

## 3

### Modelo de Reservatórios Naturais de Petróleo

Nesse capítulo é feita uma breve apresentação do que é um modelo de reservatório natural de petróleo, os resultados associados a uma simulação desse modelo e quais ferramentas podem ser oferecidas para a análise desses resultados. Em seguida é apresentada nossa proposta para a visualização de modelos de médio porte, que permite a visualização interativa de modelos com poucos milhões de células. Essas técnicas também servirão para os sistemas propostos nos próximos capítulos.

#### 3.1

##### Simulação de Reservatórios

Reservatórios naturais de petróleo são formados pela acumulação de hidrocarbonetos no interior de rochas porosas, formadas pelo depósito de sedimentos ao longo de milhões de anos (20). O processo de extração desses recursos consiste na perfuração de diversos poços no domínio do reservatório e na conexão desses poços a uma linha de produção na superfície para armazenamento, processamento e transporte. As pressões naturais do reservatório forçam o óleo para a superfície, provendo uma recuperação primária do petróleo. Eventualmente essas pressões cessam, e é economicamente vantajoso recuperar o petróleo remanescente utilizando métodos secundários, como a sucção, injeção de água, elevação via gaseificação (*gas lift*), entre outros.

Com o propósito de recuperar o máximo de recursos com o menor custo possível, a indústria petrolífera vem empregando simuladores numéricos para tentar prever o fluxo dos fluidos no domínio do reservatório ao longo de dezenas de anos. Ao simular diferentes configurações de poços e planos de produção, o reservatório é avaliado economicamente e é feito um planejamento da sua exploração. Esse plano de exploração é determinado por um processo de maximização do valor econômico do reservatório ao longo do seu tempo de operação, processo esse em que a simulação numérica tem grande importância.

O estudo de reservatórios é associado a um certo grau de incerteza, tanto na coleta dos dados reais quanto nas suposições feitas pelo modelo matemático utilizado pela simulação numérica. Posteriormente, quando o reservatório já está produzindo, são feitas coletas de novos dados reais, inclusive de produção, que são utilizados para realimentar o modelo: ao ajustar os seus parâmetros, a incerteza é reduzida. A partir desse procedimento, também chamado de ajuste de histórico, são feitas novas simulações, o plano de produção é ajustado, e

assim sucessivamente. A busca pelo melhor modelo, tanto no estágio de pré-produção quanto no de ajuste do modelo, requer uma grande quantidade de rodadas de simulação.

### 3.2 Modelos de Reservatório

A indústria de petróleo tem empregado atualmente um modelo definido por uma malha discreta de células hexaédricas para simular o comportamento de reservatórios de petróleo. As células dessa malha são organizadas topologicamente em uma grade tridimensional, onde cada célula é identificada por uma tripla  $[i, j, k]$ , sendo as células  $[i + 1, j, k]$ ,  $[i - 1, j, k]$ ,  $[i, j + 1, k]$ ,  $[i, j - 1, k]$ ,  $[i, j, k + 1]$  e  $[i, j, k - 1]$  as suas vizinhas topológicas. A Figura 3.1 ilustra a grade topológica utilizada em tais modelos.

A geometria associada a essa grade, no entanto, é bastante irregular, conforme mostrado nas figuras a seguir. Devido a descontinuidades na elevação, caracterizando *falhas* geológicas, algumas células vizinhas na topologia da grade podem não compartilhar faces. Além disso, algumas células podem ser consideradas *inativas* para a simulação, resultando em grupos irregulares e possivelmente desconectados de células. Essas descontinuidades são ilustradas na Figura 3.2. O conjunto de células com uma mesma coordenada  $k$  constitui o que é chamado de uma *camada*, que lembra um terreno irregular com espessura e descontinuidades. A Figura 3.3 ilustra uma camada de um reservatório.

