

RELAÇÃO ENTRE RIGIDEZ DE FIXADOR EXTERNO E QUANTIDADE DE PINOS: ANÁLISE COMPUTACIONAL POR ELEMENTOS FINITOS

RELATIONSHIP BETWEEN RIGIDITY OF EXTERNAL FIXATOR AND NUMBER OF PINS: COMPUTER ANALYSIS USING FINITE ELEMENTS

Marcelo Back Sternick¹, Darlan Dallacosta², Daniela Águida Bento³, Marcelo Lemos do Reis⁴

RESUMO

Objetivo: Analisar a rigidez da montagem de um fixador externo tipo plataforma, segundo diferentes números de pinos em cada *clamp*. **Métodos:** Realizou-se simulação computacional do fixador externo dinâmico modelo Cromus tamanho grande (Baumer S.A.) por elementos finitos, conforme a norma ASTM F1541. Os modelos foram gerados com, aproximadamente, 450.000 elementos tetraédricos quadráticos. Compararam-se as montagens com dois, três e quatro pinos tipo Schanz com 5,5mm de diâmetro em cada *clamp*. Cada modelo foi submetido à força máxima de 200N, dividida em 10 *sub-steps*. Para os componentes foi assumido comportamento do material linear, elástico, isotrópico e homogêneo. Para cada modelo, avaliou-se a rigidez da montagem e a distribuição de tensão de Von Mises. **Resultados:** A rigidez do sistema foi de 307,6N/mm para dois pinos, 369,0N/mm para três e 437,9 N/mm para quatro. **Conclusão:** Os resultados demonstram que quatro pinos tipo Schanz por *clamp* promovem aumento de rigidez de 19% em relação à configuração com três e 42% em relação à configuração com dois. Maiores tensões ocorrem para configurações com menor quantidade de pinos. Nos modelos analisados, a tensão máxima ocorre na superfície do pino, próxima à área de fixação.

Descritores – Fixadores externos; Biomecânica; Estresse Mecânico.

ABSTRACT

Objective: To analyze the rigidity of a platform-type external fixator assembly, according to different numbers of pins on each *clamp*. **Methods:** Computer simulation on a large-sized Cromus dynamic external fixator (Baumer SA) was performed using a finite element method, in accordance with the standard ASTM F1541. The models were generated with approximately 450,000 quadratic tetrahedral elements. Assemblies with two, three and four Schanz pins of 5.5 mm in diameter in each *clamp* were compared. Every model was subjected to a maximum force of 200 N, divided into 10 *sub-steps*. For the components, the behavior of the material was assumed to be linear, elastic, isotropic and homogeneous. For each model, the rigidity of the assembly and the Von Mises stress distribution were evaluated. **Results:** The rigidity of the system was 307.6 N/mm for two pins, 369.0 N/mm for three and 437.9 N/mm for four. **Conclusion:** The results showed that four Schanz pins in each *clamp* promoted rigidity that was 19% greater than in the configuration with three pins and 42% greater than with two pins. Higher tension occurred in configurations with fewer pins. In the models analyzed, the maximum tension occurred on the surface of the pin, close to the fixation area.

Keywords – External fixators; biomechanics; mechanical stress.

INTRODUÇÃO

O uso de fixadores externos remonta desde os tempos de Hipócrates. Ao longo dos anos, diversas modificações foram feitas, seja com relação aos materiais em-

pregados como no *design* dos seus componentes, para que fosse possível ampliar sua estabilidade e minorar as complicações inerentes ao aparelho⁽¹⁾.

Após a Segunda Guerra Mundial, grandes avanços

1 – Ortopedista, Hospital Felício Rocho – Belo Horizonte, MG, Brasil.

2 – Engenheiro Mecânico e Mestre em Engenharia Mecânica com ênfase em Biomecânica, SCiTec – Florianópolis, SC, Brasil.

3 – Engenheira Mecânica e Doutora em Engenharia Mecânica com ênfase em Biomecânica, IF-SC – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Departamento de Metal Mecânica – Florianópolis, SC, Brasil.

4 – Ortopedista e Mestre em Ciências Médicas, Hospital Universitário da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) – Florianópolis, SC, Brasil.

Trabalho realizado no IF-SC – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Departamento de Metal-Mecânica – Florianópolis, SC, Brasil.

