



PROJETO DE UM MECANISMO CAME PARA APLICAÇÃO DE TORÇÃO E ESTUDO DE ESFORÇOS EM VÉRTEBRAS LOMBARES

Edel Mary Quinn de Oliveira Figuerêdo¹, Alex Sandro de Araújo Silva² - Orientador

Resumo: Este trabalho teve por objetivo projetar um mecanismo came para realizar testes através do movimento de torção. A proposta era transformar um movimento de translação em rotação a partir de uma força compressiva. O artigo conta inicialmente com uma explanação teórica sobre mecanismos, o came e suas classificações, bem como sua aplicação diversificada na indústria e no dia-a-dia. O projeto se deu pela modelagem do mecanismo, melhorias e adaptações deste. A simulação foi realizada para obtenção de resultados aproximados do real, a qual nos deu a mobilidade de realizar alterações até atingir um resultado desejado. Os resultados foram mostrados graficamente e comparados para fins de discussão. No entanto, pode ser observado que um projeto de engenharia requer bem mais análises de projeto para estar finalizado.

Palavras-chave: mecanismo, came, dinâmica de multicorpos, simulação computacional;

1. INTRODUÇÃO

Na indústria, preza-se muito por máquinas automáticas que trabalhem com altas velocidade e precisão. Para isso, é necessário o projeto de um mecanismo que torne um maquinário cada vez mais superior ao outro, como resultado para uma boa produção. Segundo Norton [1], um mecanismo é um dispositivo, constituído de elos e juntas, que transforma um padrão de movimento em outro, ou seja, controla ou limita um movimento relativo. É utilizado para transmitir intensidades baixas de força e potência, em baixas velocidades de funcionamento.

Dentre os tipos de mecanismos, o mais simples e mais usual é o mecanismo de quatro barras. Ele é versátil em termos de tipos de movimentos que pode gerar, porém não é indicado para espaços limitados. Além disso, depende de parâmetros de funcionalidade e rotatividade no qual se não for bem dimensionado pode gerar travamento dos elos e impossibilitar o movimento. Uma outra alternativa dentre os mecanismos são os cames. Os cames são amplamente usados pela sua flexibilidade de se obter movimentos distintos e irregulares que seriam impossíveis de se conseguir através de um mecanismo de quatro barras.

Um came transmite movimento por contato direto. Neste tipo de mecanismo, o came é o membro condutor e o membro conduzido é denominado seguidor (*follower*). O seguidor pode permanecer parado, transladar, oscilar ou rotacionar [2]. Pode-se, através do came, especificar qualquer função de saída através do movimento do seguidor, colocando o came como um gerador de funções extremamente útil. Apesar de serem compactos, esses dispositivos são caros para serem fabricados, devido a sua geometria ser relativamente mais complexa. Além de que sofrem o efeito de desgaste devido às tensões sofridas pelo contato.

Para projetar um mecanismo é preciso ter concepção de como este funciona e de todas suas restrições, para que se possa tomar decisões que atendam a uma dificuldade específica, ponderando os critérios de segurança e viabilidade.

O objetivo desse estudo é projetar um mecanismo para que seja possível a realização de testes através do movimento de torção. A ideia é projetar um came que transforme uma força compressiva em movimento de torção para estudo de vértebras submetidas a esses esforços. O comportamento do osso humano sob influências de forças e momentos é afetado por suas propriedades mecânicas, características geométricas, o modo como as cargas são aplicadas, direção, razão e frequência da carga. O osso *in vivo* está sujeito a tensão, compressão, envergamento, deslizamento, torção e cargas combinadas [3]. Desse modo, surge a necessidade de avaliar a coluna sob um carregamento torcional de uma forma mais generalizada, aplicando-a na prática.

Serão utilizados *softwares* para modelagem 3D e para simulação da dinâmica de multicorpos. De posse dos dados será possível a otimização do came e obtenção de relações entre movimentos e esforços que representam a melhor biomecânica da coluna lombar.

2. APLICAÇÃO DE CAMES

Em sua forma geral, cames consistem em dois corpos de superfícies moldadas, um condutor e outro seguidor, ligados por um terceiro corpo que permanece fixo. Podem ser classificados de diversas maneiras: pelo tipo de movimento do seguidor, rotação ou translação; pelo tipo de came, radial, de rolete ou tridimensional; pelo tipo de fechamento da junta, de força ou de forma; pelo tipo de seguidor, curvo ou liso, rotacionando ou deslizando;

pelo tipo de movimento crítico, posição extrema crítica (PEC) ou percurso de movimento crítico (PMC); pelo tipo programado de movimentação, sobe-desce (SD), sobe-desce-para (SDP), sobe-para-desce-para (SPDP) [1].

A Figura 1 mostra um mecanismo came do tipo rotação de seguidor, que pode substituir um mecanismo de quatro barras equivalente. Os comprimentos dos elos são determinados por seus centros de curvaturas que passam em a e b . Quando os pontos a e b são deslocados, esses elos equivalentes possuem comprimentos diferentes, permitindo uma maior flexibilidade para movimentos mais críticos, gerando uma vantagem em relação ao movimento de quatro barras.