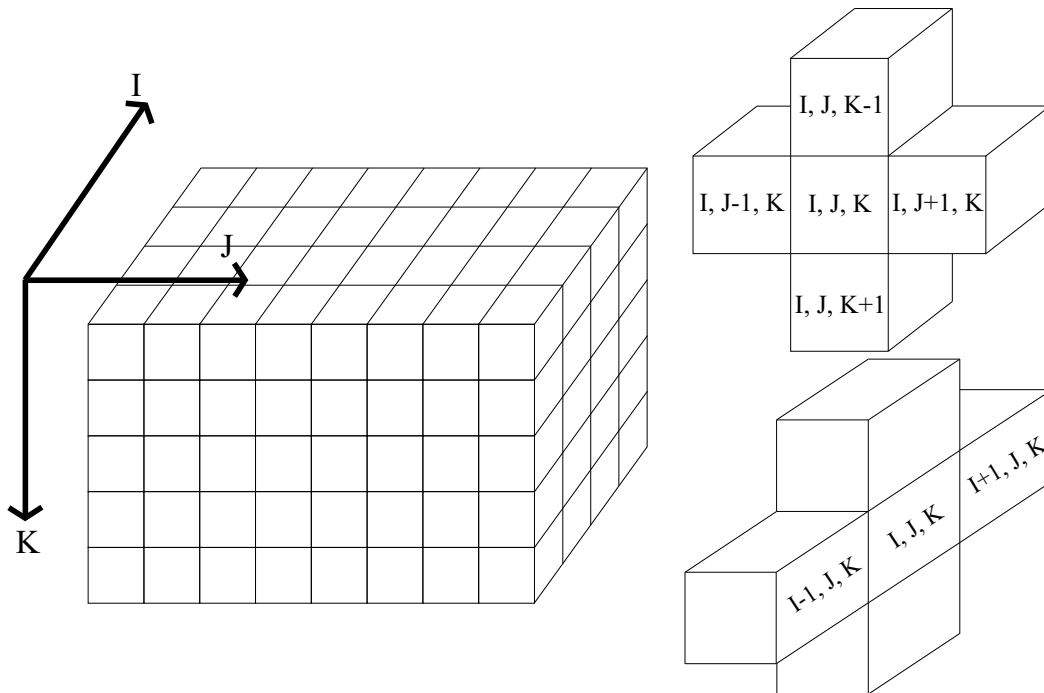


Figura 3.1: Grade topológica utilizada em modelos de reservatório de petróleo.

Cada célula  $[i, j, k]$  possui faces denominadas *de topo*, que são possivelmente compartilhadas com a célula  $[i, j, k - 1]$ , e faces *de base*, que são possivelmente compartilhadas com a célula  $[i, j, k + 1]$ . As faces restantes de uma célula são denominadas *faces laterais*, que também podem ser compartilhadas ou não com as células adjacentes na grade topológica.

Com base em informações geofísicas e geológicas, o reservatório é caracterizado ao serem associadas propriedades às células da malha. Dada uma configuração de poços, o simulador calcula o fluxo dos fluidos, como óleo, gás e água com base no seu modelo numérico. Como resultado, a simulação exporta dados de produção de poços e propriedades físicas de cada célula a cada passo (*time-step*) da simulação, como saturação de óleo, gás e água, pressão, etc.