Correspondência Rua Patagônia 55/1.101 – 30320-080 – Belo Horizonte, MG. E-mail: marcelo.sternick@terra.com.br

Trabalho recebido para publicação: 21/09/2011, aceito para publicação: 09/02/2012.

Declaração de conflito de interesses: Um dos autores possui contrato de colaboração técnica com a Baumer S.A. (MBS).
Declaration of conflict of interests: One of the authors has a technical collaboration contract with Baumer S.A. (MBS).

Este artigo está disponível online nas versões Português e Inglês nos sites: www.rbo.org.br e www.scielo.br/rbort
This article is available online in Portuguese and English at the websites: www.rbo.org.br and www.scielo.br/rbort

foram feitos até chegarmos à moderna fixação externa, a partir da década 1970. Testes laboratoriais biomecânicos começaram a ser feitos até o estudo de Huiskes e Chao, que, pela primeira vez, padronizou estas análises para diversos tipos de fixadores externos⁽²⁾.

O primeiro estudo com elementos finitos envolvendo fixadores externos data de 1979. Desde então, esta técnica está sendo largamente utilizada para simular, utilizando modelos computacionais, as diversas situações referentes à montagem de um fixador externo.

Neste estudo, foi realizada uma simulação computacional do sistema de fixação externa a fim de fornecer valores de referência, que posteriormente poderão ser validados experimentalmente. Foi utilizado o método dos elementos finitos, a fim de estabelecer uma relação entre a rigidez da montagem e o número de pinos tipo Schanz utilizados no sistema.

MATERIAIS E MÉTODOS

Realizou-se simulação computacional do fixador externo dinâmico modelo Cromus tamanho grande (Baumer S.A.). Os modelos foram analisados levando em consideração os requisitos de montagem da norma técnica ASTM (*American Society for Testing and Materials*) F1541 – *Standard Specification and Test Methods for External Skeletal Fixation Devices* (Figura 1 e Tabela 1).

A distância P_o , localizada próximo ao foco da fratura, não pôde ser atendida devido às características geométricas do fixador. Os modelos foram analisados utilizando o pacote comercial NX Nastran, sendo gerados com aproximadamente 450.000 elementos tetraédricos quadráticos e sua malha pode ser vista na Figura 2.

Durante as análises, foram avaliadas três configurações de montagem:

Com dois pinos ósseos em cada uma das plataformas (superior e inferior), sendo eles na posição AA-DD;

Com três pinos ósseos em cada uma das plataformas (superior e inferior), sendo eles na posição AA-CC-DD;

Com quatro pinos ósseos em cada uma das plataformas (superior e inferior), sendo eles inseridos nas posições: AA-BB-CC-DD.

Foram utilizados pinos tipo Schanz com 5,5mm de diâmetro. As posições dos pinos podem ser vistas na Figura 3.

Cada modelo de fixador foi submetido a uma força máxima de 200N, equivalente à força axial máxima suportada por tais dispositivos durante a fase de recuperação do paciente⁽³⁾.

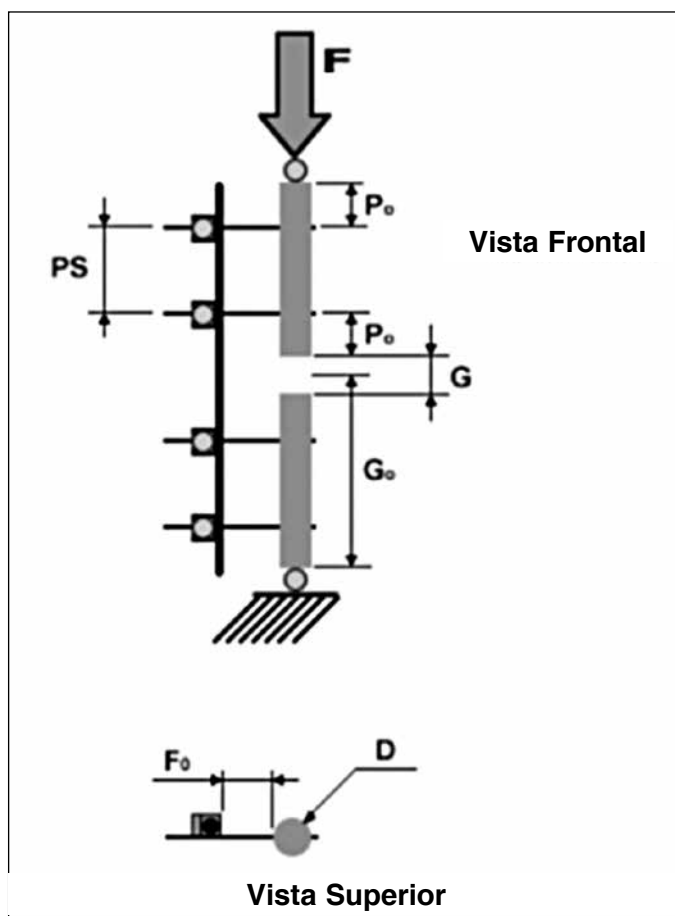


Figura 1 – Características de montagem conforme ASTM F1541.