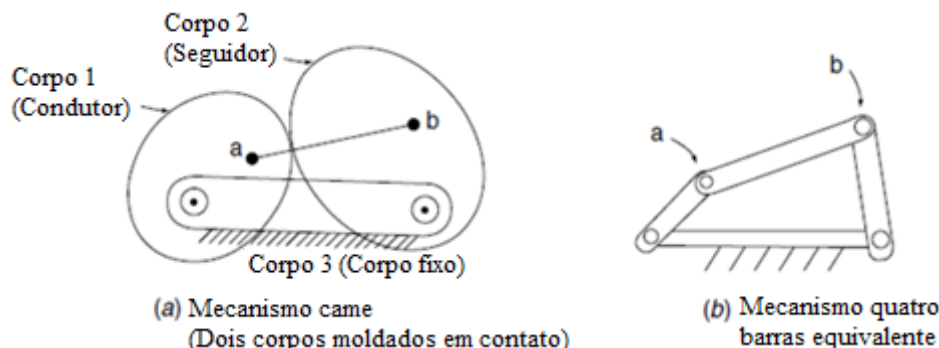


Figura 1. Mecanismo came de rotação do seguidor. (Adaptado de [2])

O campo de aplicação dos cames é muito vasto. Sua utilização se dá, geralmente, para o posicionamento de peças através de projeto pré-estabelecido. Mecanismos cames com seguidores são encontrados em diversos equipamentos e máquinas industriais, que vão desde equipamentos de transporte, têxteis, agricultura, combustão interna de motores de automóveis até, mais recentemente, micromáquinas que se utilizam de sistemas microeletromecânicos.

O sistema de cames mais comumente encontrado está localizado em eixos de comando de válvulas, em motores de combustão interna. Essa árvore de cames, como é também conhecido, regula a abertura e fechamento das válvulas de admissão e escape através da transformação de um movimento rotacional em movimento linear. Nesse mecanismo o formato excêntrico do came impacta diretamente no desempenho do motor. Sua construção deve levar em conta as considerações de projeto dos outros itens associados a ele, como as válvulas e o pistão. A mola de retorno é uma restrição do mecanismo e a área de deslocamento de sua curva é uma análise essencial de dimensionamento. A Figura 2, exemplifica alguns modelos de eixos de comando com características variadas.

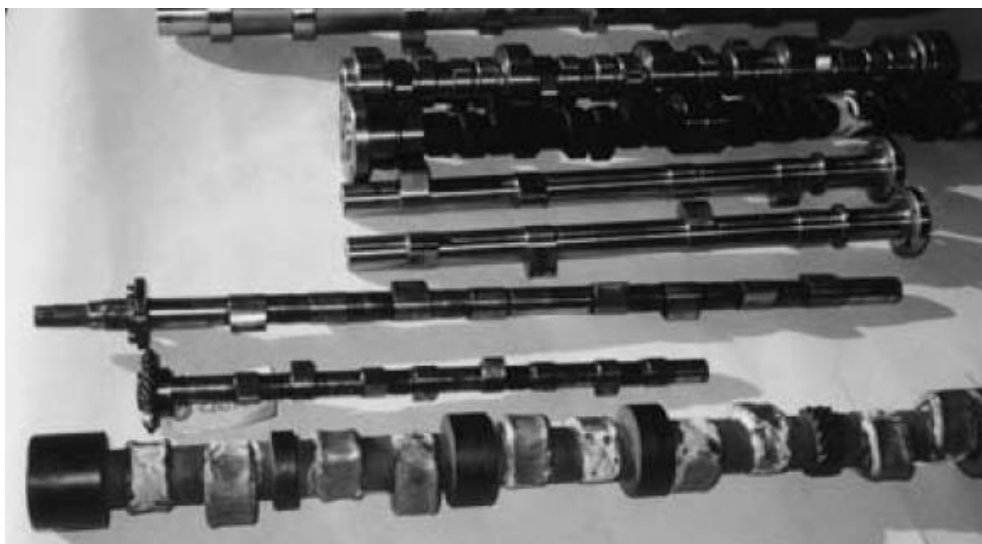


Figura 2. Eixos de comando automotivo. [1]

Um outro exemplo de mecanismo came é apresentado na Figura 3, no qual trata-se de um mecanismo de transferência da impressora. O seguidor é acelerado no sentido horário. O came 1 e o rolete 1 são empregados para o intervalo de espera inicial na parte da aceleração positiva da ação e o came 2 e rolete 2 para a porção de aceleração negativa até o período de espera. As engrenagens se entrelaçam durante os intervalos da ação.

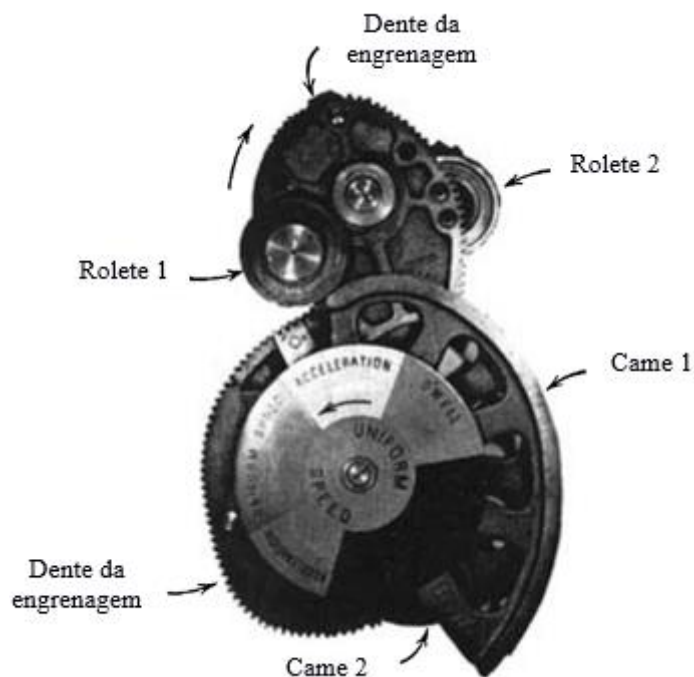


Figura 3. Mecanismo de transferência da impressora. (Adaptado de [2])

Citando outros, tem-se o mecanismo do relógio mecânico, onde utiliza-se um came para mover a engrenagem e conseqüentemente o ponteiro. Em máquinas operatrizes, os comes são utilizados para posicionamento de ferramentas de usinagem, bem como movimentação da peça usinada.

