



**Vinicius da Silva Costa Almada**

**Modelagem Topológica e Geométrica de  
Processos aplicados a multi-seções Geológicas**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, do Departamento de da PUC-Rio.

Orientador : Prof. Dr. Luiz Fernando Martha  
Coorientador: Dr. André Luís Müller

Rio de Janeiro  
Julho de 2021



**Vinicius da Silva Costa Almada**

**Modelagem Topológica e Geométrica de  
Processos aplicados a multi-seções Geológicas**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo:

**Prof. Dr. Luiz Fernando Martha**

Orientador  
Departamento de – PUC-Rio

**Dr. André Luís Müller**

Tecgraf/PUC-Rio

**Prof. Banca Um**

UFMG

**Prof. Banca Dois**

UFOP

**Dr. Banca Três**

CETEM/MCTI

**Dr. Banca Quatro**

Departamento de Engenharia Química e de Materiais – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 31 de Julho de 2021

Todos os direitos reservados. A reprodução, total ou parcial do trabalho, é proibida sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Vinicius da Silva Costa Almada**

Bacharel em Engenharia Civil pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA), formou-se em 2018. Foi bolsista de programas de Iniciação Científica PIBITI – IFMA, com projeto de desenvolvimento de software para Mecânica dos Solos e um segundo na área de Dinâmica das Estruturas. Este último foi base para seu Trabalho de Conclusão de Curso, cujo objetivo foi desenvolver um software para análise dinâmica de estruturas sujeitas à carregamento sísmico. Desde o fim de 2019 atua no Instituto Tecgraf como bolsista no Grupo de Modelagem Geológica de Sistemas Petrolíferos

#### Ficha Catalográfica

Almada, Vinicius da Silva Costa

Modelagem Topológica e Geométrica de Processos aplicados a multi-seções Geológicas / Vinicius da Silva Costa Almada; orientador: Luiz Fernando Martha; coorientador: André Luís Müller. – 2021.

24 f: il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de , 2021.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental – Teses. 2. Engenharia – Teses. 3. Geologia Estrutural. 4. Restauração de Seções Geológicas. 5. Restauração de Superfícies Geológicas. 6. Estrutura de Dados. I. Martha, Luiz Fernando. II. Müller, André Luís. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de . IV. Título.

CDD: XYZ.AB

Dedicado lorem ipsum

## Agradecimentos

Primeiro parágrafo de agradecimento ...

Segundo parágrafo de agradecimento ...

## Resumo

Almada, Vinicius da Silva Costa; Martha, Luiz Fernando; Müller, André Luís. **Modelagem Topológica e Geométrica de Processos aplicados a multi-seções Geológicas**. Rio de Janeiro, 2021. 24p. Dissertação de Mestrado – Departamento de , Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esse projeto visa desenvolver, dentro do Sistema Recon MS, um fluxo de trabalho que envolve as áreas de geologia estrutural, estratigrafia e geologia de reservatórios. Esse fluxo inicia com a restauração de modelos geológicos (seções e superfícies). Dentro do Sistema Recon busca-se aprimorar as ferramentas em seu ambiente de visualização 3D, denominado multi-seções, ou MS. Através de duas formas diferentes serão desenvolvidas ferramentas que irão prover as geometrias para o ambiente de simulação estratigráfica (para cada tempo geológico): 1) mapeamento de litologias e outras propriedades durante a restauração de seções, que por sua vez gerarão os paleo-relevos; 2) restauração de superfícies em si, que elimina a necessidade do mapeamento do item 1. A importância de ambas as estratégias consiste no fato de que nem sempre é possível obter bons resultados com restauração de superfícies, já que os mecanismos de restauração de seções desenvolvidos são muito mais geológicos. Para o mapeamento é necessária a criação de uma estrutura de dados que represente a malha de superfícies com possibilidade de armazenar informações, como propriedades e ligações entre as entidades das superfícies com as seções. Atualmente o Sistema Recon trabalha de forma totalmente desacoplado entre a estruturas de dados que representa as seções geológicas e a estrutura que representa as superfícies geológicas (horizontes, falhas e tipo do sal). Já para a segunda abordagem, ou seja, a restauração de superfícies, prevê-se o desenvolvimento de um módulo computacional de otimização dedicada a eliminar os buracos das superfícies que estão sendo restauradas incluindo restrições de deslocamento, sobre as falhas geológicas, das sub-superfícies abaixo da superfície restaurada.

## Palavras-chave

Geologia Estrutural; Restauração de Seções Geológicas; Restauração de Superfícies Geológicas; Estrutura de Dados.