Tabela 1 – Parâmetros de montagem.

| | |
|-------|--------|
| OS | 90 mm |
| F_o | 50 mm |
| G | 20 mm |
| D | 30 mm |
| P_o | 20 mm |
| G_o | 167 mm |

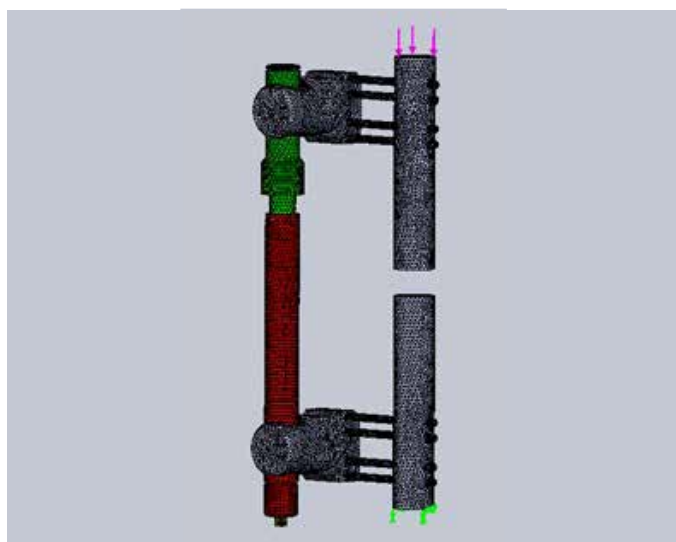


Figura 2 – Malha de elementos finitos.

A força foi aplicada perpendicularmente à face superior do substituto ósseo 1; enquanto isso, o substituto ósseo 2 permaneceu engastado na face inferior.

Para todos os componentes do sistema foi assumido que o comportamento do material é homogêneo, linear, elástico e isotrópico, definido pelo módulo de elasticidade E e pelo coeficiente de Poisson ν (Tabela 2).

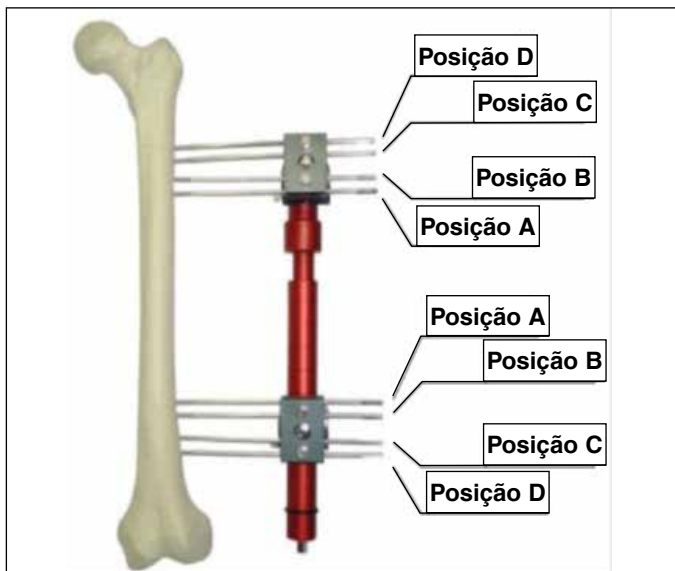


Figura 3 – Configurações de montagem.