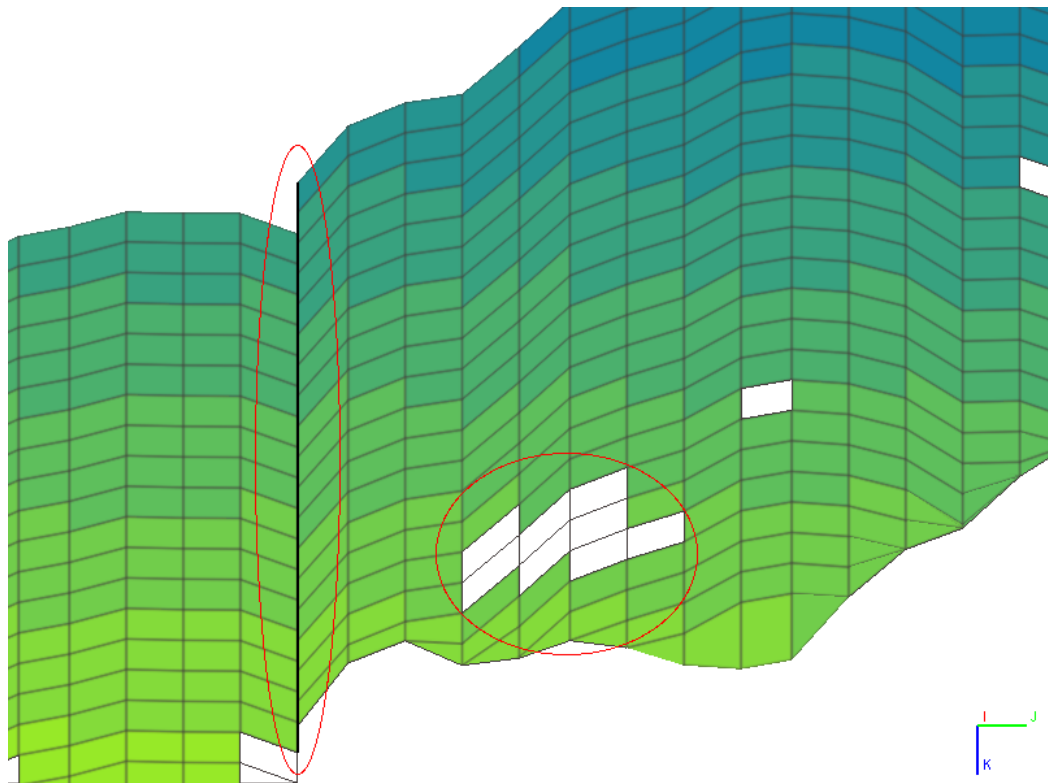


Figura 3.2: Ilustração das irregularidades do modelo em uma seção lateral. À esquerda encontra-se uma falha geológica. À direita, algumas células tornadas inativas.

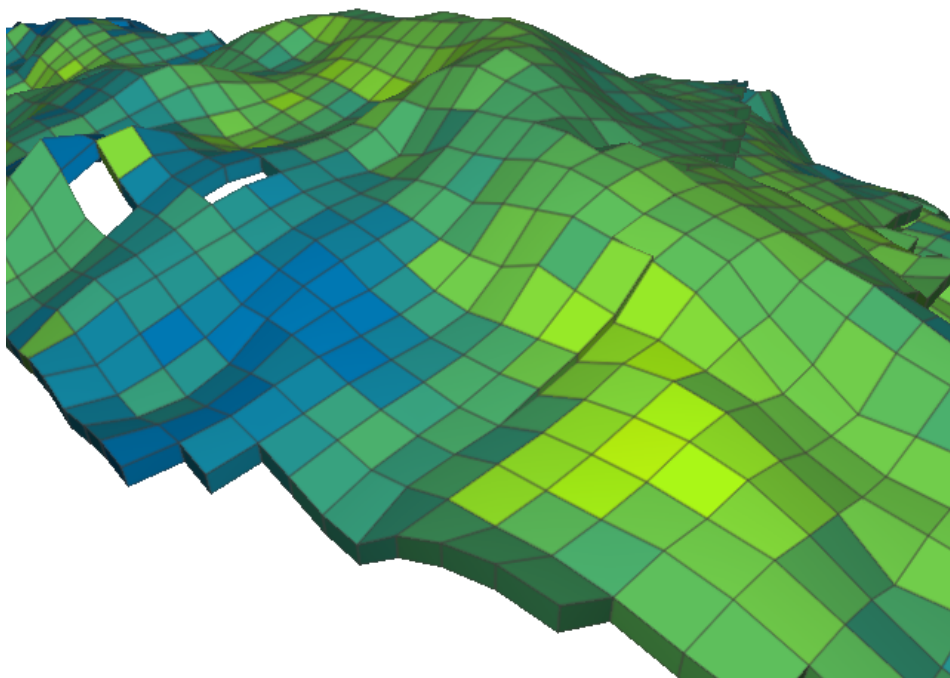


Figura 3.3: Ilustração de uma camada do reservatório.

### 3.3 Visualização de Modelos de Reservatório

A simulação numérica de reservatórios produz conjuntos grandes de dados. Os dados associados aos poços são comumente analisados em plotagens simples de gráficos XY, onde os comportamentos de poços, de plataformas e do campo como um todo são analisados ao longo do tempo de simulação. Esses dados, como por exemplo a vazão de óleo ao longo de dezenas de anos, permitem uma análise quantitativa da produção do campo, que é fortemente correlacionada com o retorno econômico da sua exploração.

Por sua vez, os dados associados às células permitem uma análise do comportamento dos fluidos ao longo do domínio espacial do campo, como por exemplo a influência da configuração de poços escolhida em cada região do reservatório. Com o intuito de fornecer um conjunto rico de ferramentas para a análise dessa grande massa de dados, diversas técnicas de visualização científica e de visualização de informação podem ser aplicadas para inspecionar o comportamento do reservatório ao longo do campo.

