

3 *Reservatórios Naturais de Petróleo e Requisitos de Visualização*

O capítulo anterior proporcionou uma visão geral do problema de MR. Assim, convém, neste momento, apresentar uma definição mais detalhada das malhas de simulação em reservatórios que são o foco de estudo deste trabalho, objetivando instanciar melhor o problema em si. Para tanto, é necessário conhecer as características geométricas dessas malhas e os requisitos de sua visualização, uma vez que esta se diferencia da visualização foto-realista.

A Seção 3.1 descreve brevemente o que é um RNP e o que é a simulação numérica do fluxo de fluidos em reservatórios. Na Seção 3.2, são apresentados os dados provenientes da simulação, dentre eles as malhas de simulação e seus atributos. Finalmente, na Seção 3.3, os requisitos de visualização exigidos são detalhados.

3.1 Reservatório Natural de Petróleo

Segundo Gehardt [Ger98], a grande maioria das ocorrências de acumulações de petróleo (hidrocarbonetos como óleo e gás) se encontra em rochas sedimentares. Uma rocha sedimentar é formada a partir da acumulação, diagênese e solidificação de sedimentos, podendo ser de origem clástica, química ou orgânica. À medida que os sedimentos vão se empilhando em uma bacia sedimentar, o aumento de pressão ativa

os processos físicos, químicos e biológicos de formação de rochas sedimentares que compõem a diagênese, tais como: compactação, cimentação, recristalização, hidratação, lixiviação, ação de bactérias, etc. A uma temperatura adequada, os sedimentos orgânicos podem começar a gerar hidrocarbonetos, sendo então denominados rochas geradoras. Os hidrocarbonetos fluem através de meios permeáveis segundo o fenômeno da migração. Por terem densidades menores que a da água, são por ela deslocados ao encontrar uma via de escape. Se nenhuma trapa (barreira) for encontrada, acabam por escapar pela superfície da terra. Entretanto, se durante a migração existir uma combinação entre uma rocha capeadora impermeável e um meio poroso, os hidrocarbonetos podem ser trapeados e acumulados, formando um reservatório. Meios porosos típicos são arenitos e calcários, enquanto os selantes mais comuns são chamados de rochas sedimentares não-permeáveis, como os folhelhos. A Figura 3.1 ilustra dois tipos de reservatórios, um associado com uma estrutura capeadora do tipo convexo (anticlinal) e outro com um deslocamento linear (**falha geológica** ou **falha**).

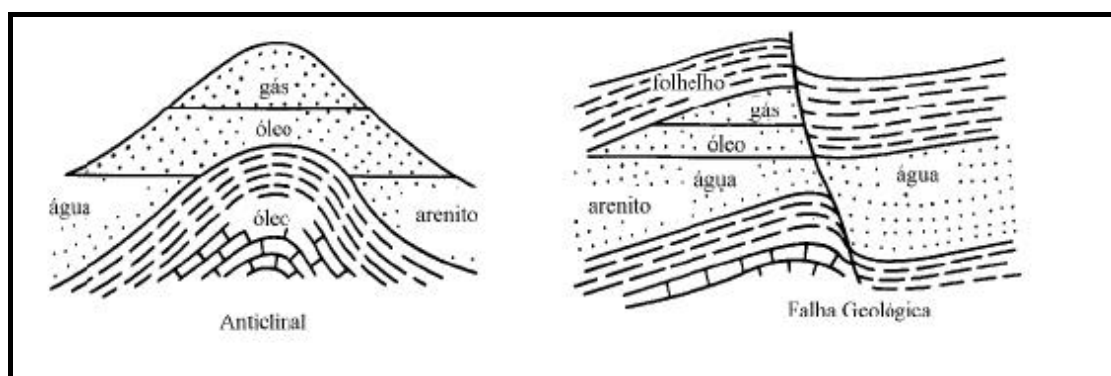


Figura 3.1 - Acumulações de hidrocarbonetos: (a) estrutura do tipo anticlinal e (b) estrutura do tipo falha (Robison et al., 1980).

O processo exploratório de um RNP baseia-se na capacidade estimada de extração do petróleo [Tho01]. Pode-se calcular esta capacidade através de simuladores numéricos baseados em estimativas prévias das propriedades das rochas e dos fluidos obtidas pela geologia e pela geofísica. Essas estimativas prévias são reajustadas à medida que se obtêm medidas de vazão e pressão dos poços.

O escoamento dos hidrocarbonetos dentro da camada permeável é modelado matematicamente por equações diferenciais de fluxos em meios porosos. Tais

equações são normalmente resolvidas numericamente representando o seu domínio através de uma malha discreta de células hexaédricas (malha de simulação) às quais são atribuídos os valores das propriedades físicas.

O modelo geométrico do reservatório é composto pelo conjunto de células. A quantidade e o tamanho dessas células variam de acordo com os requisitos da simulação numérica. Ou seja, há uma importante diferença em relação aos modelos utilizados em animações e na representação de ambientes virtuais. No caso destes, a resolução é determinada pela necessidade de se obter imagens realistas dos modelos, enquanto, no caso de malhas de simulações numéricas, a resolução é controlada pela necessidade de precisão dos valores das grandezas físicas estimadas.

3.2 Dados da Simulação

Os dados provenientes da simulação numérica correspondem à malha de simulação e às propriedades escalares (grandezas físicas) a ela associadas. Esta seção tem por objetivo detalhar esses dados a fim de possibilitar um melhor entendimento sobre o objeto que é o foco do MMR proposto neste trabalho.

3.2.1 Malhas de Simulação

Como foi visto brevemente no capítulo introdutório, as malhas de simulação são compostas por um conjunto de células hexaédricas indexadas por triplas $\langle i, j, k \rangle$ que associam às células uma suposta relação de vizinhança 6-conectada (**vizinhança IJK**): a célula $\langle i, j, k \rangle$ é vizinha das células $\langle i+1, j, k \rangle$ e $\langle i-1, j, k \rangle$, em I , das células $\langle i, j+1, k \rangle$ e $\langle i, j-1, k \rangle$, em J , e das células $\langle i, j, k+1 \rangle$ e $\langle i, j, k-1 \rangle$, em K .