Tabela 2 – Propriedades de material.

| Descrição | Material | E (GPa) | V |
|-----------------------------|---------------------------------------|---------|------|
| Parafuso Trava M-6 x 30,0mm | Aço Inoxidável Austenítico AISI 304 | 190 | 0,29 |
| Parafuso Trava M-6 x 45,0mm | | | |
| Suporte Trava | | | |
| Mola | | | |
| Parafuso Trava Clamp | | | |
| Porca M-6 | | | |
| Parafuso Fixo | | | |
| Barra Trava Rosqueada | | | |
| Parafuso M-6 | | | |
| Chave 7.0mm com cabo Longo | | | |
| Chave allen 2,5mm | Liga de Alumínio (6063-T5 ou 6351-T6) | 69 | 0,33 |
| Clamp Inferior para pino | | | |
| Clamp Superior para pino | | | |
| Articulador | | | |
| Haste Fixa | | | |
| Haste Móvel | | | |
| Corpo Trava Rosqueado | | | |
| Clamp Móvel | ASTM F138 | 192 | 0,3 |
| Pino de Schanz | | | |

RESULTADOS

Para cada um dos modelos analisados, foi avaliada a rigidez tangente do sistema. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Na Figura 4 (A, B e C) são apresentados os resultados de tensão máxima de von Mises para as três propostas de montagem avaliadas. Para força de 200N, pode

ser observado o campo de deslocamentos resultantes para as montagens (Figura 5 – A, B e C). Na imagem deformada a escala foi aumentada artificialmente, a fim de facilitar a visualização.

Tabela 3 – Rigidez do sistema.

| Configuração | Rigidez (N/mm) |
|---------------------------|----------------|
| Com 2 (dois) pinos ósseos | 307,6 |
| Com 3 (dois) pinos ósseos | 369 |
| Com 4 (dois) pinos ósseos | 437,9 |

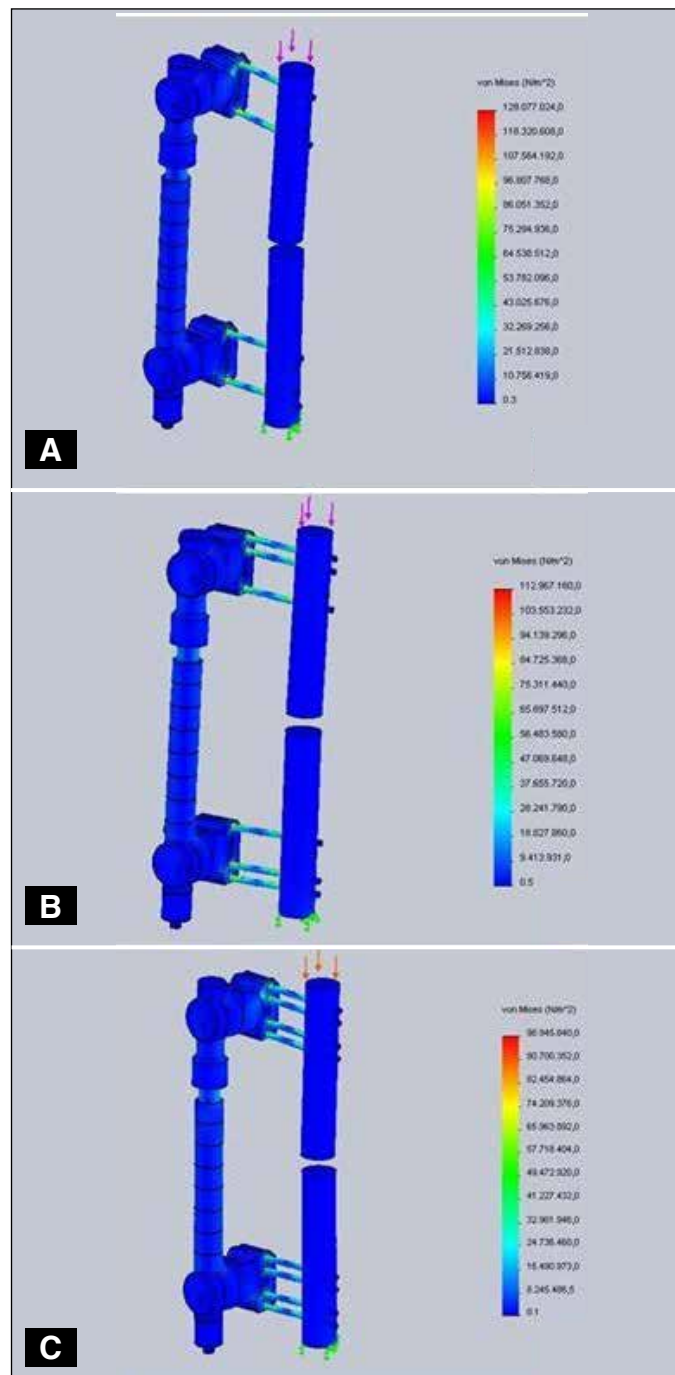


Figura 4 – Tensão de von Mises: (A) para configuração com quatro pinos; (B) para configuração com três pinos; (C) para configuração com quatro pinos.