No que tange às células do reservatório, um conjunto variado de técnicas de visualização 3D podem ser oferecidas ao usuário:

- visualização convencional de campos escalares colorindo as faces externas das células (iso-contorno) (Figura 3.6(a));
- visualização de campos escalares com iso-linhas (Figura 3.6(b));

- separação das camadas para uma melhor inspeção do interior do reservatório (Figura 3.7(a));
- posicionamento de planos de corte arbitrários (Figura 3.7(b));
- visualização de propriedades vetoriais (Figura 3.8(a));
- visualização volumétrica de malhas não estruturadas (Figura 3.8(b)).

Esses modos de visualização permitem que o usuário analise o comportamento dos campos escalares e vetoriais associados às células do reservatório ao longo do tempo. Algumas ferramentas, como a separação de camadas, o posicionamento de planos de corte e visualização volumétrica simplificam o entendimento do fluxo no interior do reservatório. As soluções para o tratamento de modelos massivos devem preservar a viabilidade do emprego dessas técnicas de visualização.

### 3.4

#### Visualização de Modelos de Médio Porte

Esta seção apresenta a nossa proposta para a visualização interativa de modelos de médio porte. Após a apresentação da representação utilizada para a malha de reservatórios, serão apresentadas as adaptações das técnicas de descarte de primitivas existentes para o contexto de reservatórios e será feita uma breve análise experimental da eficácia das técnicas utilizadas.

##### 3.4.1

#### Representação da Malha de Reservatórios

Os sistemas apresentados neste trabalho representam a malha de reservatório utilizando a estrutura topológica TopS, que é descrita em detalhe no trabalho apresentado por Celes et al. (16). Essa estrutura somente representa explicitamente os *vértices* e *células* da malha, sendo todas as outras entidades (*faces* e *arestas*) representadas implicitamente.

Apesar de possuir uma representação compacta, a estrutura topológica é *completa*, no sentido de preservar a possibilidade de obtenção de todas as relações topológicas de adjacência, que no nosso contexto são úteis em algoritmos de manipulação da malha e de visualização. É possível, por exemplo, dado um vértice, obter os seus vértices adjacentes, ou determinar se uma dada face é compartilhada entre duas células adjacentes, o que é muito útil na determinação do que precisa ser desenhado, conforme veremos na seção a seguir.

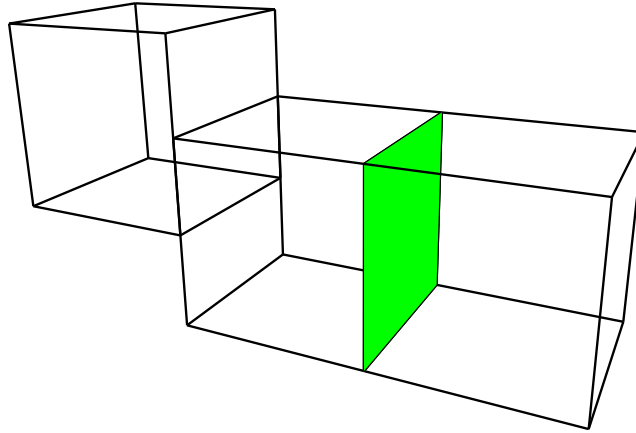


Figura 3.4: Exemplo de extração das faces externas: a face em verde é interna e não necessita ser incluída na renderização das faces do reservatório em cor opaca. As faces restantes são externas e devem ser consideradas para a renderização, como por exemplo as pertencentes a uma falha geológica (entre a primeira e segunda célula da esquerda para a direita).

### 3.4.2 Extração das Faces Externas

Algumas faces das células do reservatório são compartilhadas entre duas células vizinhas na grade topológica, sendo denominadas *faces internas*. Já as outras faces, denominadas *faces externas*, pertencem à fronteira do modelo ou a uma falha geológica, fazendo parte apenas de uma célula. Ambos os tipos de face estão ilustradas na Figura 3.4.

Boa parte dos algoritmos de visualização desenham a malha de reservatórios por meio da renderização de suas faces com uma cor opaca (Figuras 3.6(a), 3.6(b), 3.7(a) e 3.8(a)). Nesse tipo de visualização as faces internas ficam totalmente oclusas. Portanto, uma primeira técnica para reduzir o número de primitivas gráficas utilizadas é o processo chamado de *extração das faces externas* (*hull extraction*). A extração das faces externas é bastante facilitada pela presença de uma estrutura topológica: uma face é determinada interna se existem duas células adjacentes a essa face.