Cada célula é homeomorfa ao cubo e esta propriedade, acrescida da relação de vizinhança, faz com que, intuitivamente, o reservatório possa ser representado parametricamente a partir da partição regular de um cubo. O espaço paramétrico (dado pelos eixos i, j e k) auxilia na compreensão do dado, principalmente de sua

suposta vizinhança (Figura 3.2). A cada célula do espaço paramétrico é aplicado um homeomorfismo f que leva a célula para o espaço geométrico (dado pelos eixos x , y e z).

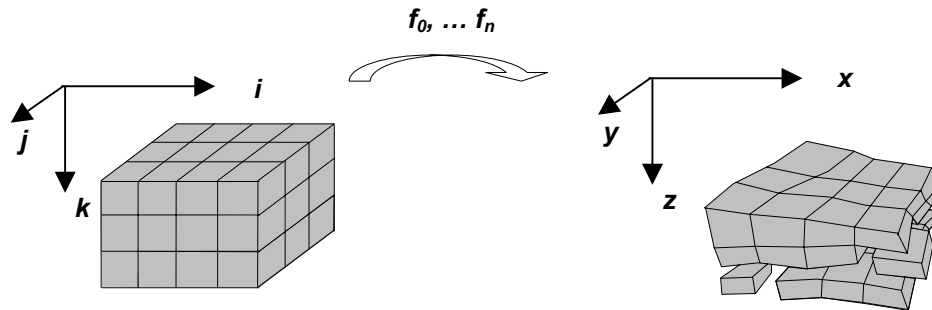


Figura 3.2 – Representação paramétrica das malhas de simulação do fluxo de fluidos em reservatórios.

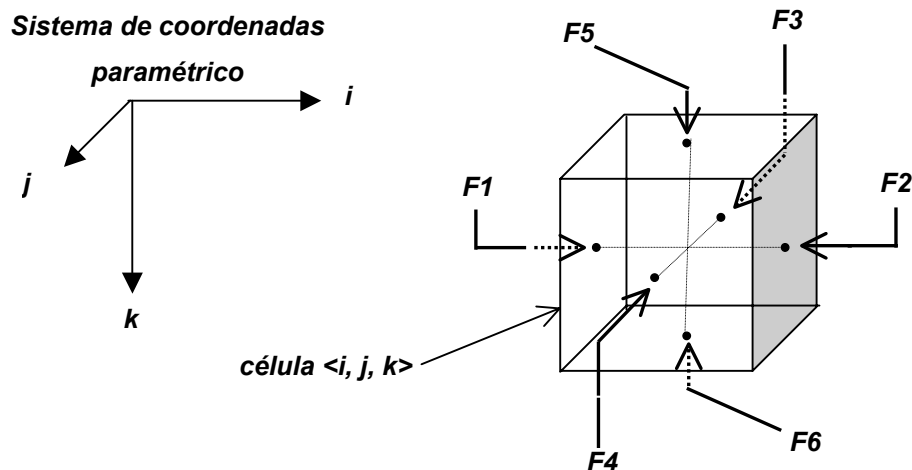


Figura 3.3 - Topologia de uma célula. $F1$ está à esquerda de $F2$ segundo o eixo i . Da mesma forma, $F3$ está à esquerda de $F4$ segundo o eixo j e $F5$ está à esquerda de $F6$ segundo o eixo k . A face $F5$ é também denominada *TOPO*, a face $F6$ é a *BASE* e o conjunto de faces $\{ F1, F2, F3, F4 \}$ é denominado *CERCA*.

No espaço paramétrico, o reservatório está alinhado com os eixos i , j e k e cada célula é composta por faces que são identificadas através de rótulos, como na Figura 3.3. Assim, se uma célula A está à esquerda de uma célula B , em I , significa que $A \cap B$ corresponde à face $F2$ de A (que é igual a $F1$ de B). As faces $F2$ e $F1$ de A e B , respectivamente, são denominadas **faces potenciais de contato** entre A e B . Analogamente, as faces potenciais de contato são definidas nas outras direções, J e K .

Considerando a representação paramétrica, a geometria dos dados pode ser representada pelo conjunto das n células $C = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_n\}$ e pelo conjunto dos n homeomorfismos $\xi = \{f_1, f_2, f_3, \dots, f_n\}$ que levam as células do espaço paramétrico para o espaço geométrico. Assim, $G = \{C, \xi\}$ é o conjunto que representa a geometria do reservatório.

A relação de vizinhança está implícita na indexação linearizada de cada célula, uma vez que é conhecida a quantidade máxima de células em cada direção (**MAX_I**, **MAX_J** e **MAX_K**) e a fórmula de linearização. Entretanto, explicitando, pode-se representar a vizinhança através de um grafo, $A = (N, Arc)$, denominado **grafo de adjacência**, onde N é o conjunto de nós do grafo que representa as células do reservatório e Arc é o conjunto de arcos não-direcionados que representa a vizinhança IJK (Figura 3.4).

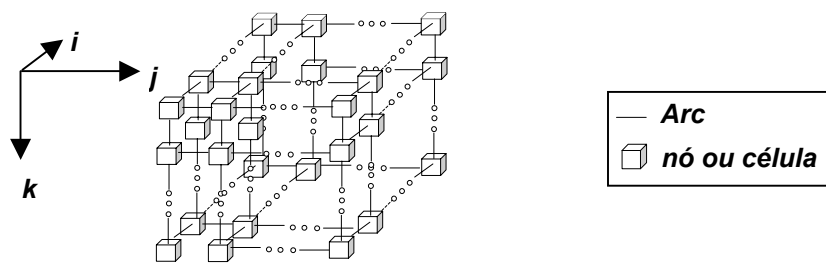


Figura 3.4 - Grafo de adjacência.

Para a simulação, é importante que as faces potenciais de contato entre duas células possuam realmente uma superfície de contato no espaço geométrico. A existência desses contatos reais, além daqueles verificados pelo caminhamento em K , torna possível a passagem de fluido entre células. Tendo em mente a representação paramétrica do reservatório, o conjunto G e o grafo A , são caracterizados dois tipos de malhas de simulação que descrevem com maior ou menor precisão a possibilidade de fluxo entre as células e, da mesma forma, se adaptam melhor ou pior à geometria do reservatório no mundo real e aos métodos numéricos empregados na simulação: as malhas do tipo *block-centered* e as *corner-point*. Cada tipo de malha, de certa forma, impõe restrições que correlacionam os homeomorfismos de ξ , garantindo a existência de áreas de contato entre as células.