## **Abstract**

Almada, Vinicius da Silva Costa; Martha, Luiz Fernando (Advisor); Müller, André Luís (Co-Advisor). **Topological and Geometric Modeling of Processes applied to Geological multi-sections.** Rio de Janeiro, 2021. 24p. Dissertação de Mestrado – Departamento de , Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This project aims to develop, within the Recon MS System, a workflow that involves the areas of structural geology, stratigraphy and reservoir geology. This flow begins with the restoration of geological models (sections and surfaces). The Recon System seeks to improve the tools in its 3D visualization environment, called multi-sections, or MS. Through two different forms, tools will be developed that will provide the geometries for the stratigraphic simulation environment (for each geological time): 1) mapping of lithologies and other properties during the restoration of sections, which in turn will generate paleo-reliefs; 2) surface restoration itself, which eliminates the need for mapping item 1. The importance of both strategies is the fact that it is not always possible to obtain good results with surface restoration, since the section restoration mechanisms developed are much more geological. For mapping, it is necessary to create a data structure that represents the surface mesh with the possibility of storing information, such as properties and links between the entities of the surfaces and the sections. Currently the Recon System works in a totally decoupled way between the data structures that represent the geological sections and the structure that represents the geological surfaces (horizons, faults and salt type). For the second approach, that is, the restoration of surfaces, it is foreseen the development of a computational optimization module dedicated to eliminate the holes of the surfaces that are being restored including displacement restrictions, on the geological faults, of the sub-surfaces below the restored surface.

## **Keywords**

Structural Geology; Restoration of Geological Sections; Restoration of Geological Surfaces; Data Structure.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>Processo de Restauração de Seções Geológicas</b>	<b>14</b>
2.1	Estruturas Geológicas	14
2.2	Comportamento dos Materiais e Rochas	14
2.3	Seções Geológicas	14
2.4	Restauração de Seções Geológicas	14
<b>3</b>	<b>Sistema Recon MS</b>	<b>15</b>
3.1	Subdivisão Planar	15
3.2	Atributos Geológicos	15
3.3	Seções Geológicas	15
3.4	Módulos	15
3.5	Transformações	15
3.6	Malhas e Resultados	15
3.7	Linhas de Mapeamento	15
3.8	Derivações das Linhas de Mapeamento	18
<b>4</b>	<b>Restauração de Superfícies Geológicas</b>	<b>20</b>
4.1	Linhas de Mapeamento do Modelo	20
4.2	Deformador de Superfícies	20
4.3	Preparação dos dados	20
4.4	Resultados	20
<b>5</b>	<b>Restauração volumétrica de um modelo geológico</b>	<b>21</b>
5.1	Visão geral de restauração do volume	21
5.2	Metodologia baseada em movimentação de partículas	21
5.3	Preparação dos dados	21
5.4	Resultados	21
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>22</b>
	<b>Referências bibliográficas</b>	<b>23</b>
<b>A</b>	<b>Published paper</b>	<b>24</b>



## Lista de figuras

Figura 3.1	Linhas de mapeamento em uma seção.	16
Figura 3.2	Linhas de mapeamento cortando múltiplas faces.	17
Figura 3.3	Partes de uma linha de mapeamento	18
Figura 3.4	Informações topológicas da malha mapeadas para a linha de mapeamento.	18

## Lista de tabelas

Tabela 3.1	Informações topológicas salvas na linha de mapeamento.	17
------------	--	----

## Lista de Abreviaturas

ADI – Análise Digital de Imagens

BIF – *Banded Iron Formation*

*My beautifull epigraph*

**Wassily Kandinsky**, *Regards sur le passé.*

# **1**

## **Introdução**

This is the first chapter...

## **2**

### **Processo de Restauração de Seções Geológicas**

#### **2.1**

##### **Estruturas Geológicas**

#### **2.2**

##### **Comportamento dos Materiais e Rochas**

#### **2.3**

##### **Seções Geológicas**

#### **2.4**

##### **Restauração de Seções Geológicas**

## 3

## Sistema Recon MS

### 3.1

#### Subdivisão Planar

### 3.2

#### Atributos Geológicos

### 3.3

#### Seções Geológicas

### 3.4

#### Módulos

### 3.5

#### Transformações

### 3.6

#### Malhas e Resultados

This is the first chapter

### 3.7

#### Linhas de Mapeamento

Um dos recursos presentes no Sistema Recon é a **linha de mapeamento**, cujo objetivo é auxiliar na interpretação dos resultados gerados na restauração do modelo. Essa linha armazena referências a pontos topológicos da malha da seção. Com isso, é possível ter uma linha que acompanha a movimentação da malha de um cenário a outro.