Com isso, a proposta apresentada neste artigo trata-se um mecanismo came que transforma um movimento linear de translação em um movimento de rotação. Essa transformação se dará através da aplicação de uma força axial de compressão no *slider* (condutor), que através de roletes fará um rotor (seguidor) rotacionar, chegando à proposta esperada.

3. METODOLOGIA

Neste trabalho, utilizaremos conceitos de metodologia de projeto para aplicar ao desenvolvimento do mecanismo came. Nosso objetivo é projetar um came que proporcione um movimento de rotação através da aplicação de uma força axial. Neste caso, a força axial implicará em um movimento de translação. Este came será utilizado, em trabalhos posteriores, para o estudo do comportamento biomecânico da vértebra lombar submetida a cirurgias de artrodese lombar, no qual poderá ser analisado o torque submetido, o deslocamento angular em função do deslocamento linear, força suportada, entre outras análises que se queira. Serão propostos dois modelos. O primeiro modelo (modelo base) trata-se de uma ideia inicial, no qual possui alguns detalhes mais rústicos, e foi pensado somente para geração do movimento e visualização funcional. O segundo modelo proposto é uma idealização do inicial e o objetivo é otimizar o melhor possível de um modelo real.

Para obtenção do mecanismo e de seus resultados serão utilizados dois *softwares* que serão responsáveis pela modelagem e simulação, respectivamente, no corrente artigo. A modelagem, será o passo inicial que dará forma ao came, será executada no NXTM 12. De posse do modelo, será realizada a simulação, para análise dinâmica e plotagem de gráficos, feita no RecurdynTM 9.2. Após a análise gráfica dos dois modelos, será incorporada uma comparação entre ambos. A Figura 4 mostra um fluxograma detalhando o passo-a-passo utilizado.

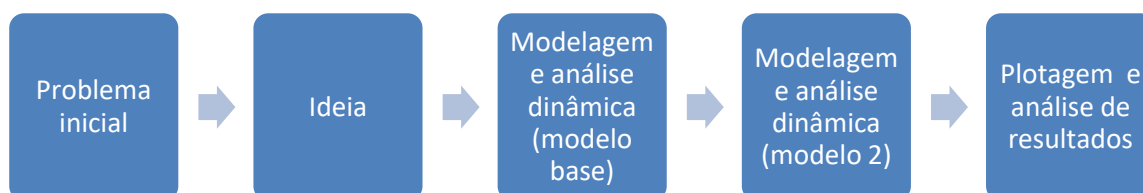


Figura 4. Fluxograma de detalhamento do projeto. (Autoria Própria)

4. MODELO BASE

4.1 Modelagem

A ideia inicial de modelagem do came para testes de torção é composta por três elementos: o *slider*, os roletes e o rotor, apresentados na Figura 6.

O rotor é o local no qual será acoplado o disco de vértebra lombar para testes. Possui quatro ranhuras (caminhos) helicoidais por onde deslizarão os quatro roletes que estão fixos no *slider*, o qual funciona como um condutor. À medida que é aplicada uma força compressiva no *slider*, os roletes caminharão pelas ranhuras fazendo-o transladar e causar rotação do rotor.

Um fator importante a ser considerado nesse momento é o ângulo de hélice, γ . O momento torçor (torque) de um elemento é causado pela parcela de força tangencial existente, F_T , enquanto que uma força normal, F_N , causa uma parcela de força axial. Quanto maior o ângulo de hélice maior a parcela de força tangencial e menor a parcela de força normal. O ideal para o projeto é reduzir ao máximo as forças tangenciais no rotor para que o movimento fique o mais próximo possível de uma compressão pura, Figura 5.

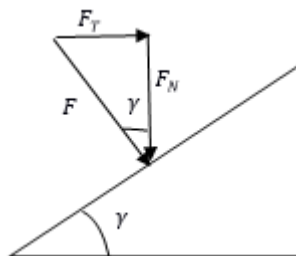


Figura 5. Esquema das forças envolvidas nas curvas helicoidais do rotor. (Autoria Própria)

4.2 Simulação

Para a simulação desse modelo foi acrescentado um par de molas, uma em cada lado do *slider*. Em uma das molas é aplicada uma força de translação, no qual simulará a aplicação da força de compressão no came para que haja o movimento de rotação, visto na Figura 7.

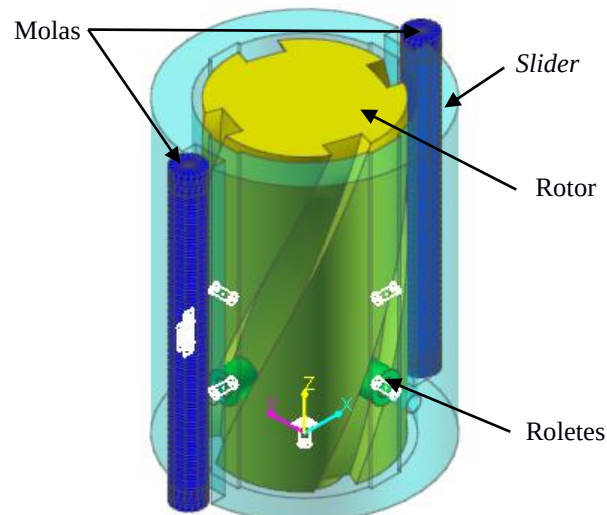


Figura 6. Identificação dos elementos do Modelo 1. (Autoria Própria)