3.2.1.1 *Malhas do Tipo Block-centered*

As restrições impostas à geometria das malhas *block-centered* podem ser percebidas através da forma com que a malha é fornecida pelo simulador. Predefinindo-se que as células que a formam são alinhadas com os eixos do sistema de coordenadas, a malha é fornecida através de dois vetores, **DX** e **DY**, e de duas matrizes tridimensionais, **ZTOPO** e **ZBASE**⁶.

Os vetores **DX** e **DY** são, respectivamente, funções dos indexadores *i* e *j*. **DX** define o comprimento, em *X*, das células indexadas por coordenadas $\langle i, *, * \rangle$ e, analogamente, **DY** define o comprimento, em *Y*, das células indexadas por $\langle *, j, * \rangle$. Estes comprimentos (cada um para seu indexador), dispostos em seqüência, formam duas discretizações: uma do eixo *x* e outra do eixo *y* (Figura 3.5).

O produto cartesiano dessas duas discretizações forma uma discretização regular de um suporte retangular $U \subset \mathcal{R}^2$, que é um subconjunto do plano formado pelos eixos *x* e *y* (Figura 3.6). Esta discretização induz, naturalmente, a uma subdivisão do plano em células planares retangulares que reconstrói o suporte *U*, a qual convém chamar de **malha de referência**. (Figura 3.7).

As matrizes **ZTOPO** e **ZBASE** completam as informações existentes na malha de referência, atribuindo a cada célula $\langle i, j, k \rangle$ do reservatório as posições, em **Z**, de sua face **TOPO** e de sua face **BASE**, respectivamente (Figura 3.8).

⁶ Na verdade, o simulador denomina estas duas matrizes de **TOPO** e **BASE**. As denominações **ZTOPO** e **ZBASE** são feitas para distingui-las das denominações **TOPO** e **BASE** atribuídas às faces *F5* e *F6*.

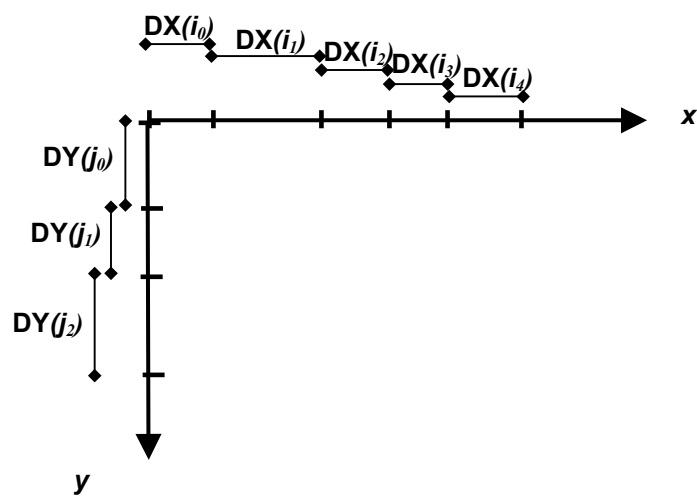


Figura 3.5 - Discretizações dos eixos x e y .

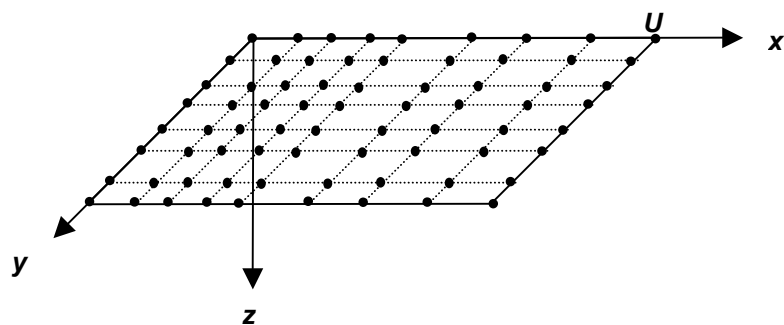


Figura 3.6 – Produto cartesiano das discretizações dos eixos x e y .

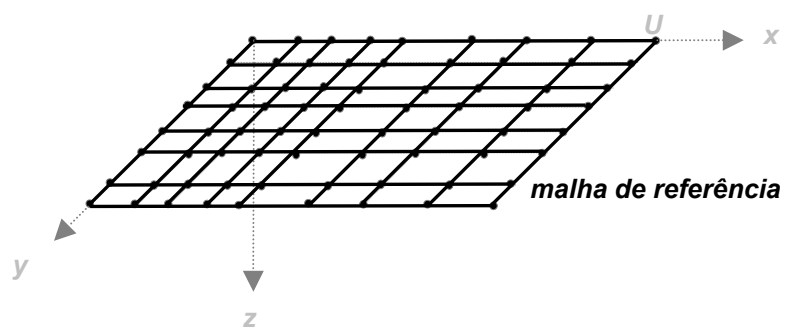


Figura 3.7 - Malha de referência que reconstrói o suporte U .