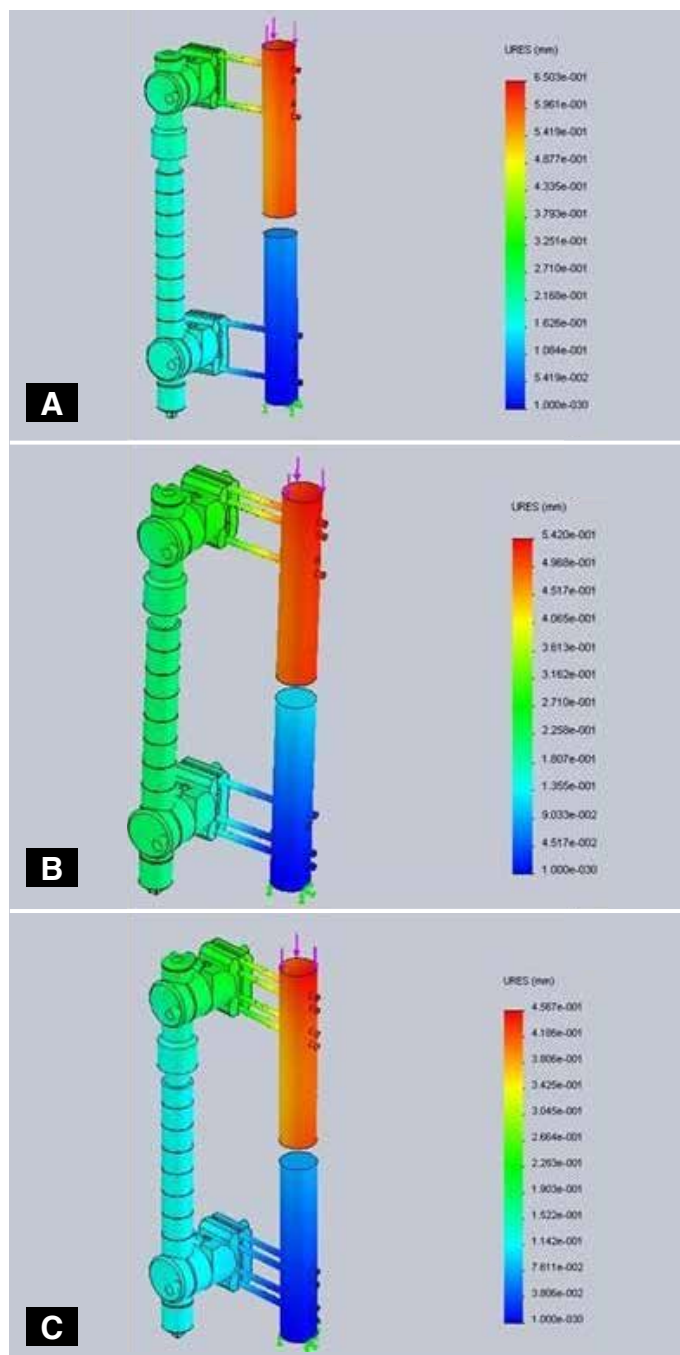


Figura 5 – Deslocamento resultante: (A) para configuração com quatro pinos; (B) para configuração com três pinos; C – para configuração com quatro pinos.

DISCUSSÃO

Nas últimas décadas, um enorme avanço ocorreu na fixação externa. Diversos aparelhos foram lançados, sempre buscando o que há de melhor em termo de componentes e *design*. Cada vez mais se fizeram necessários estudos biomecânicos para atestar a estabilidade do sistema. Huiskes e Chao, em 1986, foram os primeiros a padronizar estes estudos, lançando diretrizes para as avaliações biomecânicas⁽²⁾.

Atualmente, a norma técnica mais utilizada para avaliação de fixadores externos e seus componentes são as ASTM, sendo que a principal referência é a ASTM F 1541 – 02 (2011) – *Standard Specification and Test Methods for External Skeletal Fixation Devices*, que foi utilizada neste estudo⁽⁴⁾.