Caso o algoritmo de visualização utilizado separe as camadas do reservatório (Figura 3.7(a)), é necessário notar que todas as faces de topo e de base devem ser consideradas para a renderização, independente de serem externas ou internas.

### 3.4.3 Representação Hierárquica e Descarte de Primitivas

Após computada a estrutura topológica do modelo, inicia-se o cálculo de uma representação hierárquica para as células da malha de reservatório. Essa

representação permite a aceleração de algoritmos como o descarte de primitivas para a renderização. O cálculo da interseção das células do reservatório com formas geométricas, como por exemplo planos de corte (Figura 3.7(b)), também pode ser acelerado com esse tipo de representação.

A representação hierárquica proposta consiste no cálculo de hierarquias de volumes envolventes para as células da malha. É calculada uma hierarquia a ser utilizada quando o reservatório é visualizado sem separação de camadas (Figuras 3.6(a), 3.6(b) e 3.7(b)) e uma hierarquia por camada do reservatório, a ser utilizada quando as camadas são separadas (Figura 3.7(a)).

O cálculo da primeira hierarquia é iniciado pela partição da grade topológica do modelo em blocos de  $2 \times 2 \times 2$  células, que serão as folhas da hierarquia proposta. A partir da partição inicial, constrói-se uma hierarquia de caixas orientadas (*oriented bounding boxes*) por meio de uma partição KD-Tree do conjunto de blocos. O cálculo da hierarquia de cada camada é o mesmo, partindo de blocos de  $2 \times 2 \times 1$  células da camada em questão.

A escolha de um tamanho pequeno de bloco permite uma boa aceleração em algoritmos de interseção com a malha. É necessário no entanto considerar o efeito do uso de um bloco tão pequeno para a renderização. Se utilizássemos os nós folha dessa hierarquia para extrair e renderizar faces externas, teríamos um número muito pequeno de faces por agrupamento de primitivas, o que não é recomendado para uma renderização ótima (25).

Com o objetivo de evitar agrupamentos muito pequenos de geometria, optou-se por percorrer a hierarquia contabilizando o número de células no conjunto de blocos abaixo de cada nó. Varremos a hierarquia novamente de cima para baixo avaliando cada nó de acordo com essa contagem de células. Digamos que uma contagem considerada ideal para fins de renderização e descarte seria de alguns poucos milhares de células. Os nós com contagem de células igual ou abaixo desse limite serão considerados nós folha para fins de renderização e algoritmos de descarte.

A preparação desses nós para a renderização consiste na junção de todos os blocos associados e na extração de suas faces externas. Essas faces são classificadas e separadas em três grupos: faces de topo, faces de base e faces laterais. A partir disso, são calculados cones de normais (49) para o grupo de faces de topo e para o grupo de faces de base. Isso permite descartar esses grupos de primitivas com base nas suas orientações, conforme descrito no Capítulo 2, seção 2.1. Optou-se por não construir cones de normais para as faces laterais, pois além de sua quantidade ser reduzida quando comparadas com as faces de topo e de base, há muita variação nas suas orientações, não tornando a técnica muito útil para essas primitivas.

Utilizamos então, dependendo se as camadas são visualizadas em conjunto ou separadas, a hierarquia de volumes envolventes adequada, permitindo o descarte rápido de primitivas que sejam determinadas como fora do volume de visão, oclusas ou como sendo faces de trás (*back faces*).

É necessário ressaltar a razão por optarmos por efetuar o descarte por orientação como “última” técnica de aceleração: ao construir cones de normais por nó folha da hierarquia de renderização, é considerado um número pequeno de primitivas, da ordem de poucos milhares. Isso reduz a variação de orientações para cada cone, em contraste com o mesmo cálculo para um grupo maior de primitivas, como por exemplo todas as faces de topo de uma dada camada do reservatório. Obtém-se como consequência uma boa eficácia no descarte por orientação.

#### 3.4.4 Resultados Experimentais

Modelo	Células ativas (milhares)	Total de faces (milhares)	Faces externas sem separação de camadas (milhares)	Faces externas com separação de camadas (milhares)
a	31	186	18	76
b	81	486	61	183
c	123	738	223	261
d	6.015	36.138	1.151	13.100

Tabela 3.1: Comparação entre extrair e não extrair as faces externas do reservatório para alguns modelos.