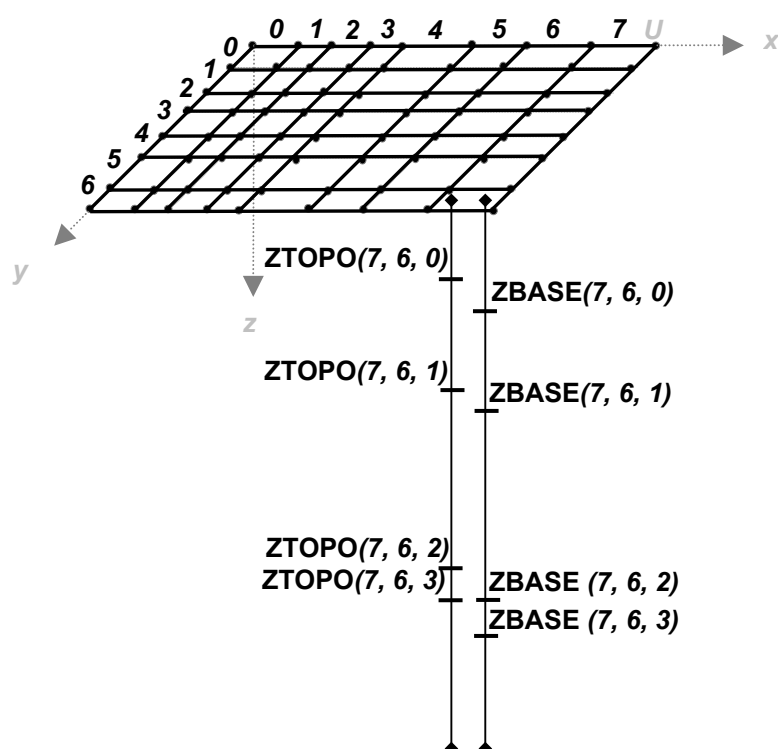


Figura 3.8 – Informações fornecidas por ZTOPO e ZBASE para as células $\langle 7, 6, 0 \rangle$, $\langle 7, 6, 1 \rangle$, $\langle 7, 6, 2 \rangle$ e $\langle 7, 6, 3 \rangle$.

A partir de **DX** e **DY**, tem-se diretamente o comprimento das células em **X** e em **Y** e, a partir de **ZTOPO** e **ZBASE**, tem-se o comprimento das células em **Z** (subtraindo-se **ZTOPO(i, j, k)** de **ZBASE(i, j, k)**). As translações que posicionam as células no espaço são derivadas de **DX**, **DY** e **ZTOPO**.

A geometria de uma célula $\langle i, j, k \rangle$ da malha pode, portanto, ser assim definida (Figura 3.9):

- **DX(i)** é seu comprimento na direção **X**;
- **DY(j)** é seu comprimento na direção **Y**;
- **DK(i, j, k) = ZBASE(i, j, k) - ZTOPO(i, j, k)** é seu comprimento na direção **Z**;
- $T(\sum_{i'=0}^{i-1} DX(i'), \sum_{j'=0}^{j-1} DY(j'), ZTOPO(i, j, k))$ é a translação que a posiciona no

espaço;

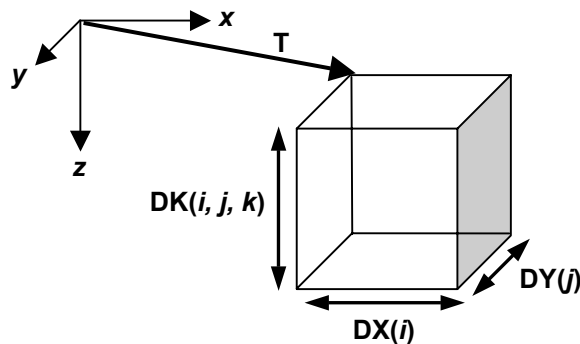


Figura 3.9 – Geometria de uma célula *block-centered*.

As restrições das malhas *block-centered*, garantidas por construção, impõem ao reservatório a uniformidade e a continuidade requeridas pela simulação para a transferência de fluidos. A restrição à malha de referência, por exemplo, garante que a vista superior (aquela perpendicular ao plano formado pelos eixos **x** e **y**) de qualquer camada do reservatório seja idêntica à vista superior da malha de referência (Figura 3.10-a), implicando em que células indexadas por $\langle i, j, * \rangle$ possuam suas faces F1 necessariamente contidas no mesmo plano (o mesmo vale para as faces F2, F3 e F4) (Figura 3.10-b). Conseqüentemente, células vizinhas em **I**, ou em **J**, possuem também

suas faces potenciais de contato contidas no mesmo plano no espaço geométrico (Figura 3.11).

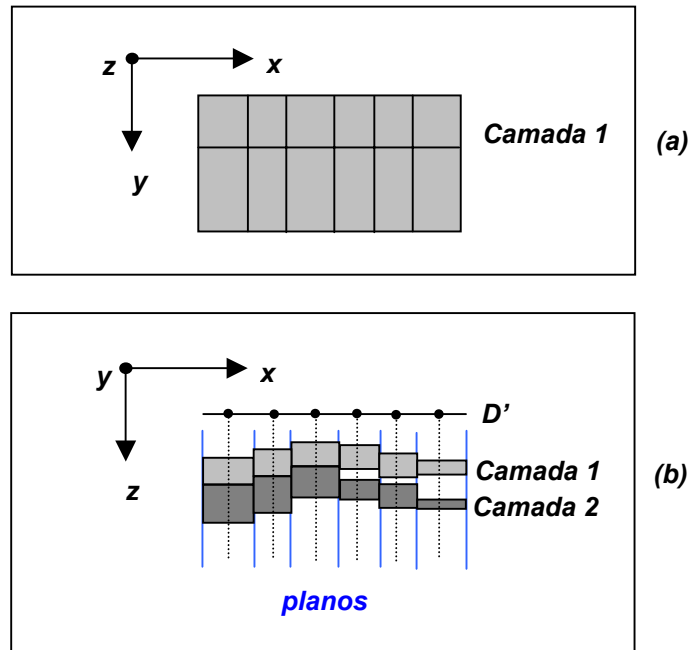


Figura 3.10 – Em (a), vista superior de uma camada. Em (b), vista lateral das células mostra que células indexadas por $\langle i, j, * \rangle$ possuem faces no mesmo plano.

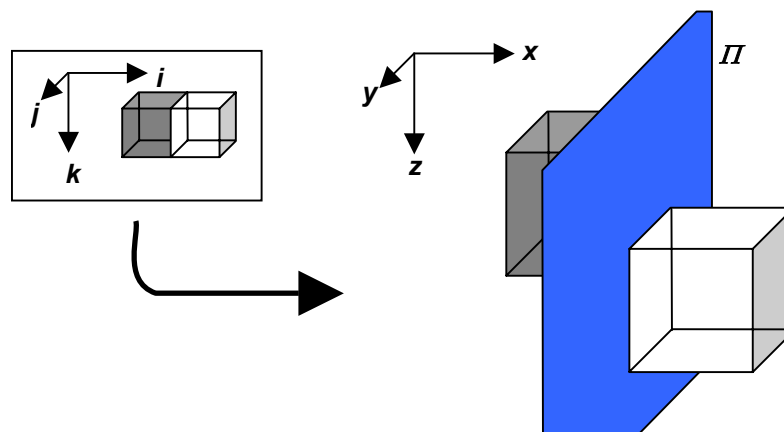


Figura 3.11 – Restrições das faces potenciais de contato.