As linhas de mapeamento (Figura 3.1) permitem realizar um mapeamento geométrico ao longo de uma restauração tomando como base uma linha-guia poligonal definida em um dado cenário. Essa linha pode ser criada em qualquer cenário, mesmo em seções já restauradas.

Cada face de uma seção tem como atributo uma malha triangulada, e as linhas de mapeamento são definidas no sistema de coordenadas local da malha de cada uma das faces. Além disso, é possível que uma linha de mapeamento

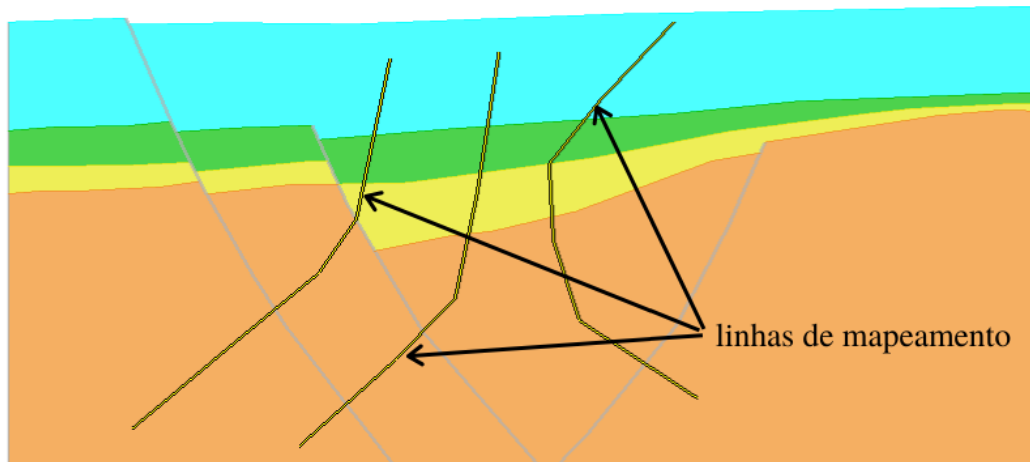


Figura 3.1: Linhas de mapeamento em uma seção.

cruze diversas malhas, por isso, a linha de mapeamento é definida como um conjunto de "partes" de linha de mapeamento, sendo cada parte pertencente a um trecho contínuo em uma mesma face. O processo de criação do mapeamento da linha é feito para cada parte. Na Figura 3.2 é possível ver uma linha de mapeamento cortando algumas malhas diferentes.

A primeira etapa desse mapeamento é a criação da linha-guia, a partir disso é feita a separação nas partes a serem processadas. É realizado um mapeamento com informações topológicas da interseção da parte com a malha. Essa ação consiste em fazer uma relação entre um ponto da parte da linha-guia e um ponto em uma entidade topológica da malha.

Por exemplo, na Figura 3.3 estão evidenciadas as partes que formam a linha de mapeamento. Cada uma dessas partes é representada pela entidade chamada *LineMapPart*.

Cada parte é processada individualmente e, como já citado, a linha de mapeamento final é um conjunto dessas partes.

Como a malha possui três entidades básicas, o ponto da linha pode ser mapeado para um nó topológico, para um ponto interno de uma aresta (lado de triângulo) de uma malha ou ponto interior a um elemento (triângulo da malha). Em cada um desses casos, a informação topológica relacionada é guardada:

- Nó: guarda o identificador do nó
- Aresta: guarda o identificador da aresta e a coordenadas paramétricas do ponto em que cruza a aresta.
- Elemento: guarda o identificador do elemento e as coordenadas baricêntricas do ponto no interior do elemento.



