1) e (2), respectivamente, na tentativa de maximizar uma função objetivo que corresponda a um melhor cenário biomecânico e garanta também o reposicionamento espacial acetabular ideal (ângulos nas direções x , y e z) e correção da displasia do quadril:

1. No primeiro item, o modelo pré-operatório é o ponto de partida. Neste caso, a cabeça do fêmur do lado afetado é deslocada para uma nova posição para alinhar corretamente com a cabeça femoral do lado oposto (normal). A partir do **modelo pré-operatório**, o centróide da cabeça do fêmur do lado afetado é deslocado para

uma nova posição, a fim de garantir o alinhamento correto com a cabeça femoral do lado oposto (normal). A este modelo gerado é aplicado o AG.

- No segundo item, o ponto de partida é o modelo de elementos finitos resultante do **planejamento digital** baseado em parâmetros clínico-radiográficos, realizado pelo ortopedista. Este é submetido a uma análise de otimização, por meio do AG.

São comparadas quatro condições para cada um dos três estudos de caso analisados: pré-operatória (M1), planejada pelo ortopedista (M2), e otimizadas utilizando duas abordagens distintas: (1) otimização com base no modelo pré-operatório (M3), e (2) otimização do modelo planejado pelo ortopedista, considerando parâmetros clínico-radiográficos (M4).

Os modelos biomecânicos desenvolvidos [Ferraz 2023] são construídos no programa de elementos finitos, Abaqus®. Eles envolvem a geometria do problema, a atribuição das propriedades dos materiais envolvidos, a seleção de etapas de simulação, a aplicação de carregamento e das condições de contorno e contato.

O processo de otimização automática do posicionamento acetabular utilizando o modelo de elementos finitos é apresentado detalhadamente no fluxograma da Figura 1.

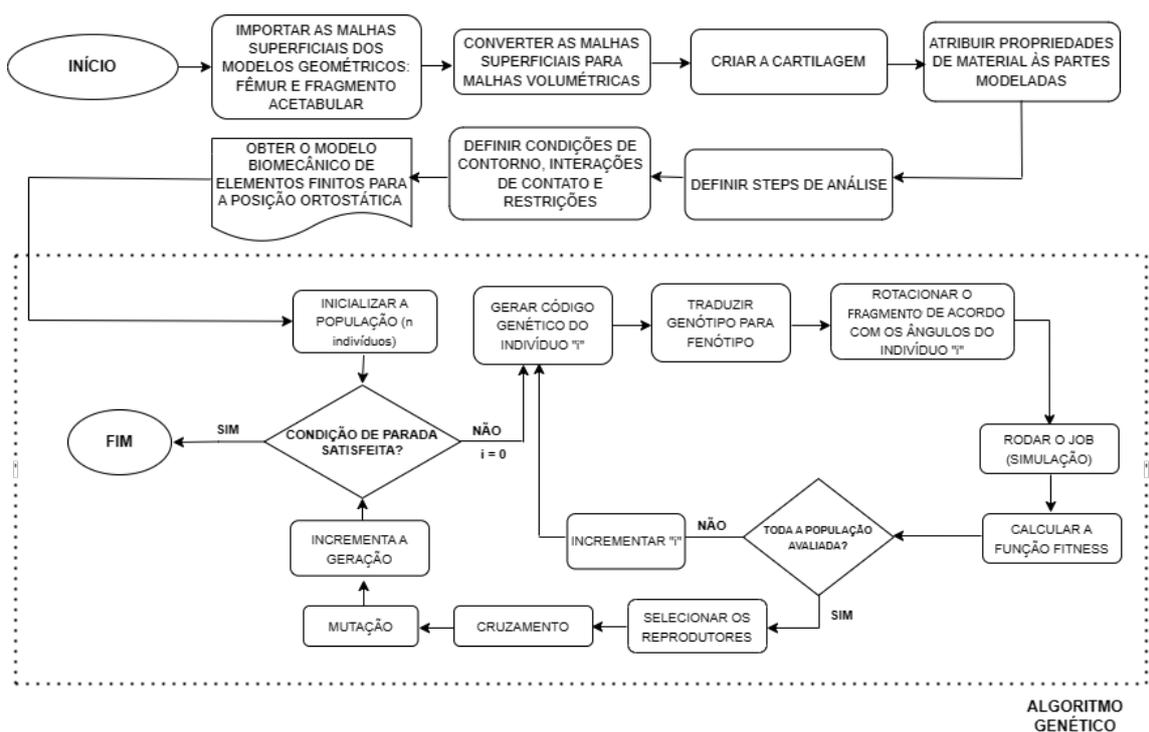


Figura 1. Etapas para modelagem e simulação do problema.