A Figura 3.12 é um típico exemplo de malha do tipo *block-centered*.

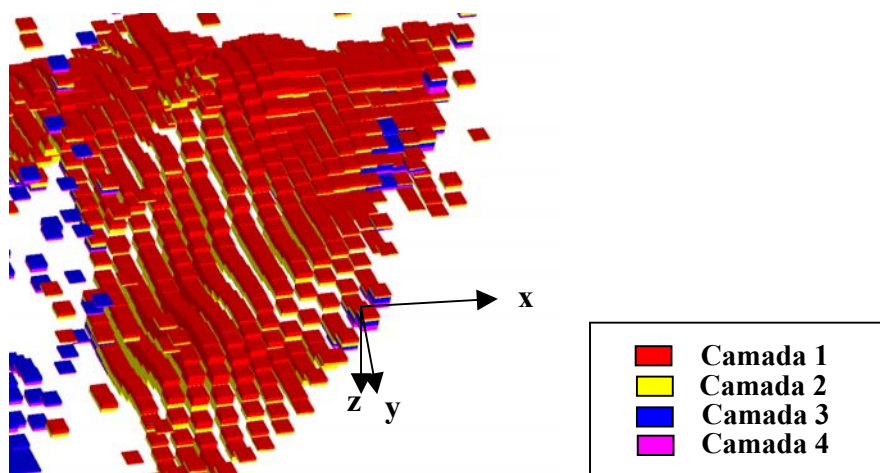


Figura 3.12 - Exemplo de uma malha do tipo *block-centered* (obs.: o eixo está deslocado).

3.2.1.2 Malhas do Tipo *Corner-point*

No espaço geométrico, uma malha do tipo *block-centered* possui células alinhadas com os eixos do sistema de coordenadas. Apesar da representação fácil e compacta, a malha do tipo *block-centered* apresenta muitas descontinuidades, denominadas **degraus** (Figura 3.13), e não se adaptam bem a geometrias complicadas, prejudicando, muitas vezes, a precisão das simulações.

Uma malha do tipo *corner-point* é uma generalização da malha do tipo *block-centered*. Ela não possui a limitação de ter células alinhadas com os eixos, possibilitando uma melhor representação da geometria típica de um terreno no mundo real. A consequência disto é a possibilidade de uma simulação mais precisa e realista do fluxo no RNP, desde que as células não apresentem, em seus vértices, ângulos muito distintos dos ângulos dos vértices de um cubo (ou seja, deformações podem levar a aproximações numéricas não muito boas).

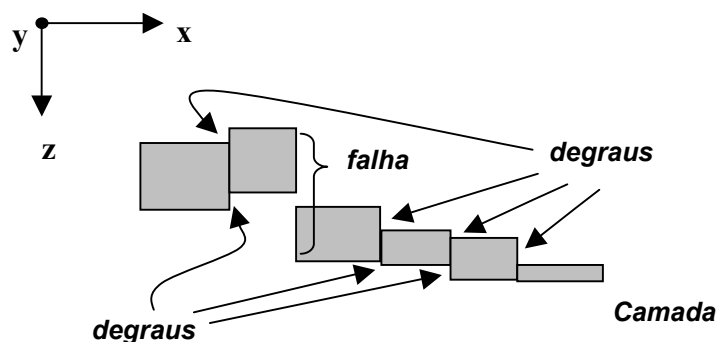


Figura 3.13 - Degraus e falhas em uma camada.

Cada célula da malha do tipo *corner-point* precisa ser explicitamente definida pelos seus oito vértices e pela indicação de suas faces, as quais são identificadas pelos rótulos F1, F2, F3, F4, F5 e F6. A geometria de uma face é definida pela interpolação bilinear de seus vértices e, portanto, não precisa ser planar. Entretanto, quanto mais próximas as faces forem de retângulos, melhores serão os resultados numéricos [IMEX00].

O fluxo pode existir em duas situações: (a) quando as faces potenciais de contato entre duas células compartilham os mesmos vértices no espaço geométrico (Figura 3.14-a) e (b) quando as seguintes condições são satisfeitas:

- as faces potenciais de contato são planares no espaço geométrico;
- as arestas ***direita*** (ver Figura 3.14-b) de cada face são colineares, assim como suas arestas ***esquerda***, e há alguma interseção entre elas.

Uma malha *corner-point* é fornecida pelo simulador diretamente através das coordenadas dos oito vértices de cada célula. Portanto, ao contrário das malhas do tipo *block-centered*, a forma com que as malhas *corner-point* são fornecidas não indica a existência de obediência às restrições requeridas pela simulação para a existência de fluxos.

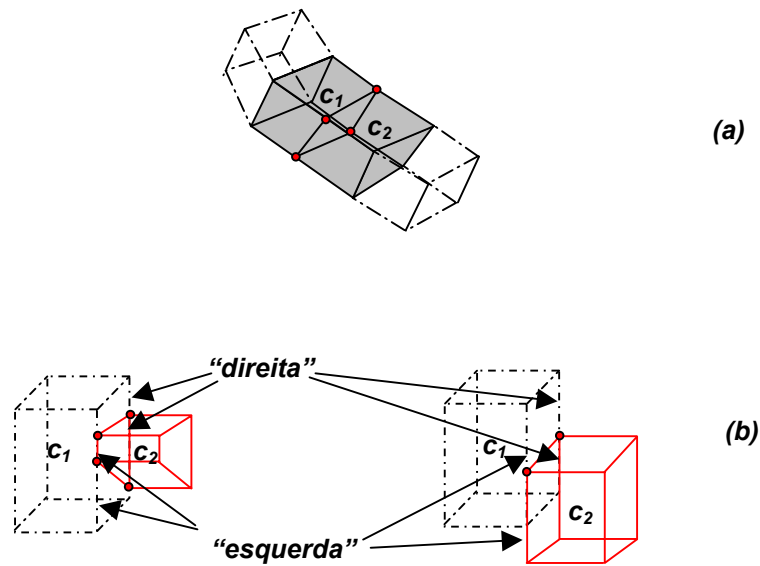


Figura 3.14 – Existência de fluxo entre células. Em (a), as faces potenciais de contato entre c_1 e c_2 compartilham os mesmos vértices. Em (b), as arestas *direita* de cada célula são colineares, assim como as arestas *esquerda*. Além disso, as faces potenciais de contato são coplanares.