O primeiro trabalho com elementos finitos na fixação externa data de 1979, sete anos após o primeiro trabalho realizado por este método na ortopedia⁽⁵⁾. Desde então, diversos estudos foram feitos⁽⁶⁻¹¹⁾. Na literatura brasileira também foram publicados estudos utilizando esta técnica, mas não com simulação de fixador externo⁽¹²⁻¹⁴⁾.

Os pacotes comerciais de elementos finitos são ferramentas muito versáteis para avaliação da influência de parâmetros de montagem em relação à rigidez axial de um fixador externo em particular, devido à facilidade para alterar características geométricas da montagem e condições de contorno do modelo. A vantagem dos modelos computacionais com elementos finitos é a possibilidade de modificar diversos parâmetros de uma maneira sistemática e fácil⁽⁷⁾, avaliar a rigidez, sem a necessidade de testes experimentais⁽¹¹⁾, além de dispensar estudos em animais, situação cada vez mais difícil nos dias de hoje.

A estabilidade é a principal característica de um fixador externo. Entretanto, a rigidez do sistema deve permitir micromovimentos, que são necessários para o processo de consolidação óssea⁽¹¹⁾. Sabe-se, através de estudos em animais, que os movimentos interfragmentários devem ficar entre 0,2 a 1,0mm⁽¹⁵⁾. A estabilidade de um sistema depende tanto do aparelho e seus componentes (pinos, barras, *clamps*) como do paciente (tipo de fraturas, presença de doenças sistêmicas, qualidade do osso, infecção adquirida no sítio dos pinos etc), além da técnica empregada para a colocação e tempo de utilização. Dentre estes, o número de pinos empregados nos fragmentos ósseos é um dos parâmetros mais importantes, podendo, caso utilizado inadequadamente, levar a mudanças importantes na utilização do fixador⁽⁸⁾.

Por esta razão, utilizou-se a avaliação comparativa do fixador com diferentes quantidades de pinos em cada *clamp*, sabendo-se, previamente, que quanto maior a quantidade de pinos, maior a estabilidade. Assim, permitindo uma avaliação quantitativa de estabilidade do sistema, no que depende desta variável. Foi utilizado um fixador externo dinâmico tipo plataforma, composto por uma barra e dois *clamps* multiplanares, que permitem colocar até quatro pinos em cada segmento.

A distância Po não pôde ser atendida devido às

características construtivas do fixador Cromus. Esta distância é levada em conta somente para modelos de fixadores que são dotados de barras lisas e permitem a distribuição de pinos em qualquer local ao longo de seu comprimento. O aumento da distância P_o tende a aumentar a flexibilidade do sistema, porém não há variação do momento fletor. O sistema foi ensaiado conforme sua indicação de uso, o que tende a reproduzir com mais fidelidade o comportamento do fixador. A norma técnica serve como documento orientativo; portanto, permite que sejam efetuadas alterações de configuração, desde que sejam devidamente relatadas e consideradas. Deve-se ressaltar que os demais parâmetros foram mantidos conforme estabelecidos pela ASTM F1541.

O critério de tensão de von Mises é baseado na teoria de Mises-Hencky, também conhecida como teoria da máxima energia de distorção. A teoria diz que um material dúctil começa a falhar em um local onde a tensão equivalente de von Mises atinge o valor do limite de escoamento do material.

O objetivo do trabalho foi analisar a rigidez do conjunto e não determinar locais prováveis de ocorrência de falha. Na avaliação da rigidez, o sistema foi submetido a um estado de tensões que não resultaria em deformações plásticas dos componentes. Isso foi comprovado, pois todos os resultados de tensão equivalente de von Mises estão abaixo da tensão de escoamento dos materiais empregados na fabricação dos componentes.

As propriedades mecânicas foram obtidas das respectivas normas técnicas de matéria-prima; portanto, desconsideram-se variações abaixo dos limites mínimos estabelecidos pelas normas. Questões de acabamento superficial são irrelevantes neste tipo de análise, pois são controladas no processo de fabricação dos componentes.

