FÍSICA COMPUTACIONAL:
MODELOS PARA A FÍSICA DE TERREMOTOS

Rodrigo M. Freitas, Edison Z. da Silva
freitasr@ifi.unicamp.br zacarias@ifi.unicamp.br
Instituto de Física Gleb Wataghin, UNICAMP.

RESUMO

O problema da modelagem computacional de terremotos apresenta desafios e características que motivaram o tema deste trabalho. Terremotos apresentam padrões de distribuição não triviais bem caracterizados por duas leis empíricas (lei de Gutenberg-Richter e a lei de Omori) que, ainda hoje, permanecem sem um entendimento fundamental. Para tentar entender melhor estas duas leis estudamos o modelo sísmico de Burridge-Knopoff, proposto em 1967. Este modelo descreve um sistema de massa-mola que é carregado até o ponto crítico onde as massas se movem de modo a redistribuir a tensão local. Este comportamento crítico dos terremotos apresenta muitas características em comum com transições de fase de segunda ordem e outros problemas em física, como o problema do atrito macroscópico, evidenciando o interesse físico no problema. Nosso primeiro contato com o modelo de massa-mola foi segundo a análise de Carlson-Langer na qual as equações de movimento do sistema são resolvidas segundo a dinâmica newtoniana. Introduzimos modificações de modo a deixar o sistema mais realista porém julgamos os resultados como insuficientes. Partimos então para uma abordagem mais sofisticada: estudamos a análise de Olami-Feder-Christensen (1992) e introduzimos as modificações propostas por Jagla (2009). Obtivemos assim um comportamento robusto que segue de perto a lei de Gutenberg-Richter e a lei de Omori, a comparação com dados reais de um catálogo de terremotos é surpreendente.

O MODELO DE BURRIDGE-KNOPOFF

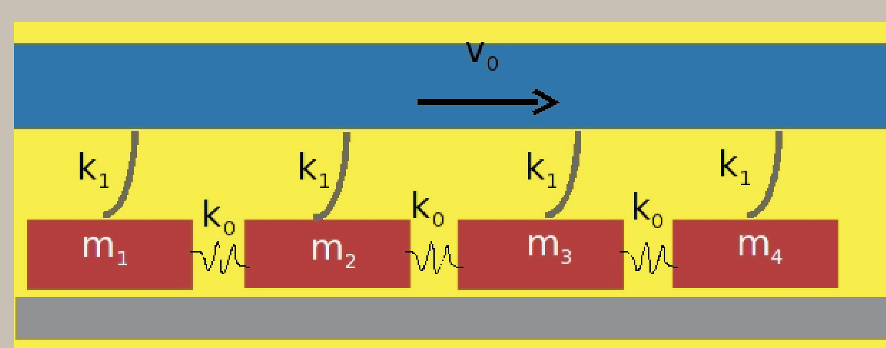

***Figura 1:** Modelo de Burridge-Knopoff em uma dimensão: uma fileira de blocos interligados por molas ideais está em contato com duas placas que possuem um movimento relativo, o contato com a placa superior é feito através de leaf springs enquanto a placa inferior está em contato direto (atrito) com os blocos.*

MOTIVAÇÃO:

Este modelo tem sido usado atualmente para descrever um tipo de movimento coletivo e brusco (o mesmo modo como os blocos do modelo se movimentam) em diferentes sistemas físicos tais como: ruído *Barkhausen* em ímãs, saltos no movimento irregular de paredes de domínio magnético, avalanches na linha de contato de um fluído e o deslocamento e propagação de fraturas em sólidos. Além disso este modelo é considerado o paradigma do conceito de criticalidade auto-organizada (*self-organized criticality - SOC*).