A eficácia do algoritmo de extração das faces externas do reservatório está demonstrada na Tabela 3.1. Como é possível observar, há uma grande economia no número de primitivas desenhadas quando se utiliza apenas as faces externas da malha, mesmo quando as camadas do reservatório são separadas, onde todas as faces de topo e base devem ser consideradas para a renderização independente de serem externas ou internas.

A eficiência dos algoritmos de descarte por volume de visão, oclusão e das faces de trás aplicados a reservatórios de petróleo foi testada em um PC com dois processadores AMD Opteron 280 1 GHz com dois núcleos cada, 8 gigabytes de RAM e placa gráfica NVIDIA Geforce 8600 GT com 512 MB de memória de vídeo. A hierarquia utilizada considerou os nós com 2000 células ou menos como nós folha para fins de descarte e renderização.



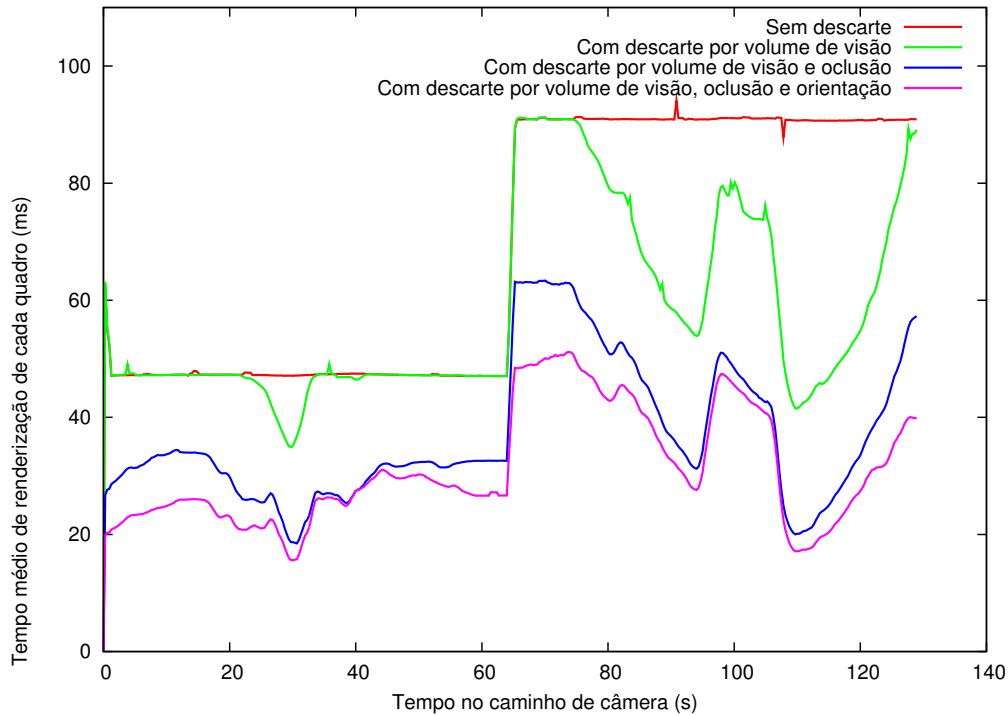
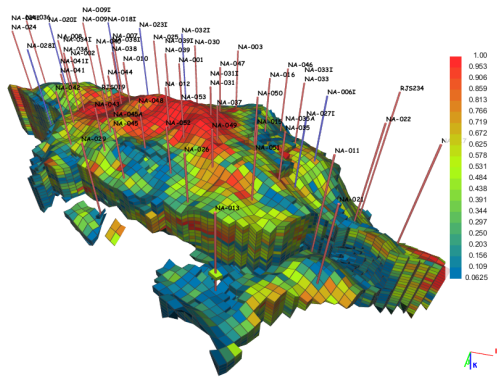


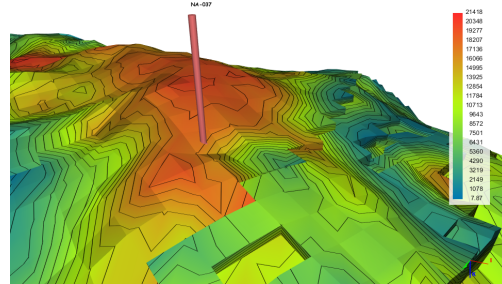
Figura 3.5: Comparação ao longo de um caminho pré-determinado entre não descartar primitivas (em vermelho), descartar por volume de visão (em verde), descartar por volume de visão e oclusão (em azul) e descartar por volume de visão, oclusão e orientação (em magenta). É possível notar a crescente redução no tempo médio de renderização conforme vão sendo adicionadas as técnicas de aceleração.