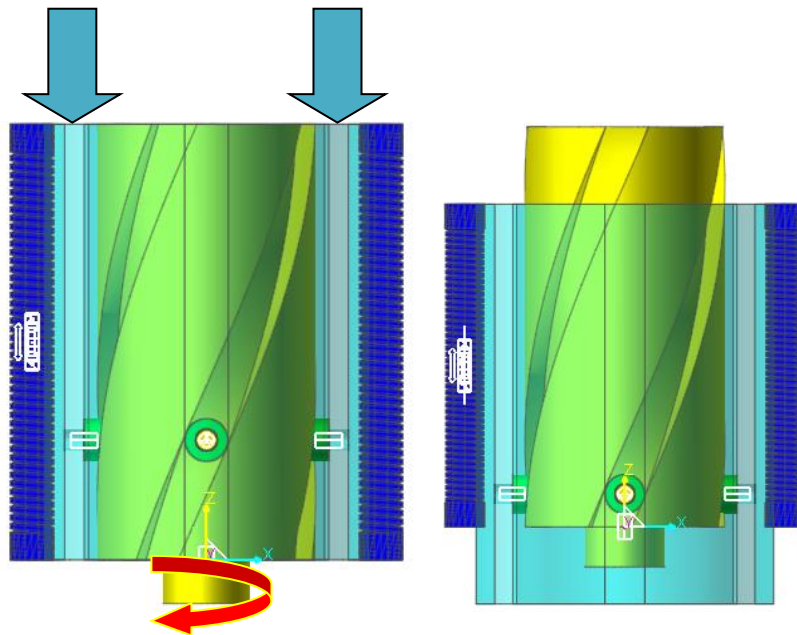


Figura 7. Movimentação do came. (Autoria própria)

5. SEGUNDO MODELO PROPOSTO

5.1 Modelagem

Com base na ideia primária, foi proposto um segundo modelo a fim de aprimorar as características do modelo base. Para tal, toda a modelagem foi aperfeiçoada. O *slider* se diferencia do modelo inicial pelo fato de ter um fechamento (tampa) superior, ao invés de ser totalmente vazado e um barramento para limitar o movimento. Este também apresenta os roletes passantes pela sua estrutura. Nos roletes, foram colocadas presilhas de fixação e acrescentadas buchas a fim de reduzir a trepidação causada pela força de fricção envolvida no contato e evitar que os roletes fizessem um movimento giratório. Um rolamento axial foi posto no rotor para suportar as cargas axiais envolvidas. As curvas helicoidais foram suavizadas com uma angulação nos cantos, com o intuito de propiciar uma diminuição da força de reação entre o rotor e os roletes e facilitar o deslizar entre ambos. Foram acrescentadas ao modelo duas ponteiros de fixação. A primeira, localizada na ‘tampa’ do *slider*, servirá para fixação do mecanismo à máquina de força envolvida. A segunda ponteira, localizada no rotor, servirá para acoplar o dispositivo de fixação da vértebra lombar. A Figura 8 detalha o modelo.

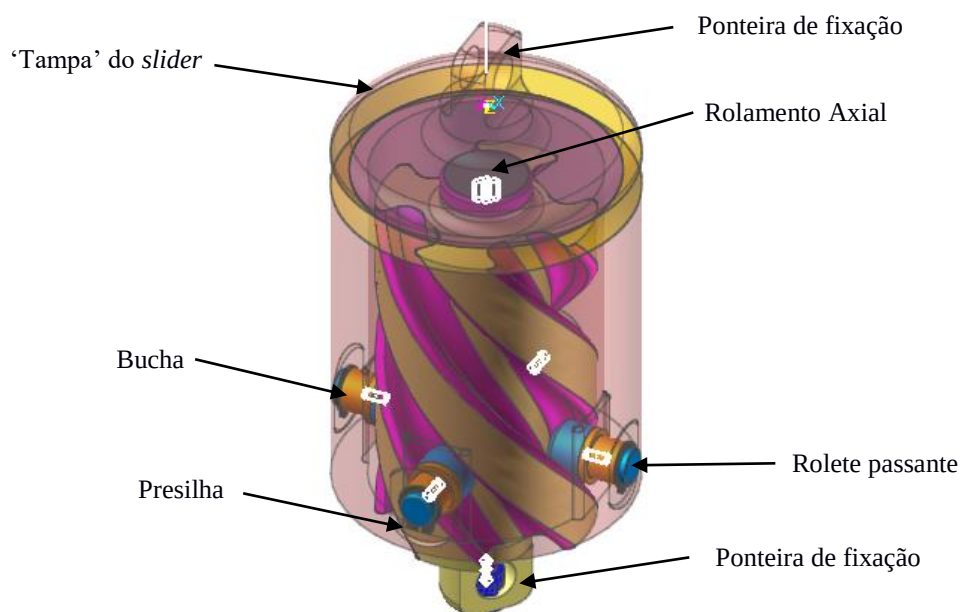


Figura 8. Identificação dos elementos do Modelo 2. (Autoria própria)

5.2 Simulação

Esta simulação levou em consideração algumas análises mais complexas para deixar o resultado o mais próximo do real possível. A força axial foi posta na ponteira de fixação do *slider*, para causar o movimento de translação. Na ponteira de fixação do rotor foi inserido um elemento elástico para simular a presença de um disco de vértebra. Para esse caso devemos considerar que o came é submetido a uma carga combinada de torção e compressão. Para o contato entre duas superfícies, rotor-rolete, foi considerado o Modelo de Contato de Hertz. Esse modelo explica a pressão envolvida entre duas superfícies de contato curvas, de raios diferentes, no qual uma pequena área de contato é criada através da deformação elástica, limitando as tensões consideráveis [4]. A Figura 9 mostra a simulação do segundo modelo, demonstrando seus dois movimentos e a Figura 10 mostra um esquema geral de montagem.