A LEI DE GUTENBERG-RICHTER E A LEI DE OMORI

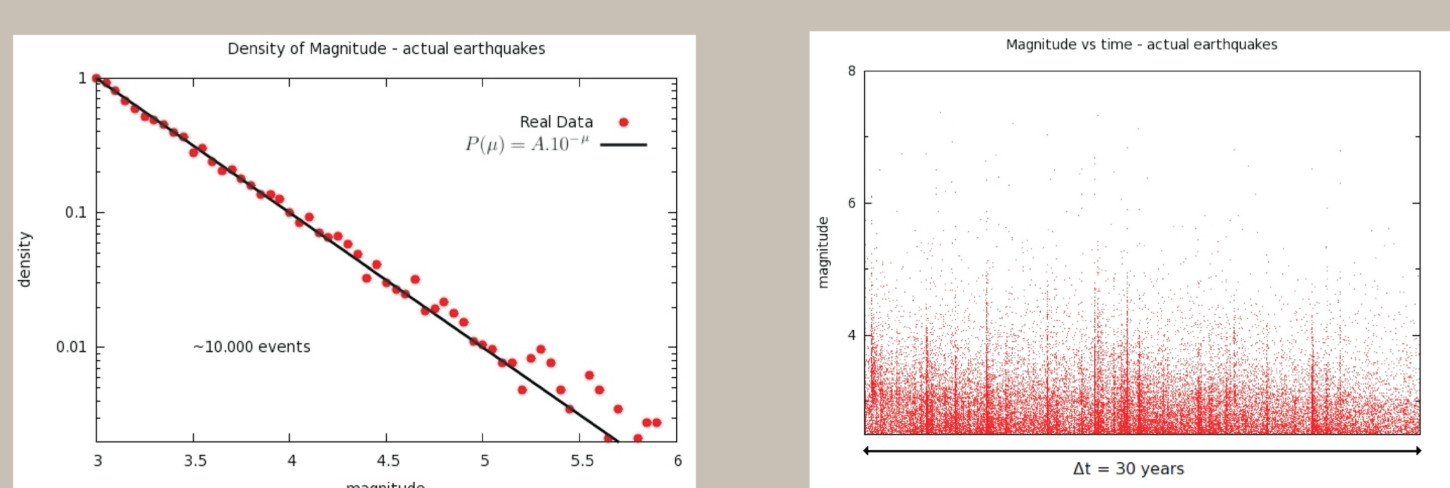

***Figura 2:** Distribuição temporal de terremotos para a falha de San Andreas (Califórnia). **Esquerda:** lei de Gutenberg-Richter. **Direita:** podemos notar claramente o clustering de terremotos que segue um mainshock caracterizado pela sua alta magnitude (lei de Omori). Dados obtidos para o período de 1980 a 2010 no catálogo de terremotos da [NCDEC and ANSS, 2010]*

ANÁLISE DE CARLSON-LANGER (CL)

- <u>Método</u>: solução das equações newtonianas de movimento para o sistema de blocos
- <u>Vantagem</u>: podemos obter alguns resultados analíticos em casos limite

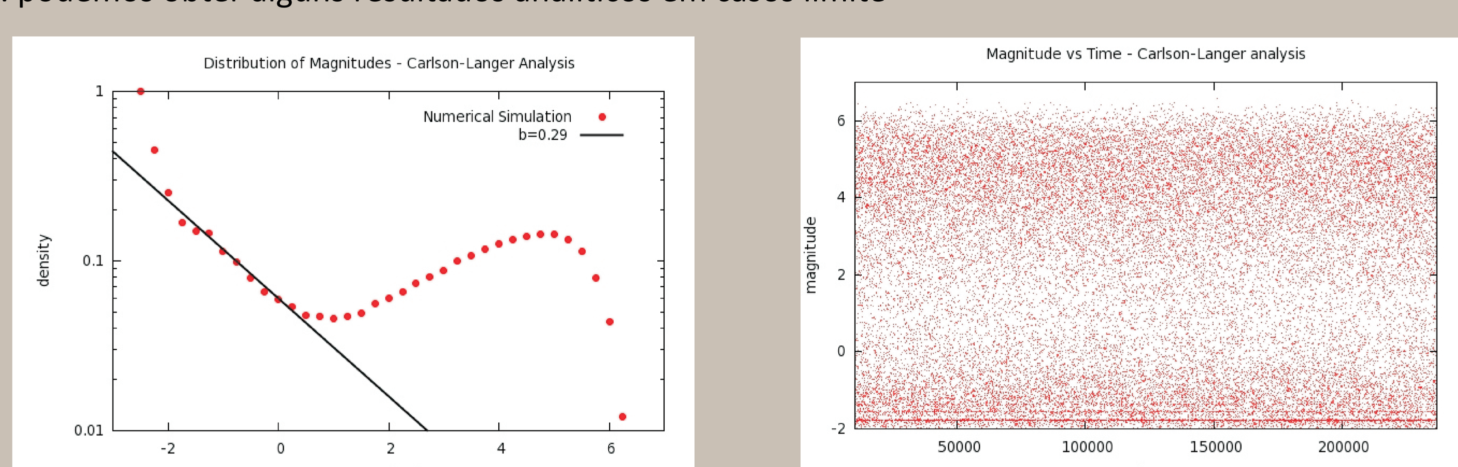

***Figura 3:** Resultado da análise de Carlson-Langer. **Esquerda:** Distribuição de magnitudes para um sistema 1.000 blocos, obtivemos aproximadamente 500.000 eventos. Note o comportamento aproximadamente linear no intervalo de magnitudes de -2 a +2. **Direita:** Distribuição temporal da magnitude dos terremotos, não obtivemos o clustering temporal.*