Entretanto, tipicamente, essas malhas são geradas de forma que as condições de existência de fluxos possam ser satisfeitas. A geração é feita de forma semelhante ao modo com que a malha *block-centered* é fornecida pelo simulador. Para gerar a malha, é utilizada uma segunda malha de referência que forma uma decomposição em células quadrilaterais de uma região $U' \subset \mathbb{R}^2$ contida no plano formado pelos eixos x e y (Figura 3.15). Às células desta malha é atribuída uma identificação baseada na indexação em I e em J (Figura 3.16).

A partir de cada vértice da malha de referência são definidas retas que conterão os vértices finais das células da malha de simulação. Tais retas não precisam ser exatamente perpendiculares ao plano que contém a malha de referência (Figura 3.17). Então, uma célula $\langle i, j, k \rangle$ do reservatório é definida a partir da célula $\langle i, j \rangle$ da malha de referência da seguinte forma: para cada reta que parte de um vértice da célula

$\langle i, j \rangle$, são atribuídos valores de topo e de base, definindo os vértices finais da célula $\langle i, j, k \rangle$ (Figura 3.18).

Comparando visualmente os dois tipos de malhas de simulação (Figura 3.19), percebe-se a diferença entre elas. Devido à flexibilidade na definição da geometria das células, malhas do tipo *corner-point*, normalmente, formam decomposições hexaédricas de sub-regiões do reservatório (potencialmente, uma sub-região pode ser o próprio terreno como um todo), ajustando-se muito bem à geometria da sub-região no mundo real sem possuir muitos degraus.

Um exemplo típico de uma malha do tipo *corner-point* é ilustrado pela Figura 3.20.

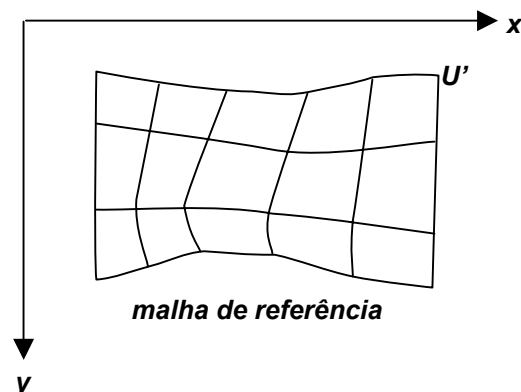


Figura 3.15 - Malha de referência que reconstrói o suporte U' .

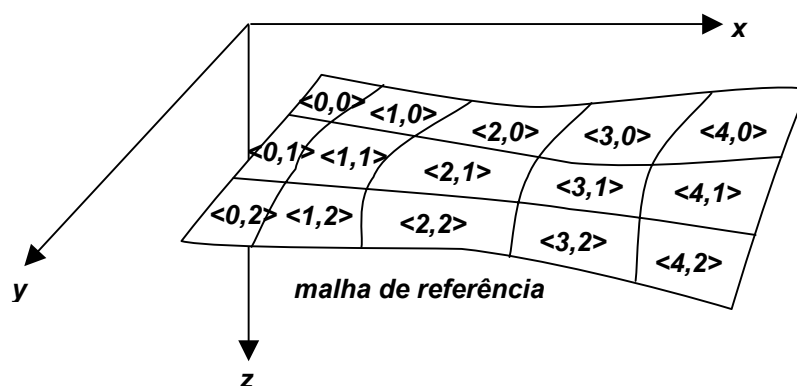


Figura 3.16 - Indexação das células da malha de referência.

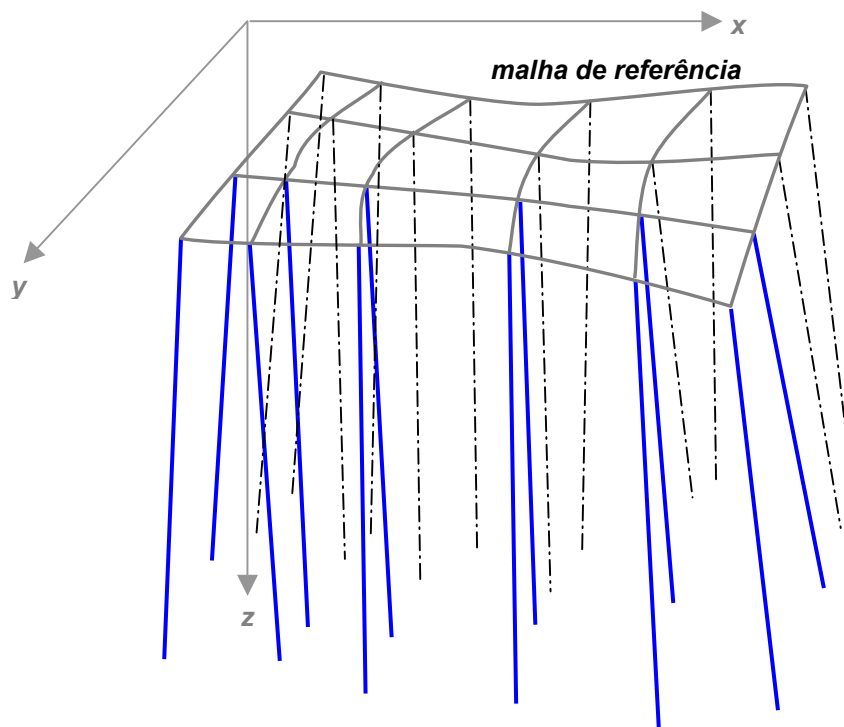


Figura 3.17 - Retas que passam pelos vértices da malha de referência.