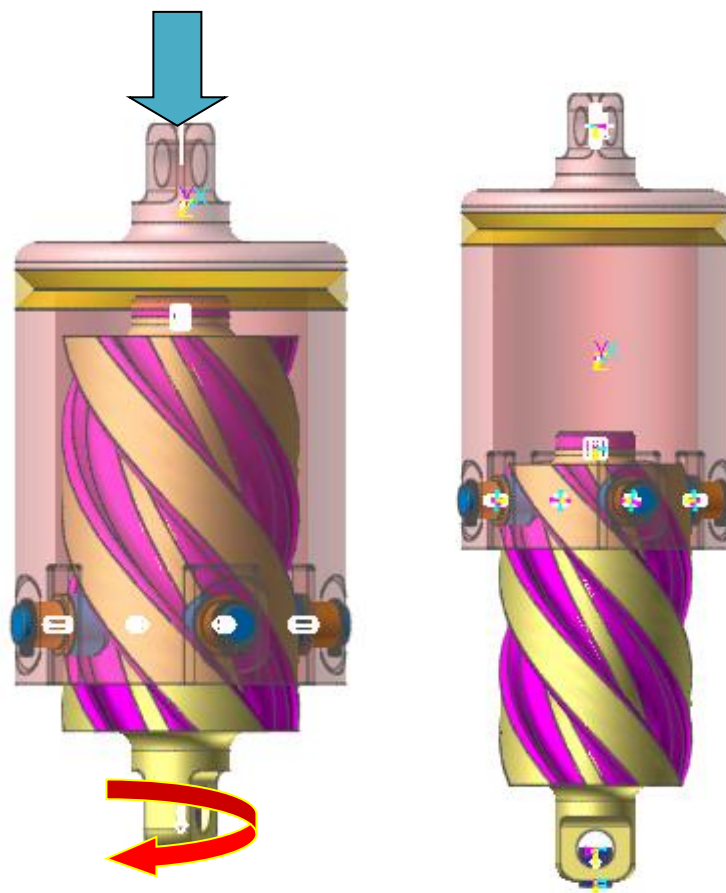


Figura 9. Movimentação do came. (Autoria própria)

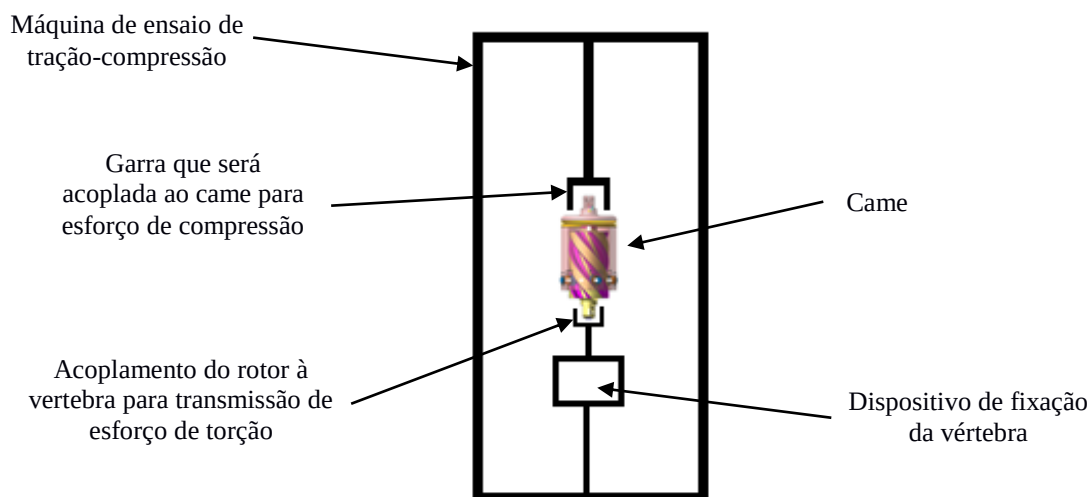


Figura 10. Esquema geral de montagem. (Autoria própria)

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Resultados do modelo base

Os resultados obtidos na simulação mostram que é possível transformar a translação de um determinado corpo em rotação, ou mesmo transformar força axial de compressão em torque, como é observado na Figura 11. O torque gerado é de aproximadamente $3500 \text{ N} \cdot \text{mm}$ durante um tempo de 4 s no eixo de aplicação da força.