- <u>Resultados</u>:
  A força de atrito é do tipo *velocity-weakening*.
  Comportamento *power-law* insatisfatório dado seu alcance limitado.
  Alta frequência de grandes terremotos.
  Dificuldade em realizar um ajuste fino no parâmetro **b.**
  Não obedece a lei de Omori.

ANÁLISE DE OLAMI-FEDER-CHRISTENSEN (OFC)

A diferença fundamental do modelo OFC em relação ao CL é o fato de que agora em vez de resolvermos as equações de movimento dos blocos vamos fixar nossa atenção na relação:

Força *realizada pelas molas* ⟷ Força *de atrito*

Fazendo uso desta motivação simulamos um sistema bidimensional onde em vez de resolvermos a equação de movimento de cada bloco é proposto um automata celular que pode ser diretamente mapeado no modelo de Burridge-Knopoff.

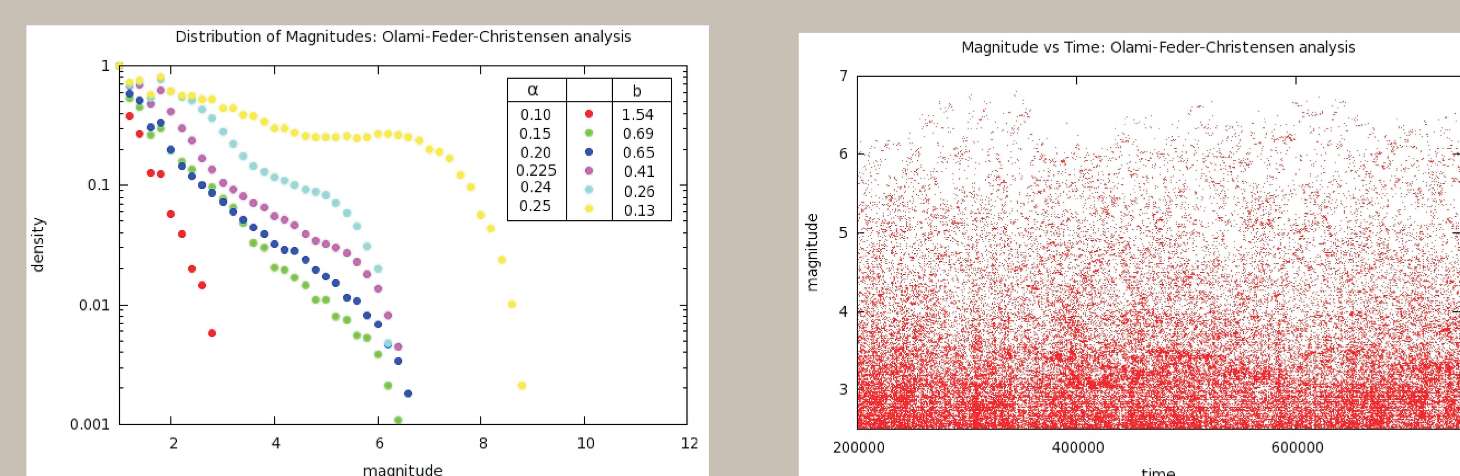

***Figura 4:** Simulação do modelo de Burridge-Knopoff segundo a análise de Olami-Feder-Christensen em um sistema de 200x200 blocos. **Esquerda:** O parâmetro **α** está diretamente relacionado com as constantes de mola, utilizando os parâmetros da análise de Carlson-Lange obtivemos valores de **b** muito próximos, neste caso temos **α = 0.24, b = 0.26** (OFC) e **b=0.29** (CL). **Direita:** O sistema não apresentou clustering temporal.*

MODIFICAÇÃO DE JAGLA

No estudo de atrito entre sólidos é um fato conhecido que o coeficiente de atrito estático entre dois sólidos aumenta com o tempo em que as superfícies estão em contato, isso significa que o contato entre as superfícies se torna mais forte com o tempo; este mecanismo é conhecido como relaxação estrutural.