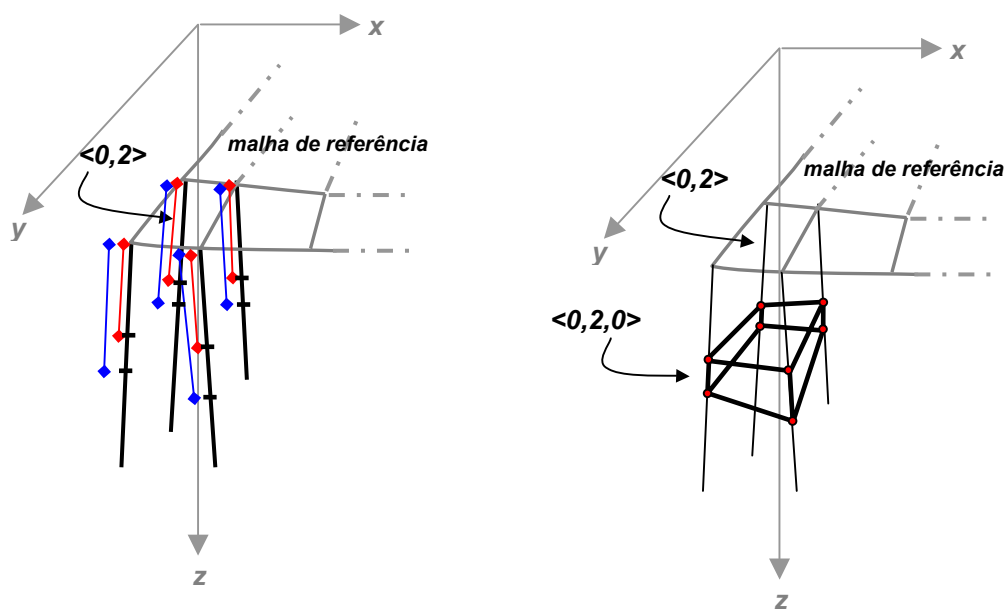


Figura 3.18 - Geração da célula $\langle 0, 2, 0 \rangle$. À esquerda, em vermelho, estão representados os valores de topo de cada reta e, em azul, os valores de base. A figura à direita representa a célula final.

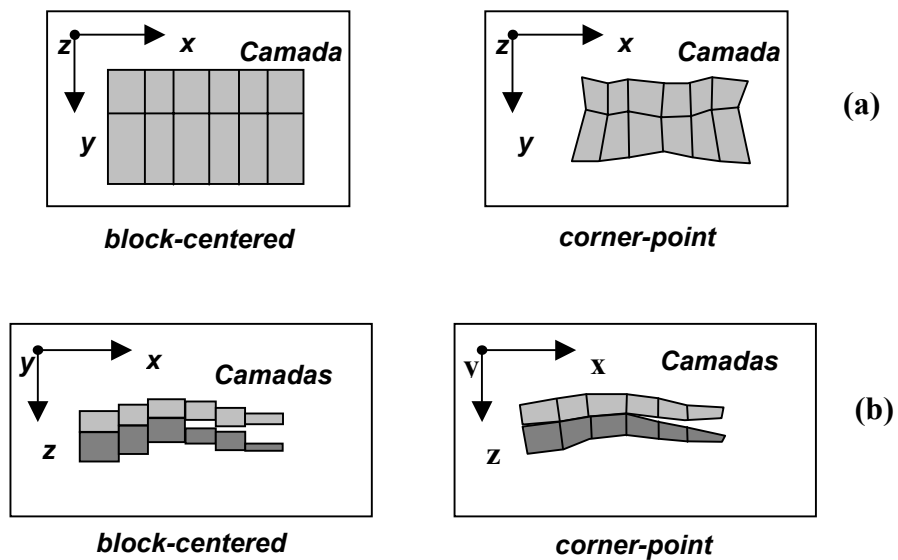


Figura 3.19 - Comparação entre os dois tipos de malhas. Em (a), vista superior de uma camada. Em (b), vista lateral de duas camadas.

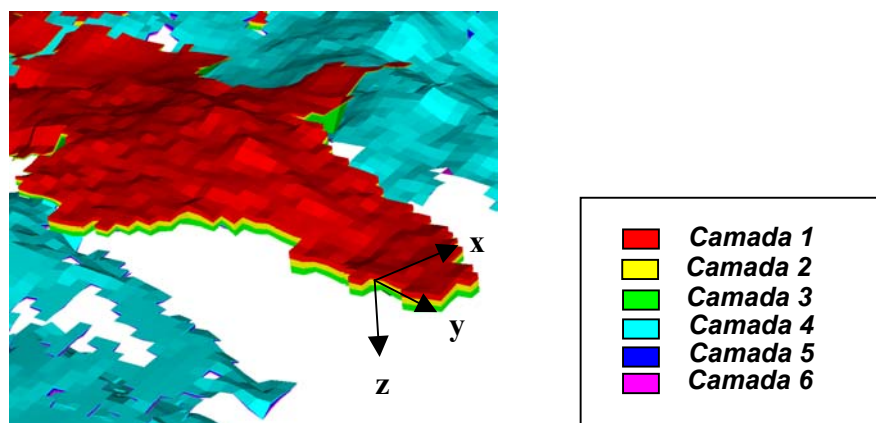


Figura 3.20 - Exemplo de uma malha do tipo *corner-point*.

3.2.2 *Propriedades Escalares*

As propriedades físicas que são associadas a cada célula do reservatório também fazem parte dos dados provenientes da simulação, representando grandezas específicas. Se as áreas de contato entre células tornam possível a existência de fluxos, o estado das propriedades do RNP, tais como densidade, porosidade e permeabilidade, define esses fluxos dentro do reservatório. Tais propriedades são medidas, ou estimadas, ao longo do reservatório em uma unidade de medida própria para cada uma. Dessa forma, valores escalares são associados a cada célula da geometria para representar as propriedades no interior da mesma.

Para definir formalmente as propriedades, consideremos o conjunto de células $C = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_n\}$. Uma propriedade do reservatório é definida através da função injetiva $i: C \rightarrow \mathcal{R}$, que associa a cada célula c_i um valor escalar. Propriedades representadas dessa forma não variam de estado ao longo do tempo e são denominadas **mapas de inicialização**. Os mapas de inicialização são representados pelo conjunto $I = \{i_1, i_2, i_3, \dots, i_p\}$, $p \in \mathbb{N}$, onde cada i_i representa uma função e, logo, uma propriedade.