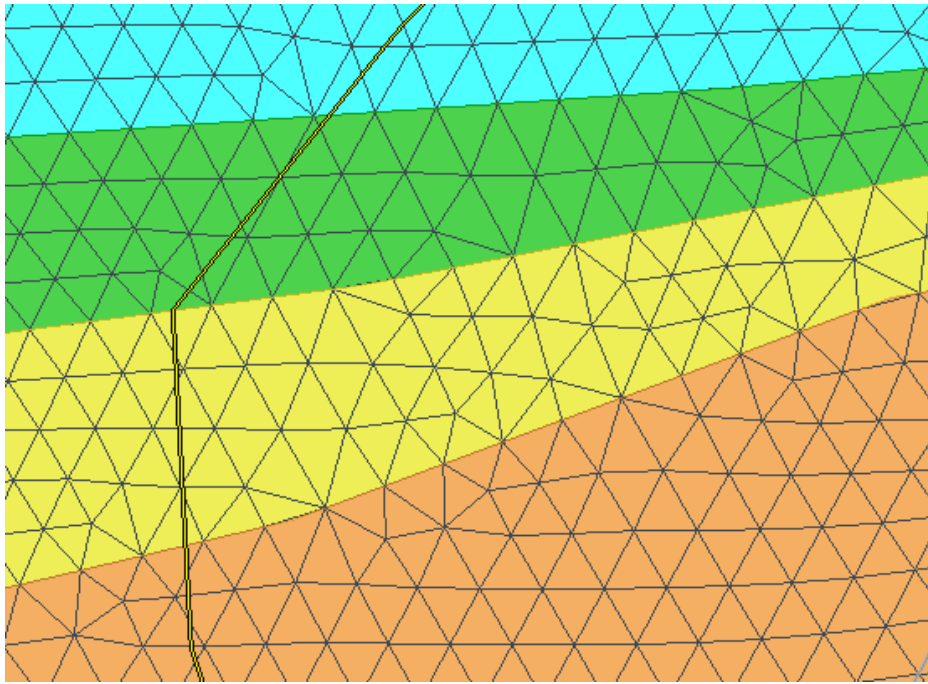


Figura 3.2: Linhas de mapeamento cortando múltiplas faces.

A Figura 3.4 mostra a identificação dos pontos da linha de mapeamento e a Tabela 3.1 exhibe quais informações topológicas são salvas de cada ponto.

Tabela 3.1: Informações topológicas salvas na linha de mapeamento.

Ponto	Tipo	Informação
0	Elemento	id=30, c. baricêntricas=(0,33; 0,33; 0,33)
1	Nó	id=431
2	Aresta	id=130 c. paramétrica=0,45
3	Aresta	id=145 c. paramétrica=0,55

Após esse processo de mapeamento topológico da linha propriamente dita, é possível calcular a geometria da linha em diferentes cenários que usam a mesma malha (já que a topologia é mantida), bastando apenas verificar se a malha se manteve, isto é, não foi refeita, apagada ou editada.

Em casos de edição, todos os atributos associados à malha são interpolados para a nova versão da malha, incluem-se nisso as partes de linha de mapeamento que recebem uma nova versão se a malha original teve sua topologia alterada.

A vantagem deste tipo de mapeamento é ser baseado em malha, já que todas as transformações geológicas que ocorrem no processo de restauração, tem como objetivo deformar a malha.