A modificação de Jagla consiste em incluir este mecanismo na evolução do sistema, para isso é adicionado ao algoritmo de OFC um termo de resistência ao carregamento do sistema pela placa superior que tem o papel de uniformizar as forças em cada bloco, fazendo assim com que exista uma coesão maior entre as placas.

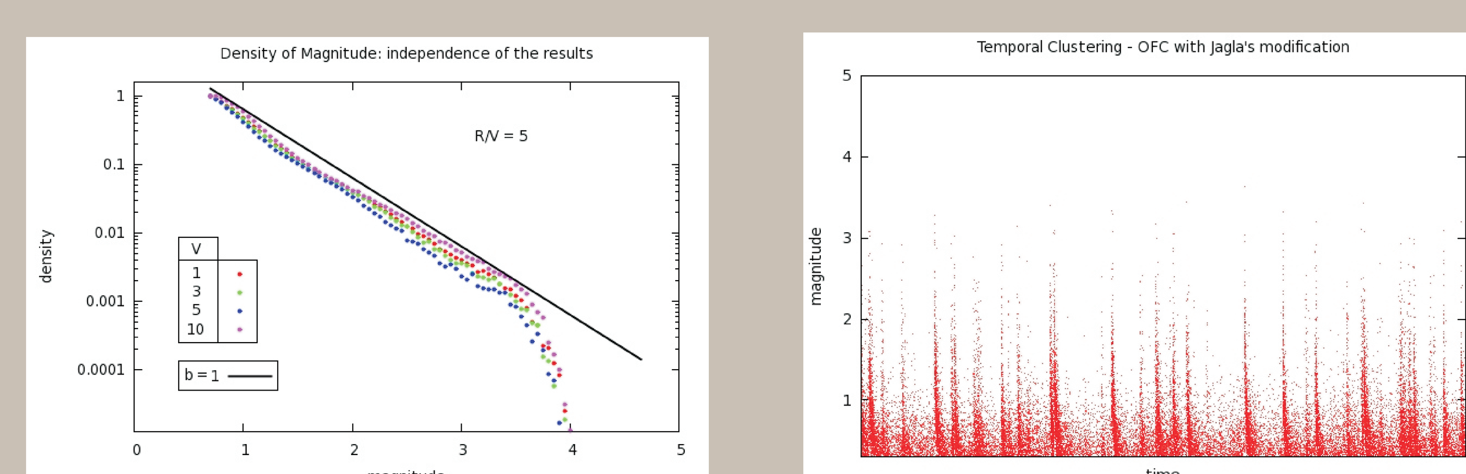

***Figura 5:** Simulação segundo a análise de Olami-Feder-Christensen com a modificação introduzida por Jagla. **Esquerda:** Obtivemos um valor de **b = 1** robusto, modificamos vários parâmetros do sistema sem obter nenhuma variação significativa deste comportamento. **Direita:** Obtivemos clustering temporal compatível com o caso real (lei de Omori), a comparação com a **Fig. 2 (direita)** mostra a impressionante semelhança.*

CONCLUSÃO

Inserindo o termo de relaxação estrutural conseguimos obter o parâmetro **b = 1** e o comportamento de clustering temporal de terremotos; a semelhança com o caso real mostrado na Fig. 2 é evidente. Um ponto muito importante destes dois resultados é o fato de ambos aparecerem simultâneamente no sistema com a inclusão de um termo de relaxação estrutural que tem origens muito bem conhecidas no estudo do atrito entre os sólidos, dando abertura para podermos usar a mesma interpretação para o caso dos terremotos.

REFERÊNCIAS

[1] R. Burridge and L. Knopoff. "Model and theoretical seismicity". Bull. Seismol. Soc. Am., 1967.
[2] J. M. Carlson and J. S. Langer. "Properties of earthquakes generated by fault dynamics". Phys. Rev. Lett., 1989.
[3] Z. Olami, H. J. S. Feder, and K. Christensen. "Self-organized criticality in a continuous, nonconservative cellular automaton modeling earthquakes". Phys. Rev. Lett., 1992.
[4] E. A. Jagla. "Realistic spatial and temporal earthquake distributions in a modified Olami-Feder-Christiensen model ". Phys. Rev. E, 2010.