REFERÊNCIAS

1. Sternick MB. A história da fixação externa. In: Andrade MAP, Silva WN, editores. Clínica ortopédica da SBOT. Avanços em alongamento e reconstrução óssea. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan; 2010. p. 98-103.
2. Huiskes R, Chao EY. Guidelines for external fixation frame rigidity and stresses. J Orthop Res. 1986;4(1):68-75.
3. Vijayakumar V, Marks L, Bremmer-Smith A, Hardy J, Gardner T. Load transmission through a healing tibial fracture. Clin Biomech (Bristol, Avon). 2006;21(1):49-53.
4. ASTM Comitee F04 on Medical and Surgical Materials and Devices. Designation F 1541-02. Standard Specification and Test Methods for External Skeletal Fixation Devices, 2002.
5. Huiskes R, Chao EY. A survey of finite element analysis in orthopedic biomechanics: the first decade. J Biomech. 1983;16(6):385-409.
6. Huiskes R, Chao EY, Crippen TE. Parametric analyses of pin-bone stresses in external fracture fixation devices. J Orthop Res. 1985;3(3):341-9.
7. Drijber FL, Finlay JB, Dempsey AJ. Evaluation of linear finite-element analysis models' assumptions for external fixation devices. J Biomech. 1992;25(8):849-55.
8. Juan JA, Prat J, Vera P, Hoyos JV, Sánchez-Lacuesta J, Peris JL, et al. Biomechanical consequences of callus development in Hoffmann, Wagner, Orthofix and Ilizarov external fixators. J Biomech. 1992;25(9):995-1006.
9. Koo TK, Chao EY, Mak AF. Fixation stiffness of Dynafix unilateral external fixator in neutral and non-neutral configurations. Biomed Mater Eng. 2005;15(6):433-44.
10. Radke H, Aron DN, Applewhite A, Zhang G. Biomechanical analysis of unilateral external skeletal fixators combined with IM-Pin and without IM-Pin using finite-element method. Vet Surg. 2006;35(1):15-23.
11. Watson M, Mathias KJ, Maffulli N, Hukins DW, Shepherd DE. Finite element modelling of the Ilizarov external fixation system. Proc Inst Mech Eng H. 2007;221(8):863-71.
12. Queiroz RD, Lima RG, Del Pino GG, Mestriner LA, Takata ET. Análise do desgaste do polietileno do componente acetabular da prótese total do quadril, utilizando o método de elementos finitos de simulação computadorizada. Rev Bras Ortop. 2001;36(5):149-54.
13. Soni JF, Santili C, Lancelotti CLP, Hecke MB, Almeida FR, Karam LZ. Análise comparativa em modelo computadorizado bidimensional em simulação do emprego de hastes flexíveis de aço e titânio, na fratura do fêmur na criança, utilizando o método de elementos finitos. Rev Bras Ortop. 2008;43(5):183-92.
14. Gabrieli APT, Lemos RR, Henrich CH. Ferramenta computacional para estudo da deformação e alterações estruturais musculares na paralisia cerebral espástica utilizando modelos obtidos através de imagens de ultrassom e ressonância magnética. In: VII Congresso Brasileiro de Ortopedia Pediátrica, Vitória, ES, 2006.
15. Claes LE, Wilke HJ, Augat P, Rübenacker S, Margevicius KJ. Effect of dynamization on gap healing of diaphyseal fractures under external fixation. Clin Biomech (Bristol, Avon). 1995;10(5):227-234.

O modelo real possui características, do ponto de vista estrutural, idênticas ao modelo numérico.

O modelo não foi submetido a tensões acima do limite de escoamento dos materiais; portanto, não incorreram deformações plásticas. A rigidez do sistema é determinada no regime elástico. Em termos de projeto, os componentes são projetados para trabalhar somente no regime elástico, ou seja, a ocorrência de plastificação tende a provocar falha funcional.

CONCLUSÃO

Os resultados demonstram que quatro pinos tipo Schanz por *clamp* promovem aumento de rigidez de 19% em relação à configuração com três e 42% em relação à configuração com dois.

As maiores tensões de von Mises ocorrem para as configurações com menor quantidade de pinos, pois, neste caso, as reações devem ser suportadas por uma quantidade menor de elementos. Para todos os modelos analisados, a tensão máxima ocorre na superfície dos pinos tipo Schanz, próximo à fixação, pois é o local com maior momento fletor e menor seção. Os principais parâmetros que influenciam na rigidez axial e distribuição de tensões na montagem são a quantidade de pinos e a distância F_o . Para esta condição, quanto menor for a distância F_o , maior será a rigidez e menor será o momento fletor, o que tende a diminuir as tensões de von Mises na montagem.

AGRADECIMENTOS

Nossos agradecimentos à Baumer S.A., por disponibilizar os modelos geométricos 3D do fixador utilizado e fornecer apoio técnico para realização do trabalho.