

## **Dinâmica não linear de treliças 3D aplicada à análise de mecanismos atuados e estruturas origâmicas - Formulação MEF e sua implementação computacional.**

**Rafael Rosas Garcia Almeida**

**Orientador: Humberto Breves Coda**

Universidade de São Paulo - EESC

rafaelrga@usp.br

### **Objetivos**

Esse trabalho teve como objetivo principal a elaboração de um código que fizesse a análise dinâmica e estática de estruturas treliçadas com o enfoque maior em estruturas origâmicas, estruturas dobráveis que tem sido utilizadas em aplicações na engenharia aeroespacial, mecânica e civil.

Para esse fim, alguns objetivos secundários foram trabalhados, entre eles, a aplicação do Método dos Elementos Finitos Posicional (MEFP) para a análise não linear de treliças tridimensionais, estudo e aplicação de elementos atuadores no programa, elaboração de um modelo que represente corretamente o comportamento dos elementos de origami e por fim, a visualização dos resultados obtidos por meio de módulos gráficos do ambiente Python e também pelo software Acadview.

### **Métodos e Procedimentos**

Para concretizar os objetivos citados, o Método dos Elementos Finitos Posicional (MEFP) foi escolhido devido a sua não linearidade geométrica e fácil implementação, de modo a ser adaptado para abranger e reproduzir os mecanismos de elementos atuadores e estruturas origâmicas. Para aplicar o MEFP em programa computacional foi seguido a metodologia apresentada em Coda (2018), que utiliza o Método de Newton-Raphson uma

técnica iterativa para encontrar as raízes das equações de equilíbrio da energia mecânica total. Já para a análise dinâmica foi aplicado integrador de Newmark que aproxima as variáveis de velocidade e aceleração ao considerar o tempo como variável discreta de modo a compatibilizar com as iterações de Newton-Raphson.

Os elementos atuadores já foram utilizados em trabalhos na área de Engenharia civil para análise estática e dinâmica de estruturas com elementos de tamanho variável como feito em Silva (2020) para simular a protensão e relaxamento de cabos em pontes.

Já os elementos origami, nesse trabalho seguiram um modelo parecido com o proposto em Liu e Paulino (2017) que considera uma mola de giro entre planos formados pelos elementos de treliça.

No caso desse trabalho, o elemento de origami considerou a energia de deformação da mola de giro (eq 1.) de maneira que o ângulo dela fosse relacionado com as posições dos nós de modo a integrar essa parcela com o resto da formulação do MEFP.

$$U^e = \frac{K}{2}(\theta - \theta_0)^2 \quad (1)$$

A mudança de configuração de um elemento origami está apresentada na Figura 1 abaixo:

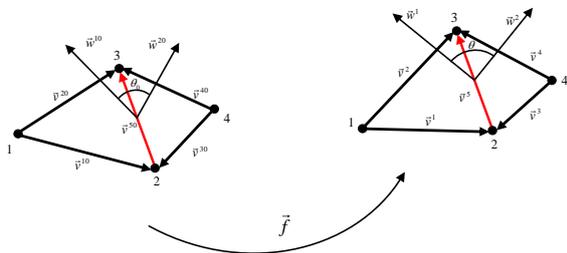


Figura 1: Mudança de configuração do origami

A aplicação desses dois elementos tem como objetivo representar exemplos encontrados na literatura bem como criar novos.

## Resultados

O primeiro exemplo utilizado para verificação da metodologia aplicada foi o de uma viga retrátil, formada por 8 painéis quadrados de treliça de 1 metro cada. Os origamis formados pelas diagonais têm constante  $K$  de mola de 1000 N.m de modo a formarem planos rígidos, já os formados pelas barras entre painéis foram atribuídos com valores 3,32 N.m.

Primeiramente essa viga foi submetida por elementos atuadores até um valor de 7,2 m de contração, após isso, os elementos atuadores foram descartados e uma análise dinâmica foi feita ao liberar a estrutura de modo que ela voltasse a uma posição de equilíbrio. Os resultados estão na Figura 2.

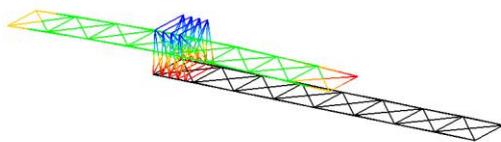


Figura 2: Deslocamento da viga na retração e liberação.

Já para o segundo, foi elaborada uma malha de origamis no padrão waterbomb, muito utilizado na literatura, onde cada elemento de origami funcionou como um atuador de modo a formar uma forma aproximadamente cilíndrica que pudesse atuar como um stent. Stent é o nome denominado a um dispositivo expansível utilizado em cirurgias de angioplastia visando regular a pressão sanguínea de vasos entupidos (Townsend et al.2020). Normalmente

esses tubos funcionam por sua estrutura rígida ou por mecanismos infláveis, já o idealizado nesse estudo é possibilitado pelo coeficiente de Poisson negativo de uma célula waterbomb, ou seja, a estrutura ao ser esticada, expande diametralmente. A diferença entre a posição inicial e final bem como entre os diâmetros do stent estão na Figura 3 abaixo:

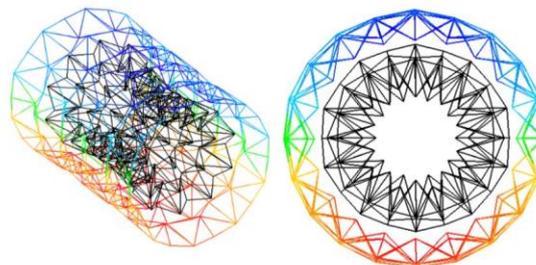


Figura 3: Expansão do Stent

## Conclusões

A formulação para análise de atuadores e origami foi implementada com sucesso e os exemplos demonstrados, apesar de simples, evidenciam o potencial para simulação de aplicações de estruturas implantáveis e retráteis. Como possível melhorias em trabalhos futuros, pode ser citado um modelo não linear para a constante de “mola” do origami para melhor representação de modelos mais complexos e aplicáveis.

## Referências

- CODA, H. B. O Método dos Elementos Finitos Posicional: Sólidos e Estruturas - Não Linearidade Geométrica e Dinâmica. Edição 2018. São Carlos: EESC/USP, 2018.
- FILIPOV, E. T.; LIU, K.; PAULINO, G. H.; SCHENK, M.; TACHI, T. Bar and hinge models for scalable analysis of origami. International Journal of Solids and Structures, 2017.
- SILVA, A. P. O.; Desenvolvimento de código computacional para análise estática e dinâmica de pontes pênséis, pontes estaiadas e tenso-estruturas simples. São Carlos, 2020.
- TOWNSEND, C. M.; BEAUCHAMP, R. D.; EVERS, B. M.; MATTOX, K. L. Tratado de Cirurgia. Ed 19. Saunders. 2020