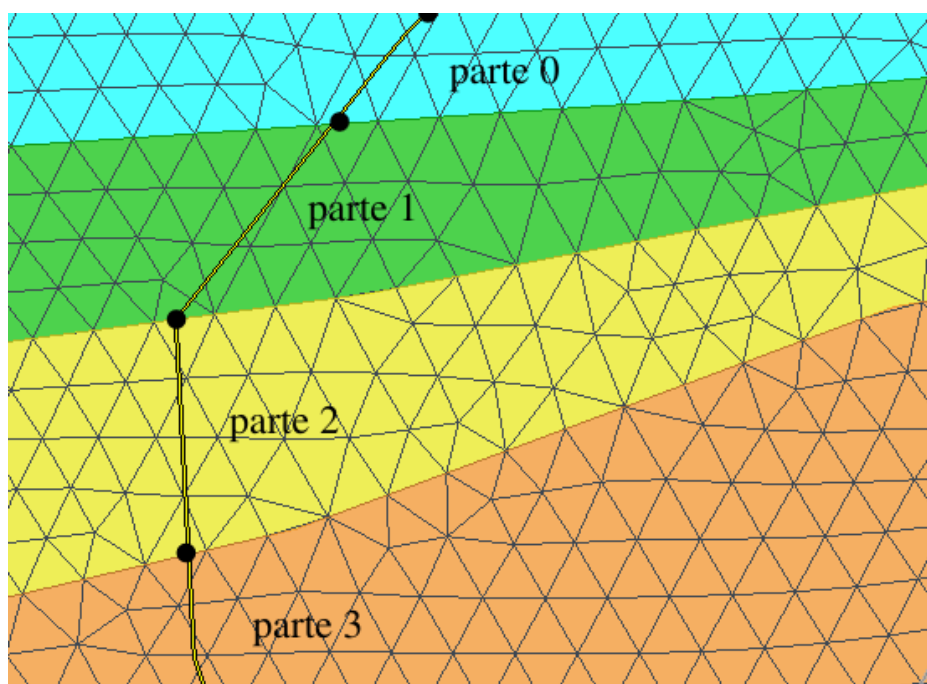


Figura 3.3: Partes de uma linha de mapeamento

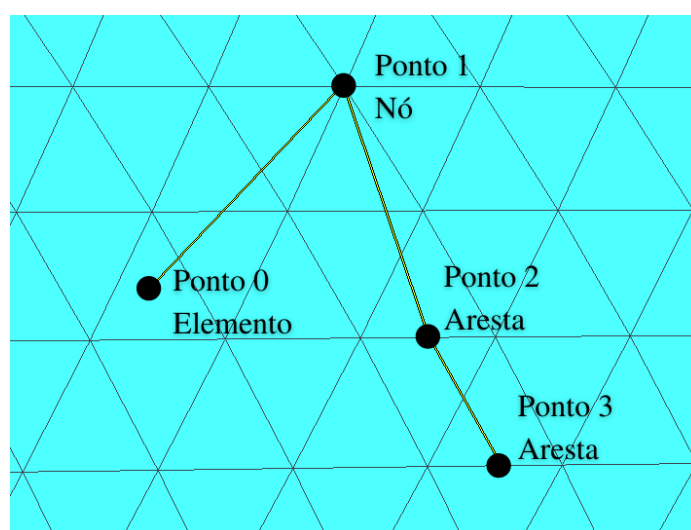


Figura 3.4: Informações topológicas da malha mapeadas para a linha de mapeamento.

### 3.8

#### Derivações das Linhas de Mapeamento

As linhas de mapeamento têm também casos de usos mais especializados, como na criação e representação de poços. Poços são criados semelhantemente às linhas de mapeamento ou por importação de modelos com poços em 3D. Têm característica de serem linhas mais verticalizadas e possuem uma finalidade mais limitada. Nos casos de poços 3D, a linha correspondente ao

poço é apenas uma projeção do objeto tridimensional.

Há o uso nas chamadas linhas de interseção (*CrossLine*) que servem para identificar e mapear as linhas de cruzamento entre seções no espaço tridimensional do multi-seções, com isso é possível ter uma noção do que ocorre com seções transversais mesmo estando no domínio bidimensional da restauração.

Por fim, as linhas de mapeamento são a base para as linhas de mapeamento do modelo ou *LMMModel*, cujo objetivo é servir como um mapeamento das linhas de entidades geológicas (horizonte, falha e topo de sal) ao longo da restauração do modelo. Dessa forma, é possível ter um acompanhamento das entidades geológicas na seção, baseado na malha das faces que mais bem discretizadas que as arestas base originais, além de poder verificar como se deu a movimentação de cada ponto de horizonte ao longo da restauração, por exemplo.

Pelo objetivo proposto, as *LMMModels* são linhas de mapeamento que tomam a geometria das entidades geológicas como entrada, então não há necessidade de criar uma linha-guia. Neste caso, há uma parte de linha de mapeamento para cada aresta, seja de horizonte, falha ou topo de sal.

Além disso, há o armazenamento de atributos importantes para a manipulação das *LMMModels*, como idade dos horizontes, identificador da falha e até sobre a qual pedaço de superfície aquela parte de linha está associada.

Todas essas informações atreladas ao mapeamento topológico das *LM-Models*, quando em conjunto com as diversas restaurações de um modelo multi-seções, são o que fazem dela o principal dado para a realização de uma restauração a nível 3D, já que trazem todo o histórico de movimentação das camadas de um modelo geológico.

## **4**

# **Restauração de Superfícies Geológicas**

### **4.1**

## **Linhas de Mapeamento do Modelo**

### **4.2**

## **Deformador de Superfícies**

### **4.3**

## **Preparação dos dados**

### **4.4**

## **Resultados**

## **5**

### **Restauração volumétrica de um modelo geológico**

#### **5.1**

##### **Visão geral de restauração do volume**

#### **5.2**

##### **Metodologia baseada em movimentação de partículas**

#### **5.3**

##### **Preparação dos dados**

#### **5.4**

##### **Resultados**

## **6**

### **Conclusão**

Assim, como uma proposta para trabalho futuro, pode-se buscar combinar os dois enfoques...

## **Referências bibliográficas**

## **A**

### **Published paper**

The following paper was published ...