Os gráficos mostram o tempo gasto para renderizar cada quadro de um modelo com 1 milhão de células ao longo de um caminho de câmera pré-determinado. Nesse caminho, o modelo original é enquadrado e rotacionado até  $t = 22s$ , quando começa a ser feita uma navegação para inspecionar o reservatório de perto. Em seguida, o observador se afasta até  $t = 43s$ . As camadas do reservatório são separadas em  $t = 63s$ , aumentando o número de primitivas sendo desenhadas. O modelo é rotacionado até  $t = 77s$ , quando são feitas novas aproximações até  $t = 110s$ . A partir daí, o observador volta à sua posição original.

A Figura 3.5 mostra o desempenho da renderização ao longo do caminho de câmera. Nela é possível observar que o descarte por volume de visão consegue melhorar o desempenho de forma significativa quando são feitas aproximações ao modelo. É também notável a economia em tempo de processamento feita pela inclusão do algoritmo de descarte por oclusão. O algoritmo de descarte das faces voltadas para trás também contribuiu significativamente para a melhoria do desempenho da visualização.

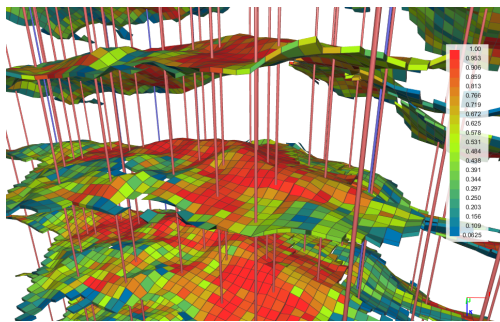


3.6(a):

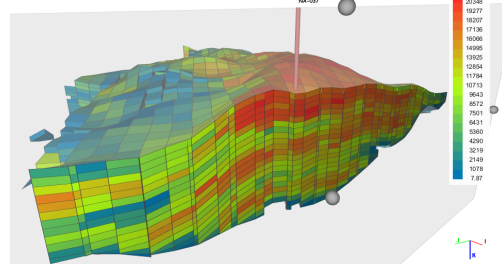


3.6(b):

Figura 3.6: Algoritmos de visualização: 3.6(a): iso-contorno das coordenadas originais do modelo: associa-se uma cor a cada valor ou intervalo de valores do campo escalar. 3.6(b): propriedade por vértice com iso-linhas.

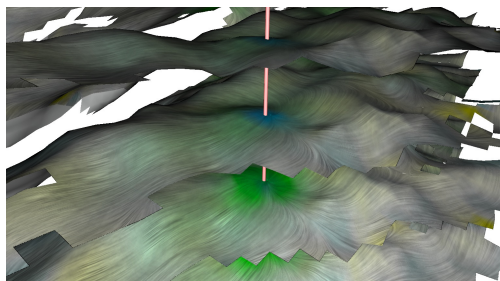


3.7(a):

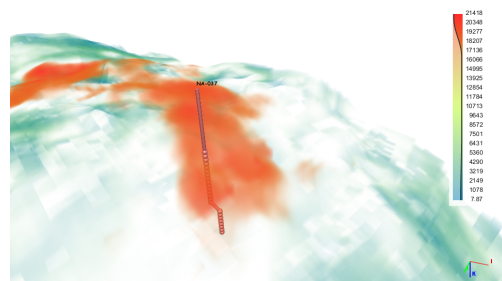


3.7(b):

Figura 3.7: Algoritmos de visualização: 3.7(a): iso-contorno com separação de camadas. 3.7(b): posicionamento de planos de corte arbitrários.



3.8(a):



3.8(b):

Figura 3.8: Algoritmos de visualização: 3.8(a): visualização de campos vetoriais. 3.8(b): visualização volumétrica por traçado de raios. Por meio do uso de transparência, permite-se por exemplo isolar o volume de óleo, gás ou água.