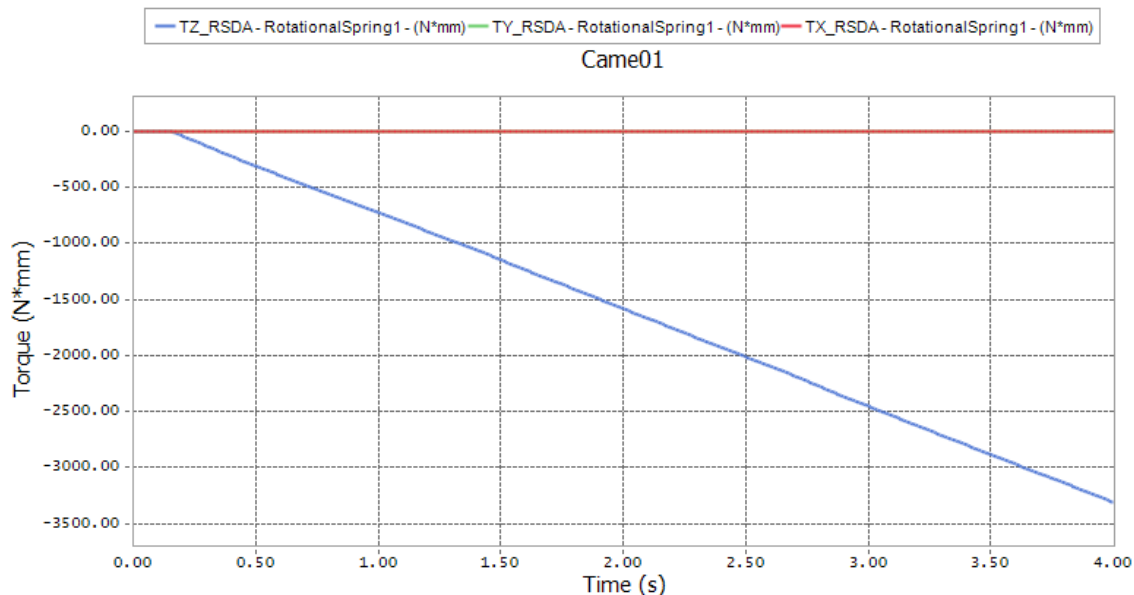


Figura 11. Gráfico do torque gerado no rotor pela força de compressão. (Autoria própria)

Através da análise gráfica obtida pela simulação, constatamos que a relação de deslocamento linear é de aproximadamente $1^\circ/\text{mm}$, como visto na Figura 12. Com isso, é possível controlar o ângulo de torção ao qual o disco de vértebra será submetido.

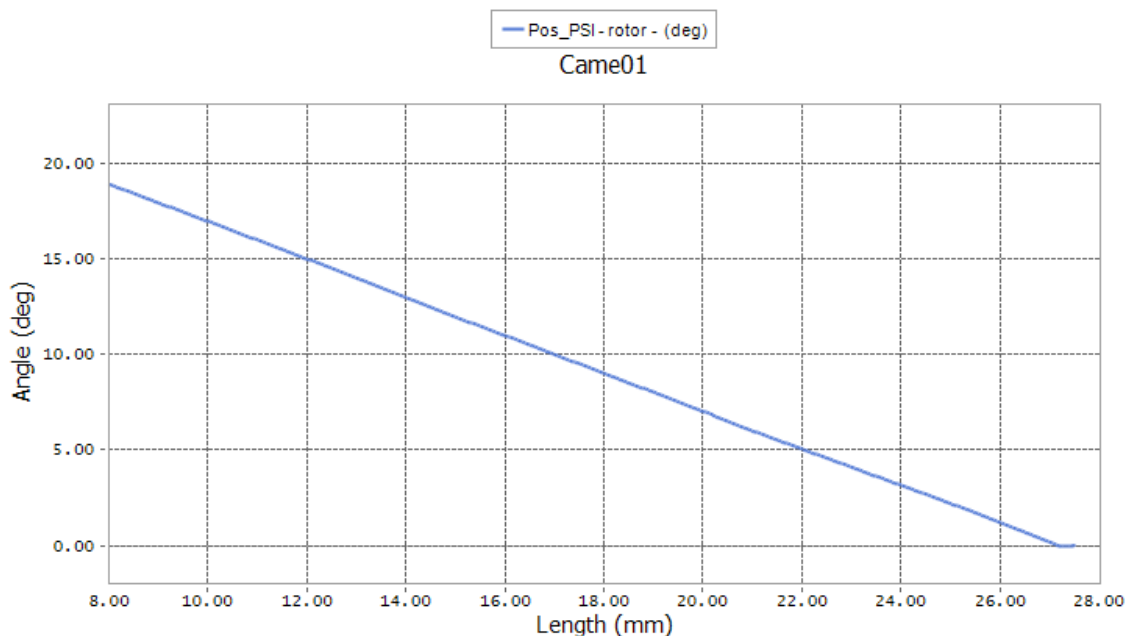


Figura 12. Gráfico do deslocamento linear do movimento. (Autoria própria)

Além disso, a reação compressiva é relativamente baixa em relação ao que poderia ser gerado. Outro ponto em questão na análise são os roletes, no qual devem ser escolhidos para propiciar uma transmissão de força sem variações bruscas no contato com o rotor. A Figura 13 apresenta a resposta das forças de reação na hélice, enquanto o rotor faz o movimento de rotação, as quais apresentam muito atrito, fazendo com que haja trepidação

no movimento.

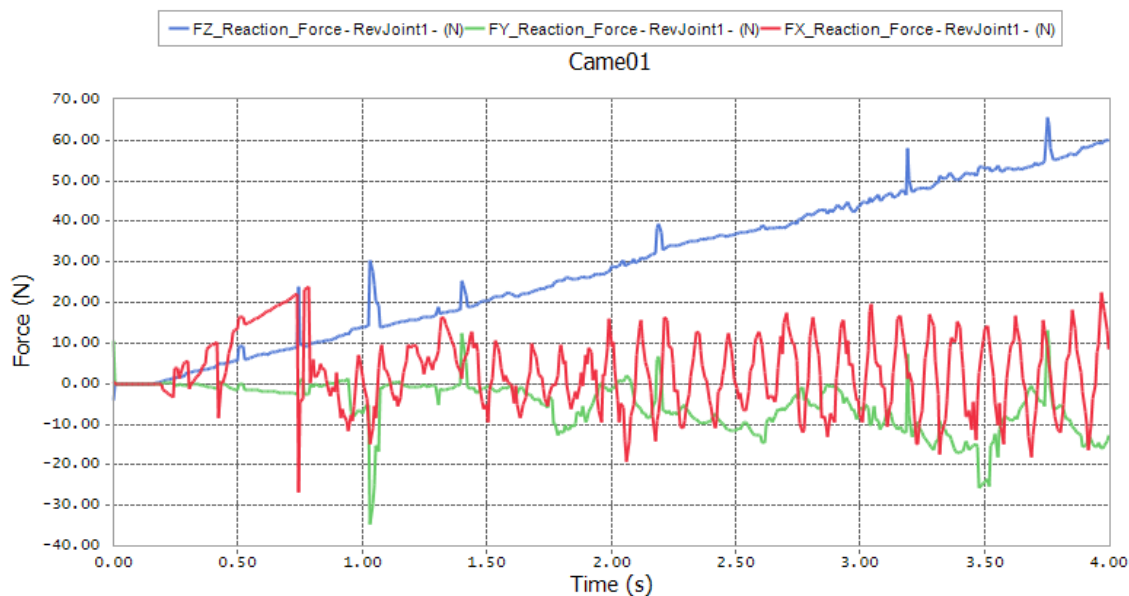


Figura 13. Gráfico da força atuante no conjunto rolete-rotor. (Autoria própria)