Por sua vez, as propriedades que variam em função do tempo, denominadas **mapas de recorrência**, são representadas através do conjunto $R = \{r_1, r_2, r_3, \dots, r_p\}$, onde cada r_i é uma função $r: C \times \mathbb{N} \rightarrow \mathcal{R}$, sendo \mathbb{N} o conjunto dos números naturais que representa uma quantização do tempo.

Finalmente, chega-se à representação final dos dados provenientes da simulação através do conjunto $\{G, S\}$, onde $S = \{I, R\}$, que encerra em si todos os dados que representam o comportamento estimado do reservatório ao longo dos anos.

Vale ressaltar a existência de um mapa inicial especial, denominado **INAT**, que não está associado a grandezas físicas. Ele contém somente valores booleanos que indicam se uma célula é **ativa** ou **inativa**. Uma célula inativa, por definição, não possibilita o fluxo de fluidos⁷. Este mapa torna-se importante para o MMR a ser

⁷ Na verdade, uma célula inativa não faz parte do reservatório propriamente dito.

proposto no Capítulo 4 porque tanto a geometria quanto os valores de grandezas físicas associados a uma célula inativa devem ser desconsiderados na visualização.

3.3 Requisitos de Visualização

O objetivo da visualização do conjunto $\{G, S\}$ é oferecer um meio eficiente de aquisição de informações sobre os dados oriundos da simulação⁸. Analisando as imagens desses dados, o engenheiro de petróleo pode inferir rapidamente a respeito do fenômeno ou, até mesmo, sobre a precisão da simulação realizada.

As técnicas de visualização utilizadas para gerar as imagens com a quantidade de informações exigida formam as **características de visualização** do problema em questão. Ao longo dos anos, os engenheiros de petróleo identificaram o conjunto de técnicas considerado adequado para formar as ditas características. Repensar estas técnicas não é a intenção deste trabalho. Assim, o modelo de multi-resolução proposto deve levar em consideração as características de visualização existentes, visando satisfazê-las.

Dentre as características existentes, as mais significativas são:

1. visualização da fronteira das células com, ou sem, seu *wireframe*, ou seja, não é necessário visualizar o interior de uma célula (Figura 3.22);
2. visualização por rótulo de faces, ou seja, pode-se escolher, alternativamente, a visualização somente da **BASE** ou do **TOPO** das células;
3. deformação arbitrária da geometria dos dados na direção **Z** feita em tempo de exibição;
4. afastamento arbitrário entre camadas de sedimentação (grupo de células com mesmo valor para a coordenada k – ver Figura 1.3);

⁸ Estes objetivos caracterizam a sub-área da Computação Gráfica denominada Visualização Científica (VC) [Cignoni98].

5. latência pequena para iniciar a visualização após a leitura dos dados de simulação;
6. interatividade em tempo real durante a visualização;
7. visualização das propriedades através da associação de uma paleta de cores;
8. possibilidade de troca de mapas sem perda significativa de interação;
9. possibilidade de animação temporal dos mapas recorrentes sem perda significativa de interação.

A característica 1 é bastante importante não só porque elimina a necessidade de visualização do interior das células como também porque impõe definitivamente a semântica da célula hexaédrica para a visualização, uma vez que o *wireframe* das células pode ser requisitado (até agora a semântica somente era forte para a simulação).

A característica 2 enfatiza a mesma imposição anterior e também, juntamente com a característica 4, garante a importância das células internas da malha, pois aumenta a chance destas contribuírem para a imagem gerada.

A característica 5 é de fundamental importância, influenciando diretamente o MMR que será proposto no Capítulo 4. Ela determina a qualidade da heurística utilizada pelo algoritmo de construção do espaço discreto de modelos, aumentando a preocupação com o tempo gasto em pré-processamento (vale salientar que não é interessante para o usuário possuir um arquivo com a estrutura de MR pré-calculada, pois isso levaria à necessidade de lidar com mais um volume de dados).

Por sua vez, a característica 7 atribui uma semântica às propriedades dentro do contexto da visualização, uma vez que os valores escalares atribuídos a cada célula da malha serão utilizados como atributos de cor. Isto é feito através da associação de uma paleta de cores aos valores de propriedade (Figura 3.21).

Finalmente, a característica 6, além de ser a motivação principal deste trabalho, é também seu objetivo principal, tendo prioridade absoluta.

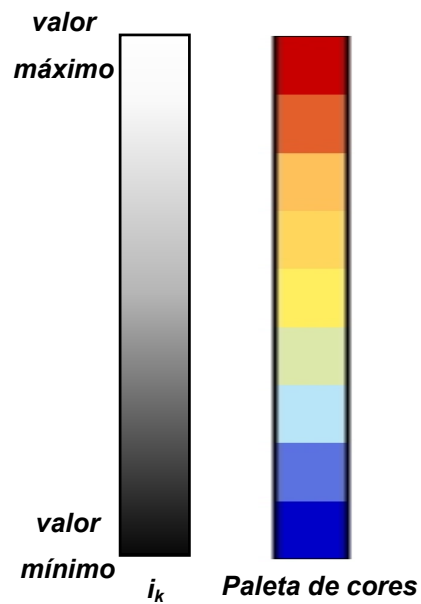


Figura 3.21 – Paleta de cores. A paleta exemplificada é discreta, mas pode ser utilizada também uma paleta contínua.

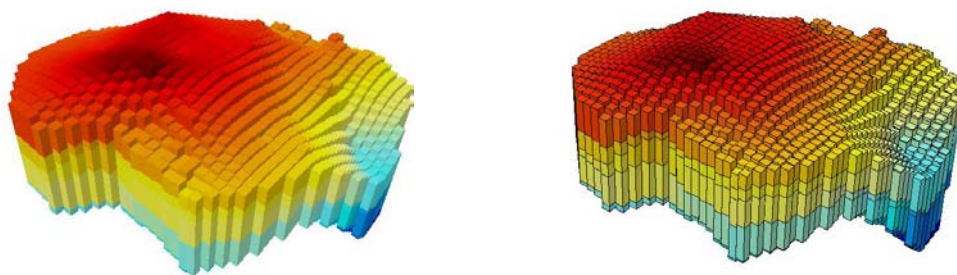


Figura 3.22 – Característica de visualização 1. À esquerda, a visualização da fronteira das células. À direita, a visualização da fronteira juntamente com o *wireframe* das células.