Um algoritmo em *Python* integrado ao *software* ABAQUS é utilizado para otimizar o posicionamento acetabular por meio de elementos finitos (cujo processo é ilustrado na Figura 1). O Algoritmo Genético seleciona os melhores ângulos (em x, y, e z) para o planejamento cirúrgico, considerando a evolução dos resultados ao longo das iterações. Cada indivíduo na população é representado por uma classe que armazena os ângulos de rotação do acetábulo e seu valor de aptidão. A análise dos resultados é realizada considerando o incremento em que a pressão de contato máxima atinge um valor limitante,

com base em estudos preliminares para cada caso. A função objetivo maximiza a força resultante das pressões de contato e a área de contato na cartilagem acetabular, excluindo os indivíduos que não atingem o valor limite para a pressão de contato máxima (detalhes em [Ferraz 2023]).

Para obter mais detalhes sobre as etapas da modelagem em elementos finitos e construção do Algoritmo Genético (AG), recomenda-se consultar [Ferraz 2023].

3. Resultados e Discussão

Quanto à avaliação da Pressão de Contato (CPRESS) Máxima e da Área de Contato (CNAREA) Máxima na cartilagem coxofemoral, os modelos otimizados (M3 e M4) demonstraram desempenho superior em comparação com os modelos pré-operatório e planejado pelo ortopedista em todos os estudos de caso. Apresenta-se aqui o resultado detalhado para o Estudo de Caso 1, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Comparação entre os modelos: Estudo de Caso 1

Modelo	p (MPa)	a (mm ²)	F (N)
M1 (pré-operatório)	0,1251	147,8244	18,4857
M2 (Planejamento digital)	0,2993	135,1456	40,4535
M3 (otimizado - estratégia 1)	0,4815	187,4748	90,2611
M4 (otimizado - estratégia 2)	0,5509	203,1447	111,9203

Considerando o problema de maximização da função objetivo escolhida, definida pela força de contato na cartilagem em um determinado incremento da simulação, os resultados indicam que o modelo M4 foi o mais eficaz entre os testados. O valor da função objetivo (F) para o M4 (111,9203 N) foi aproximadamente 6 vezes maior do que o do modelo pré-operatório (M1).

Além disso, o modelo M3 também obteve um resultado satisfatório ($F = 90,2611$ N). Embora o planejamento médico inicial tenha melhorado o quadro clínico em relação à situação patológica, os modelos de planejamento otimizado se destacaram. Especificamente, o modelo M4 foi identificado como a melhor escolha para aplicação clínica, apresentando um aumento de 24% em relação ao M3, conforme a função de aptidão.

Com relação aos demais Estudos de Caso (EC), destaca-se:

- O planejamento digital realizado pelo cirurgião ortopedista para o EC 2 foi satisfatório se comparado com a configuração pré-operatória, em função de F . Houve um aumento percentual de 452, 95% entre os modelos M1 e a M2.
- No EC 3, o modelo M3 apresentou um resultado satisfatório, com um aumento percentual de 261,73% em relação ao modelo M1. Ao comparar as duas estratégias utilizando AGs, M4 e M3, observa-se um aumento percentual de 68,21%, com maior destaque para o M4.
- Em todos os EC, observa-se um aumento médio na pressão de contato na cartilagem coxofemoral de M1 para M4, acompanhado de um aumento na área de contato a .

A Tabela 2 resume os ângulos de rotação do fragmento acetabular nos planos frontal (eixo z), sagital (eixo x) e transversal (eixo y) para os modelos M4 simulados em

todos os estudos de caso. Embora as configurações M2 e M3 também resultassem em melhora biomecânica do quadril afetado, o planejamento gerado pelo modelo M4 foi o mais recomendado, alinhando-se com os objetivos propostos na modelagem do problema.

Tabela 2. Ângulos do planejamento otimizado M4 (em graus)

Estudo de Caso	Ângulo X	Ângulo Y	Ângulo Z
1	-7,00	12,60	-4,60
2	10,90	-6,10	0,90
3	7,60	-0,10	0,20

Buscou-se ainda, determinar se os modelos planejados estão em conformidade com os valores normais estabelecidos para cada parâmetro clínico-radiográfico da literatura médica. Ao verificar se a correção foi adequadamente executada e se os resultados se alinham com os valores normais, pode-se confirmar a validade dos planejamentos e sua capacidade de produzir efeitos positivos quando aplicados clinicamente.