6.2 Resultados do segundo modelo

Serão plotados, como resultados do segundo modelo, o gráfico correspondente ao primeiro modelo, a fim de comparação de resultados.

Como já era esperado, há também um torque produzido pela força axial devido a geometria do came. O que é observado na Figura 14 é que o torque aplicado é consideravelmente maior no modelo dois. Isso foi causado pelo aumento de velocidade aplicada, geometria do modelo (aumento da massa) e ponto de aplicação da força de translação.

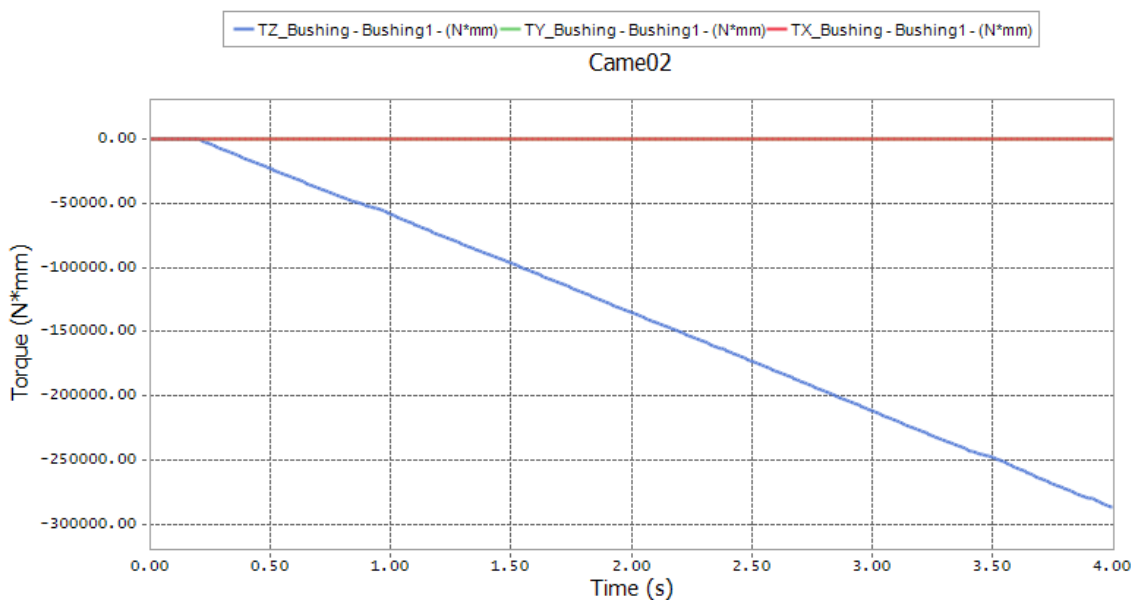


Figura 14. Gráfico do torque gerado no rotor pela força de compressão. (Autoria própria)

A relação de deslocamento linear também aumentou de $1^\circ/mm$ para aproximadamente $1,7^\circ/mm$, Figura 15. Esse aumento pode ter sido ocorrido pelo aumento da curvatura superficial da hélice do rotor bem como aplicação da carga combinada.

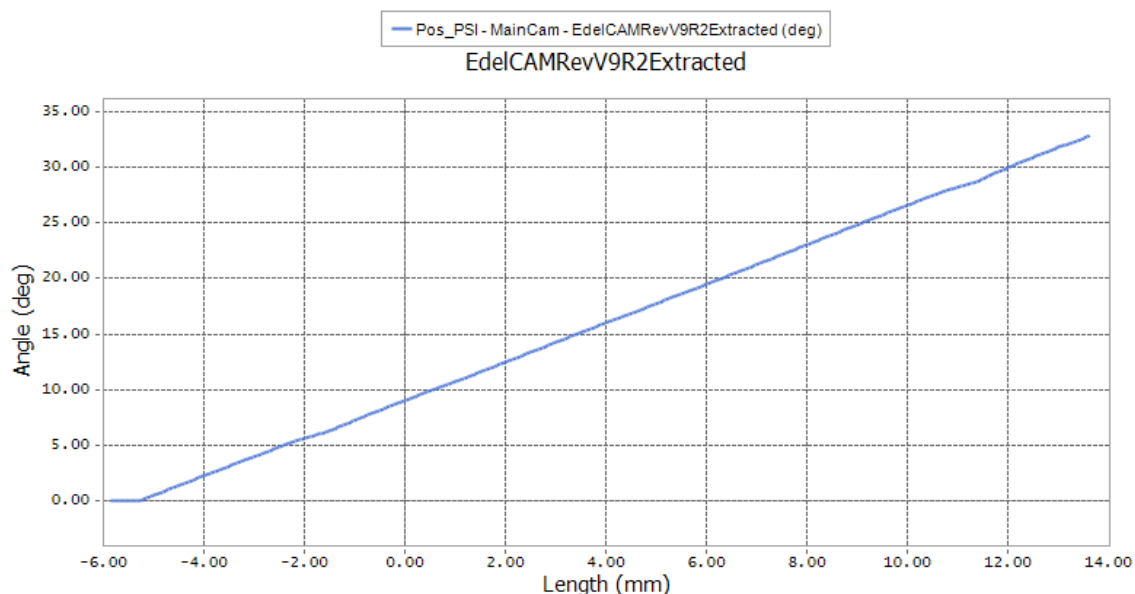


Figura 15. Gráfico do deslocamento linear do movimento. (Autoria própria)

Para análise da força nos roletes, nesse modelo, foi considerado uma carga combinada. Ou seja, a força analisada levou em conta um movimento de torção e um carregamento axial devido o elemento elástico estar presente na simulação. Nesse caso não pode ser obtido um movimento axial puro transformando-se em um movimento de torção puro. Para tal, encontramos uma força de reação presente nos três eixos coordenados, Figura 16.

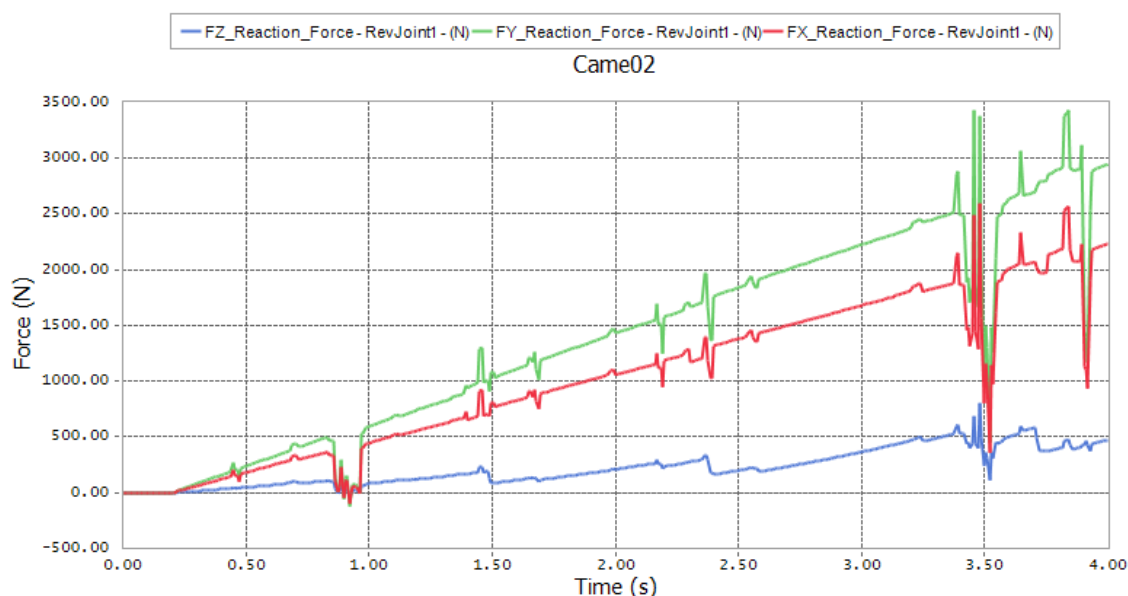


Figura 16. Gráfico da força atuante no conjunto rolete-rotor. (Autoria própria)

Para os gráficos apresentados nos resultados, temos em mente que ambos os modelos mostraram resultados diferenciados. Isso ocorreu devido as duas análises terem sido feitas levando em conta características diversas. Fatores como aplicação da força de translação, ponto de aplicação dessa força, inserção de elementos no came e modificação de sua estrutura contribuíram para o resultado alcançado.

7. CONCLUSÕES

Após apresentação dos resultados vimos que com ajuda de ferramentas CAD/CAE tornamos a resolução do problema mais rápido. Como para os dois modelos foram apresentadas duas análises diferentes, era de se esperar um resultado distinto pois os dois modelos distinguem-se qualitativamente entre si. A cada melhoria realizada no projeto é necessária uma comparação de resultados para aferir os dados. Além disso é preciso mais iterações para

alcançar o progresso total do projeto e eliminar os problemas.

O objetivo proposto inicialmente foi projetar um came para transformação de movimento, para que pudesse ser obtido um movimento de torção através de uma compressão aplicada. Assim, verificamos a funcionalidade do projeto. Podemos perceber que um projeto de engenharia é muito mais complexo do que se pensa e envolve um conjunto de problemas estruturados.

Para trabalhos futuros, recomenda-se mais ajustes deste modelo, bem como a proposta de prototipagem para testes.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NORTON, Robert L. **Cinemática e Dinâmica dos Mecanismos**. Porto Alegre: AMGH, 2010.
- [2] ROTHBART, Harold A. **Cam Design Handbook**. New Jersey: McGraw-Hill, 2004.
- [3] NORDIN, Margareta; FRANKEL, Victor H. **Biomecânica Básica do Sistema Muscoesquelético**. 3 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2003.
- [4] ZHU, Xiaoyin. **Tutorial on Hertz Contact Stress**, OPTI, 521, December 1, 2012. Disponível em: <https://wp.optics.arizona.edu/optomech/wp-content/uploads/sites/53/2016/10/OPTI-521-Tutorial-on-Hertz-contact-stress-Xiaoyin-Zhu.pdf>. Acesso em: 03 de fev. 2020.
- [5] SCLATER Neil. CHIRONIS, Nicholas P. **Mechanisms and Mechanical Devices Sourcebook**. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2007.
- [6] DICKER JR., John J. PENNOCK Gordon R., SHIGLEY, Joseph E. **Theory of Machines and Mechanisms**. 3rd ed. New York: Oxford University Press, 2003.
- [7] ERDMAN, Arthur G. SANDOR, George N. KOTA, Sridhar. **Mechanism Design**. 4th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2001.