É possível confirmar que:

- Os modelos M1 de todos os estudos de caso mostraram ângulos CE e Tönnis fora dos limites normais, indicando displasia de quadril.
 - No estudo de caso 3, o modelo M1 apresentou valores próximos aos limites aceitáveis para o ângulo CE e o ângulo de Tönnis (23° e 14°, respectivamente).
- O planejamento cirúrgico realizado pelo cirurgião (M2) obteve resultados satisfatórios dentro dos parâmetros normais em todos os estudos de caso.
- Embora os estudos de caso 1 e 3 tenham apresentado parâmetros radiográficos dentro dos limites aceitáveis, o estudo de caso 2 obteve um ângulo de Tönnis de -4°.
 - Isso indica a necessidade de validar os parâmetros usados para garantir a viabilidade e confiabilidade do planejamento M3 em todos os casos.
- Os valores dos parâmetros radiográficos em M4 indicam que essa estratégia foi a melhor e pode ser aplicada clinicamente, validando o planejamento executado.

Vale ressaltar que o planejamento otimizado M4 dos estudos de caso 2 e 3 foram empregados para corrigir a displasia de desenvolvimento do quadril das pacientes em estudo (aplicados na prática), e foram cruciais para alcançar uma melhora biomecânica dos quadris afetados e, conseqüentemente, obter sucesso na cirurgia, validando assim o método proposto, clinicamente.

4. Conclusão

O estudo investigou estratégias de otimização para um planejamento cirúrgico tridimensional da OPA, visando ajudar ortopedistas a decidir o melhor posicionamento do fragmento acetabular, considerando as características individuais dos pacientes. Os resultados foram positivos para os casos estudados, mostrando que o modelo corrigido teve melhor desempenho do que o modelo patológico e o modelo planejado digitalmente. Esse planejamento pré-cirúrgico pode ser utilizado para criar guias cirúrgicos personalizados, auxiliando na colocação precisa do fragmento acetabular durante a cirurgia, o que pode reduzir o tempo cirúrgico e minimizar complicações.

5. Contribuições científicas

Este trabalho contribuiu para diversas produções científicas, incluindo trabalhos completos publicados em anais de congressos (3) e artigos em periódicos especializados (1). Além disso, foi apresentado em conferências científicas e reconhecido com o Prêmio Gastão Velloso na Categoria Estudo Experimental no 53º Congresso Brasileiro de Ortopedia e Traumatologia (2021). A metodologia e os resultados parciais também foram fundamentais para o desenvolvimento de um projeto na Med3D Soluções Médicas Ltda. e para o depósito de uma patente de invenção junto ao INPI.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES pelo apoio concedido.

Referências

- Chegini, S., Beck, M., and Ferguson, S. J. (2009). The effects of impingement e dysplasia on stress distributions in the hip joint during sitting e walking: a finite element analysis. *Journal of Orthopaedic Research*, 27(2):195–201.
- Dezateux, C. and Rosendahl, K. (2007). Developmental dysplasia of the hip. *The Lancet*, 369(9572):1541–1552.
- Ferraz, M. V. d. S. (2023). Ferramenta computacional para planejamento cirúrgico tridimensional otimizado da osteotomia periacetabular de ganz via algoritmos genéticos e método dos elementos finitos.
- Fukushima, K., Takahira, N., Uchiyama, K., Moriya, M., and Takaso, M. (2017). Pre-operative simulation of periacetabular osteotomy via a three-dimensional model constructed from salt. *Sicot-j*, 3.
- Galeano, N. A., Uriel, E. D., Guinea, N. S., Molinero, J. G., Barez, M. G., and Garcia, E. B. (2018). Hallazgos radiológicos de la displasia de cadera en el adulto. *Seram*.
- Goetz, J. E., Thomas-Aitken, H. D., Sitton, S. E., Westermann, R. W., and Willey, M. C. (2021). Joint contact stress improves in dysplastic hips after periacetabular osteotomy but remains higher than in normal hips. *HIP International*, page 11207000211036414.
- Kitamura, K., Fujii, M., Iwamoto, M., Ikemura, S., Hamai, S., Motomura, G., and Nakashima, Y. (2022). Is anterior rotation of the acetabulum necessary to normalize joint contact pressure in periacetabular osteotomy? a finite-element analysis study. *Clinical Orthopaedics and Related Research*®, 480(1):67–78.
- Liu, L., Ecker, T., Schumann, S., Siebenrock, K., and Zheng, G. (2016). omputer assisted planning of periacetabular osteotomy with biomechanical optimization: Constant thickness cartilage models vs. patient-specific cartilage models. In *Computational Biomechanics for Medicine*, pages 3–13. Springer.
- Souza, B. G. S. (2020). Prototipagem rápida em cirurgia ortopédica de preservação do quadril. Master's thesis, Universidade Federal de Juiz de Fora.
- Zou, Z., Chávez-Arreola, A., Meal, P., Board, T. N., and Alonso-Rasgado, T. (2013). Optimization of the position of the acetabulum in a ganz periacetabular osteotomy by finite element analysis. *Journal of Orthopaedic Research*, 31(3):472–479.